

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**SISTEMA DE BARRIDO ÓPTICO PARA
MONITOREO DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL EN ZONAS CON
MOVIMIENTOS TELÚRICOS**
TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS

PRESENTA

JAVIER RIVERA CASTILLO

DIRECTOR

DR. MOISÉS RIVAS LÓPEZ

CODIRECTORA

DRA. WENDY FLORES FUENTES

Mexicali, B. C.

DICIEMBRE DE 2018

RESUMEN

RESUMEN de la tesis de Javier Rivera Castillo, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS, EN EL ÁREA DE OPTOELETRÓNICA, Mexicali, Baja California, México, Diciembre de 2018.

SISTEMA DE BARRIDO ÓPTICO PARA MONITOREO DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL EN ZONAS CON MOVIMIENTOS TELÚRICOS

Resumen aprobado por:

Dr. Moisés Rivas López

La presente tesis doctoral muestra los resultados obtenidos durante el trabajo de investigación realizada en el área de optoelectrónica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California durante el periodo 2012-2016. La presente tesis describe el diseño y desarrollo de un prototipo para la implementación de un sistema de barrido óptico (SBO) para monitoreo de integridad estructural en zonas con movimientos telúricos. El desarrollo de este proyecto permitió llevar la experimentación con el prototipo de un ambiente de laboratorio a un ambiente de operación real. La exitosa implementación de un procedimiento de alineación del canal óptico del SBO permitió aumentar el alcance de la distancia de medición del orden de centímetros al orden de metros. Haciendo necesario que métodos para aumentar la resolución y disminuir el error en mediciones de posición, utilizados para la evaluación del SBO en ambiente de laboratorio fueran probados y modificados a fin de adaptarlos a las nuevas características del SBO, para operar en ambiente real. Se realizaron mediciones precisas de coordenadas espaciales, utilizando dos SBO y el método de triangulación dinámica, a través de tomar dos lecturas en el centro energético de las señales generadas por una fuente emisora de luz, colocada en una estructura seleccionada en el ambiente real. Se comprobó la hipótesis de que el SBO continuaría presentando tanto en ambiente de laboratorio como en ambiente de operación real, un comportamiento de variación no lineal en sus mediciones y normalmente estas variaciones dependerían de la posición en las que fueran colocadas las fuentes de luz en las estructuras monitoreadas y de la velocidad del barrido. Además de que se presentaron otros factores como la influencia de la iluminación ambiental lo cual llevó al desarrollo de la implementación de dos sensores CCD (charge-coupled device) y de un método de fusión de datos para combinar los resultados del SBO y del CCD con el fin de aumentar la precisión de las mediciones. Con el propósito de mejorar la exactitud de las mediciones se utilizaron técnicas de aprendizaje automático, también conocidas como algoritmos de inteligencia artificial, para eliminar lecturas atípicas a fin de mejorar los resultados en métodos de predicción de errores de medición, también utilizados con el propósito de ajustar la variación no lineal que se presentó en las mediciones tanto angulares como de coordenadas.

ABSTRACT

ABSTRACT of the thesis of Javier Rivera Castillo, presented as partial requirement for obtaining the degree of DOCTOR IN SCIENCE IN THE AREA OF OPTOELECTRONICS. Mexicali, Baja California, México, December 2018.

Abstract approved by:

Dr. Moisés Rivas López

The present Ph.D. thesis shows the results obtained during the research work done in the area of optoelectronics Engineering Institute of the Autonomous University of Baja California during the period 2012-2016. The present thesis describes the design and development of a prototype for the implementation of an optical scanning system (OSS) for monitoring structural health integrity in areas with earthquakes. Through this experimentation it was possible to take the design of the prototype of the operation in laboratory environment to the operation in field environment. The successful implementation of an OSS optical channel alignment procedure allowed the measurement distance of the order of centimeters to increase to the order of meters. It has been necessary that previous methods used for the evaluation of the OSS in laboratory environment to increase the resolution and to reduce the error in position measurements were tested and modified in order to adapt them to the new characteristics of the OSS to operate in field environment. Precise measurements of spatial coordinates were made using two OSSs and the dynamic triangulation method through taking two readings in the energy center of the signals generated by a light emitting source placed in a selected structure in the field environment. It was hypothesized that the OSS would continue to present both non-linear variation behavior in the laboratory environment and in the field environment, and normally these variations would depend on the position in which the light sources were placed in the monitored structures and sweep speed. In addition to other factors such as the influence of environmental lighting, which led to the development of the implementation of two charge-coupled device (CCD) sensors and a data fusion method to merge OSS and CCD results into increase the accuracy of measurements. In order to improve the accuracy of the measurements, automatic learning techniques, also known as artificial intelligence algorithms, were used to eliminate atypical readings in order to improve the results in methods of predicting measurement errors, also used for the purpose of adjust the nonlinear variation that occurred in both angular and coordinate measurements.

ÍNDICE

Índice de Páginas

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
ÍNDICE.....	3
Índice de Páginas.....	3
Índice de Figuras.....	5
Índice de Tablas.....	5
CAPÍTULO I.....	6
1. Introducción	6
CAPÍTULO II.....	10
2. Propósito de la Investigación	10
2.1. Planteamiento del Problema.....	10
2.2. Justificación y uso de Resultados.....	12
2.3. Hipótesis.....	13
2.4. Objetivos Generales y Específicos.....	14
2.4.1. Objetivo Generales.....	14
2.4.2. Objetivos Específicos.....	14
2.5. Metodología.....	15
CAPÍTULO III.....	17
3. Marco Teórico	17
3.1 Monitoreo de la Salud Estructural.....	17
3.2 Tecnologías para el Monitoreo de la Salud Estructural.....	20
3.2.1 Monitoreo Estructural Basado en la Imagen 2D (visión 2D).....	24
3.2.2 Monitoreo Estructural Basado en la Señal Optoelectrónica de un Sistema de Barrido (Visión 3D).....	26
3.2.3 Fusión de Bases de Datos de Sistemas de Monitoreo Estructural Basados en Visión 2D y Visión 3D.....	30
3.2.4 Redes de sistemas de barrido óptico.....	33
CAPÍTULO IV.....	35



4. Experimentación y Análisis de Resultados	35
4.1. Evaluación experimental del prototipo desarrollado	36
4.2. Descripción del prototipo	37
4.3 Mediciones Experimentales	46
4.3.1 Mediciones en ambiente de vibración	47
4.3.2 Fusión de datos 2D y 3D	47
4.4 Evaluación del Ambiente Operacional	64
CAPÍTULO V	66
5. Conclusiones y recomendaciones	66
5.1. Conclusiones	66
5.2. Recomendaciones	67
<i>PRODUCTOS DERIVADOS DE LA INVESTIGACIÓN</i>	68
<i>Publicaciones en Revistas Indizadas y Arbitradas</i>	68
<i>Capítulos de Libro</i>	68
<i>Memorias de Congreso</i>	69
<i>Referencias Bibliográficas</i>	71
A N E X O S	76



Índice de Figuras

Figura 1. Acondicionado el prototipo experimental en un tripie para mediciones de campo	12
Figura 2. Bases de triangulación	28
Figura 3. Sistema de monitoreo con 4 aperturas, monitoreándose entre sí	34
Figura 4. Apertura de barrido óptico	39
Figura 5. Diagrama de tiempo de la apertura de barrido óptico.....	40
Figura 6. Señal óptica	42
Figura 7. Representación gráfica de los ECLM en la señal optoelectrónica detectada por el fotodiodo	44
Figura 8. Representación gráfica de los ECLM en las imágenes detectadas por el CCD.....	46
Figura 9. Diagrama de flujo general de funcionamiento de un SBO a través de una mesa óptica en el entorno del laboratorio.	49
Figura 10. Base de datos de las mediciones del SBO	49
Figura 11. Datos atípicos.....	51
Figura 12. Comparación de Kernels en el algoritmo SVMR.....	54
Figura 13. Canal óptico.....	55
Figura 14. Medición de coordenadas utilizando dos aperturas de barrido	56
Figura 15. Puntos de medición sobre la estructura.....	56
Figura 16. Diagrama de flujo general para medición de coordenadas espaciales.....	57
Figura 17. Sistema de triangulación dinámica	59
Figura 18. Resultados de fusión 2D y 3D.....	63
Figura 19. Sitios propuestos para la prueba del prototipo en ambiente de operación real	65

Índice de Tablas

Tabla 1. Mejores parámetros para SVMR.....	53
Tabla 2. Resultados MSE de la regresión SVM.....	54
Tabla 3. Mediciones 2D and 3D.....	61
Tabla 4. Resultados de los métodos de fusión 2D y 3D.....	62

CAPÍTULO I

1. Introducción

Actualmente las estructuras de grandes obras de ingeniería como puentes, presas, minas, plantas de generación de energía, entre otras, se encuentran inmersas en un ambiente operacional que por lo general dificulta el monitoreo de su integridad estructural. Cuando el tamaño de la estructura crece, las ventajas de utilizar una red optimizada de monitoreo en la detección de daños es obvia. Sin embargo, cuando la estructura o el objeto bajo observación se encuentra en una zona con movimientos telúricos frecuentes o en un ambiente de vibración, los métodos y los medios de monitoreo utilizados, deben distinguir entre los cambios que sufre el propio sistema de monitoreo por los movimientos telúricos en la zona y los cambios que se presentan en los puntos de interés debidos a daños que sufre el objeto bajo observación, debidos a dichos movimientos.

Uno de los aspectos más importantes que se deben considerar en la etapa de adquisición de datos del proceso de monitoreo de integridad estructural es la cantidad y ubicación de los sensores que serán utilizados para este fin.

Adicionalmente, cuando el monitoreo se lleva a cabo en zonas con movimientos telúricos frecuentes, utilizando sistemas de barrido óptico, se presenta la dificultad de distinguir entre los cambios asociados al movimiento del propio sistema de barrido, de los cambios que sufran los puntos de interés asociados a los daños que sufra el objeto bajo observación en un ambiente de vibración. Recientemente, en el Departamento de Optoelectrónica y Mediciones Automáticas del Instituto de Ingeniería de la UABC, se desarrolló un método y un prototipo de un sistema de barrido óptico para tareas de monitoreo de integridad estructural que ha sido probado con

resultados satisfactorios bajo condiciones de laboratorio. Sin embargo, este sistema de barrido no había sido probado en un ambiente real de operación con vibraciones presentes.

El presente proyecto de tesis consistió en proponer un sistema de barrido óptico para monitoreo de integridad estructural en zonas con este tipo de movimientos, considerando tres de los principales problemas que se presentan en este tipo de ambientes y que pueden resumirse como sigue: determinar el número de dispositivos de barrido para obtener mediciones confiables, la ubicación que deben tener estos dispositivos de barrido, el método formal y algoritmo de procesamiento para separar los cambios debidos al movimiento del sistema de barrido de los cambios que sufran los puntos de interés asociados a daños que sufra el objeto bajo observación en un ambiente de vibración. Para abordar estos problemas fue necesario realizar la experimentación descrita en esta tesis doctoral donde se muestran los resultados obtenidos durante el diseño y desarrollo de un prototipo para la implementación de un sistema de barrido óptico (SBO) para monitoreo de integridad estructural en zonas con movimientos telúricos frecuentes.

El desarrollo del proyecto permitió llevar la experimentación, de un ambiente de laboratorio, a un ambiente de operación real. La exitosa implementación de un procedimiento de alineación del canal óptico del SBO permitió aumentar el alcance de la distancia de medición del orden de centímetros al orden de metros. Haciendo necesario que métodos para aumentar la resolución y disminuir el error en mediciones de posición, utilizados para la evaluación del SBO en ambiente de laboratorio fueran probados y modificados a fin de adaptarlos a las nuevas características del SBO, para operar en ambiente real. Se realizaron mediciones precisas de coordenadas espaciales, utilizando dos SBO y el método de triangulación dinámica, tomando lecturas en el

centro energético de las señales generadas por una fuente emisora de luz colocada en una estructura seleccionada en el ambiente real de operación.

Se comprobó la hipótesis de que el SBO continuaría presentando, tanto en ambiente de laboratorio como en ambiente real, un comportamiento de variación no lineal en sus mediciones y normalmente estas variaciones dependerían de la posición en las que fueran colocadas las fuentes de luz en las estructuras monitoreadas y de la velocidad del barrido. Además de que se presentaron otros factores como la influencia de la iluminación ambiental lo cual llevó al desarrollo de la implementación de dos sensores CCD (charge-coupled device) y de un método de fusión de datos para fusionar los resultados del SBO y del CCD para aumentar la precisión de las mediciones.

Con el propósito de mejorar la exactitud de las mediciones se utilizaron técnicas de aprendizaje automático, también conocidas como algoritmos de inteligencia artificial, para eliminar lecturas atípicas a fin de mejorar los resultados en métodos de predicción de errores de medición, también utilizados con el propósito de ajustar la variación no lineal que se presentó en las mediciones tanto angulares como de coordenadas.

Pruebas experimentales fueron realizadas para desarrollar los métodos de detección del centro energético de la señal optoelectrónica generadas por dos SBO's y dos CCD's en ambiente de operación real. Se implementó un método para eliminar datos atípicos de las mediciones de ángulos, se corrigieron errores de medición. Se implementó el método de triangulación dinámica para calcular coordenadas. Se fusionaron los resultados de los sensores SBO's y CCD's.

El prototipo inicial fue trasladado y acondicionado en un tripie, para realizar mediciones sobre una estructura en ambiente de campo con el propósito de probar la efectividad de los métodos descritos y del sistema de barrido óptico para monitoreo de integridad estructural en zonas con

movimientos telúricos. En este contexto, la presente tesis ha sido estructurada en cinco capítulos, que permiten dar un seguimiento detallado al desarrollo del sistema. En el capítulo uno se presenta un panorama general del proyecto y la estructuración del presente documento. En el capítulo dos se define el propósito del proyecto y se presenta el planteamiento del problema, así como la justificación, objetivos y metodología para el desarrollo del mismo.

En el capítulo tres, se presenta el marco teórico, que comprende los conceptos básicos relacionados con los SBO's, CCD's y el estado del arte, incluyendo los métodos más utilizados recientemente para detectar el centro energético de la señal, triangulación dinámica y las técnicas de inteligencia artificial para detección y eliminación de datos atípicos para la estimación de errores, así como para la fusión de datos. La experimentación y el análisis de resultados se presentan en el capítulo cuatro, para finalmente presentar las conclusiones en el capítulo cinco. Por último, se encuentran las referencias, y se anexan las copias de publicaciones realizadas.

CAPÍTULO II

2. Propósito de la Investigación

Desarrollar un nuevo método para monitoreo de integridad estructural en zonas con movimientos telúricos en base a una red de sistemas de barrido óptico, con el propósito de detectar daños en la infraestructura industrial, civil, mecánica, minera y aeroespacial, entre otras. Debido a que diferentes tipos de daños en una estructura producen deformaciones que, de no ser detectadas a tiempo, pueden provocar el colapso de las mismas.

2.1. Planteamiento del Problema

Una de las tareas más importantes en el proceso de monitoreo de Integridad Estructural, SHM (de sus siglas en inglés “Structural Health Monitoring”) es la adquisición de datos, para apoyar en la toma de decisiones oportunas para controlar la integridad y seguridad de la estructura bajo estudio, previniendo posibles colapsos repentinos que puedan poner en riesgo vidas humanas.

En la actualidad algunos de los métodos más utilizados, para este fin, se basan en el monitoreo a base de redes de sensores inalámbricos (Chintalapudi, et al., 2006), redes de fibra óptica (Kihara, et al., 2002) y recientemente se han propuesto métodos utilizando sistemas de barrido óptico (Rivas, et al., 2010).

Estos métodos han sido probados con buenos resultados, colocando los sensores en puntos interés, bajo condiciones de estado estable del objeto en observación o en ambientes de laboratorio (Rivas, et al., 2010). Sin embargo, existen problemas que se presentan cuando la medición se realiza en ambientes de vibración y más aún, cuando la medición se realiza en zonas sísmicas.

En el caso particular de las tareas de SHM con sistemas de barrido óptico en zonas sísmicas, uno de los principales obstáculos para realizar el monitoreo es el movimiento de los propios sistemas de barrido, estos pueden resumirse principalmente en los siguientes tres problemas:

- El número óptimo de dispositivos de barrido para obtener mediciones confiables
- La ubicación que deben tener estos dispositivos de barrido
- El método formal y algoritmo de procesamiento para separar los cambios debidos al movimiento del sistema de barrido de los cambios que sufran los puntos de interés asociados a los daños que sufra el objeto bajo observación en un ambiente de vibración.

Estos tres problemas son abordados en la presente tesis de investigación. Así como otras fuentes de error que se encontraron en el sistema al adaptarlo para realizar mediciones en campo. En el presente proyecto de tesis se pretendió trasladar y acondicionar el prototipo experimental en un tripie para realizar mediciones sobre una estructura en ambiente real de operación con el propósito de probar la efectividad de los métodos descritos y del sistema de barrido óptico para monitoreo de integridad estructural en zonas con movimientos telúricos frecuentes, ver Figura 1.

Recientemente en el departamento de optoelectrónica y mediciones automáticas del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California se desarrolló un sistema de barrido óptico para medición de coordenadas y monitoreo de desplazamiento en grandes estructuras. Dicho sistema de barrido se probó obteniéndose resultados satisfactorios en un ambiente de laboratorio estable. Sin embargo, este sistema, al igual que otros sistemas a base de

fibra óptica o sensores inalámbricos no ha sido probado en ambientes de vibración reales ni en zonas con movimientos telúricos frecuentes.



Figura 1. Acondicionado el prototipo experimental en un tripie para mediciones de campo

2.2. Justificación y uso de Resultados

El presente proyecto de tesis tuvo como objetivo último el proponer un sistema de barrido óptico para monitoreo de integridad estructural en zonas con movimientos frecuentes.

La justificación del proyecto, radica en el hecho de que una detección oportuna de fallas en una estructura, no solo permite evitar la pérdida de vidas humanas, sino que también permite reducir los costos de mantenimiento y reparación de las mismas, comparado con los costos asociados a una reparación, cuando el problema se ha agudizado.

Los beneficios del monitoreo de la integridad de una estructura son varios y aunque existen diferentes sistemas de monitoreo, en este trabajo se optó por utilizar un sistema de barrido

óptico, que tiene la ventaja de facilitar el monitoreo continuo de una estructura bajo observación, utilizando un método no invasivo, de bajo costo.

Una vez probado el sistema de barrido y validados los métodos utilizados, éste puede aplicarse en una amplia gama de obras de ingeniería, como puede ser el monitoreo de fallas geológicas e inclusive puede utilizarse como sistema de visión para navegación de robots móviles.

2.3. Hipótesis

Uno de los principales problemas que se presentan en el monitoreo de integridad estructural en zonas con movimientos telúricos o en ambientes de vibración, sobre todo cuando se utilizan sistemas de barrido óptico, es que el propio sistema también tiene movimiento si es colocado en la misma zona donde se ubican los puntos de interés, lo que dificulta distinguir entre los cambios debidos al movimiento del sistema de barrido y los cambios que sufran los puntos de interés asociados a los daños que se originan en el objeto bajo observación en un ambiente de vibración.

En este sentido se plantea la hipótesis de que utilizando una red sistemas de barrido óptico y al menos una referencia externa bien definida, es posible realizar el monitoreo de la integridad estructural con mayor precisión que el monitoreo con un solo sistema de barrido y para ello se propone como parte de la presente investigación desarrollar un método basado en una red de sistemas de barrido óptico optimizando el número de fuentes emisoras de luz colocadas en los puntos de interés y el número óptimo de sistemas de barrido.

2.4. Objetivos Generales y Específicos

2.4.1. Objetivo Generales

Desarrollar un nuevo método para monitoreo de integridad estructural en zonas con movimientos telúricos en base a una red de sistemas de barrido óptico, realizando un análisis comparativo de los distintos sistemas de monitoreo de estructuras y en específico de sistemas de barrido óptico más utilizados actualmente en tareas de SHM, sus métodos de medición, las consideraciones de su diseño y proponer un nuevo método para la medición de coordenadas y desplazamiento de puntos ubicados en las estructuras en el campo.

2.4.2. Objetivos Específicos

- Estudiar los métodos existentes para tareas de monitoreo de salud estructural en zonas con movimientos telúricos frecuentes.
- Definir el número de sistemas de barrido óptico para integrar una red optimizada de monitoreo.
- Identificar nuevas alternativas de métodos para tareas de SHM, en zonas con movimientos telúricos, mediante un análisis comparativo de los métodos existentes.
- Desarrollar un método teórico para monitoreo utilizando una red de sistemas de barrido óptico.
- Desarrollar un prototipo básico de los sistemas de barrido óptico que integrarán el sistema de monitoreo.
- Elaborar un análisis metrológico teórico con los resultados obtenidos con la red de monitoreo.

- Documentar la elaboración de la construcción de un prototipo experimental para validar los métodos propuestos.
- Medición de coordenadas en estructuras utilizando un sistema de barrido óptico con los distintos métodos propuestos.

2.5. Metodología

La metodología propuesta para el proyecto contempla dos perspectivas: la primera se relaciona con el desarrollo de un método teórico y la segunda con el diseño de un prototipo para evaluar la implementación este método. Esta metodología se conforma de las siguientes etapas:

- Revisión del estado del arte sobre los sistemas ópticos más utilizados actualmente para monitoreo de integridad estructural en zonas con movimientos telúricos y los métodos existentes para el procesamiento de datos utilizados para este fin. Esta primera etapa permitirá hacer una recopilación de información sobre los sistemas de barrido óptico más utilizados en la actualidad para monitoreo de integridad estructural en zonas con movimientos telúricos para identificar nuevas alternativas de métodos y sistemas de barrido que pueden ser implementados para este fin.
- Diseño de un método teórico basado en el uso de por lo menos dos sistemas de barrido óptico y una referencia externa, como puede ser el uso de GPS o un sistema con cámaras de video. Esta etapa consiste en el desarrollo de un método para aumentar la exactitud y disminuir la incertidumbre de las mediciones aumentando el número de aperturas de barrido y al menos una referencia externa.

- Simulación del método propuesto. Esta etapa consiste en la evaluación del método propuesto mediante un modelo de simulación.
- Diseño y construcción del prototipo para la implementación del método propuesto. En esta etapa se diseñará y se construirá un prototipo del sistema de barrido óptico para la implementación del método propuesto.
- Prueba del método y el sistema de barrido utilizados, variando diferentes parámetros como son: número de aperturas de barrido que integran el sistema de monitoreo, número de puntos monitoreados y referencia externa. Una vez desarrollado el método teórico, se procederá a utilizar modelos de optimización para determinar el número óptimo de sistemas de barrido que deberán integrar la red de monitoreo, el número de puntos a observar e identificar el tipo de referencia externa para disminuir la incertidumbre de las mediciones.
- Análisis de resultados y conclusiones. En esta última etapa se analizarán los resultados obtenidos y se emitirán las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO III

3. Marco Teórico

Aun cuando las estructuras han sido diseñadas para tolerar un cierto grado de fallas debido a materiales defectuosos, sus mantenimientos son necesarios para garantizar su integridad estructural por razones de seguridad, con el fin de reducir daños en sus elementos estructurales principales. Por lo tanto, es necesario detectar y medir los daños y la fatiga, inducidos por el envejecimiento, la sobrecarga o los impactos de baja velocidad. En especial para aquellos daños que son invisibles y no detectados por medio de la inspección visual, varias estrategias de identificación de daños se han desarrollado en las últimas décadas utilizando una amplia gama de tecnologías. Por estas razones, el monitoreo de salud estructural (SHM) ha ganado considerable atención en diversas aplicaciones de ingeniería debido a que se ocupa de la identificación de daños para estructuras aeroespaciales, civiles, industriales y mecánicas, ya sean puentes, presas, edificios, estadios, buques, plataformas, aerogeneradores, etc. Incluso para el monitoreo de grandes maquinarias y equipos (Ko, et al., 2005, Inman, et al., 2001, Liu, et al., 2010, Qu, et al., 2006). A continuación se describe un marco teórico bajo el cual fue desarrollado el presente trabajo.

3.1 Monitoreo de la Salud Estructural

El monitoreo de la salud estructural es una técnica moderna para la detección y localización de daños en estructuras que consiste en un proceso que rastrea la integridad de una estructura a través del tiempo usando una amplia gama de tecnologías que abarca integración de sensores, transmisión de datos y procesamiento (Dworakowski et.al 2016). SHM hace posible tomar

decisiones con respecto al futuro mantenimiento y operación de la estructura con el objetivo de prevenir daños catastróficos a la estructura y evitar daños humanos (Derriso, et al, 2014).

Los edificios a menudo son diseñados y construidos con detalles de construcción deficientes y, si además se encuentran en zonas con movimientos telúricos frecuentes, el mal estado de conservación de materiales y componentes tiene consecuencias obvias en su rendimiento general. Es por eso que hoy en día las tareas de monitoreo estructural se consideran de suma importancia durante los procesos de planificación urbana y protección civil. El monitoreo de estructuras puede llegar a ser una tarea desalentadora debido a la falta de modelos pre-existentes de la estabilidad de las estructuras y, debido a las restricciones de funcionamiento de algunos sistemas para monitoreo de estructuras. Sin embargo, la tecnología ha seguido desarrollando para supervisar estructuras y, en especial para aquellas que se encuentran en zonas con movimientos telúricos frecuentes.

Los sistemas para identificación de daños en las estructuras pueden clasificarse en activos y pasivos. En los sistemas de detección activa, las estructuras monitoreadas son activadas o excitadas y se registran las respuestas causadas por tal excitación. Por el contrario, en los sistemas de detección pasiva no se requiere ninguna excitación, mientras que sólo se utilizan sensores para monitorear las respuestas inducidas por los daños. Debido a la simplicidad en términos de operación, estos últimos sistemas han recibido una atención especial en las últimas dos décadas (Xu, 2014). El sistema propuesto puede clasificarse como un sistema de visión pasivo, presentando algunas ventajas sobre otros sistemas de visión, tales como: a) Una amplia distancia de medición; ya que el prototipo propuesto puede configurarse para mediciones a cortas distancias (aproximadamente de 10 a 70 centímetros) (Flores-Fuentes, et al., 2014) y para mediciones a largas distancia (aproximadamente de 1 a 20 metros) mediante un ajuste en la



ganancia en los sensores ópticos y un ajuste en el canal óptico. Siendo una gran ventaja en comparación con sensores de desplazamiento y de vibración basados en láser, los cuales generalmente son muy precisos pero tienen una distancia de medición limitada, normalmente inferior a 5 metros (Feng, et al., 2015).

b) Seguro para la salud humana ya que el prototipo propuesto se basa en una luz incoherente en comparación con otros sistemas basados en una fuente de luz coherente que manejan haz de luz de alta intensidad.

c) Prototipo de bajo costo ya que está compuesto por aperturas ópticas mecanizadas, motores, sensores de fotodiodos y un cámaras rentables, en comparación con sistemas comerciales que se cotizan en más de 100 veces el valor de este prototipo (Rivas, et al. 2013).

d) Fácil de operar y de configurar de acuerdo con la aplicación específica para la cual se utilizará, ya que este prototipo ha sido adaptado para la navegación robótica (Básaca-Preciado, et al., 2014), el barrido con propósitos de evaluación médica (Rodríguez-Quñones, et al., 2013), y para el monitoreo de la salud estructural (Flores-Fuentes, et al., 2014), e) Un bajo requerimiento de memoria para el almacenaje de datos, ya que sólo las coordenadas de interés en la escena se registran en lugar de registrarse toda la escena (Flores-Fuentes, et al., 2015).

f) Procesamiento digital de imágenes y señales simple y con un tiempo de computación reducido (Flores-Fuentes, et al., 2014).

g) La resolución no depende de la reflexión de superficies, como es el caso de los sistemas radar interferométricos (Feng, et al.,2015).

h) La exactitud no dependen sólo de las ventajas de las cámaras CCD's o de los sistemas de barrido ópticos (SBO's) de manera individual, por el contrario, el sistema propuesto es

robustecido debido a tomar ventaja de ambos sensores ópticos propuestos por medio de la fusión de sus datos.

3.2 Tecnologías para el Monitoreo de la Salud Estructural

Tradicionalmente, las estructuras eran monitoreadas con inspecciones visuales, con la ayuda de dispositivos y pruebas simples. Pero estos métodos tradicionales tienen muchos inconvenientes; En primer lugar se limitan a las zonas accesibles del edificio. En segundo lugar, sólo pueden realizarse periódicamente, ya que requieren la presencia en el sitio de técnicos y expertos. Por último, este tipo de inspecciones son altamente subjetivas y se basan en la experiencia y el juicio de los inspectores. Aunque estos métodos todavía son ampliamente utilizados, en las últimas décadas ha habido un cambio gradual hacia el uso de sistemas automáticos y sensores en el campo del monitoreo estructural. El monitoreo es muy importante para conocer el estado de salud de la estructura, con el fin de analizar cualquier posible situación anormal. Los sistemas para monitoreo de estructuras deben tener acceso o aquellas características de las estructuras que proporcionen una diversidad de datos que creen una imagen de la condición de la estructura. La tecnología para el monitoreo de estructuras debe ser capaz de inspeccionar o medir sin hacer ningún daño a la estructura, también debe ser robusta en comparación con el nivel de daños que están tratando de detectar en estas estructuras críticas. Además, necesitan ser altamente confiables y operar sin necesidad de aportaciones a largo plazo. Casi todos los sistemas de monitoreo de estructuras están compuestos por una red de sensores conectados a una unidad externa de adquisición de datos. Los datos crudos de los sensores se analizan para derivar el estado de salud de las estructuras. Por lo general, los sensores son sensores inalámbricos

distribuidos en un área grande. Los sistemas más modernos incorporan transmisores y receptores inalámbricos para superar algunas limitaciones causadas por el uso de cables.

Los datos brutos se pueden recoger de los sensores a través de la comunicación inalámbrica para ser almacenados y procesados en un procesador central situado en un lugar lejano a la estructura en monitoreo (Lombillo, et al., 2016). Los sistemas de monitoreo son capaces de evaluar las estructuras continuamente, proporcionando información en tiempo real sobre su estado de salud, incluyendo la identificación, localización y cuantificación del daño (Mukhopadhyay, et al., 2011). Las limitaciones de las redes de sensores inalámbricas (WSN de sus siglas en inglés wireless sensor networks) como la comunicación inalámbrica de bajo ancho de banda, recursos limitados en los nodos de sensores inalámbricos necesitan ser abordados en un sistema de monitoreo de estructuras para que sea exitoso. Mientras que los sensores inalámbricos pueden incluir medidores de deformación (strain gauges), acelerómetros y termopares, los sensores con cable pueden incluir giroscopios, acelerómetros y magnetómetros.

Otros sensores utilizados para monitoreo de estructuras son los sensores ópticos o de luz, utilizados para capturar imágenes y/o hacer un barrido para obtener señales optoelectrónicas, que son capaces de proporcionar robustez al sistema de monitoreo frente a condiciones ambientales desfavorables (como luz tenue, perturbación de la imagen de fondo y/o oclusión parcial de la escena), (Feng, et al., 2015). También pueden ser utilizados para medir la posición de una característica específica en la estructura o para la reconstrucción de imágenes 3D a partir de los datos medidos en distintos puntos de las tres dimensiones (3D). Los sensores ópticos actúan como un transductor que recibe fotones y produce una respuesta eléctrica que puede amplificarse y convertirse en una forma de parámetros relevantes para manejar los datos de entrada para la interpretación de los resultados. Estos sensores pueden clasificarse como sensores de imagen de

cámaras y de señal analógica de sistemas de barrido óptico. Los sensores de imagen son reconocidos como la tecnología más avanzada para grabar imágenes electrónicas, también conocidas como imágenes basadas en visión 2D. Estos sensores se basan en el efecto fotoeléctrico en el silicio, que describe la interacción entre un fotón con longitud de onda apropiada (en general entre 200nm y 1000 nm) y un átomo de silicio que genera un par de electrones-huecos. Si está presente un campo eléctrico, el electrón y el hueco se separan y la carga se acumula, proporcionalmente al número de fotones incidentes, y por lo tanto la escena imaginada en el detector se reproducirá si existe una estructura X-Y adecuada. Cada elemento básico, que define la granularidad del sensor, se denomina pixel (elemento de imagen). Los más utilizados para las tareas de monitoreo estructural son el sensor CCD (dispositivo de carga acoplada), sensor CMOS (semiconductor de óxido metálico complementario) y PSD (sensor de detección de posición), los cuales se pueden encontrar más comúnmente en cámaras. En los sistemas de barrido óptico, que proveen una señal analógica como salida, los sistemas se utilizan como un receptor óptico para convertir la luz en electricidad. Este principio se aplica a fotodetectores, foto-transistores y otros detectores como celdas fotovoltaicas, y foto-resistencias. Sin embargo, los detectores más utilizados hoy en día para las tareas de medición de posición son el fotodiodo y los fototransistores, y se pueden encontrar más comúnmente en los sistemas de barrido, para las tareas de monitoreo a largo alcance de imágenes 3D (Rivas, et al., 2013). Los requisitos indispensables en un sistema de monitoreo para estructuras son: sistemas rentables, reemplazables, duraderos y de bajo consumo, así como contar con inteligencia artificial para adaptarse al sitio donde son utilizados, a fin de tener la capacidad de distinguir el comportamiento anormal del normal durante el proceso de monitoreo. Deben desarrollarse sistemas para monitoreo estructural, que puedan reconocer cuando se ha producido un daño y



proporcionar la ubicación del daño. Existen diferentes tipos de tecnologías, y de sensores disponibles, que deben elegirse y fusionarse en función de la aplicación para obtener resultados óptimos en las tareas de monitoreo estructural.

En años recientes se han desarrollado diferentes tecnologías para monitoreo de integridad estructural debido a la necesidad de preservar la infraestructura pública como puentes, presas edificios, así como la infraestructura industrial como minas, plataformas petroleras y plantas de generación de energía, entre otras.

Así por ejemplo en la década de los 80's los métodos más utilizados para tareas de SHM en ambientes de vibración eran en base a tecnologías acústicas, ultrasónicas, campo magnético y medición de campo térmico, sin embargo, todos estos métodos requieren que la vecindad del daño se conozca a priori y que la porción de la estructura sea fácilmente accesible (Doherty, et al., 1987), en la década de los 90' se propusieron algunos métodos ópticos utilizando cámaras de video, estos sistemas son más adecuados para monitoreo de imágenes u objetos en movimiento pero, tienen la principal desventaja en la correspondencia de las imágenes monoculares haciendo más complejos los algoritmos para realizar estas tareas, elevando el costo de computación (Cristina, et al., 2007), teniendo además limitaciones en condiciones de brillo, sombras, y sombreados.

Más recientemente, a partir del año 2000, los métodos basados en sensores incrustados o embebidos a base de fibras ópticas (Kihara, et al., 2003), las redes inalámbricas a base de sensores bluetooth (Metha, et al., 2004), y radiofrecuencia (Chintalapudi, et al., 2006). Sin embargo, debido a sus limitaciones en alcance o interferencia, estos medios se están utilizando principalmente en el monitoreo de la integridad estructural de obras civiles como puentes y edificios.

En ambientes de vibraciones son altamente utilizados los acelerómetros para el monitoreo respectivo. Usando la transformada rápida de Fourier se identifica la frecuencia natural en cada señal, posteriormente, con el objeto de comparar los registros en el tiempo se integra dos veces la señal de aceleraciones en el contenido temporal utilizando el método trapezoidal acumulativo, que consiste en aproximar la señal por medio de trapezoides según la ecuación (1), donde a es un punto de la señal y b es el siguiente punto en la misma (Franco, et al., 2011).

$$\int_a^b f(x) dx \approx (b - a) \frac{f(a)+f(b)}{2} \quad (1)$$

En este proceso de doble integración numérica no se tiene en cuenta las condiciones de borde de la doble integración analítica, lo que genera una imprecisión en la integración numérica,

Actualmente con los avances acelerados de la electrónica, sensores y sistemas de telecomunicaciones, se están realizando estudios de SHM con sensores embebidos a base de MEMS (microelectro-mechanical systems) estos dispositivos son más pequeños, su nivel de ruido es bajo y pueden resultar más económicos que los sensores anteriormente mencionados. Sin embargo, actualmente los MEMS apenas están siendo evaluados para realizar este tipo de tareas, al igual que los sistemas de barrido óptico que es el tipo de tecnología en la que se enfocará el presente trabajo.

3.2.1 Monitoreo Estructural Basado en la Imagen 2D (visión 2D)

El monitoreo estructural basado en la imagen 2D (visión 2D), también llamado imágenes de luminancia 2D, se utiliza para extraer directamente de las imágenes características geométricas. La adquisición de la imagen se realiza bajo buenas condiciones de iluminación usando una

cámara de luz normal y sin ningún tipo de desorden de fondo. El método basado en la visión 2D mediante una adquisición de imágenes digitales a través de una cámara o fotogrametría de corto alcance (CRP por sus siglas en inglés close-range photogrammetry) se ha utilizado para producir modelos texturizados 3D realistas utilizando diversos grados de asistencia manual. Sin embargo, estos métodos de modelado de última generación basados en imágenes requieren de un gran número de imágenes para crear modelos con suficientes detalles geométricos en 3D, para así poder detectar daños arquitectónicos mediante la detección automática y la extracción de características geométricas (Li, et al., 2011). Otro método para producir modelos texturizados 3D realistas se define mediante imágenes en profundidad 2D. Una imagen en profundidad de un modelo 3D está asociada con un conjunto de líneas de profundidad que luego se transformarán en secuencias. La información de secuencia de profundidad proporciona una descripción más precisa de los límites de forma 3D que el uso de otros descriptores de forma 2D (Chaouch, et al., 2007). Como alternativa a la visión 2D, se han implementado la visión 3D a partir de datos obtenidos con sistemas de barrido óptico, se conjetura que los datos de la visión 3D pueden aliviar las dificultades inherentes a la modalidad de visión 2D, ya que la visión 3D permite realizar verdaderas mediciones de superficie y, por tanto, diferencias sutiles y, así poder ir más allá de los límites de la visión 2D (Savran, et al., 2012). Una de las características más importantes que se pueden extraer de las imágenes son los bordes, que corresponden a cambios rápidos en los niveles de gris en la dirección de los bordes. La mayor parte del tiempo, tales cambios son el resultado de cambios repentinos en las propiedades de reflexión de la superficie. Los ejemplos incluyen sombras y marcas. Más importante aún, son los límites de los objetos los que también causan bordes en las imágenes porque las dos caras de un límite tienen propiedades de reflexión diferentes (Schenk, et al., 2002). Inicialmente, se han desarrollado algoritmos para



procesar imágenes en escala de grises o en color. Hoy en día, la alta precisión de estos algoritmos, la enorme cantidad de imágenes en las bases de datos existentes, y la disponibilidad de cámaras económicas para adquirir imágenes con calidad satisfactoria permiten la mayoría de las aplicaciones existentes y futuras (Husken, et al., 2005), entre ellas permiten el monitoreo de estructuras a través de procesamientos digitales rápidos y precisos de las adquisiciones hechas con cámaras con sensores CCD. Esta aplicación de la visión 2D proporciona imágenes de alta resolución y calidad, que se pueden utilizar para la medición de coordenadas espaciales para las tareas de monitoreo estructural con el fin de analizar si los elementos de una estructura están experimentando desplazamiento, e incluso pueden aplicarse para analizar el comportamiento dinámico en las estructuras debido a las cargas a las que son sometidas, como se muestra en (Feng, et al., 2015, Wu, et al., 2014), obteniendo resultados satisfactorios en comparación con los sistemas de contacto que miden la vibración en las estructuras.

3.2.2 Monitoreo Estructural Basado en la Señal Optoelectrónica de un Sistema de Barrido (Visión 3D)

En el monitoreo estructural basado en la señal optoelectrónica de un sistema de barrido (visión 3D) y los modelos resultantes en 3D se representan como primitivos de bajo nivel y carecen de codificación explícita de estructuras de alto nivel. Los sistemas de barrido basados en la visión 3D pueden utilizar emisores de luz coherente o incoherente. Estos sistemas de barrido basados en la visión 3D con emisores de luz coherente, más comúnmente conocidos como escáners láser, se utilizan para realizar el barrido láser para adquirir una representación discreta de un objeto o escena. La generación de imágenes de alcance implica la interpolación de los puntos láser irregularmente espaciados para componer una cuadrícula y su conversión a valores de grises. Los

sistemas de barrido disponibles se extienden a todos los tipos de objetos, casi independientemente de la escala y complejidad, y tienen la capacidad de recopilar rápidamente información de superficie 3D de alta resolución de un objeto o escena. La nube de puntos 3D permite la construcción de un modelo de superficie 3D del objeto o escena. La resolución de la exploración, que define el número de puntos registrados en una escena y el nivel de detalle visible en una exploración, es simplemente el menor cambio de distancia que el sistema de barrido es capaz de detectar. Los sistemas de barrido láser de alta resolución se pueden utilizar para la adquisición de modelos de alta calidad incluso con una precisión de resolución de milímetros. Sin embargo, tales sistemas de barrido son lentos y tienen volúmenes de trabajo pequeños, haciéndolos inadecuados para la digitalización de edificios y bloques de la ciudad. Como alternativa, los sistemas de barrido de detección de luz 3D y los sistemas de barrido de alcance (LIDAR, siglas de varios métodos de altimetría láser) son atractivos, ya que son rápidos, fáciles de usar y capaces de generar exploraciones coherentes de estructuras grandes de construcción (Rothfeder, et al., 2003). Desafortunadamente, tales barridos son ruidosos, escasos y suelen carecer de capacidad para adquisición detallada de las estructuras. A pesar de que proporcionan una impresión superficial de los edificios explorados, la nube de puntos crudos que se obtienen no son adecuados para cualquier aplicación práctica o para la inspección digital (Forkuo, 2005). Por otro lado, el sistema de barrido basado en la visión 3D con emisores de luz incoherentes se utiliza para barrer la escena con el fin de detectar el emisor de luz incoherente y extraer sólo las características de interés de un objeto o escena sin la necesidad de capturar las imágenes. Debido a que, para algunas aplicaciones, no es necesario adquirir toda la visión de una escena como lo que hace la visión humana, es decir: sólo se extraen las características de interés



(Sonka, 2014), y esto sólo es posible mediante el uso de un sistema de barrido rotatorio y de la aplicación de triangulación dinámica.

El antecedente más reciente al que se le dará continuidad en el presente trabajo es el método y sistema de barrido óptico desarrollado en el laboratorio de optoelectrónica y mediciones automáticas del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California.

Este sistema fue desarrollado para medir ángulos, coordenadas, desplazamiento, deformaciones utilizando la triangulación dinámica (Rivas, et al., 2010). Este sistema también puede ser utilizado como sistema de visión para control de navegación de robots móviles (Sergiyenko, et al., 2009). En este contexto, el fundamento teórico de la investigación parte del sistema de barrido como el que se muestra en la Figura 2.

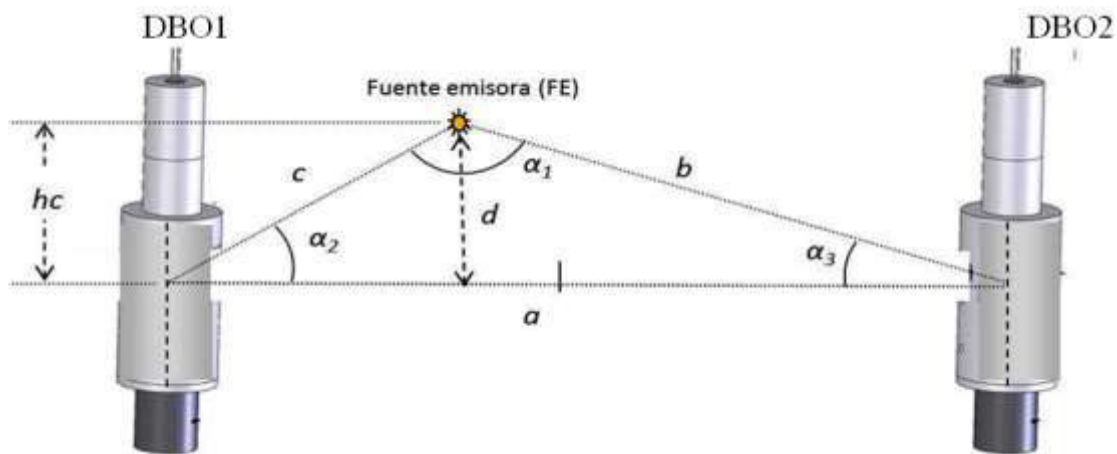


Figura 2. Bases de triangulación

Donde a es la distancia entre dos dispositivos de barrido óptico $DBO1$ y $DBO2$, d es la distancia de la base de triangulación a una fuente emisora de luz colocada en el punto de interés, α_2 es el ángulo medido desde el centro del espejo del $DBO1$, α_3 es el ángulo medido desde el centro del espejo del $DBO2$, b es la distancia del sistema del $DBO2$ al punto de interés, c es la

distancia del sistema del *SBO1* al punto de interés y α_1 es el ángulo entre las líneas virtuales de cada *SBO* al punto de interés.

En este sistema los ángulos α_2 y α_3 , se estiman utilizando la ecuación 2.

$$\alpha = 2\pi \cdot N_{\alpha} / N_{2\pi} \quad (2)$$

Siendo N_{α} el código asociado a los pulsos de una frecuencia estándar contados desde el inicio hasta el final de la medición y $N_{2\pi}$ es el código asociado a los pulsos de la frecuencia estándar contados en un periodo.

Si se tienen varios puntos de interés en un plano la ecuación 2 se generaliza quedando como se expresa en la ecuación 3.

$$\alpha_{ij} = 2\pi \cdot N_{\alpha_{ij}} / N_{2\pi_{ij}} \quad (3)$$

Una vez medidos los ángulos α_2 y α_3 , en diferentes puntos de interés, las coordenadas se calculan con la ecuaciones 4 y 5.

$$x_{ij} = a \cdot \frac{\text{Sen}\alpha_{2ij} \cdot \text{Sen}\alpha_{3ij}}{\text{Sen}[180^\circ - (\alpha_{2ij} + \alpha_{3ij})]} \quad (4)$$

$$y_{ij} = -a \cdot \left(\frac{1}{2} + \frac{\text{Sen}\alpha_{2ij} \cdot \text{Cos}\alpha_{3ij}}{\text{Sen}[180^\circ - (\alpha_{2ij} + \alpha_{3ij})]} \right) \quad (5)$$

El desplazamiento se obtiene con la diferencia de las coordenadas en cada punto de interés. Este método y el sistema de barrido han sido probados con resultados satisfactorios en condiciones de laboratorio pero no habían sido probados en ambientes operacionales reales en

zonas con movimientos telúricos frecuentes, lo que puede incrementar la incertidumbre en las mediciones al tener movimiento en los propio sistema de monitoreo, por lo que la presente investigación se enfocó en contrastar la hipótesis de que utilizando una red de sistemas de barrido óptico es posible obtener mediciones confiables en este tipo de ambientes. Para ello se propuso desarrollar el método de medición y evaluarlo en un ambiente con movimientos telúricos frecuentes. Para llevar a cabo la etapa experimental, se hizo primero una evaluación del ambiente en que operaría el sistema y se determinó el número de sistemas de barrido que debería de integrar la red.

3.2.3 Fusión de Bases de Datos de Sistemas de Monitoreo Estructural Basados en Visión 2D y Visión 3D

Con la fusión de las bases de datos de dos sistemas de visión 2D y 3D se puede obtener un escenario clásico de fusión donde el sinergismo de dos datos de entrada de sensores distintos excede considerablemente la información obtenida por los sensores de forma individual (Schenk, et al., 2002). La fusión puede ser útil en el mapeo de textura, a partir de la nube de puntos se pueden crear modelos 3D foto-realistas que son esenciales para una gran variedad de aplicaciones, como son: la extracción de objetivos de referencia para el registro y la calibración, la reconstrucción 3D, la automatización de mediciones en 3D (orientación exterior automática), e incluso si los datos están geo-referenciados pueden incorporarse fácilmente a las aplicaciones existentes del Sistema de Información Geográfica (SIG) (Forkuo, et al., 2005). La exploración basada en la visión 3D puede ser vista como un complemento a las imágenes basadas en la visión 2D, por ejemplo, la fusión de la CRP y la relativamente nueva tecnología de los métodos de

barrido láser terrestre ofrecen nuevas oportunidades para la presentación foto-realista de modelos 3D y la creación de objetos en una realidad virtual (como modelos de ciudades 3D, información turística virtual, así como cualquier otra aplicación que requiera de una visualización virtual). Los sistemas de barrido láser terrestres (TLS por sus siglas en inglés Terrestrial laser scanners) tienen la capacidad de recopilar información superficial 3D de alta resolución de un objeto rápidamente. El mismo tipo de datos puede ser generado por las técnicas de CRP, pero las disparidades en las imágenes de las escenas requieren de una tarea intensa para el operador. Los sistemas de imagen de algunos TLS no tienen una resolución radiométrica muy alta, mientras que las cámaras digitales de alta resolución utilizadas en la CRP moderna sí cuentan con ella. Además, los TLS son esencialmente vinculados a tierra, mientras que las cámaras se pueden mover a voluntad alrededor del objeto que se desea monitorear (Sonka, et al., 2014). Un método para realizar la fusión de las bases de datos 2D y 3D de monitoreo de estructuras consiste en la creación de imágenes sintéticas (SCI, de sus siglas en inglés Synthetic Camera Images). Se realiza una coincidencia de coincidencia entre parejas, para lo cual el primer paso es la extracción de características, tanto de las imágenes 2D como de los datos 3D utilizando el detector de esquinas de Harris. La correspondencia inicial entre estos puntos se establece entonces correlacionando regiones alrededor de las características. La similitud es entonces juzgada por el desarrollo acumulado de los correspondientes puntos de interés en las dos bases de datos 2D y 3D (Rothfeder, et al. 2003). Para el barrido optoelectrónico basado en la visión 3D con el emisor de luz coherente y la imagen en 2D basada en la visión obtenida con una cámara con sensor CCD, la fusión se realiza interpolando los valores del punto láser reflejado (que contiene datos de puntos espaciados) en una cuadrícula regular y utilizando los valores de intensidad de las imágenes de la cámara para generar la imagen sintética. Para la fusión 2D y 3D,



hay dos opciones relacionadas con esta interpolación. La primera opción es generar la imagen sintética manteniendo la resolución original de los datos de la nube de puntos y calcular un nuevo tamaño de píxel. La segunda opción, por el contrario, es mantener el tamaño de píxel de la imagen de la cámara real y luego calcular el número de píxeles o la resolución. Las técnicas de procesamiento de imágenes convencionales, tales como el estiramiento de contraste y la mejora de imagen, se utilizan entonces para producir la imagen final. Es obvio que las características geométricas en la imagen sintética son más fáciles de detectar que las de los datos del sistema de barrido láser. Esta imagen ofrece una gran ventaja para interactivamente o automáticamente conjugar las coincidencias de la intensidad de las imágenes producidas por una cámara digital (Forkuo, et al. 2005). Las aplicaciones de este método pueden verse en la preservación histórica, la planificación urbana, la cartografía digital, la estructura, la navegación, la realidad virtual, el comercio electrónico, la cinematografía digital y los juegos de computadora, por nombrar sólo algunos. Históricamente, la fusión se ha utilizado para la automatización; para mejorar la precisión y la fiabilidad. Se han realizado trabajos relacionados con la integración 2D y 3D para la reconstrucción automática de escenas urbanas (Seitz, et al., 2006), para realizar comparaciones a gran escala (benchmark) (Li, B., et al., 2015), reconocimiento facial (Li, H., et al., 2015), cartografía terrestre (Grout, et al., 2014), imaginación médica (Bloch, et al., 1997) y visión de robot (Sheng, et al., 2002), por mencionar algunos. En esta tesis el nuevo método propuesto para la fusión de conjuntos de datos 2D y 3D es por medio de un algoritmo de inteligencia artificial, es un modelo matemático que describe la integración de la visión 2D (cámara con sensor CCD) y la visión 3D (sistema de barrido optoelectrónico con emisor de luz incoherente sensor de fotodiodo). Análisis preliminares de este método sobre la fusión 2D

y 3D se presentaron en (Flores, et al., 2015). El algoritmo de inteligencia artificial es una técnica de inferencias de alto nivel, que requiere de realizar razonamiento tipo humano como reconocimiento de patrones, planificación, deducción y aprendizaje. Los procesos de inferencia utilizados por los sistemas expertos comienzan con un grupo de datos iniciales (datos previos) y algunas reglas básicas. La lógica difusa y las redes neuronales son ejemplos de tales métodos. Varios algoritmos de aprendizaje de máquina se investigan para fusionar los datos de los sensores, como las redes neuronales (NN por sus siglas en inglés, Neuronal Networks) y la máquina vectorial de apoyo (SVM, por sus siglas en inglés, Support Vector Machine). El mejor modelo generado por cada algoritmo se denomina estimador. Se ha demostrado que el empleo de estimadores basados en la inteligencia artificial puede mejorar significativamente el rendimiento alcanzado por cada sensor por sí solo (Faceli, et al., 2002, Banerjee, et al. 2012).

3.2.4 Redes de sistemas de barrido óptico

Uno de los principales problemas que se presentan en el monitoreo de una estructura, es el número de sensores, que deberán colocarse para obtener información confiable, en el caso del presente trabajo se optó por trabajar con un sistema de barrido, que en principio puede utilizar un número N de aperturas de barrido (SBO) monitoreando la estructura y al mismo tiempo monitorean también las distintas aperturas por pares, para hacer la triangulación como se muestra en la Figura 3.

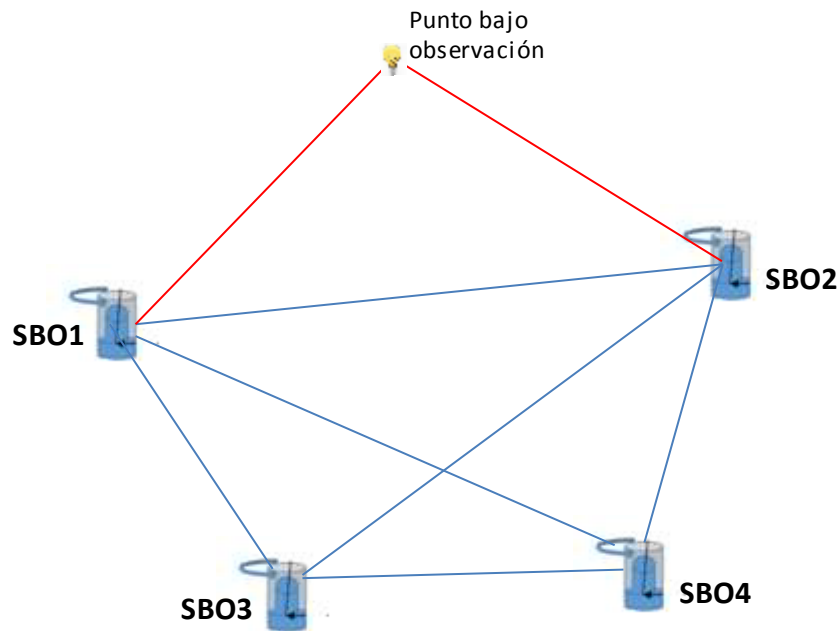


Figura 3. Sistema de monitoreo con 4 aperturas, monitoreándose entre sí

Otra posibilidad es utilizar un sistema de barrido con solo dos aperturas y una referencia externa como puede ser un GPS o un sistema de cámaras que permita monitorear la posición de las aperturas.

En este sentido, los alcances del proyecto se limitan a un sistema con dos aperturas y un sistema de cámaras que permitieron la fusión de datos 2D y 3D, aumentando la exactitud y la precisión de los datos.

CAPÍTULO IV

4. Experimentación y Análisis de Resultados

Las imágenes y señales ópticas se pueden utilizar para detectar el desplazamiento en estructuras de ingeniería civil. A continuación se presenta la experimentación de una tecnología para el monitoreo de la salud de estructuras, por el sistema propuesto el cual puede monitorear sin estar en contacto con la estructura y sin realizar ninguna prueba destructiva. El énfasis del estudio experimental se centra en el entorno urbano exterior, mediante la detección de desplazamiento de coordenadas espaciales en las estructuras con el fin de realizar una evaluación de daños. La experimentación considera tanto aspectos teóricos como experimentales de la fusión de datos de imágenes tomadas con sensores CCD's y de datos de señales obtenidas con SBO's utilizando algoritmos inteligentes. Se utilizaron dos cámaras CCD's y dos sistemas de barrido óptico SBO's para generar imágenes de alta resolución y calidad para imágenes 2D y datos de rango de precisión 3D de señales de sensores optoelectrónicos. Se realizaron exploraciones en un área específica de una estructura de ingeniería para medir desplazamientos de coordenadas espaciales, verificando con éxito la efectividad y la robustez del enfoque del sistema propuesto.

La presente experimentación fue recomendada para la ingeniería civil, especialmente para aquellas estructuras antiguas sensibles al envejecimiento, fatiga, daños por sobrecarga y fenómenos ambientales, como terremotos y huracanes, que se encuentran en zonas con intensos movimientos telúricos frecuentes. Ya que estas estructuras requieren una evaluación cuidadosa de su integridad estructural, con una comprensión precisa y cuantitativa de los factores que pueden afectarlas (Ceriotti, et al., 2009, Ramos, et al., 2010). La estrategia propuesta calcula el

desplazamiento de coordenadas en las estructura, realizando mediciones sin estar en contacto con la estructura y sin utilizar pruebas destructivas, ya que se basa en métodos de visión artificial (Breuer, et al, 2015): a) Método basado en la visión 2D mediante una imagen digital de una cámara montada sobre cada SBO, b) Método basado en la visión 3D mediante un barrido óptico con los SBO's. En ambos casos, es posible medir puntos (coordenadas espaciales) en la estructura (Kohut, et al., 2013), para la detección de desplazamiento (Li, et al., 2015). El proceso de monitoreo por ambos métodos basados en la visión 2D y 3D propuestos producen una gran cantidad de imágenes y señales de donde las características de interés se extraen como conjuntos de datos que se transforman en información que describe la integridad actual y la integridad proyectada de la estructura (Balsamo, et al., 2015). La fusión de las bases de datos 2D y 3D se basa en técnica de inteligencia artificial (IA) que requiere de la entrada y salida de datos de ambas bases de datos. Específicamente, la técnica de IA ha sido formulada como un problema de regresión, seleccionándose para este propósito la Regresión de Máquina de Vector de Soporte (SVMR), ya que ésta ha sido aplicada previamente en tareas de SHM con resultados exitosos (Zhao, et al., 2015, Buluta, et al., 2005, Worden, et al., 2007, Bornn, et al., 2009). El análisis de exactitud de ambos métodos 2D y 3D y su fusión fueron realizados.

4.1. Evaluación experimental del prototipo desarrollado

Con el propósito de contribuir al desarrollo científico y tecnológico de sistemas para monitoreo de estructuras en zonas con intensos movimientos telúricos, un grupo de investigación de la Universidad Autónoma de Baja California ha consolidado una línea de investigación en "Optoelectrónica y mediciones automáticas", y se ha desarrollado un prototipo (SBO), el cual realiza el monitoreo sin estar en contacto con las estructuras y sin realizar destrucciones en las

estructuras. Un primer prototipo ha sido probado experimentalmente en el entorno de laboratorio con resultados exitosos, pero con un alcance de barrido limitada (Flores, et al., 2014), el prototipo propuesto se ha mejorado por medio de una alineación en el canal óptico para ampliar los límites de distancia de barrido, incrementando el alcance de un límite de 70 centímetros a un límite aproximado de 20 metros. Para realizar la experimentación en un ambiente de operación real, simulando el ambiente de campo, en un ambiente expuesto a condiciones reales, se instaló el sistema propuesto con dos aperturas en un modelo dinámico de triangulación con una distancia de 1 metro entre aberturas para realizar mediciones a una distancia de 4 metros entre el sistema y la estructura. Las mediciones se realizaron en una estructura localizada afuera del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. La obtención de resultados fue satisfactoria debido al aumento del área de escaneo y la mejora de la precisión mediante la aplicación de la fusión de las bases de datos 2D y 3D, dando lugar a una nueva etapa de experimentación aplicada a un estudio con énfasis en el entorno urbano exterior, para zonas con movimientos telúricos.

4.2. Descripción del prototipo

Este prototipo fue diseñado para realizar monitoreo de estructuras en zonas con movimiento telúrico utilizando un método y una tecnología que no estuviera en contacto con la estructura ni le provocara destrucciones. Se utilizaron dos cámara y dos sistemas de barrido optoelectrónico para generar imágenes de alta resolución 2D y datos de precisión 3D de señales de sensores optoelectrónicos. A continuación se detallan los aspectos teóricos y experimentales de la fusión de conjuntos de datos de la visión 2D y de la visión 3D, utilizando algoritmos inteligentes. El diseño del prototipo comenzó con el sistema de barrido óptico (SBO), el cual consta de un

sistema de barrido de luz para la aplicación de monitoreo de estructuras y se puede clasificar como un sistema de medición de posición. Se compone de una fuente emisora de luz instalada en la estructura bajo monitoreo y una apertura de exploración óptica que está barriendo la estructura en la búsqueda de la fuente de luz emitida para saber si ésta se mueve. Se utiliza una fuente emisora de luz como indicador de posición; se monta sobre la estructura bajo monitoreo y se utiliza como indicador de posición. Esta podría ser una fuente de luz coherente, tal como un láser o una fuente de luz incoherente, tal como una bombilla, o como las utilizadas en vehículos. Asumimos que para cualquier fuente emisora de luz sólo hay un centro de energía que representa su posición. La apertura óptica giratoria, está diseñada como una superficie de espejo inclinada a 45° unida a un vástago cilíndrico que está rotando para desviar el haz de luz a una lente biconvexa provista de un filtro de interferencia, hacia un fotodiodo. El vástago cilíndrico está montado sobre el eje de un motor eléctrico de corriente continua y, a medida que gira, se genera una señal eléctrica. La Figura 4 muestra los elementos principales de la apertura de barrido óptica. Cuando el espejo comienza a girar, el sensor "s" se sincroniza como el origen generando un impulso indicando la posición 0° y el inicio de un ciclo de 360° que termina inmediatamente antes de que el sensor "s" genere el siguiente impulso de inicio. Estos pulsos se utilizan para calcular la frecuencia de barrido y la referencia cero grados, la cual se utiliza para medir el ángulo en el que se encuentra la fuente de emisora de luz (Rivas, et al., 2012).

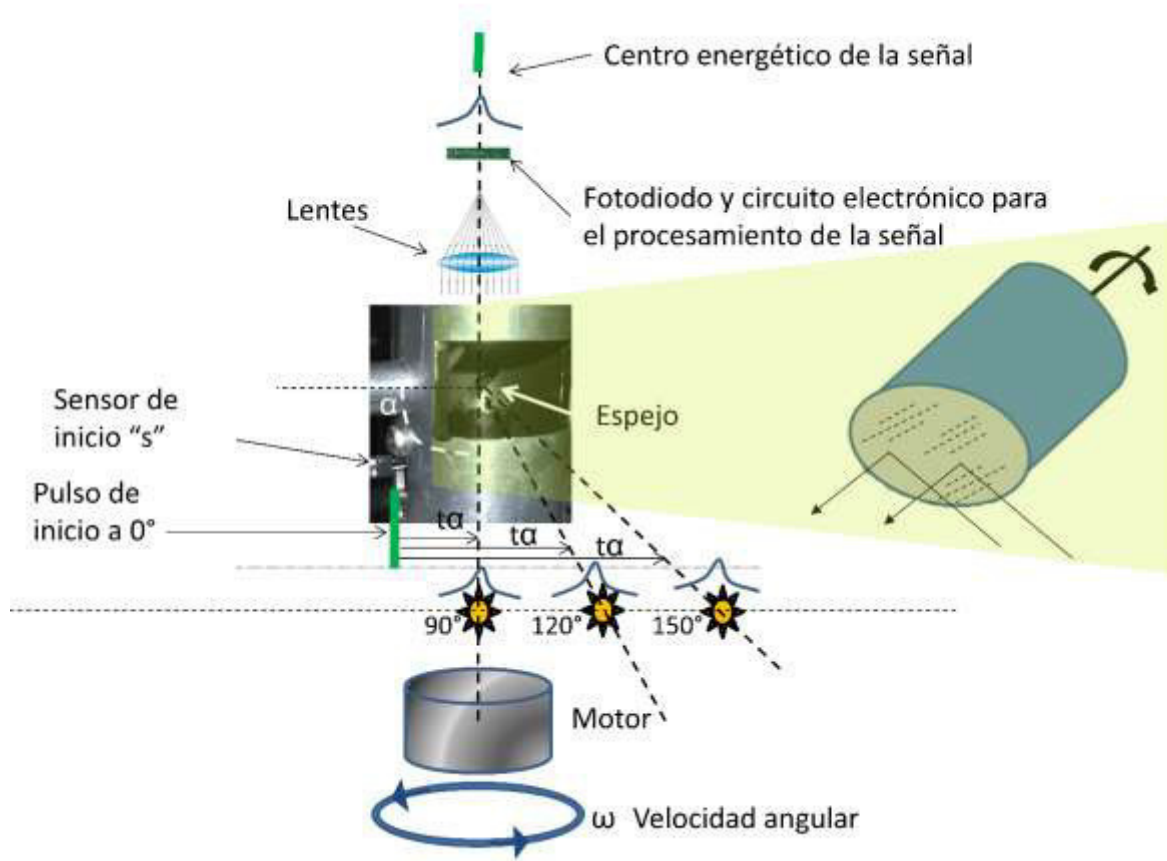


Figura 4. Apertura de barrido óptico

El diagrama de tiempo de la señal en la Figura 5 muestra el pulso de inicio y su relación con la señal optoelectrónica utilizada para calcular la posición del centro energético de la señal emitida por la fuente de luz como se describe en las ecuaciones siguientes. El periodo $T_{2\pi}$ es el tiempo para una revolución del motor, definida como el tiempo entre dos m_1 consecutivos como se describe en la ecuación 6, que se expresan por el código $I_{2\pi}$ definido en la ecuación 7. En cuanto a m_1 , esta es la referencia del inicio de una revolución del motor (0°). El tiempo t_α es el tiempo entre la referencia del arranque de una revolución del motor y el centro energético de la señal, es

decir, el intervalo entre m_1 y m_2 . Esto puede ser expresado por el código I_α como se define en la ecuación 8. En cuanto a m_2 , es el centro energético de la señal. El ángulo bajo medición se calcula entonces mediante la ecuación 9.

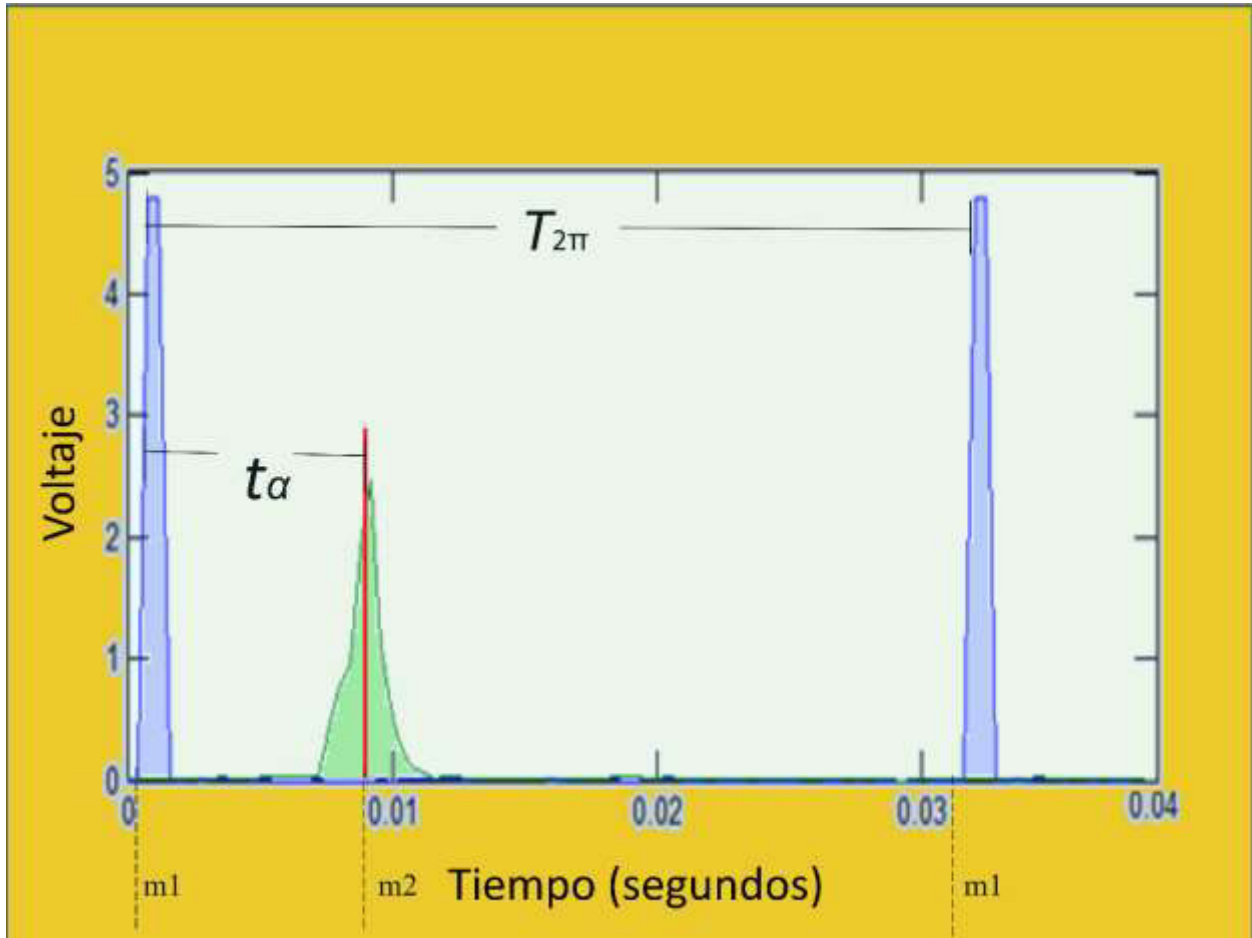


Figura 5. Diagrama de tiempo de la apertura de barrido óptico

$$T_{2\pi} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{2\pi f} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

$$I_{2\pi} = T_{2\pi} f \quad (7)$$

$$I_{\alpha} = t_{\alpha} f \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{2\pi I_{\alpha}}{I_{2\pi}} = \frac{2\pi t_{\alpha} f}{T_{2\pi} f} = \frac{2\pi t_{\alpha} f}{\frac{2\pi}{\omega} f} = t_{\alpha} \omega = t_{\alpha} 2\pi f \quad (9)$$

Donde m_1 es la referencia del inicio de una revolución del motor, m_2 es el centro energético de la señal, $T_{2\pi}$ es el intervalo de tiempo de un ciclo, de m_1 a m_1 , ω es la velocidad angular, f es la frecuencia de barrido (ciclos por segundo), $I_{2\pi}$ es el código de intervalo de un ciclo, de m_1 a m_1 , I_{α} es el código de rango desde el inicio de un ciclo al centro energético de la señal y t_{α} es el intervalo desde el inicio de la señal al centro energético de la señal, de m_1 a m_2 .

Diferentes formas de señales son generadas por un SBO, dependiendo del tipo de fuente de luz y del sensor de captura de haz luminoso. Un proceso típico de medición de posición incluye una fuente emisora de luz, el detector sensible a la posición, como un fotodiodo y/o CCD, ambos dispositivos receptores, recogen una porción de la fuente de luz instalada en el objetivo, como se muestra en la Figura 6. La función de distribución espacial de la luz tiene una forma similar a la función Airy, cuando un fotodiodo se utiliza como un sensor en un sistema de barrido con espejo giratorio, también puede originar una forma parecida a una señal Gaussiana con cierto ruido y deformación, por el otro lado el sensor CCD produce corrientes de salida relacionadas con el "centro de masa" de luz incidente sobre la superficie del dispositivo, el CCD utiliza la distribución de la cantidad de luz de todo el haz que entra en el elemento receptor de luz para determinar el centroide del haz de luz e identifica esto como la posición objetivo. Concluyendo que la señal de un fotodiodo origina una función similar a la de un CCD, en consecuencia, es posible mejorar la precisión de mediciones tomando las mediciones en el centro de energía de la señal, tanto en el caso de sistemas de visión 2D como en el caso de sistemas de visión 3D (Hou, et al., 2011).

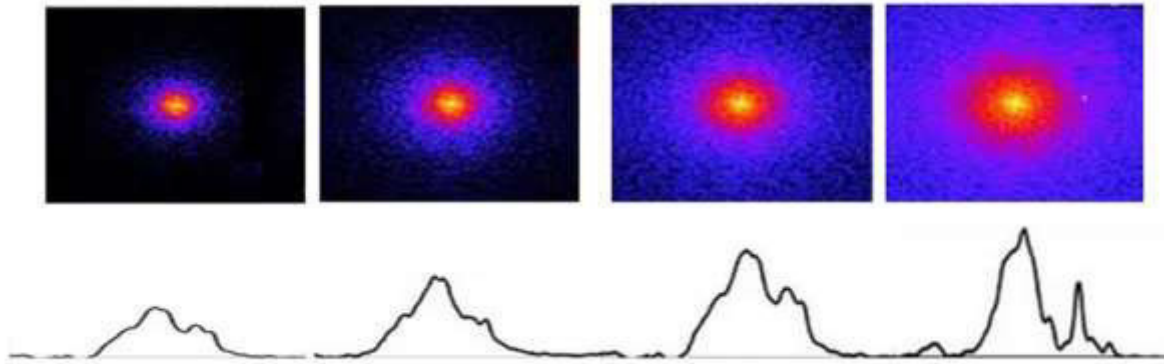


Figura 6. Señal óptica

El fotodiodo es el sensor que da lugar al barrido optoelectrónico (Rivas, et al., 2010). Debido a que el monitoreo estructural es una tendencia que va en aumento, ya que se requiere determinar la integridad de las estructuras para prevenir daños indeseables, fue diseñado el SBO, el cual cumple con la necesidad de detectar la luz proveniente de un emisor de luz montado sobre la estructura bajo supervisión, a fin de medir las coordenadas espaciales 3D de su centro energético. El SBO genera las señales optoelectrónicas que pueden ser analizadas por los métodos previamente propuestos (Rivas-Lopez, et al., 2014), donde se evaluaron seis métodos de localización del centro energético (ECLM, de sus siglas en inglés Energy Centre Localization Methods): centroide geométrico, centroide del espectro de potencia, procesamiento analógico por circuito electrónico, saturación e integración, flanco de subida, y detección de pico, (ver Figura 7). De donde se concluye que para reducir los errores de medición de posición, la mejor solución es tomar la medida en el centro energético de la señal generada por el SBO y, de acuerdo con los resultados de la evaluación, el ECLM más preciso es el centroide geométrico y el centroide del espectro de potencia, por lo que se seleccionó el ECLM centroide de espectro de potencia para

realizar la localización del centro energético de la señal optoelectrónica detectada por el fotodiodo a través del SBO.

De tal manera que m_2 es calculado por medio de la ecuación 10. Dónde: SC es el centroide espectral en frecuencia (Hertz), $X^d[k]$ es la magnitud correspondiente al contenedor k de frecuencia, k es el contenedor de frecuencia (fs/N) en Hertz, fs es la frecuencia de muestreo, y N es la longitud de la transformada discreta de Fourier (DFT de sus siglas en inglés, Discrete Fourier Transform). El valor del centroide se convierte del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, usando a) una correlación de los contenedores de frecuencia con la escala de tiempo. O b) realizar el cálculo del centroide directamente por medio de la ecuación 11. Dónde: TC es el centroide en el dominio del tiempo, $x[n]$ es la señal de entrada, n es el índice de tiempo, y L es la longitud del tiempo. La secuencia de muestras de tiempo L está representada por las secuencia de muestras de frecuencias N después de la Transformada de Fourier.

$$SC_{Hz} = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} k * X^d[k]}{\sum_{k=1}^{N-1} X^d[k]} \quad (10)$$

$$TC = \frac{\sum_{n=1}^{L-1} nx[n]}{\sum_{n=1}^{L-1} x[n]} \quad (11)$$

La fotogrametría da información sobre la geometría de un objeto o su superficie a través del uso de fotografías.

El CCD es el sensor que da lugar a la fotogrametría de corto alcance (Rodríguez-Quíñonez, et al., 2014).

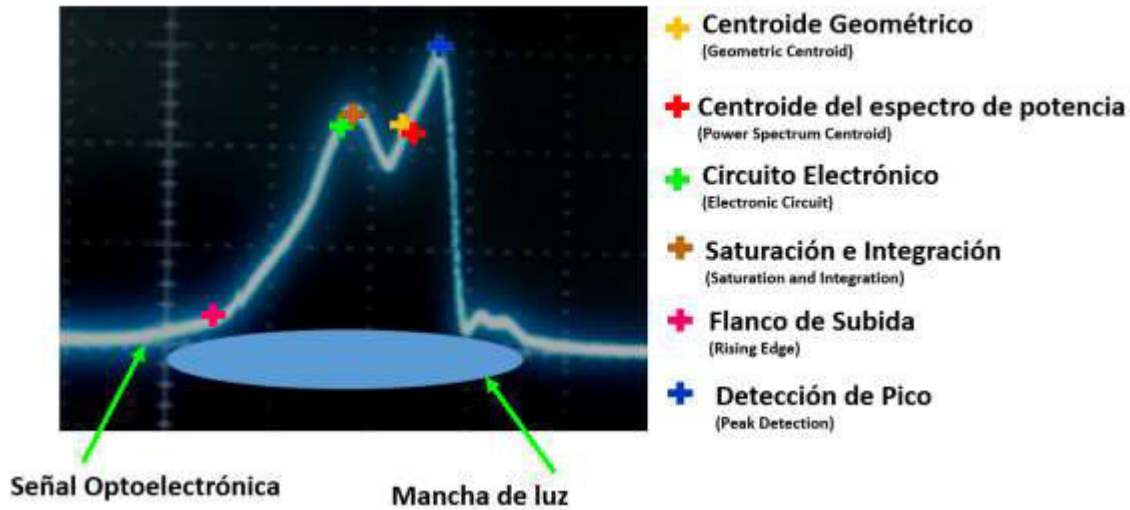


Figura 7. Representación gráfica de los ECLM en la señal optoelectrónica detectada por el fotodiodo

Proporciona información de las superficies menos densas pero con alta calidad, especialmente a lo largo de discontinuidades en los objetos, bordes y orillas. Puede definirse como la automatización de la extracción de información a partir de imágenes digitales basada en métodos de análisis de imágenes. Una cámara modelo de Logitech C920 con una resolución máxima de 1920 x 1080 píxeles con 30 fps fue situada en paralelo al fotodiodo del SBO para obtener una segunda fuente de información con respecto al ángulo α , utilizando un sensor CCD para adquirir una imagen del campo de visión, al mismo tiempo que el fotodiodo del SBO. Dos métodos fueron propuestos previamente en (Rodríguez-Quñonez, et al., 2014, Basaca-Preciado, et al., 2014). Uno se centra en la determinación de los bordes y el centroide y el otro se centra en la densidad de los puntos medidos.

Ambos métodos calculan el centro energético (image matrix centroid) aplicando operaciones morfológicas. La morfología matemática es una herramienta para extraer componentes de

imagen que son útiles en representación y descripción de la forma de la región. Trabajan directamente en el dominio espacial, representa una aproximación no lineal para la detección de bordes, utilizando transformaciones de imagen basadas en simples operaciones de expansión y contracción. La detección de bordes identifica y localiza discontinuidades en las imágenes. Un borde puede ser considerado como el límite entre dos regiones diferentes en una imagen, los métodos clásicos de detección de bordes implican la convolución de una imagen con un operador (como Canny y Prewitt), que se desarrollan para ser sensible a los gradientes en la imagen y entregar valores de cero en áreas uniformes. En el método centrado en la determinación del borde y el centroide, la ubicación del borde es realizada por un operador como Canny o Prewitt. El centro energético de la luz se localiza mediante la aplicación de una serie de operaciones morfológicas como la dilatación, la erosión, la ubicación de los límites, las regiones de imagen de relleno y la remoción del área abierta. El programa detallado de Matlab (Script) se encuentra en (Rodríguez-Quíñonez, et al., 2014). En el método centrado en la densidad de puntos, después de capturarse la imagen se obtiene el espectro de color rojo, se aplica un filtro de desenfoque gaussiano (matriz de 5x5) para suavizar la imagen capturada. Mediante el cálculo de la convolución de la imagen original y de una matriz de promediado 5x5 se obtiene la imagen más suave, lo que permite encontrar con precisión el centro del punto de luz. Se utiliza una aplicación directa de la ecuación de convolución bidimensional en forma espacial, calculada para intervalos finitos, definida por los límites del marco de imagen. Después de que la imagen haya sido borrosa, los valores máximos de color rojo se calculan para cada fila (x) y columna (y) de la matriz 2D que representa la imagen. Cuanto más brillante sea el color rojo en la imagen, mayor será el valor rojo. Los resultados finales son las coordenadas (x,y) del centro del punto luminoso dentro de la imagen capturada (es decir, estas coordenadas instantáneamente representadas en



píxeles y, además, convertidas en X e Y). El programa detallado de Matlab (Script) se encuentra en (Basaca-Preciado, et al., 2014). Para el propósito de la fusión de sensores propuesta, el método enfocado en la densidad de puntos de reflexión de luz ha sido seleccionado para ser utilizado durante la experimentación, como se muestra en la Figura 8.

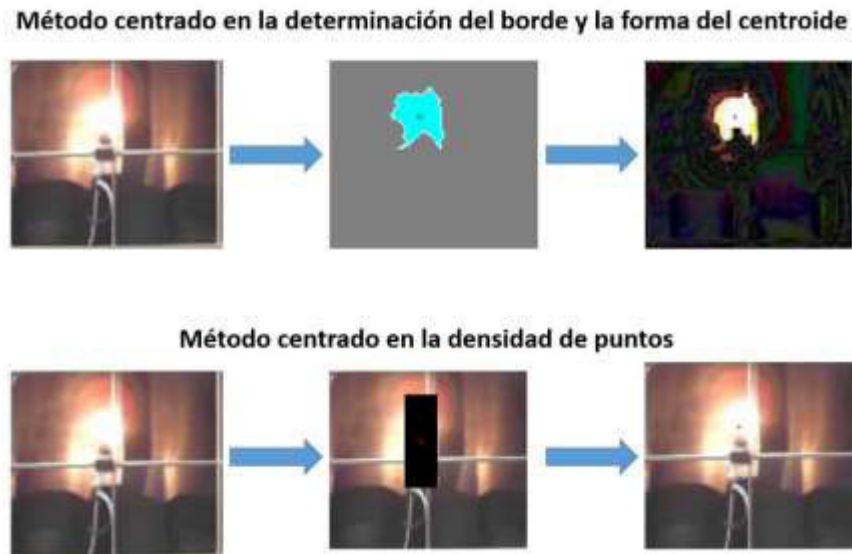


Figura 8. Representación gráfica de los ECLM en las imágenes detectadas por el CCD

4.3 Mediciones Experimentales

El proyecto de fabricación del prototipo consiste de tres etapas de investigación (en laboratorio, en el exterior y en el campo). El diseño del experimento y de las mediciones en esta sección describe los resultados de la etapa de investigación en laboratorio y los toma como antecedente para la etapa de investigación en el exterior.

Realizándose primero mediciones en ambiente de vibración y posteriormente utilizando la fusión de conjuntos de datos 2D y 3D.

4.3.1 Mediciones en ambiente de vibración

Considerando que en una zona con movimientos telúricos frecuentes, las estructuras están expuestas a un ambiente de vibración, se diseñó un experimento en el que se simularon diferentes oscilaciones fuera del laboratorio, es decir; exponiendo al SBO, a condiciones ambientales reales.

Las mediciones se realizaron a las 12:00 horas, con el SBO de frente al sol, para ver el alcance del sistema con perturbaciones del ambiente.

Con el propósito de medir el desplazamiento en ambiente de vibración se simularon oscilaciones de 1Hz, 2Hz y 3Hz, a distancias de 50 cm y 100 cm. Los resultados no fueron muy alentadores, pues la mejor resolución que se obtuvo, en medición de desplazamiento, fue de 1cm, cuando la oscilación era de Hz y el SBO, se encontraba a una distancia de 50 cm, a oscilaciones y distancias mayores, no fue posible detectar la fuente emisora, por lo que se decidió seguir trabajando en métodos que permitieran aumentar la resolución y exactitud del SBO, antes de continuar experimentando en ambientes de vibración.

4.3.2 Fusión de datos 2D y 3D

Ante el desafío de lograr el monitoreo estructural en estructuras en zonas sísmicas, se propusieron nuevas alternativas, para la construcción de un SBO para mediciones 3D, estas alternativas contemplaban que: el uso de un SBO proporciona coordenadas polares en un plano, el uso de dos SBO separados a distancias conocidas, proporcionan una coordenada espacial en un plano por medio de triangulación dinámica, mientras que el uso de tres SBO proporciona el alcance completo de la medición de coordenadas espaciales 3D. Como primera etapa, se construyó y caracterizó un SBO en el ambiente de laboratorio. Durante las pruebas se observó

que existe un comportamiento no lineal a lo largo de todo el barrido de la escena y que para obtener un aumento de precisión se requiere la aplicación de técnicas de inteligencia artificial para que el reconocimiento de patrones produzca una salida mejorada en un enfoque moderno de la predicción del error de medición no lineal del SBO y, en este sentido poder compensarlo. La Figura 9 muestra un diagrama de flujo general que explica cómo se integran el SBO y la inteligencia artificial mediante un experimento realizado a través de una mesa óptica en un ambiente de laboratorio. El diagrama de flujo es auto-explicativo. Sin embargo, algunos aspectos requieren mayor descripción.

Las mediciones se realizaron durante el barrido óptico en una ventana de 45° a 135° mediante la ecuación 10, tomándose mediciones en 32 posiciones a través de una línea en cada ángulo. Se tomaron diez mediciones en cada posición, es decir, en cada combinación ángulo-distancia, repitiendo este proceso de medición cada 5° .

Un total de 6020 mediciones construyó la base de datos de mediciones SBO. 6020 instancias (n filas) y 4 variables (p columnas), como se muestra en la Figura 10, donde x_{ij} ($i=1, \dots, n$), ($j=1, \dots, p$) son los valores en la base datos correspondiendo la columna $p=1$ al ángulo real de medición (α_R), $p=2$ a la distancia de medición entre el SBO y la fuente de luz, $p=3$ a la frecuencia de barrido del SOB, y $p=4$ al error de medición (E) calculado por medio de la ecuación 12. Dónde: E es el error de medición, α_R es el ángulo real y α_M es el ángulo medido.

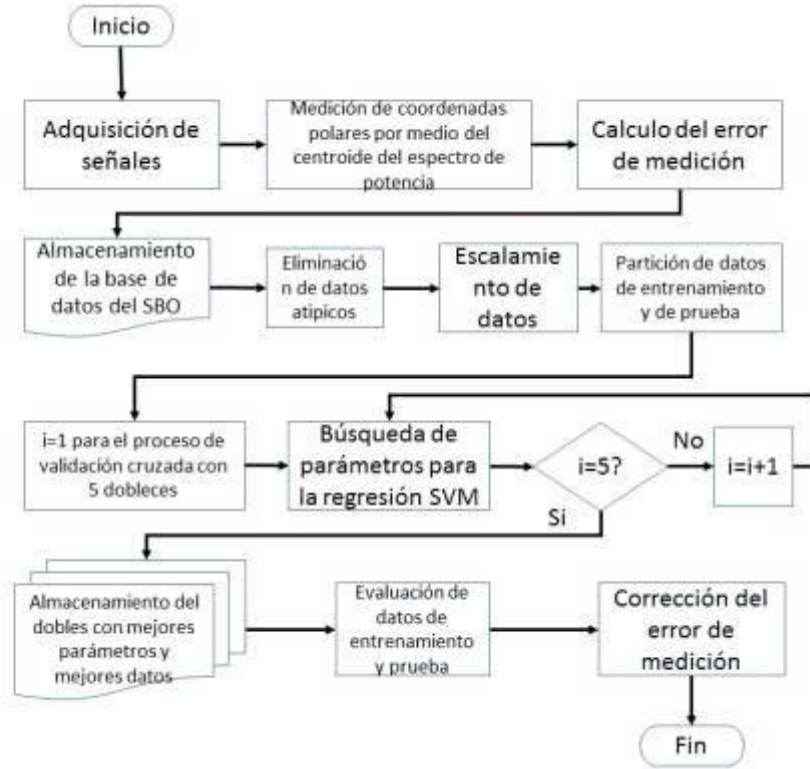


Figura 9. Diagrama de flujo general de funcionamiento de un SBO a través de una mesa óptica en el entorno del laboratorio.

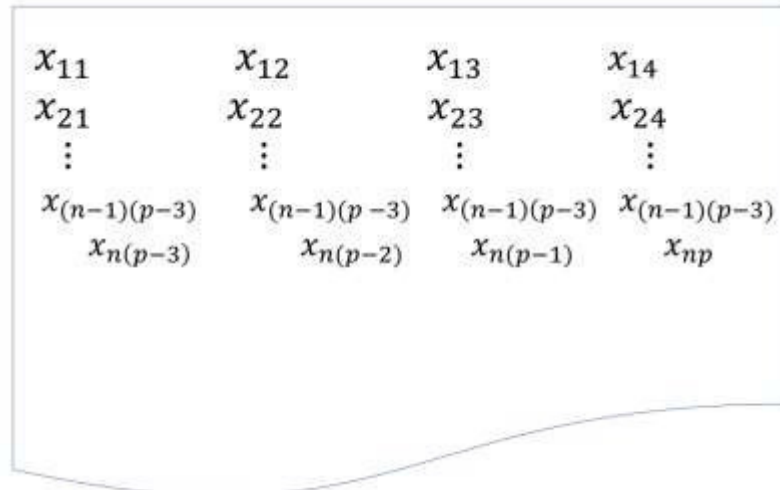


Figura 10. Base de datos de las mediciones del SBO

El algoritmo SRD (por sus siglas en inglés, Square Robust Distance) fue utilizado para la detección de datos multivariantes atípicos por medio de la ecuación 13, donde RD es la diagonal de la matriz que contiene la distancia robusta de Mahalanobis para cada instancia multivariante x_i ($i = 1, \dots, n$), x es una matriz de n renglones (instancias) y p columnas (variables), \bar{x} es una matriz de n renglones con p columnas con la media de las instancias \bar{x}_j ($j = 1, \dots, p$) y Σ^{-1} es la matriz inversa de covarianza (Zhou, et al., 2015). Obteniéndose un valor crítico de 11.1433 para un cuantil de 97.5% (Filzmoser, et al., 2012). Detectando 136 instancias atípicas de 6020 instancias, representando el 2.56% del total de instancias de la base de datos original de mediciones del SBO. Obteniendo una nueva base de datos de mediciones del SBO con 5884 instancias, como se muestra en la Figura 11.

$$E = \alpha_R - \alpha_M \quad (12)$$

$$RD = ((x - \bar{x})^T \Sigma^{-1} (x - \bar{x})) \quad (13)$$

Cada columna de la base de datos se escaló con valores de 0 a 1. La nueva base de datos de medición del SBO se dividió en dos conjuntos, 80% de datos para el entrenamiento y 20% de datos para la prueba. Obteniendo un conjunto de datos de entrenamiento de 4708 instancias con 4 columnas y un conjunto de datos de prueba de 1176 instancias con 4 columnas.

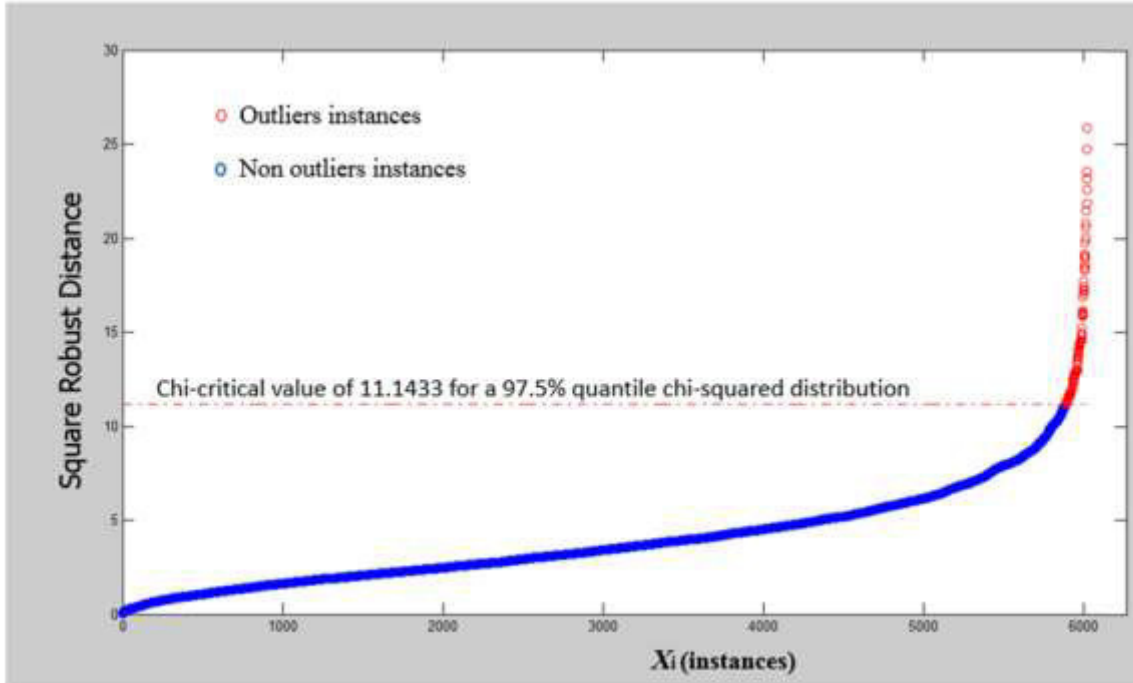


Figura 11. Datos atípicos

Siendo las 3 primeras columnas atributos y la última columna el objetivo. Para predecir el error de medición la base de datos de entrenamiento se sometió al algoritmo de regresión SVMR (por sus siglas en inglés, Support Vector Machine Regression) a través de una base de datos: $\{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$. Dónde: x_i para $i = (1, \dots, n)$ son los atributos (variables independientes) de n instancias u observaciones, y cada x_i a un vector de p columnas, siendo p el número de variables de entrada (o atributos), es decir, $x_i = \{x_{i1}, \dots, x_{ip}\}$ para $j = (1, \dots, p)$, y_i para $i = (1, \dots, n)$ son los valores de salida o valores objetivo (variable dependiente) de n instancias u observaciones. Con el propósito de encontrar una función $f(x)$ que tiene como máximo una desviación ε con respecto al objetivo obtenido y_i para todos los datos de entrenamiento y, al mismo tiempo ser lo más lineal posible. Es decir, es aceptable una predicción de error menor que ε , pero rechazable cualquier desviación mayor que ε . Para una función no lineal f definida

por la ecuación 14, donde $Q_{ij} = K(x_i, x_j)$ es uno de los kernels de las ecuaciones 16, 17, 18 y 19, sujeto a la ecuación 15 restringido a $0 \leq \beta_i, \beta_i^* \leq C$. Dónde, γ (*gamma kernel*), r (*coefficient kernel*) and d (grado del polinomio kernel) son parametros de los kernels.

$$f(x_i) = \sum_j Q_{ij}(\beta_j - \beta_j^*) + b \quad (14)$$

$$W = \frac{1}{2} \sum_{ij} (\beta_i - \beta_i^*) Q_{ij} (\beta_j - \beta_j^*) - \sum_i y_i (\beta_i - \beta_i^*) + \varepsilon \sum_i (\beta_i + \beta_i^*) + b \sum_{ij} (\beta_i - \beta_i^*) \quad (15)$$

$$K(x_i, x_j) = x_i^T x_j \quad (16)$$

$$K(x_i, x_j) = (\gamma x_i^T x_j + r)^d, \gamma > 0 \quad (17)$$

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2), \gamma > 0 \quad (18)$$

$$K(x_i, x_j) = \tanh(\gamma x_i^T x_j + r) \quad (19)$$

Con el fin de validar adecuadamente el rendimiento de la regresión, se ejecutó el bien conocido método de validación cruzada (k-fold cross-validation), repitiendo 5 veces 5 dobleces y en cada ejecución realizando una búsqueda de los parámetros óptimos. Se analizaron los siguientes parámetros con a) base de datos original b) nuevas bases de datos sin valores atípicos:

- Kernel type: [Lineal, Polynomial, RBF]
- Gamma: $[2^{-5}, 2^{-4}, 2^{-3}, 2^{-2}, 2^{-1}, 2^0, 2^1, 2^2, 2^3, 2^4, 2^5]$
- C: $[2^{-5}, 2^{-4}, 2^{-3}, 2^{-2}, 2^{-1}, 2^0, 2^1, 2^2, 2^3, 2^4, 2^5]$
- NU: [0.015, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9]
- Polynomial degree in Polynomial kernel: [1, 2, 3]

Obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Mejores parámetros para SVMR

Kernel	Parámetros							
	Para la base de datos original				Para la nueva base de datos sin datos atípicos			
	Gamma	C	NU	Degree	Gamma	C	NU	Degree
Lineal	*	2.0 0	0.01 5	*	*	0.25 0	0.01 5	*
Polynomial	*	4.0 0	0.50 0	1	*	2.00 0	0.50 0	1
RBF	11.3 1	8.0 0	0.65 0	*	11.31	2.00 0	0.70 0	*

*No aplica

Después de realizar el entrenamiento con los mejores parámetros, el vector de pesos de la máquina de vector de soporte (SVM) fue obtenido para someter el conjunto de datos de prueba y predecir el error. La comparación entre los valores predichos y los valores originales se evaluó mediante el error cuadrático medio (MSE), los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2, observando los resultados MSE más bajos de la regresión SVM con el kernel RBF en la nueva base de datos sin valores atípicos. La Figura 12 es un acercamiento de una sección de las predicciones con los distintos kernels Lineal, Polinomial y RBF, con el propósito de realizar una comparación gráfica del tubo ε obtenido con cada Kernel (Smola, et al., 2004). Finalmente obtención una mejora en las mediciones después de la corrección de errores mediante la ecuación 20, donde: α_{MC} es el ángulo medido corregido, α_M es el ángulo medido por el sistema, y E es el error de medición.

$$\alpha_{MC} = \alpha_M + E \tag{20}$$

Tabla 2. Resultados MSE de la regresión SVM

KERNEL	MSE Results	
	Para base de datos original	Para base de datos sin datos atípicos
Lineal	0.0144394	0.008840
Polynomial	0.014549	0.008817
RBF	0.008448	0.004192

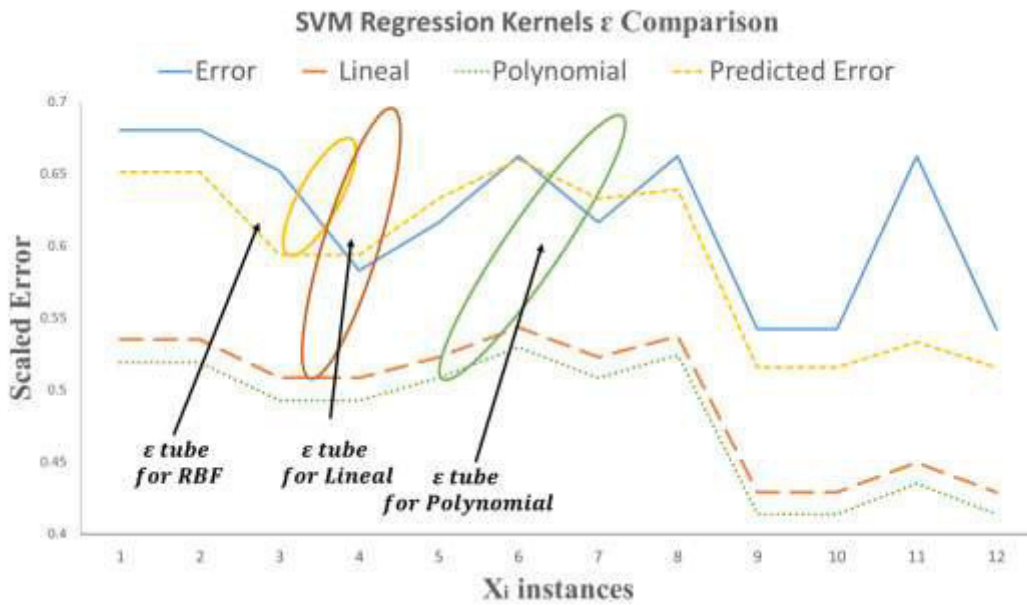


Figura 12. Comparación de Kernels en el algoritmo SVMR

En la etapa de investigación en el exterior se ha utilizado un segundo prototipo, que ha sido mejorado con ajustes en el canal óptico para ampliar los límites de alcance en el barrido del SOB con el fin de realizar la experimentación en el exterior, utilizando un entorno real, (ver Figura 13).



El diseño completo del SBO se presenta en el anexo I, aclarando que tanto esta tesis como los planos presentados en este anexo forman parte del proyecto “Método y sistema de barrido óptico para monitoreo de integridad estructural en zonas sísmicas” (Rivas, et. al.,2014).



Figura 13. Canal óptico

Se aumentó la ganancia del fotodiodo y se ha calibró el canal óptico para alinear el espejo, la lente y el fotodiodo. Se realizaron mediciones utilizando dos aperturas en ambiente de laboratorio, como se muestra en la Figura 14.

Una vez calibrado el sistema en ambiente de laboratorio se procedió a realizar mediciones fuera de laboratorio seleccionando las coordenadas de 15 puntos en una estructura fuera del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, como se muestra en la Figura 15.

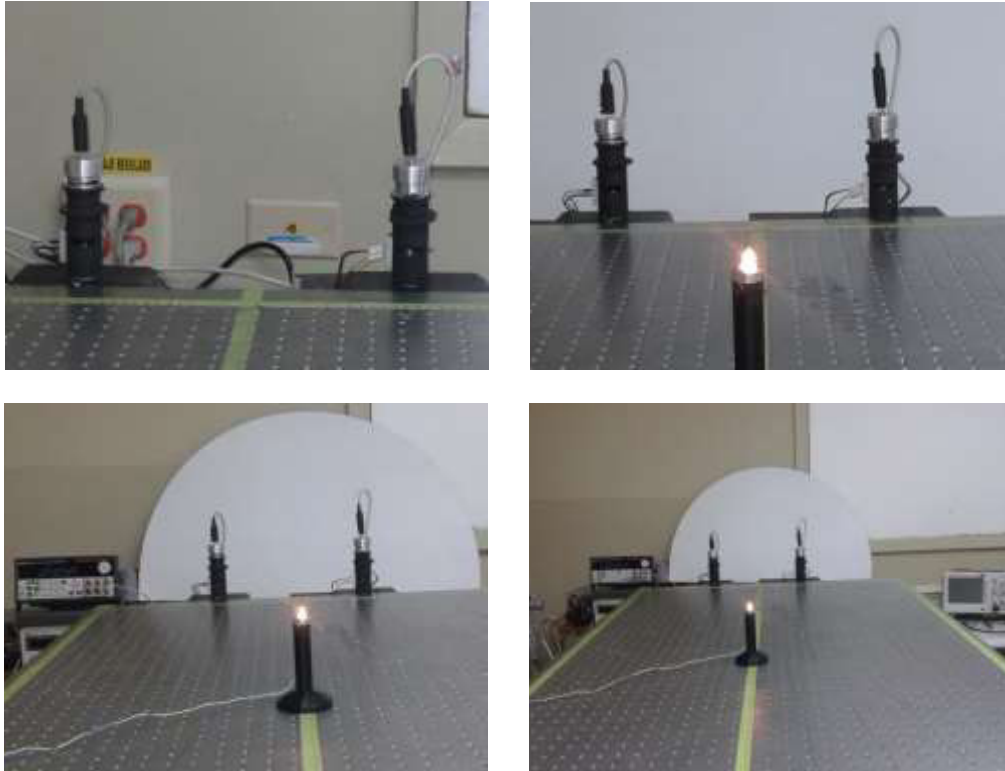


Figura 14. Medición de coordenadas utilizando dos aperturas de barrido

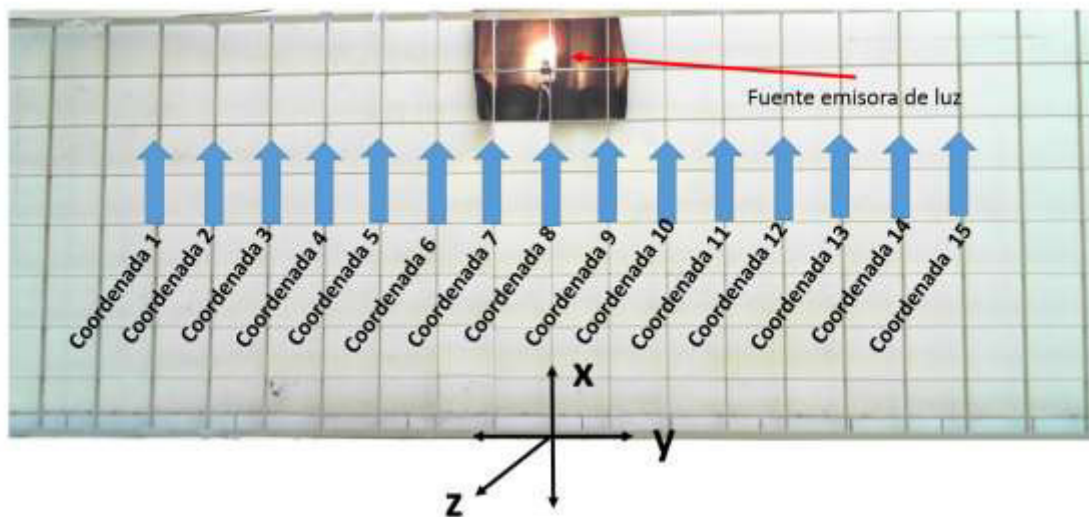


Figura 15. Puntos de medición sobre la estructura

Las mediciones se realizaron utilizando dos aperturas SBO con fotodiodos y sensores CCD, los cuales se fusionaron como se describe en el diagrama de flujo de la Figura 16.

Una vez seleccionados los 15 puntos de control de medición en la estructura, se estableció el origen de un sistema de coordenadas coincidiendo con el centro de la estructura y se utilizaron dos aperturas para realizar la triangulación dinámica para obtener la coordenada cartesiana de los puntos de control seleccionados.

Se estableció la distancia entre las aperturas de 100 cm y se estableció la distancia desde las aperturas a la estructura de 400 cm.

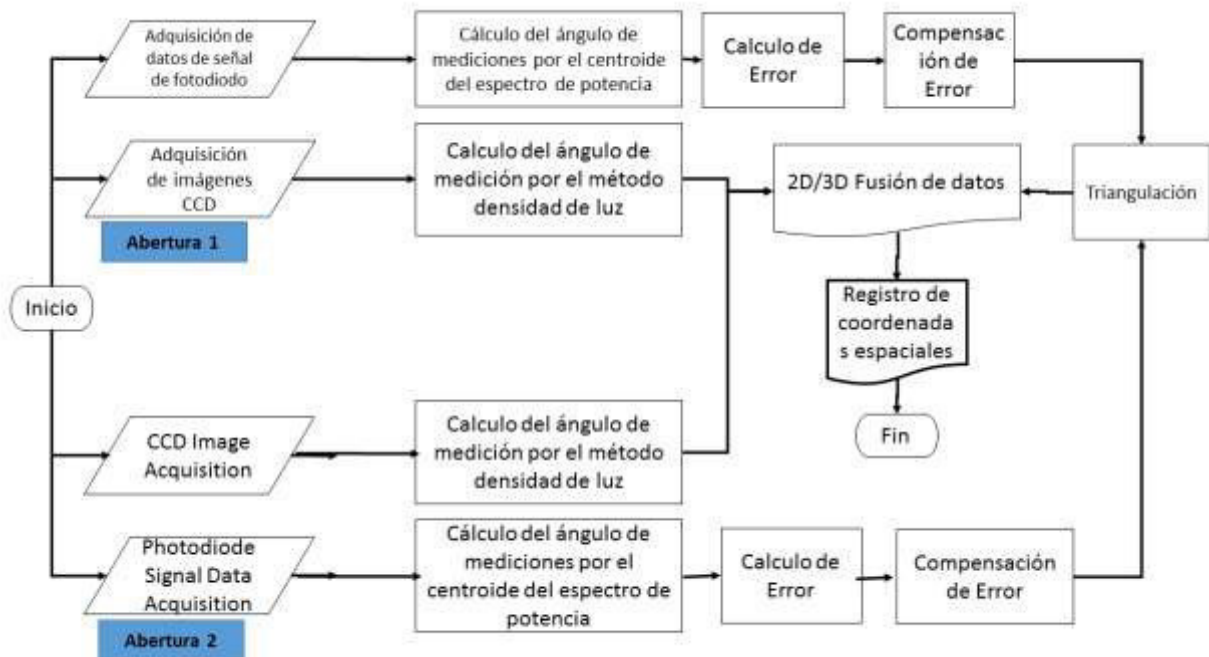


Figura 16. Diagrama de flujo general para medición de coordenadas espaciales

La coordenada real de los 15 puntos de medición fue medida dimensionalmente por un goniómetro y un medidor de flexión, con referencia a la coordenada de origen establecida. Se

colocó un emisor de luz incoherente en los puntos de control de medición uno a uno, las mediciones se realizaron en cada punto de medición con las dos aperturas utilizando un fotodiodo y un sensor CCD al mismo tiempo para cada uno de los 15 puntos de medición. La medición de ángulo por el sensor fotodiodo fue calculada por medio del centroide del espectro de potencia y su error de medición fue compensado por medio de la regresión SVM por utilizando de la ecuación 20. Con las bases de datos de ambas aperturas y de ambos sensores, se calcularon las coordenadas espaciales en coordenadas cartesianas por medio de triangulación dinámica. El uso de dos SBO separados a distancias conocidas, proporcionan una coordenada espacial en un plano mediante cálculos de triangulación dinámica. Este método de cálculo de coordenadas se denomina dinámico debido a la capacidad de rotación de las aberturas de exploración del SBO, permitiendo tener ángulos móviles que pueden formar triángulos con diferentes formas durante un período de tiempo muy corto. Cuando se forma un triángulo gracias al emisor de luz detectado por dos aperturas, se obtiene toda la información necesaria para calcular la coordenada del emisor de luz. Para calcular las coordenadas, se utiliza un conjunto de ecuaciones derivadas de la ley de los senos, como se describe en (Basaca-Preciado, et al., 2014).

Para nuestra aplicación con luz incoherente en lugar de Láser y el uso de dos aperturas SBO en lugar de un Láser de posicionamiento y una abertura de barrido se utilizó la Ley de los senos y Pitágoras para calcular la coordenada descrita en la Figura 17. Las ecuaciones 22 y 23 se derivan de estas leyes. Dónde: δ es la distancia conocida entre las aperturas ópticas, α_1 es el ángulo medido por la apertura 1, α_2 es el ángulo medido por la apertura 2, y (x_i, y_i) es la coordenada espacial de la i^{th} posición del emisor de luz. Las mediciones de coordenadas cartesianas se han calculado mediante triangulación dinámica (ver Figura 17), mientras que la medición de coordenadas cartesianas por sensor CCD se ha calculado por el método enfocado en la densidad

de luz, como se muestra en la Tabla 3. Obteniéndose un valor de error medio absoluto de 0.93 cm del sistema SBO y un valor de error medio absoluto de 1.25 cm del CCD.

$$\beta_1 = 180^\circ - \alpha_1 \quad (21)$$

$$x_i = \frac{\delta \sin \alpha_2 \cos(90 - \beta_1)}{\sin(\beta_1 + \alpha_2)} \quad (22)$$

$$y_i = \frac{-\delta \sin \alpha_2 \sin(90 - \beta_1)}{\sin(\beta_1 + \alpha_2)} - 50 \quad \text{para } \delta = 100 \text{ cm} \quad (23)$$

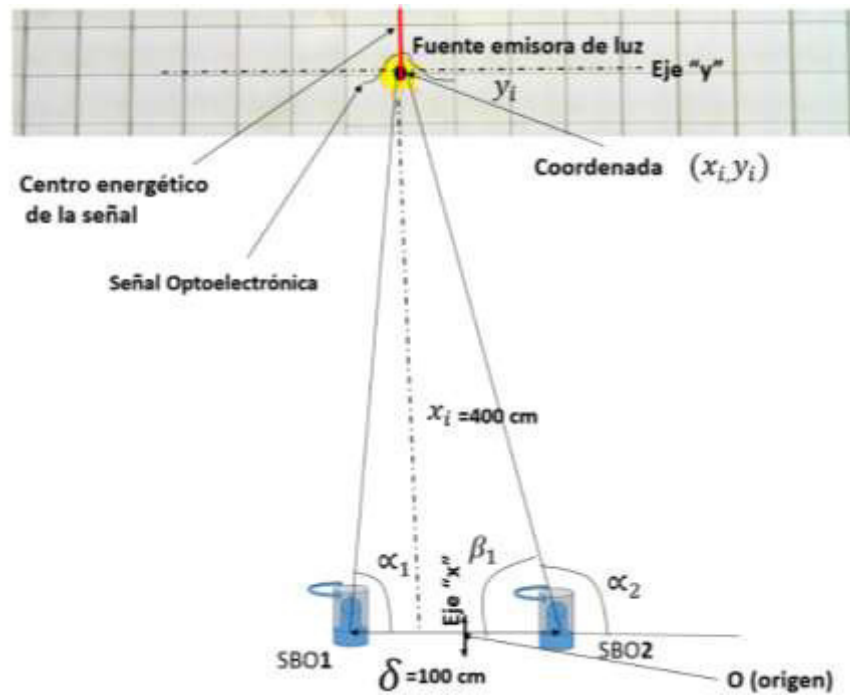


Figura 17. Sistema de triangulación dinámica

La fusión de los conjuntos de datos 2D y 3D, se realizó mediante los comandos "wfusfun" y "wfusmat" de la caja de herramientas Wavelet de MATLAB. El comando "wfusfun" fue

diseñado para la fusión de funciones, mientras que el comando "wfusmat" para la fusión de dos matrices, los métodos de fusión se clasifican como métodos simples (máx, min, media y rand) fusión ascendente, fusión descendente, fusión izquierda-derecha y fusión derecha-izquierda), (Hoseini, et al., 2013).

En esta experimentación se ha evaluado la fusión 2D y 3D por ambos métodos, se obtuvieron los mejores resultados usando el comando "wfusfun", la Tabla 4 y la Figura 18 muestran los resultados de fusión 2D y 3D. El error medio de medición con SBO es de 0.93 cm, mientras que el error medio de medición con CCD es de 1.25 cm, y después de la fusión 2D y 3D, los nuevos valores de medición (de fusión 2D y 3D) presentan un error medio de medición de 0.81cm, Mejorando la precisión de medición un 64,8% (disminuyendo el error promedio de 1.25 cm a 0.81 cm de error, lo que corresponde a una disminución del 35.2% del error).

Tabla 3. Mediciones 2D and 3D

Referencia				2D por CCD		3D por SBO												
Checkpoint	Real Cartesian Coordinates in cm			Coordinate in cm		Real Alpha Angles from Apertures in degrees		Alpha Angles Measurements by OSS without correction			Error Correction of Measurements by OSS					Coordinate in cm		
	#	x	y	z	y	Alp ha 1	Alpha2	Alpha 1	Alpha 2	Ap ha1 Error	Alph a2 Error	Err or Alpha 1	Err or Alpha 2	Al pha 1 Corre cted	Al pha2 Corre cted	B etha 2	y	Absolute Error by OSS
1	160.02	160.02	400.00	160.28	0.26	105.38	117.70	106.20	123.33	0.82	-5.63	0.81	5.58	5.39	7.75	2.25	159.72	0.30
2	160.02	137.16	400.00	136.87	0.29	102.29	115.07	74.16	119.23	28.13	-4.16	27.90	4.13	2.06	5.10	4.90	133.82	3.34
3	160.02	114.30	400.00	112.32	1.98	99.13	112.33	99.00	116.66	0.13	-4.33	0.13	4.29	13	2.37	7.63	114.08	0.22
4	160.02	91.44	400.00	92.27	0.83	95.91	109.47	93.84	117.76	2.07	-8.29	2.0	8.22	89	9.54	0.46	91.02	0.42
5	160.02	68.58	400.00	70.09	1.51	92.66	106.51	77.76	109.44	14.90	-2.93	14.78	2.91	54	6.53	3.47	67.55	1.03
6	160.02	45.72	400.00	46.42	0.70	90.61	76.54	68.82	80.22	21.79	-3.68	21.62	3.65	43	57	03.43	46.94	1.22
7	160.02	22.86	400.00	24.72	1.86	86.12	100.32	81.32	94.94	4.80	5.38	4.76	5.3	86.3	10.08	0.28	22.58	0.28
8	160.02	0.00	400.00	2.11	2.11	82.87	97.12	80.96	80.81	1.91	16.31	1.89	16.17	82.85	96.99	3.01	0.57	0.57
9	160.02	22.86	400.00	25.46	2.60	79.68	93.88	67.71	66.98	11.97	26.90	11.87	26.68	79.58	93.66	6.34	19	1.33
10	160.02	45.72	400.00	46.63	0.91	76.54	90.62	81.33	94.44	4.79	-3.83	4.75	3.80	58	65	9.35	49	0.23
11	160.02	68.58	400.00	70.46	1.88	73.49	87.31	59.62	72.49	13.87	14.82	13.76	14.70	73.38	87.19	2.81	69	1.11
12	160.02	91.44	400.00	93.20	1.76	70.53	84.05	75.96	74.70	5.43	9.35	5.39	7	57	97	6.03	73	1.29
13	160.02	114.30	400.00	115.05	0.75	67.67	80.84	63.30	76.54	4.37	4.30	4.3	4.2	67.63	80.80	9.20	114	0.56
14	160.02	137.16	400.00	137.66	0.50	64.93	77.71	65.58	60.72	0.65	16.99	0.64	16.85	64.94	77.57	02.43	139	1.97
15	160.02	160.02	400.00	160.77	0.75	62.30	74.62	57.04	71.76	5.26	2.86	5.2	2.8	62.26	74.60	05.40	160	0.02



Tabla 4. Resultados de los métodos de fusión 2D y 3D

y Cartesian Coordinate in cm				y Cartesian Coordinate Absolute Error in cm		
Real	3D OSS Measurement	2D CCD Measurement	3D/2D Fusion	From 3D OSS From 3D OSS	From 2D CCD	From 2D and 3D Fusion
-160.02	-159.72	-160.28	-160.11	0.30	0.26	0.09
-137.16	-133.82	-136.87	-134.74	3.34	0.29	2.42
-114.30	-114.08	-112.32	-113.56	0.22	1.98	0.74
-91.44	-91.02	-92.27	-91.39	0.42	0.83	0.05
-68.58	-67.55	-70.09	-68.31	1.03	1.51	0.27
-45.72	-46.94	-46.42	-46.78	1.22	0.70	1.06
-22.86	-22.58	-24.72	-23.22	0.28	1.86	0.36
0.00	0.57	-2.11	-0.23	0.57	2.11	0.23
22.86	24.19	25.46	24.57	1.33	2.60	1.71
45.72	45.49	46.63	45.83	0.23	0.91	0.11
68.58	69.69	70.46	69.92	1.11	1.88	1.34
91.44	92.73	93.20	92.87	1.29	1.76	1.43
114.30	114.86	115.05	114.92	0.56	0.75	0.62
137.16	139.13	137.66	138.69	1.97	0.50	1.53
160.02	160.00	160.77	160.24	0.02	0.75	0.22
Average						
Error				0.93	1.25	0.81
Min Error				0.02	0.26	0.05
Max Error				3.34	2.60	2.42
MSE Error				1.56	2.07	1.16



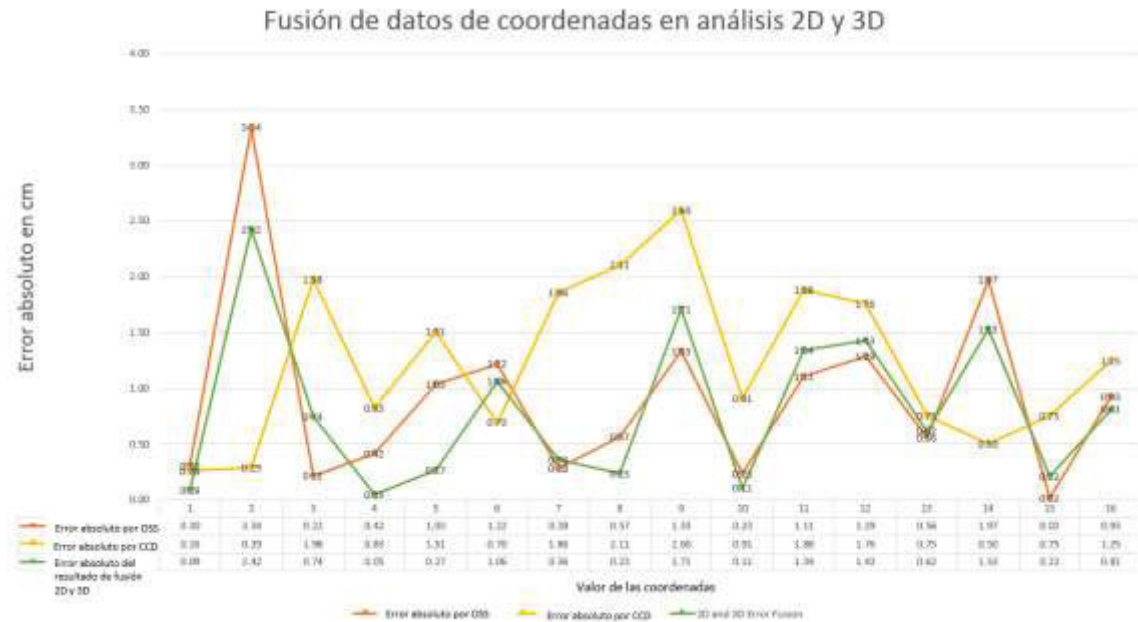


Figura 18. Resultados de fusión 2D y 3D

Las etapas de investigación en laboratorio y en el exterior proporcionaron resultados satisfactorios como un producto de las mejoras aplicadas al SBO. Y aun cuando en la etapa de investigación en el campo el error de medición disminuyó hasta un 35.2%, todavía hay oportunidades para aumentar la resolución y la precisión, ya que el error de medición en los puntos de verificación 2, 6, 9, 11, 12 y 14 son mayores de 1 cm, este error es causado por el ruido óptico del entorno que afecta tanto a los resultados del SBO como a los resultados de CCD. En futuras experimentaciones se implementarán láminas polarizadas para dirigir la luz desde el emisor de luz al sensor de fotodiodo SBO para evitar la luz de reflexión que actúa como ruido al sistema de visión. Entre las etapas de experimentación en el laboratorio y en el exterior se ha alcanzado el aumento del área de barrido y la mejora de la exactitud mediante la aplicación de la fusión 2D y 3D, dando lugar a una nueva etapa de experimentación, llamada experimentación de campo.

Los desafíos son:

- Incorporar una tercera apertura SBO, el uso de tres aperturas proporcionará el alcance completo de la medición de coordenadas espaciales 3D.
- Realizar mediciones en tiempo real mediante la integración de las etapas de procesamiento de la señal (adquisición, cálculos del centroide energético de la señal, compensaciones de errores, fusión y triangulación).
- Integrar el procesamiento de las señales en hardware, en un sistema embebido (FPGA, por sus siglas en inglés, Field Programmed Gate Array) para satisfacer los requisitos del sistema de monitoreo para continuar sus tareas con seguridad en condición de campo.
- Incluir elementos adaptativos a la tarea de procesamiento de señales para mejorar el sistema para que sea capaz de un buen desempeño en un ambiente desconocido.
- Implementación de un sistema de comunicación inalámbrica para el registro de mediciones.
- Realizar análisis de mediciones en estructuras para identificar sus patrones de comportamiento.

4.4 Evaluación del Ambiente Operacional

Con el propósito apegarse al objetivo propuesto de utilizar el SBO, en zonas con movimientos telúricos frecuentes se visitaron diferentes sitios para evaluar la posibilidad de probar el prototipo final en un ambiente de operación real. Los sitios evaluados fueron los que se muestran en la Figura 19.



Figura 19. Sitios propuestos para la prueba del prototipo en ambiente de operación real

Una vez evaluado el ambiente en cada sitio se concluyó que las torres de enfriamiento del Campo Geotérmico de Cerro Prieto y el puente vial ubicado en Calzada Lázaro Cárdenas y Gómez Morín, en la ciudad de Mexicali, reúnen las características adecuadas para realizar las pruebas del prototipo debido a que presentan movimientos frecuentes en sus estructuras ocasionando posibles desplazamientos y/o deformaciones y se encuentran sometidos a un ambiente de vibración permanente. Sin embargo, como se comentó en una sección anterior el prototipo desarrollado todavía presenta algunas desventajas para trabajar en este tipo de ambientes, por lo que se propone trabajar en mejorar su resolución y el alcance para no afectar el resultado de las mediciones.

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y recomendaciones

Es evidente que las estructuras que se encuentran en zonas con movimientos telúricos frecuentes, están continuamente sometidas a un ambiente de vibración, que lleva implícitos diferentes factores de riesgo, por lo que deben ser monitoreadas permanentemente.

5.1. Conclusiones

El resultado de este proyecto ha sido un sistema prototipo para apoyar a un usuario experto en la realización de análisis estructurales de estructuras usando la extracción de información de coordenadas espaciales de emisores de luz montados sobre una estructura como indicador para evaluar cualquier desplazamiento estructural. Por lo tanto, los usuarios podrán monitorear el estado de las estructuras, razonar sobre su estabilidad e integridad, identificar los riesgos potenciales y planificar las actividades de refuerzo. El sistema fue probado en un ambiente de controlado de laboratorio así como en un ambiente de operación real, concluyéndose lo siguiente:

- El sistema desarrollado tiene la ventaja de ser un método no invasivo, evitando la práctica de técnicas destructivas.
- Se determinó que en ambiente de vibración el sistema propuesto, en su estado actual, solo es capaz de monitorear una estructura, si la frecuencia de oscilación es menor a un hercio colocando el sistema es a una distancia máxima de 50cm, detectando desplazamientos mínimos de un centímetro.

- También se encontró que con la fusión 2D y 3D, el error de medición se disminuyó hasta un 35.2%. Sin embargo, esta experimentación se llevó cabo en horas donde el ruido asociado a intensidad de luz excesiva, provocada por el sol es mínimo.

5.2. Recomendaciones

Aunque los resultados de la experimentación muestran que el sistema puede trabajar en un ambiente de operación real, es claro que existen oportunidades de mejora que deben ser atendidas en un corto y mediano plazo, por lo tanto, se recomienda continuar trabajando en algunos que se deben mejorar, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Aumentar la resolución y alcance del sistema, así como la velocidad del barrido, para que opere de manera confiable en ambientes de vibración.
- Aunque en la presente tesis, además del sistema de barrido se utilizó un sistema de cámaras que permitió la fusión 2D y 3D, para aumentar la calidad de las mediciones, se recomienda experimentar con otro sistema de referencia como puede ser un sistema con 4 aperturas de barrido o un GPS, lo que permitiría con mayor exactitud los desplazamientos ocasionados por el propio uso de la estructura, de los desplazamientos asociados a los movimientos telúricos.
- También es importante trabajar en la minimización del ruido óptico asociado a los efectos de luz excesiva ocasionados por la intensidad de la luz solar, lo que permitirá al sistema realizar monitoreos permanentes durante todo el día y a mayores distancias.

PRODUCTOS DERIVADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Publicaciones en Revistas Indizadas y Arbitradas

- **Rivera- Castillo, J.**, Flores- Fuentes, W., Rivas- López, M., Sergiyenko, O., Gonzalez- Navarro, F. F., Rodríguez- Quiñonez, J. C., ... & Básaca- Preciado, L. C. (2016). Experimental image and range scanner datasets fusion in SHM for displacement detection. *Structural Control and Health Monitoring*.
- Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., González-Navarro, F. F., **Rivera-Castillo, J.**, Hernández-Balbuena, D., & Rodríguez-Quíñonez, J. C. (2014). Combined application of Power Spectrum Centroid and Support Vector Machines for measurement improvement in Optical Scanning Systems. *Signal Processing*, 98, 37-51. ELSEVIER.
- Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., Rodríguez-Quíñonez, J. C., Hernández-Balbuena, D., & **Rivera-Castillo, J.** (2014). Energy center detection in light scanning sensors for structural health monitoring accuracy enhancement. *IEEE Sensors Journal*, 14(7), 2355-2361.

Capítulos de Libro

- **Castillo, J. R.**, Rivas-Lopez, M., Flores-Fuentes, W., Sergiyenko, O., Rodríguez- Quiñonez, J. C., & Hernandez-Balbuena, D. (2016). Machine Vision Optical Scanners for Landslide Monitoring. In *Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision* (pp. 206-235). Edited by Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quíñonez. ISBN: 9781522506324 (hardcover). ISBN: 9781522506331 (ebook).
- Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Hernandez-Balbuena, D., Sergiyenko, O., Rodríguez-Quíñonez, J. C., **Rivera-Castillo, J.**, ... & Basaca-Preciado, L. C. (2016). Applying Optoelectronic Devices Fusion in Machine Vision: Spatial Coordinate Measurement. In *Developing and Applying Optoelectronics in Machine Vision* (pp.1-37). Edited by Oleg Sergiyenko and Julio C. Rodriguez-Quíñonez. ISBN: 9781522506324 (hardcover). ISBN: 9781522506331 (ebook).
- Flores-Fuentes, W., Rivas-López, M., Sergiyenko, O., Rodriguez-Quíñonez, J. C., Hernandez-Balbuena, D., & **Rivera-Castillo, J.** (2014). Accuracy Enhancement of a SHM System by Light Scanning Sensor Improvement. In *Transactions on Engineering Technologies* (pp. 147-160). Edited by Haeng Kon Kim, Sio-long Ao, Mahyar A. Amouzegar. Springer Netherlands. ISBN: 978-94-017-9114-4. ISBN: 978-94-017-9115-1 (eBook).

- Rivas-Lopez M., Flores-Fuentes W., **Rivera-Castillo J.**, Sergiyenko, O., and Hernández-Balbuena. D. (2013). A Method and Electronic Device to Detect the Optoelectronic Scanning Signal Energy Centre. In *Optoelectronics - Advanced Materials and Devices* (pp.1 - 30). Edited by Sergei L. Pyshkin and John M. Ballato. Croatia: In Tech, 2012., ISBN. 978-953-51-0922-8.

Memorias de Congreso

- Flores-Fuentes, W., Rivas-López, M., Hernández-Balbuena, D., Rodríguez-Quiñonez, J. C., Hoyos-Perales, E. M., **Rivera-Castillo, J.**, ... & Hernández, W. (2016, June). Online SHM Optical Scanning Data Exchange. In *Industrial Electronics (ISIE), 2016 IEEE 25th International Symposium on* (pp. 940-945). IEEE. Santa Clara, USA. June 8-20, 2016. ISBN: 978-1-5090-0872-8/16/
- Flores-Fuentes, W., Rodríguez-Quiñonez, J. C., Hernandez-Balbuena, D., Rivas-López, M., Sergiyenko, O., **Rivera-Castillo, J.**, ... & Mayorga-Ortiz, P. (2015, June). Photodiode and charge-coupled device fused sensors. In *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (pp. 966-971). IEEE. ISBN: 978-1-4673-7553-5.
- Rivas-López, M., Gomez-Sanchez, C. A., **Rivera-Castillo, J.**, Sergiyenko, O., Flores-Fuentes, W., Rodríguez-Quiñonez, J. C., & Mayorga-Ortiz, P. (2015, June). Vehicle detection using an infrared light emitter and a photodiode as visualization system. In *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (pp. 972-975). IEEE. ISBN: 978-1-4673-7553-5.
- Flores-Fuentes, W., Rodriguez-Quinonez, J. C., Hernandez-Balbuena, D., Rivas-López, M., Sergiyenko, O., Gonzalez-Navarro, F. F., & **Rivera-Castillo, J.** (2014, June). Machine vision supported by artificial intelligence. In *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. ISBN: 978-1-4799-2398-4/14 2014 IEEE.
- Rivas-López, M., Sergiyenko, O., **Rivera-Castillo, J.**, Flores-Fuentes, W., Rodríguez-Quiñonez, J. C., Hernández-Balbuena, D., & Taddei-Bringas, J. L. (2014, June).

Scanning for light detection and Energy Centre Localization Methods assesment in vision systems for SHM. In 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 1955-1960). IEEE. ISBN: 978-1-4799-2398-4/14 2014 IEEE.

- **Rivera-Castillo, J.**, Rivas-López, M., Nieto-Hipolito, J. I., Sergiyenko, O., Flores-Fuentes, W., Hernandez-Balbuena, D., ... & Platt-Carrillo, J. A. (2014, June). Structural Health Monitoring based on Optical Scanning Systems and SVM. In 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 1961-1966). IEEE. ISBN: 978-1-4799-2398-4/14. 2014 IEEE.

- Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., **Rivera-Castillo, J.**, & Hernandez-Balbuena, D. (2013). Analog signal processing in light scanning sensors for structural health monitoring accuracy enhancement. In Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (Vol. 2). ISSN: 2078-0958 (PRINT); ISSN: 2078-0966 (ONLINE) ISBN: 978-988-19253-1-2.

- Flores-Fuentes, W., Rivas-López, M., Sergiyenko, O., **Rivera-Castillo, F. G. N. J.**, & Hernández-Balbuena, D. (2013). Digital Signal Processing on Optoelectronic for SHM. In Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (Vol. 1). ISSN: 2078-0958 (PRINT); ISSN: 2078-0966 (ONLINE) ISBN: 978-988-19252-3-7.

- Fuentes, W. F., Lopez, M. R., Sergiyenko, O., & **Castillo, J. R.** (2011, January). Comparison of signal peak detection algorithms in the search of the signal energy center for measuring with optical scanning. In Proc. IEEE Section Mexico, IEEE ROC&C2011: XXII autumn international conference on communications, computer, electronics, automation, robotics and industrial exposition, Guerrero, Mexico. ISBN: 978-607-95630-1-1

Referencias Bibliográficas

- Balsamo, L., & Betti, R. (2015). Data-based structural health monitoring using small training data sets. *Structural Control and Health Monitoring*, 22(10), 1240-1264.
- Basaca-Preciado, L. C., Rodríguez-Quinonez, J. C., Segiyenko, O., Flores-Fuentes, W., Mercorelli, P., & Murrieta-Rico, F. N. (2014, October). Accuracy improvement of vision system for mobile robot navigation by finding the energetic center of laser signal. In *Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE* (pp. 2406-2411). IEEE.
- Banerjee, T. P., & Das, S. (2012). Multi-sensor data fusion using support vector machine for motor fault detection. *Information Sciences*, 217, 96-107.
- Basaca-Preciado, L. C., Sergiyenko, O. Y., Rodríguez-Quinonez, J. C., Garcia, X., Tyrsa, V. V., Rivas-Lopez, M., ... & Tabakova, I. (2014). Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot. *Optics and Lasers in Engineering*, 54, 159-169.
- Bornn, L., Farrar, C. R., Park, G., & Farinholt, K. (2009). Structural health monitoring with autoregressive support vector machines. *Journal of Vibration and Acoustics*, 131(2), 021004.
- Bloch, I., & MAITRE, H. E. N. R. I. (1997, October). Data fusion in 2D and 3D image processing: An overview. In *Computer Graphics and Image Processing, 1997. Proceedings., X Brazilian Symposium on* (pp. 127-134). IEEE.
- Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., Konopka, E., & Tarczyński, L. (2015). Monitoring horizontal displacements in a vertical profile of a tall industrial chimney using Global Positioning System technology for detecting dynamic characteristics. *Structural Control and Health Monitoring*, 22(7), 1002-1023.
- Buluta, A., Singha, A. K., Shinb, P., Fountainb, T., Jassob, H., Yanc, L., & Elgamalc, A. (2005, March). Real-time nondestructive structural health monitoring using support vector machines and wavelets. In *Proc. of SPIE Vol (Vol. 5770, p. 181)*.
- Cerioti, M., Mottola, L., Picco, G. P., Murphy, A. L., Guna, S., Corra, M., ... & Zanon, P. (2009, April). Monitoring heritage buildings with wireless sensor networks: The Torre Aquila deployment. In *Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (pp. 277-288). IEEE Computer Society.
- Chaouch, M., & Verroust-Blondet, A. (2007, September). A new descriptor for 2D depth image indexing and 3D model retrieval. In *Image Processing, 2007. ICIP 2007. IEEE International Conference on* (Vol. 6, pp. VI-373). IEEE.
- Chintalapudi, K., Fu, T., Paek, J., Kothari, N., Rangwala, S., Caffrey, J., ... & Masri, S. (2006). Monitoring civil structures with a wireless sensor network. *IEEE Internet Computing*, 10(2), 26-34.
- Cristina, F., Dapoto, S. H., Vegas, J., Artola, V., Russo, C. C., & Abásolo Guerrero, M. J. (2007). Desarrollo de un escáner 3D mediante cámaras estereoscópicas e iluminación láser. In *XIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*.
- Derriso, M. M., DeSimio, M. P., McCurry, C. D., Schubert Kabban, C. M., & Olson, S. E. (2014). Industrial Age non-destructive evaluation to Information Age structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, 13(6), 591-600.
- Doherty, J. E. (1987). Nondestructive Evaluation, Chapter 12 in *Handbook on Experimental Mechanics*, AS Kobayashi Edt. Society for Experimental Mechanics, Inc.

- Dworakowski, Z., Kohut, P., Gallina, A., Holak, K., & Uhl, T. (2016). Vision-based algorithms for damage detection and localization in structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(1), 35-50.
- Faceli, K., De Carvalho, A. C. P. L. F., & Rezende, S. O. (2002, November). Combining intelligent techniques for sensor fusion. In *Neural Information Processing, 2002. ICONIP'02. Proceedings of the 9th International Conference on (Vol. 4, pp. 1998-2002)*. IEEE.
- Feng, D., & Feng, M. Q. (2015). Vision-based multipoint displacement measurement for structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*.
- Feng, D., Feng, M. Q., Ozer, E., & Fukuda, Y. (2015). A vision-based sensor for noncontact structural displacement measurement. *Sensors*, 15(7), 16557-16575.
- Feng, M. Q., Fukuda, Y., Feng, D., & Mizuta, M. (2015). Nontarget vision sensor for remote measurement of bridge dynamic response. *Journal of Bridge Engineering*, 20(12), 04015023.
- Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., Gonzalez-Navarro, F. F., Rivera-Castillo, J., Hernandez-Balbuena, D., & Rodríguez-Quíñonez, J. C. (2014). Combined application of power spectrum centroid and support vector machines for measurement improvement in optical scanning systems. *Signal Processing*, 98, 37-51.
- Filzmoser, P., & Gschwandtner, M. (2012). mvoutlier: Multivariate outlier detection based on robust methods. R package version, 1(7).
- Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., Rodríguez-Quíñonez, J. C., Hernández-Balbuena, D., & Rivera-Castillo, J. (2014). Energy center detection in light scanning sensors for structural health monitoring accuracy enhancement. *IEEE Sensors Journal*, 14(7), 2355-2361.
- Flores-Fuentes, W., Rodríguez-Quíñonez, J. C., Hernandez-Balbuena, D., Rivas-López, M., Sergiyenko, O., Rivera-Castillo, J., ... & Mayorga-Ortiz, P. (2015, June). Photodiode and charge-coupled device fused sensors. In *Industrial Electronics (ISIE), 2015 IEEE 24th International Symposium on (pp. 966-971)*. IEEE.
- Forkuo, E. K. (2005). Automatic fusion of photogrammetric imagery and laser scanner point clouds (Doctoral dissertation, The Hong Kong Polytechnic University).
- Franco, J. M., Gómez, D., Murcia, J. H., Thomson, P., & Marulanda, J. (2011). Desarrollo e implementación de un sistema láser para caracterización dinámica y medición de desplazamientos en estructuras civiles/Development and implementation of a laser system for dynamic characterization and displacement measurement of civil structures. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (60), 170.
- Grout, V., & Houlden, N. (2014). Taking computer science and programming into schools: The Glyndŵr/BCS Turing project. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 141, 680-685.
- Hoseini, S. A., & Ashraf, M. R. (2013). Computational complexity comparison of multi-sensor single target data fusion methods by matlab. arXiv preprint arXiv:1307.3005.
- Husken, M., Brauckmann, M., Gehlen, S., & Von der Malsburg, C. (2005, June). Strategies and benefits of fusion of 2D and 3D face recognition. In *Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops, 2005. CVPR Workshops. IEEE Computer Society Conference on (pp. 174-174)*. IEEE.
- Inman, D. J., Ahmadian, M., & Claus, R. O. (2001). Simultaneous active damping and health monitoring of aircraft panels. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 12(11), 775-783.

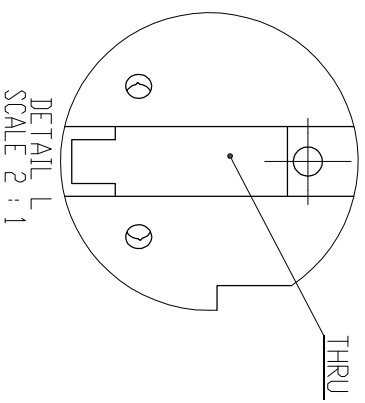
- Kihara, M., & Ohno, H. (2003, June). Distributed optical fiber sensor using Brillouin scattering. In Conference on Lasers and Electro-Optics (p. CFC3). Optical Society of America.
- Ko, J. M., & Ni, Y. Q. (2005). Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering structures*, 27(12), 1715-1725.
- Kohut, P., Holak, K., Uhl, T., Ortyl, Ł., Owerko, T., Kuras, P., & Kocierz, R. (2013). Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurements. *Structural Health Monitoring*, 12(5-6), 411-429.
- Hou, B., Wu, Z. Y., & Grosso, P. (2011). Charge-coupled devices combined with centroid algorithm for laser beam deviation measurements compared to a position-sensitive device. *Optical Engineering*, 50(3), 033603-033603.
- Li, Y., Zheng, Q., Sharf, A., Cohen-Or, D., Chen, B., & Mitra, N. J. (2011, November). 2D-3D fusion for layer decomposition of urban facades. In Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on (pp. 882-889). IEEE.
- Li, B., Lu, Y., Li, C., Godil, A., Schreck, T., Aono, M., ... & Fu, H. (2015). A comparison of 3D shape retrieval methods based on a large-scale benchmark supporting multimodal queries. *Computer Vision and Image Understanding*, 131, 1-27.
- Li, H., Ding, H., Huang, D., Wang, Y., Zhao, X., Morvan, J. M., & Chen, L. (2015). An efficient multimodal 2D+ 3D feature-based approach to automatic facial expression recognition. *Computer Vision and Image Understanding*, 140, 83-92.
- Li, J., Hao, H., Fan, K., & Brownjohn, J. (2015). Development and application of a relative displacement sensor for structural health monitoring of composite bridges. *Structural Control and Health Monitoring*, 22(4), 726-742.
- Liu, W., Tang, B., & Jiang, Y. (2010). Status and problems of wind turbine structural health monitoring techniques in China. *Renewable Energy*, 35(7), 1414-1418.
- Lombillo, I., Blanco, H., Pereda, J., Villegas, L., Carrasco, C., & Balbás, J. (2016). Structural health monitoring of a damaged church: design of an integrated platform of electronic instrumentation, data acquisition and client/server software. *Structural Control and Health Monitoring*, 23(1), 69-81.
- Mehta, V., & El Zarki, M. (2004). A Bluetooth based sensor network for civil infrastructure health monitoring. *Wireless Networks*, 10(4), 401-412.
- Mukhopadhyay, S. C., & Ihara, I. (2011). Sensors and Technologies for Structural Health Monitoring: A Review. *New Developments in Sensing Technology for SHM*, LNEE 96, Mukhopadhyay SC.
- Qu, R., Xu, J., Patankar, R., Yang, D., Zhang, X., & Guo, F. (2006). An implementation of a remote diagnostic system on rotational machines. *Structural Health Monitoring*, 5(2), 185-193.
- Ramos, L. F., Marques, L., Lourenço, P. B., De Roeck, G., Campos-Costa, A., & Roque, J. (2010). Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: two case studies. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24(5), 1291-1305.
- Rivas Lopez, M., Sergiyenko, O. Y., Tyrsa, V. V., Hernandez Perdomo, W., Devia Cruz, L. F., Hernandez Balbuena, D., ... & Nieto Hipólito, J. I. (2010). Optoelectronic method for structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, 9(2), 105-120.
- Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., Rivera-Castillo, J., Flores-Fuentes, W., Rodriguez-Quinonez, J. C., Hernandez-Balbuena, D., & Taddei-Bringas, J. L. (2014, June). Scanning for light detection and Energy Centre Localization Methods assesment in vision systems for SHM. In

- Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on (pp. 1955-1960). IEEE.
- Rivas, M., Sergiyenko, O., Hernández-Balbuena, D., Flores, W., Rivera, J., Sánchez-Bueno, A., Nieto_Hipólito J.I., (2014). Informe final del proyecto Método y Sistema de Barrido Óptico para Monitoreo de Integridad Estructural en Zonas Sísmicas.
- Rivas, M., Flores, W., Rivera, J., Sergiyenko, O., Hernández-Balbuena, D., & Sánchez-Bueno, A. (2013). A method and electronic device to detect the optoelectronic scanning signal energy centre. In *Optoelectronics-Advanced Materials and Devices*. InTech.
- Rodriguez-Quinonez, J. C., Sergiyenko, O., Gonzalez-Navarro, F. F., Basaca-Preciado, L., & Tyrsa, V. (2013). Surface recognition improvement in 3D medical laser scanner using Levenberg–Marquardt method. *Signal Processing*, 93(2), 378-386.
- Rodriguez-Quinonez, J. C., Hernandez-Balbuena, D., Segiyenko, O., Rivas-Lopez, M., Flores-Fuentes, W., & Basaca-Preciado, L. C. (2014, June). Improve laser detection in CCD for integrated photogrammetry-Laser scanner. In *Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on (pp. 1944-1948)*. IEEE.
- Rothfeder, J. L., Feng, S., & Rath, T. M. (2003, June). Using corner feature correspondences to rank word images by similarity. In *Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, 2003. CVPRW'03. Conference on (Vol. 3, pp. 30-30)*. IEEE.
- Savran, A., Sankur, B., & Bilge, M. T. (2012). Comparative evaluation of 3D vs. 2D modality for automatic detection of facial action units. *Pattern recognition*, 45(2), 767-782.
- Sheng, C., Dawei, T., Guozheng, L., & Juan, Y. (2002, October). Fusing range and 2-D images in multi-sensor for robot vision. In *TENCON'02. Proceedings. 2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering (Vol. 1, pp. 565-568)*. IEEE.
- Schenk, T., & Csathó, B. (2002). Fusion of LIDAR data and aerial imagery for a more complete surface description. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/A), 310-317.
- Seitz, S. M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., & Szeliski, R. (2006, June). A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In *Computer vision and pattern recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on (Vol. 1, pp. 519-528)*. IEEE.
- Sergiyenko, O. Y., Tyrsa, V. V., Hernandez, W., Starostenko, O., & Rivas, M. (2009). Dynamic laser scanning method for mobile robot navigation. *제어로봇시스템학회 국제학술대회 논문집*, 4884-4889.
- Smola, A. J., & Schölkopf, B. (2004). A tutorial on support vector regression. *Statistics and computing*, 14(3), 199-222.
- Sonka, M., Hlavac, V., & Boyle, R. (2014). *Image processing, analysis, and machine vision*. Cengage Learning.
- Worden, K., & Manson, G. (2007). The application of machine learning to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 515-537.
- Wu, L. J., Casciati, F., & Casciati, S. (2014). Dynamic testing of a laboratory model via vision-based sensing. *Engineering structures*, 60, 113-125.

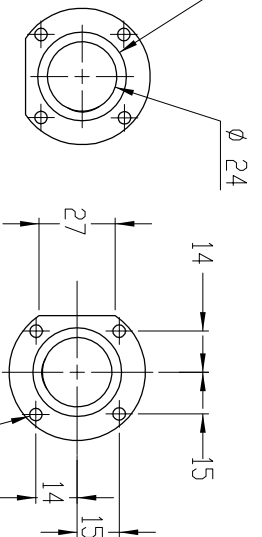
- Xu, Q. (2014). Impact detection and location for a plate structure using least squares support vector machines. *Structural Health Monitoring*, 13(1), 5-18.
- Zhao, X., Li, W., Zhou, L., Song, G., Ba, Q., Ho, S. C. M., & Ou, J. (2015). Application of support vector machine for pattern classification of active thermometry-based pipeline scour monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 22(6), 903-918.
- Zhou, Y. L., Figueiredo, E., Maia, N., Sampaio, R., & Perera, R. (2015). Damage detection in structures using a transmissibility-based Mahalanobis distance. *Structural Control and Health Monitoring*, 22(10), 1209-1222.

A N E X O 1

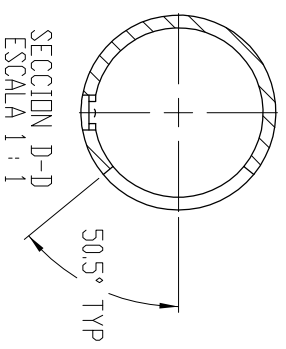
Dibujos técnicos para la construcción de la apertura de barrido óptico



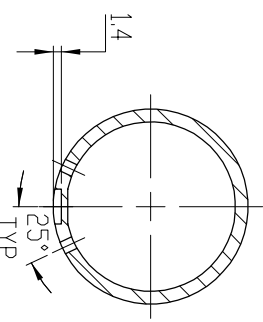
DETALLE L
ESCALA 2 : 1



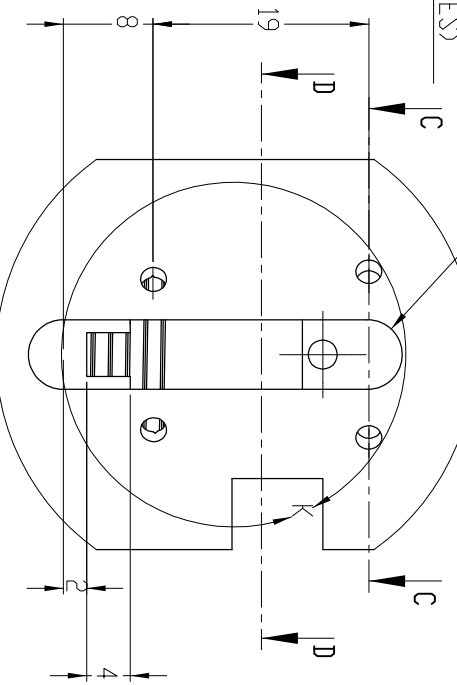
DRILL & TAP
Ø 4.369 THRU ALL
(4 PLACES)



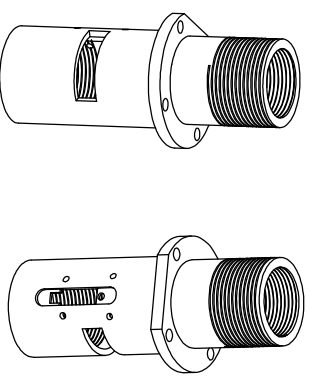
SECCION D-D
ESCALA 1 : 1



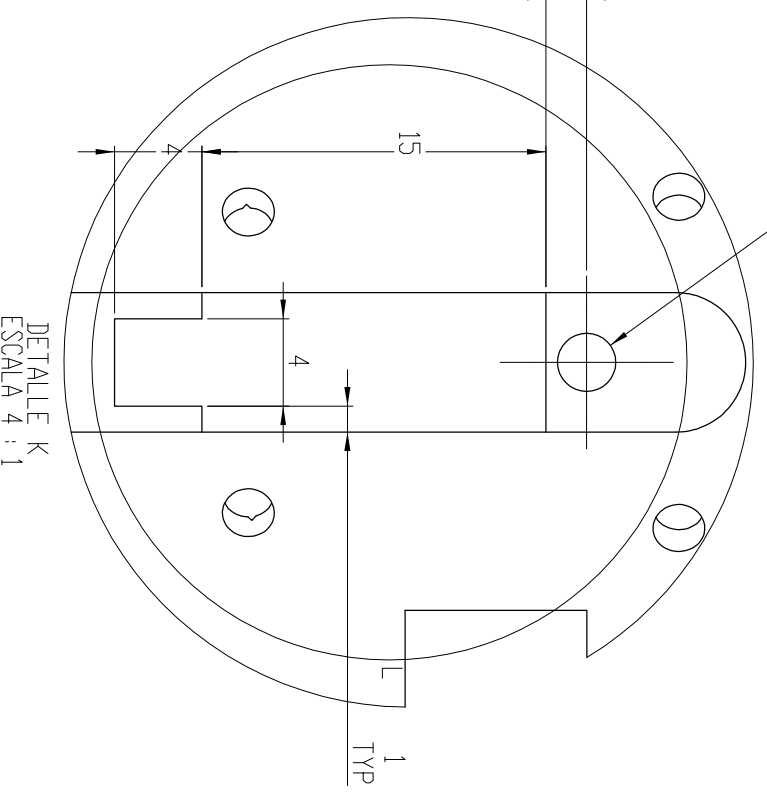
SECCION C-C
ESCALA 1 : 1



DETALLE A
ESCALA 2 : 1

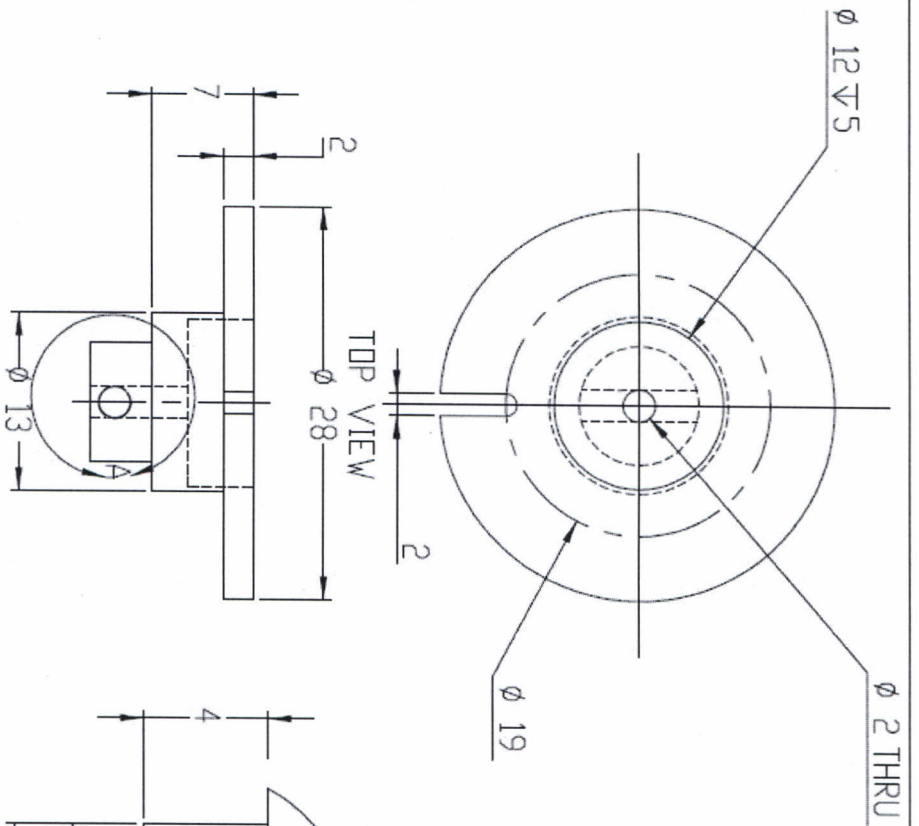


Ø 2.5 THRU



DETALLE K
ESCALA 4 : 1

INFORMACION CONFIDENCIAL Y DE MARCA		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE		FECHA		TÍTULO:	
LA INFORMACION INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A UABC. QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE LA UABC.		LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILIMETROS TOLERANCIAS: FRACCIONALES ± ANGULOS, MEDIDAS ± PLEGUES 2 LUGARES DECIMALES ± 3 LUGARES DECIMALES ±		DIBUJADO		05/10/13		SOPORTE	
		INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMETRICA POR MATERIAL		VERIFICADO				N° DE DIBUJO	
		ACABADO		INGENIERIA				REV	
		NO CAMBIE LA ESCALA		FABRICACION				ESCALA: 1:2 PESD:	
		SIGUIENTE ENSAMBLAJE		CALIDAD				HOJA 1 DE 1	
		UTILIZADO EN		COMENTARIOS:					
		APLICACION							



FRONT VIEW

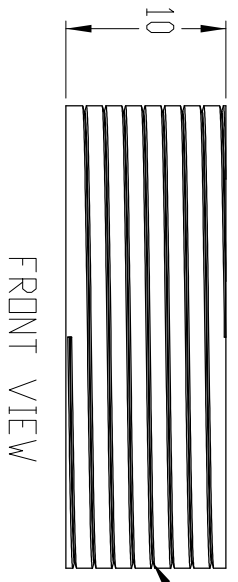
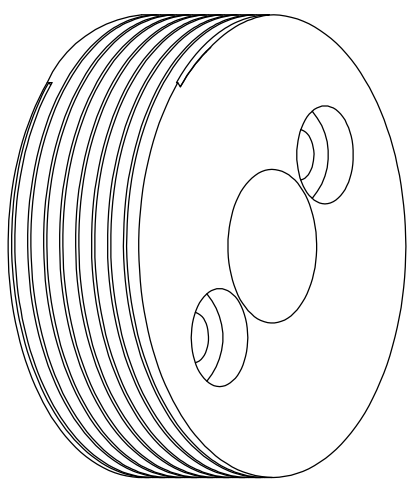
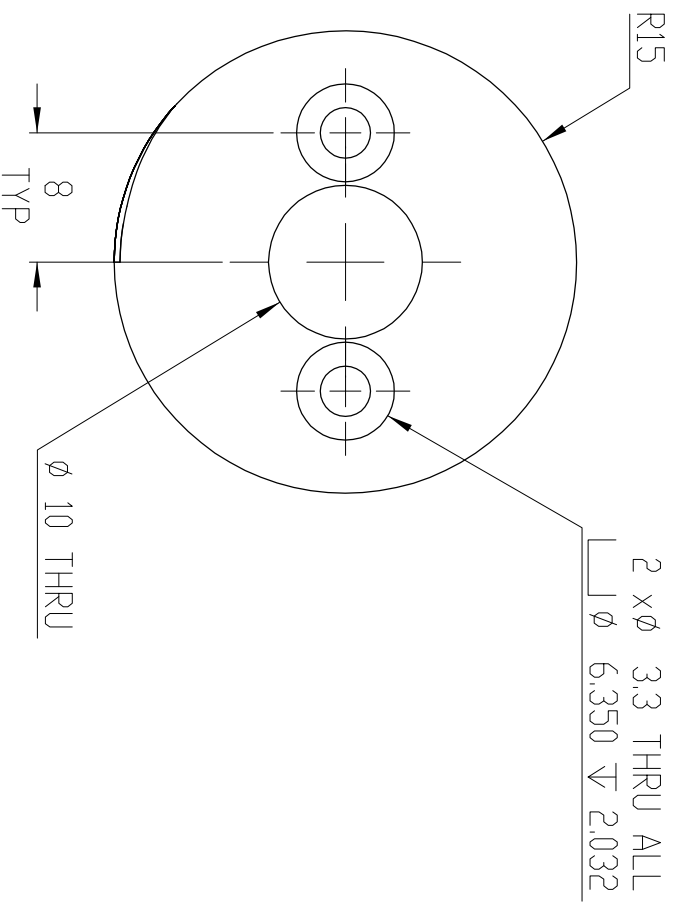
DETALLE A
ESCALA 4 : 1

ISOMETRIC VIEW

DRILL & TAP #4-40 THRU

INFORMACION CONFIDENCIAL
Y DE MARCA
LA INFORMACION INCLUIDA EN ESTE
DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A
UARC, QUEHA PROHIBIDA LA
REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL SIN EL
PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO
DE LA UARC.

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILIMETROS TOLERANCIAS: FRACCIONALES ± ANGULOS MAQUINA ± PUNTEOS 2 LUGARES DECIMALES ± 3 LUGARES DECIMALES ±	DIBUJADO	NOMBRE	FECHA	TÍTULO:
INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMETRICA POR MATERIAL	ROSY R.		05/10/13	BASE PARA ESPEJO
ACABADO	VERIFICADO			TIPO: A
	INGENIERIA			Nº DE DIBUJO
	FABRICACION			REV
	COMENTARIOS:			ESCALA: 1:1
ESTANTE DESMONTABLE	UTILIZADO EN	NO CAMBIE LA ESCALA		PESO:
APLICACION				HOJA 1 DE 1

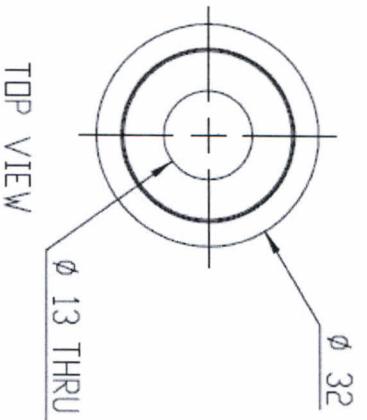


DRILL & TAP

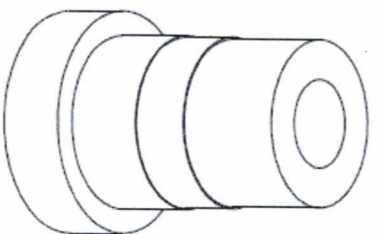
INFORMACION CONFIDENCIAL
Y DE MARCA

LA INFORMACION INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A UABC. QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVILO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE LA UABC.

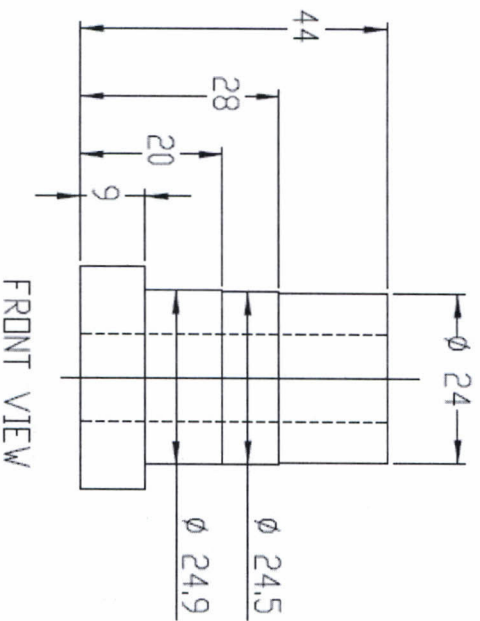
APLICACION		NO CAMBIE LA ESCALA	SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN PULGADAS TOLERANCIAS: FRACCIONAL ± ANGULAR MAQUINA ± 2 LUGARES DECIMALES ± 3 LUGARES DECIMALES ±	DIBUJADO	NDMBRE	FECHA	TÍTULO: BASE BLANCA CON ROSCA	
SIGUIENTE ENSAMBLAJE		ACABADO	INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMETRICA POR: MATERIAL	VERIFICADO	RSY R.	05/10/13		
UTILIZADO EN				INGENIERIA				
MATERIAL				FABRICACION				
COMENTARIOS:				CALIDAD			TAMANO N.º DE DIBUJO A 002	
ACABADO								ESCALA: 1:1 PESO: HOJA 1 DE 1
MATERIAL								
REVISIONES:							REV	



TOP VIEW



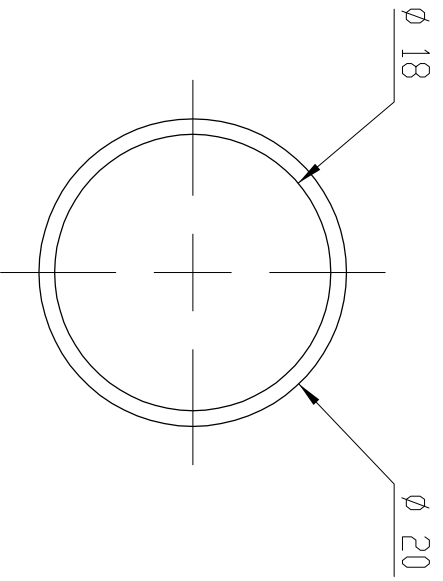
ISOMETRIC VIEW



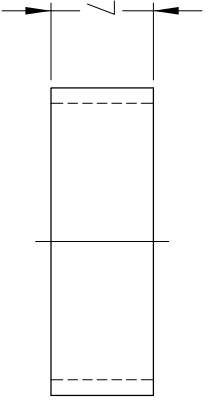
FRONT VIEW

INFORMACION CONFIDENCIAL
Y DE MARCA
LA INFORMACION INCLUIDA EN ESTE
DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A
UABC, QUEDA PROHIBIDA LA
REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL, SIN EL
PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO
DE LA UABC.

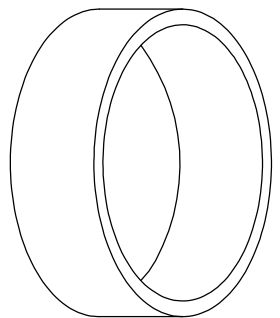
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO		NOMBRE		FECHA	
LAS COTAS SE EXPRESAN EN PULGADAS		RDS Y R.		05/10/13	
TOLERANCIAS		VERIFICADO			
FRACCIONES +		INGENIERIA			
ANGULAR, MEDIDA +		FABRICACION			
RUEBLES		CALIDAD			
2 LUGARES DECIMALES +		COMENTARIOS			
3 LUGARES DECIMALES +		DIBUJADO			
INTERPRETAR TOLERANCIA		RDS Y R.			
GEOMETRICA POR:		FECHA			
MATERIAL		TITULO:		CONECTOR	
ACABADO		TAMAO		N.º DE DIBUJO	
SIGNIFICANTE ENSEMBLAGE		A		REV	
UTILIZADO EN		ESCALA: 1:1		PESD.	
NO CAMBIE LA ESCALA		HOJA 1 DE 1			



TOP VIEW



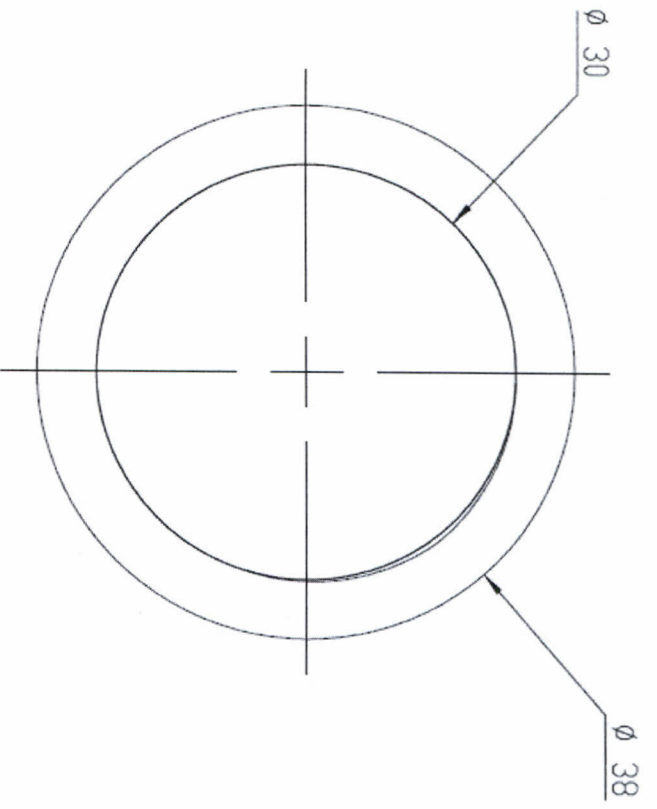
FRONT VIEW



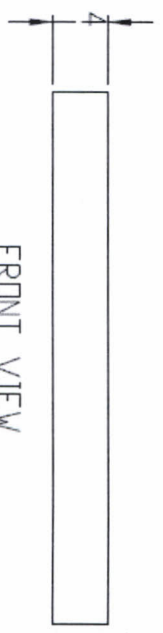
ISOMETRIC VIEW

INFORMACION CONFIDENCIAL
Y DE MARCA
LA INFORMACION INCLUIDA EN ESTE
DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A
UABC. QUEDA PROHIBIDA LA
REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL SIN EL
PREVILO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO
DE LA UABC.

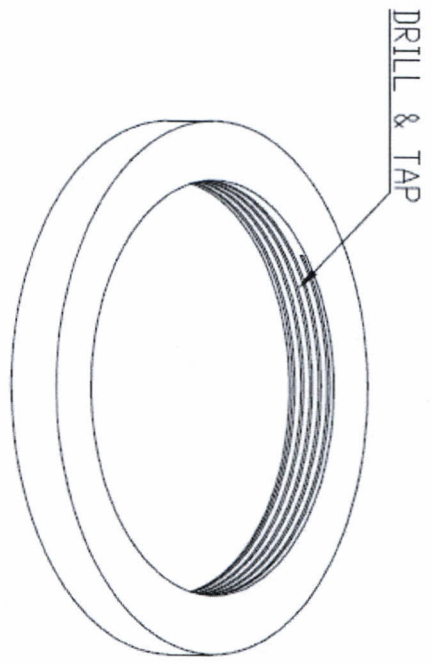
		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN PULGADAS TOLERANCIAS: FRACCIONAL: ± ANGULAR: MAQUINA ± ANGULAR: MAQUINA ± PLEGUE 2 LUGARES DECIMALES ± 3 LUGARES DECIMALES ±		DIBUJADO		NOMBRE		FECHA	
		INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMETRICA POR: MATERIAL		VERIFICADO					
		ACABADO		INGENIERIA					
		NO CAMBIE LA ESCALA		FABRICACION					
SIGUIENTE ENSAMBLAJE		UTILIZADO EN		CALIDAD		COMENTARIOS:			
APLICACION								TITULO: ANILLO	
								TAMAÑO N.º DE DIBUJO A 001	
								ESCALA: 1:1 PESO: HOJA 1 DE 1	
								REV	



TOP VIEW



FRONT VIEW

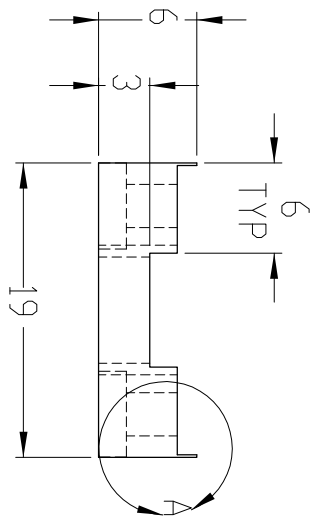


ISOMETRIC VIEW

INFORMACION CONFIDENCIAL
Y DE MARCA

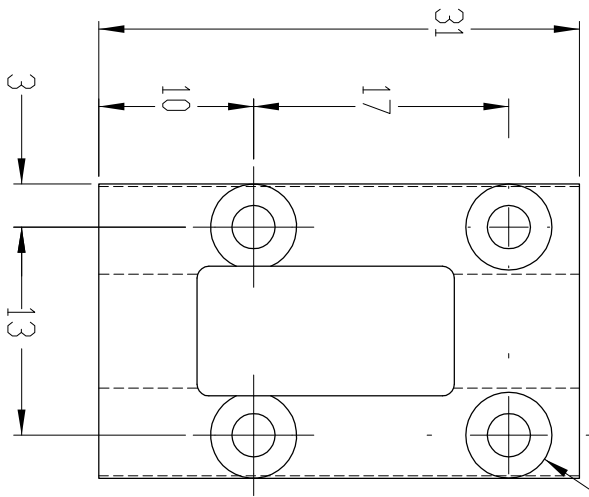
LA INFORMACION INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A UABC. QUINTA PROHIBIDA LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVILO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE LA UABC.

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO	DIBUJADO	NOMBRE	FECHA	TÍTULO: ANILLO CON ROSCA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN PULGADAS	VERIFICADO	ROSY R.	05/10/13	
TOLERANCIAS: FRACCIONAL + ANGULO MAQUINA + 2 LUGARES DECIMALES + 3 LUGARES DECIMALES +	INGENIERIA			
INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMETRICA FORN MATERIAL	FABRICACION			
ACABADO	COMENTARIOS:			TIPO N.º DE DIBUJO
NO CAMBIE LA ESCALA				REV
APLICACION	UTILIZADO EN			ESCALA: A
STOQUETE DESMONTABLE				PESO:
				HOJA 1 DE 1

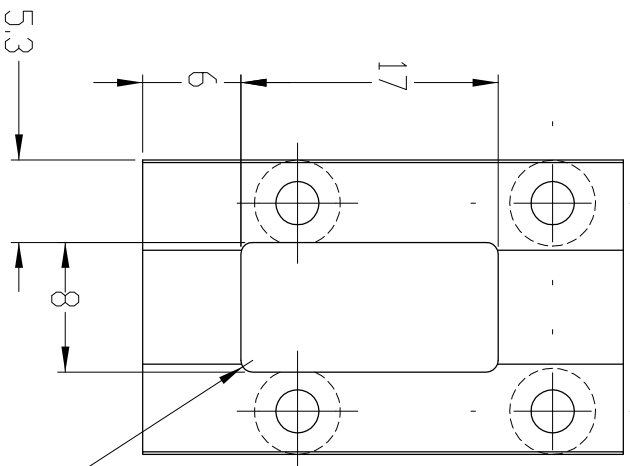


4 x Ø 2.79 THRU ALL
 Ø 5.558 ± 1.803

TOP VIEW

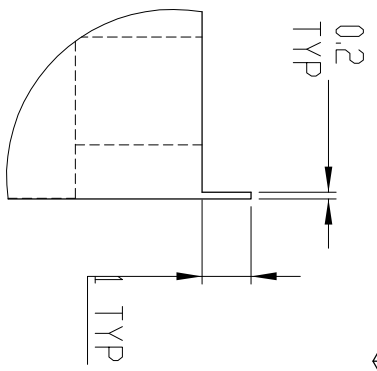
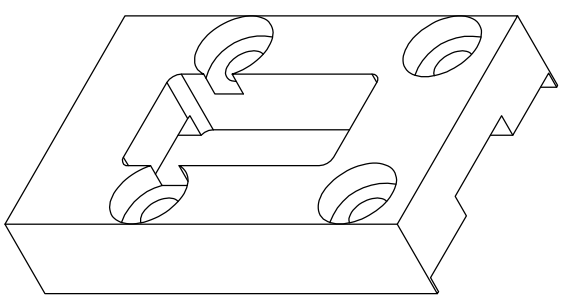
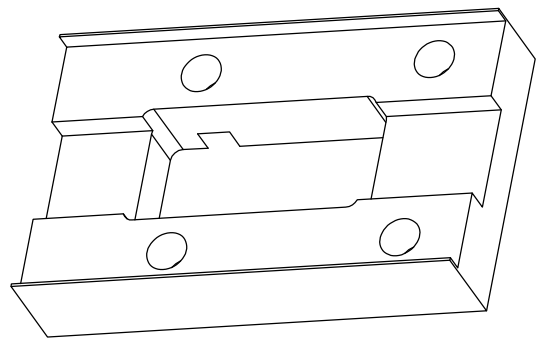


FRONT VIEW



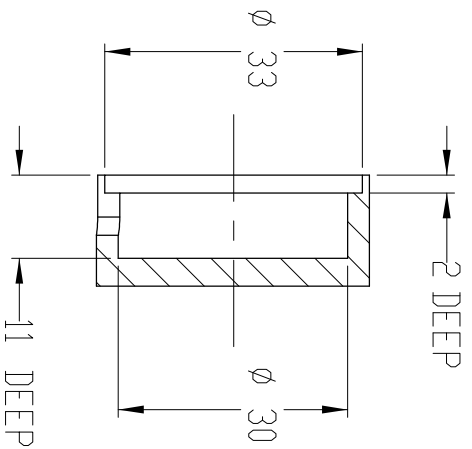
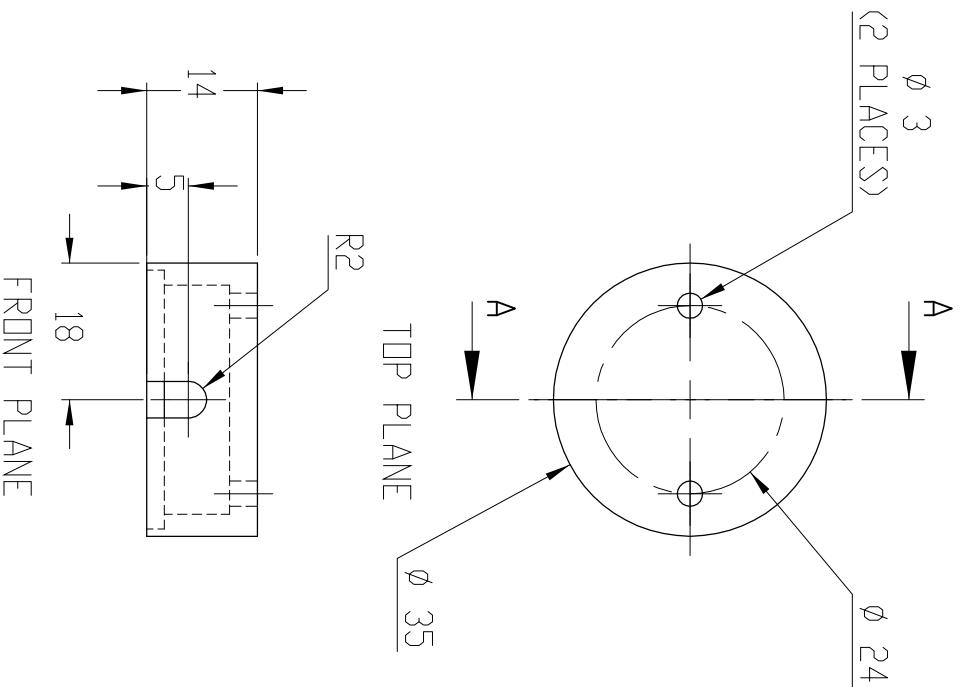
BACK VIEW

R1 (4 PLACES)

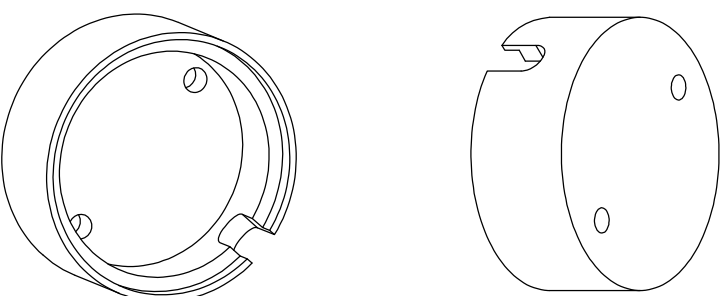


DETALLE A
 ESCALA 5 : 1

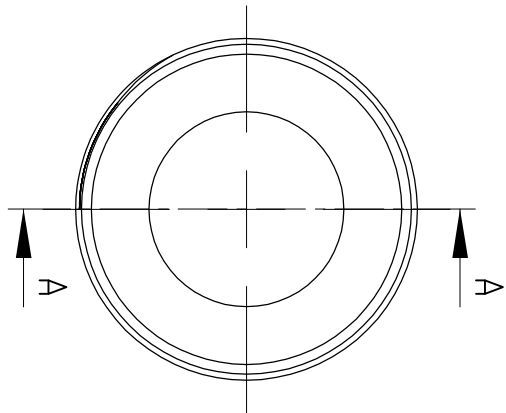
INFORMACION CONFIDENCIAL Y DE MARCA		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE	FECHA
LA INFORMACION INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A UABC. QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE LA UABC.		LAS COTAS SE EXPRESAN EN PULGADAS		ROS Y R.	05/10/13
		TOLERANCIAS FRACCIONAL ±			
		ANGULAR MAQUINA ± PLEGUE ±			
		2 LUGARES DECIMALES ±			
		3 LUGARES DECIMALES ±			
		INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMETRICA POR MATERIAL		COMENTARIOS:	
		ACABADO			
SIGUIENTE ENSAMBLAJE		UTILIZADO EN			
APLICACION		NO CAMBIE LA ESCALA			
TÍTULO:		SOPORTE DE AUTOCOPLADOR			
TAMAÑO		N.º DE DIBUJO			
A					
ESCALA:		PESO:		HOJA 1 DE 1	
2:1					
5		4		3	
1		2		1	
				REV	



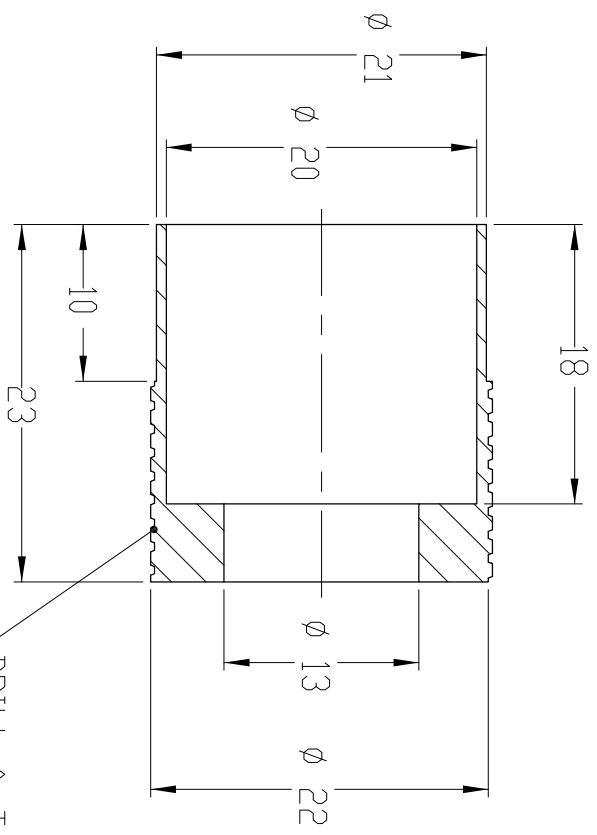
SECCIÓN SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1



INFORMACION CONFIDENCIAL Y DE MARCA		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		DIBUJADO		NOMBRE	FECHA	TÍTULO: TAPA	TAMAÑO A	N.º DE DIBUJO	REV						
LA INFORMACION INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A UABC. QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE LA UABC.		LAS COTAS SE EXPRESAN EN PULGADAS TOLERANCIAS: FRACCIONAL ± ANGULAR MAQUINA ± 2 LUGARES DECIMALES ± 3 LUGARES DECIMALES ±		VERIFICADO		RUSY R.	05/10/13					ESCALA: 2:1	PESD:	HOJA 1 DE 1			
		INTERPRETAR TOLERANCIA METRICA POR MATERIAL		INGENIERIA											APLICACION	UTILIZADO EN	ACABADO
		COMENTARIOS:		FABRICACION													
				CALIDAD													

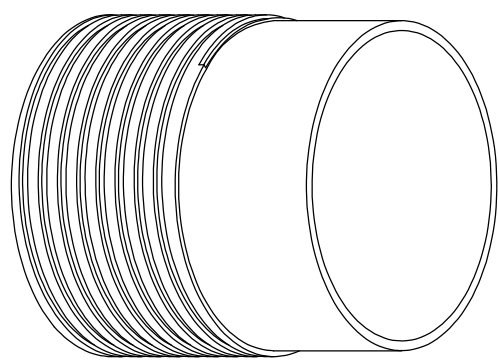


TOP VIEW

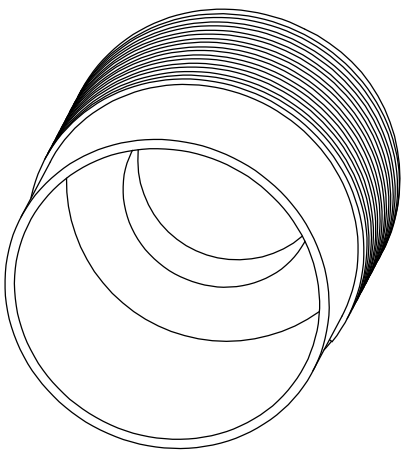


SECCION A-A

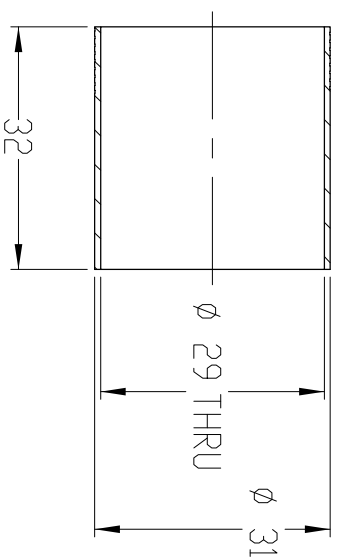
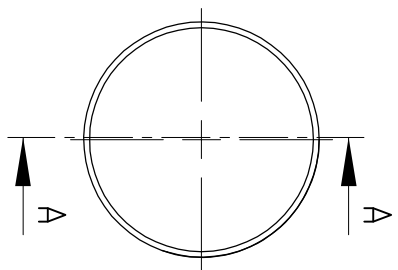
DRILL & TAP



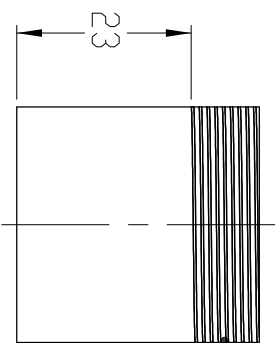
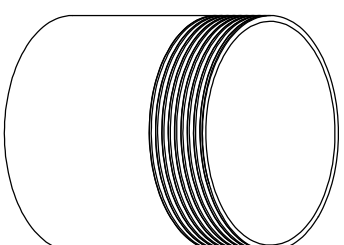
ISOMETRIC VIEW



<p>INFORMACION CONFIDENCIAL Y DE MARCA</p> <p>LA INFORMACION INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A UABC. QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE LA UABC.</p>		<p>SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN PULGADAS</p> <p>TOLERANCIAS: FRACCIONAL ± ANGULAR: MAQUINA ± PLEGUES 2 LUGARES DECIMALES ± 3 LUGARES DECIMALES ±</p>		<p>SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN PULGADAS</p> <p>TOLERANCIAS: FRACCIONAL ± ANGULAR: MAQUINA ± PLEGUES 2 LUGARES DECIMALES ± 3 LUGARES DECIMALES ±</p>		<p>VERIFICADO</p> <p>INGENIERIA</p> <p>FABRICACION</p> <p>CALIDAD</p> <p>COMENTARIOS:</p>		<p>NOMBRE</p> <p>RDSY R.</p> <p>05/10/13</p>		<p>FECHA</p>	
<p>SIGUIENTE ENSAMBLAJE</p>		<p>UTILIZADO EN</p>		<p>ACABADO</p>		<p>NO CAMBIE LA ESCALA</p>		<p>TITULO:</p> <p>TUBO CON BASE ROSCADA</p>		<p>TAMAÑO</p> <p>N.º DE DIBUJO</p>	
<p>APLICACION</p>		<p>NO CAMBIE LA ESCALA</p>		<p>COMENTARIOS:</p>		<p>ESCALA:</p> <p>2:1</p>		<p>PESQ:</p>		<p>HOJA 1 DE 1</p>	
<p>5</p>		<p>4</p>		<p>3</p>		<p>2</p>		<p>1</p>		<p>REV</p>	

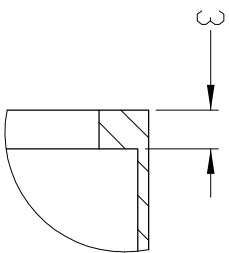
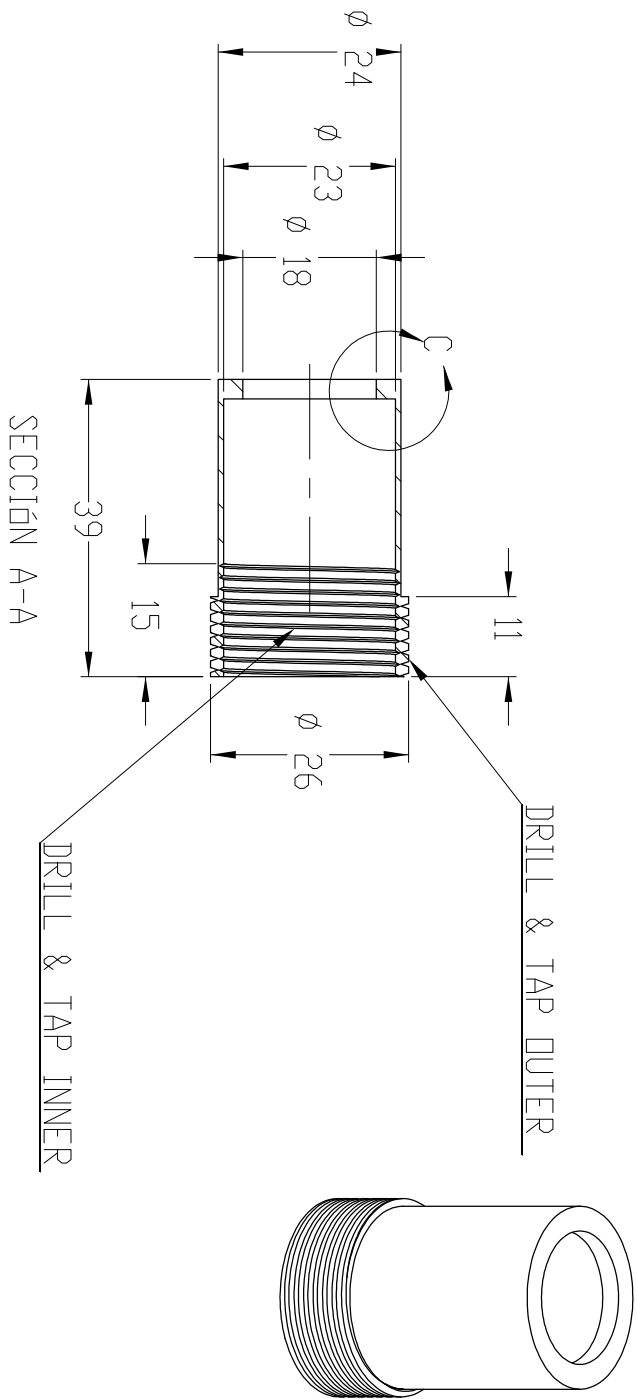
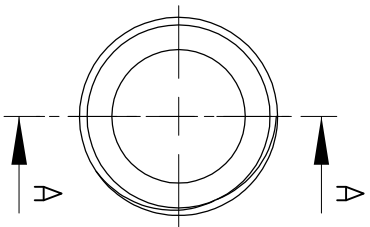


SECCIÓN A-A



DRILL & TAP

INFORMACION CONFIDENCIAL Y DE MARCA LA INFORMACION INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A UABC. QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE LA UABC.		5	
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN PULGADAS TOLERANCIAS: FRACCIONAL ± ANGULAR MAQUINA ± PLEGUE± 2 LUGARES DECIMALES ± 3 LUGARES DECIMALES±		4	
DIBUJADO VERIFICADO INGENIERIA FABRICACION CALIDAD COMENTARIOS:		NO CAMBIE LA ESCALA	
INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMETRICA POR: MATERIAL ACABADO		UTILIZADO EN	
SIGUIENTE ENSAMBLAJE		APLICACION	
TITULO: TUBO ROSCADO SUPERIOR		NO CAMBIE LA ESCALA	
NOMBRE ROSY R.		FECHA 05/10/13	
DIBUJADO VERIFICADO INGENIERIA FABRICACION CALIDAD COMENTARIOS:		NO CAMBIE LA ESCALA	
TAMAÑO A		N.º DE DIBUJO	
ESCALA: 1:1		PESO:	
HOJA 1 DE 1		REV	

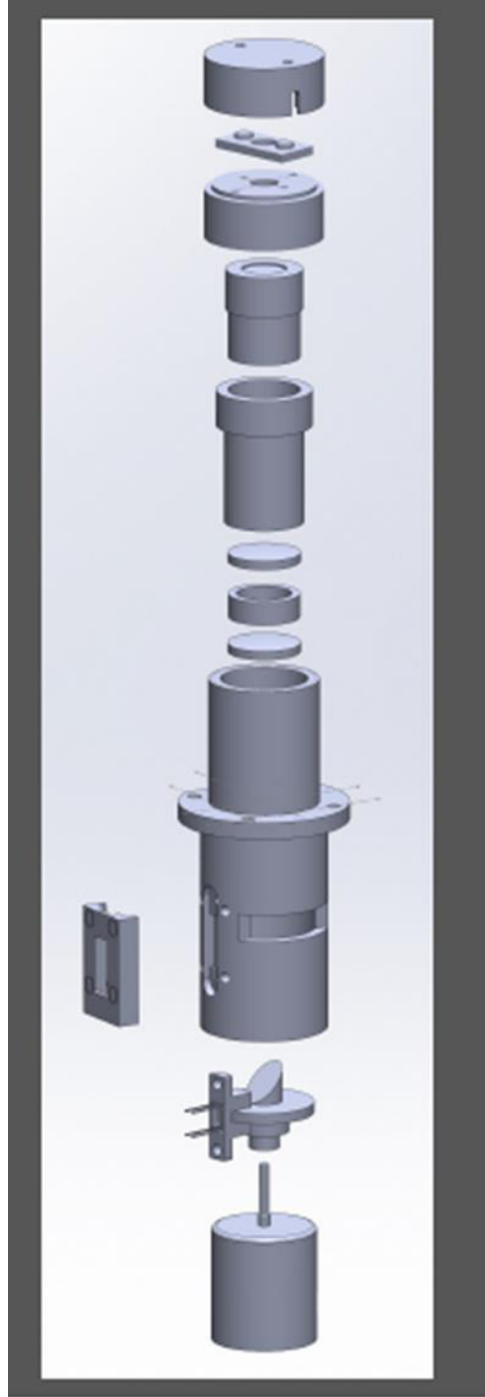


DETALLE C
ESCALA 2 : 1

INFORMACION CONFIDENCIAL
Y DE MARCA
LA INFORMACION INCLUIDA EN ESTE
DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A
UABC. QUEDA PROHIBIDA LA
REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL
SIN EL PREVIO CONSENTIMIENTO
POR ESCRITO DE LA UABC.

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:		NOMBRE		FECHA	
LAS CITAS SE EXPRESAN EN PULGADAS		RDSY R.		05/10/13	
TOLERANCIAS: FRACCIONAL ± ANGULAR MAQUINA ± 2 LUGARES DECIMALES ± 3 LUGARES DECIMALES ±		VERIFICADO		INGENIERIA	
INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMETRICA POR:		FABRICACION		CALIDAD	
MATERIAL		COMENTARIOS:			
ACABADO		TAMANO		N.º DE DIBUJO	
SIGUIENTE ENSAMBLAJE		ESCALA: 1:1		PESD:	
UTILIZADO EN		HOJA 1 DE 1		REV	
APLICACION		TITULO: TUBO ROSCADO INTERIOR Y EXTERIOR			
NO CAMBIE LA ESCALA					

ENSAMBLE FINAL DE LA APERTURA



A N E X O 2
Publicaciones

Structural Control and Health Monitoring

© John Wiley & Sons Ltd

Edited By: Lucia Faravelli, Satish Nagarajaiah

Impact Factor: 2.355

ISI Journal Citation Reports © Ranking: 2016: 14/61 (Construction & Building Technology); 16/58 (Instruments & Instrumentation); 23/125 (Engineering Civil)

Online ISSN: 1545-2263

October 2017

Volume 24, Issue 10

[Previous Issue](#)



SEARCH

In this issue

[Advanced >](#) [Saved Searches >](#)

NOTTINGHAM
TRENT UNIVERSITY

Flexible
and
engaging
online
learning



Online MSc Construction
Project Management

Your journey
starts here

Select All [Save to profile](#) [Export citation](#)

ISSUE INFORMATION

[Jump to...](#)

Issue Information

Version of Record online: 6 SEP 2017 | DOI: 10.1002/stc.1947

[Abstract](#) | [Article](#) | [PDF\(220K\)](#) | [Request Permissions](#)

REVIEW

[Jump to...](#)

Utilization of structural health monitoring in long-span bridges: Case studies

Zhen Sun, Zilong Zou and Yufeng Zhang

Version of Record online: 6 JAN 2017 | DOI: 10.1002/stc.1979

[Abstract](#) | [Article](#) | [PDF\(2829K\)](#) | [References](#) | [Request Permissions](#)

RESEARCH ARTICLES

[Jump to...](#)

Experimental image and range scanner datasets fusion in SHM for displacement detection

Javier Rivera-Castillo, Wendy Flores-Fuentes, Moisés Rivas-López, Oleg Sergiyenko, Felix F. Gonzalez-Navarro, Julio C. Rodríguez-Quifonez, Daniel Hernández-Balbuena, Lars Lindner and Luis C. Básaca-Preciado

Version of Record online: 2 DEC 2016 | DOI: 10.1002/stc.1967

[Abstract](#) | [Article](#) | [PDF\(1301K\)](#) | [References](#) | [Request Permissions](#)

Structural time-dependent reliability assessment of the vibration active control system with unknown-but-bounded uncertainties

Lei Wang, Xiaojun Wang, Yunlong Li, Guiping Lin and Zhiping Qiu

Version of Record online: 2 DEC 2016 | DOI: 10.1002/stc.1965

[Abstract](#) | [Article](#) | [PDF\(1928K\)](#) | [References](#) | [Request Permissions](#)

Damage detection in beam and truss structures by the inverse analysis of the static response due to moving loads

Nadir Boumechra

Version of Record online: 16 DEC 2016 | DOI: 10.1002/stc.1972

[Abstract](#) | [Article](#) | [PDF\(1477K\)](#) | [References](#) | [Request Permissions](#)

Structural Control and Health Monitoring

39

H Index

Country United States

Subject Area and Category Engineering
Building and Construction
Civil and Structural Engineering
Mechanics of Materials

Publisher John Wiley & Sons Inc.

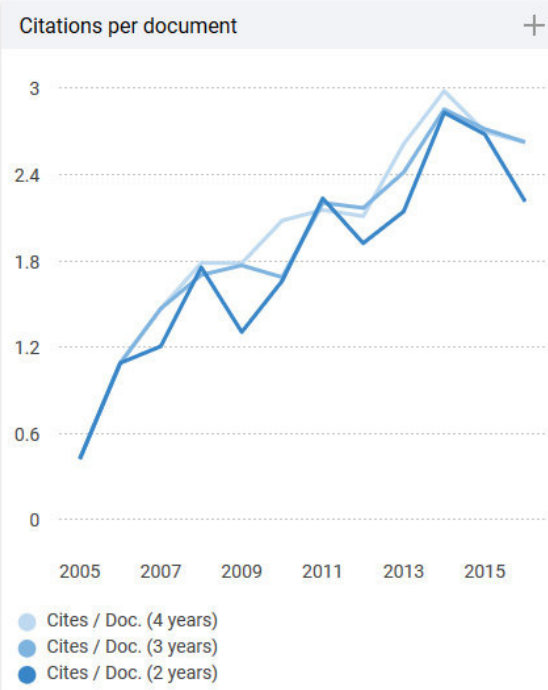
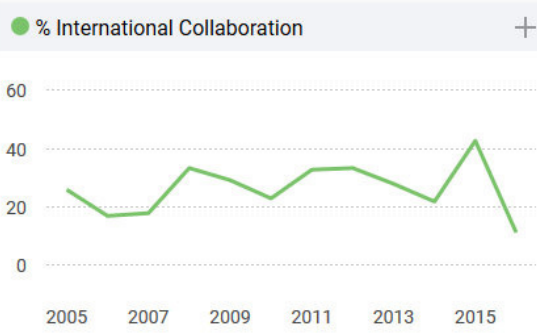
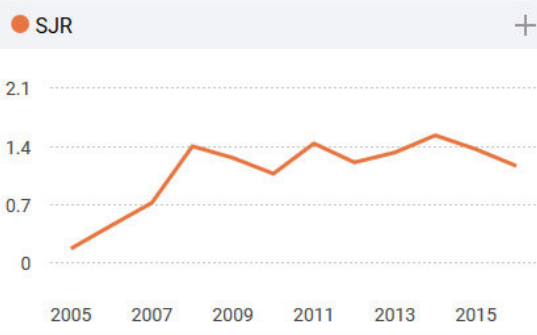
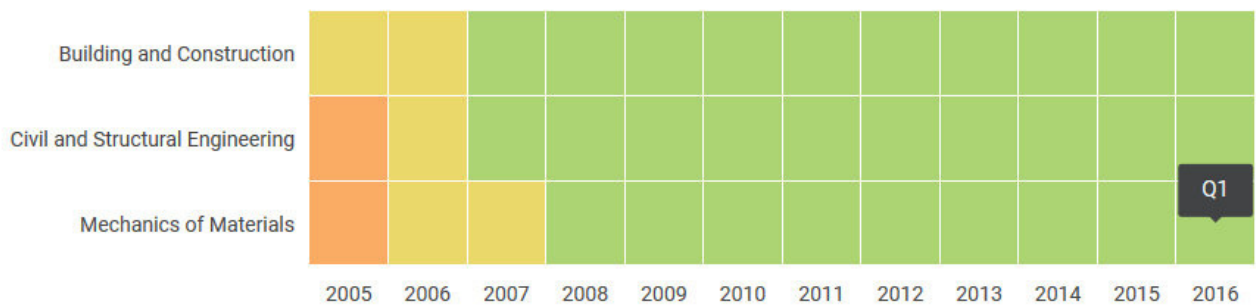
Publication type Journals

ISSN 15452255

Coverage 2004-ongoing

Scope The Journal Structural Control and Health Monitoring provides a forum in which survey articles and original research in the field of structural control can be communicated rapidly toward a cross-fertilization of information and ideas. An important aim is not only to achieve a balance between academic material and practical applications, but also to establish an interface between the many topics which characterise the interdisciplinary nature of structural control. The Journal encompasses all aspects of structural control theory and technology. Special attention will be devoted to civil and infrastructure engineering applications, but related fields, such as aerospace and ocean systems, will also be covered. [\(source\)](#)

Quartiles



RESEARCH ARTICLE

Experimental image and range scanner datasets fusion in SHM for displacement detection

Javier Rivera-Castillo¹ | Wendy Flores-Fuentes¹ | Moisés Rivas-López¹ | Oleg Sergiyenko¹ | Felix F. Gonzalez-Navarro¹ | Julio C. Rodríguez-Quiñonez¹ | Daniel Hernández-Balbuena¹ | Lars Lindner¹ | Luis C. Básaca-Preciado²

¹ Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal S/N, Colonia Insurgentes Este. C.P. 21280 Mexicali, Baja California, Mexico

² Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS), Calz. Cety S/N, Rivera 21259 Mexicali, Baja California, Mexico

Correspondence

Flores-Fuentes Wendy, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal S/N, Colonia Insurgentes Este. C.P. 21280 Mexicali, Baja California, Mexico.
Email: flores.wendy@uabc.edu.mx

Summary

Optical images and signals can be used to detect displacement in civil engineering structures. This paper presents a technical experimentation of a vision-based technology and artificial intelligence algorithms methodology for structural health monitoring of new and aging structures, by a noncontact and nondestructive system. The experimental study emphasis is on the outdoor urban environment, by the detection of spatial coordinate displacement on the structures, in order to perform a damage assessment. Also, the experimental study contains both theoretical and experimental aspects of the fusion of image and range scanner datasets created using intelligent algorithms. A camera and an optical scanning system were used to generate high resolution and quality images for 2D imaging, and 3D accuracy range data from optoelectronic sensor signals. Scans at a specific area of an engineering structure were performed to measure spatial coordinates displacements, successfully verifying the effectiveness and the robustness of the proposed non-contact and non-destructive monitoring approach.

KEYWORDS

artificial intelligence tools, data acquisition, health monitoring, measurements, sensors for damage detection, signal processing

1 | INTRODUCTION

Structural health monitoring (SHM) is a modern technique for damage detection and localization; it consists of a process that tracks the integrity of a structure across time, using a wide range of technologies, which encompasses integration of sensors, data transmission, and processing.^[1] SHM makes it possible to take decisions regarding the future maintenance and operation of the structure with the aim of preventing catastrophic structure damages and avoid human harm.^[2] Identification of damage in structures can be classified into active and passive approaches. In the active detection approaches, the monitored structures are actuated or excited and the caused responses are recorded. In contrast, in the passive detection approaches, the monitored structures do not require any actuation, whereas only sensors are used

to monitor the responses induced by damages. With the simplicity in terms of operation, the latter gains intensive attentions from both industry and academia in the past two decades.^[3] Focusing on the vision-based method, the proposed noncontact and nondestructive method and technology for SHM can be classified inside the passive approaches, presenting some advantages over other vision-based systems, such as the following: (a) a wide measurement range distance, because the proposed prototype is able to be set up for short-distance measurements (distance from 10 to 70 cm),^[4] and long distances from (1 m to over approximately 20 m) by a gain adjustment in the optical sensors and precise adjustment of the optical path, in comparison with the laser vibrometer/displacement sensor that is generally accurate but has limited measurement distance of typically less than 5 m;^[5] (b) safety for human health,

because it is based on an incoherent light source, in comparison with systems based on a coherent light source that requires taking care of the higher intensity of beam; (c) low-cost prototype consisting of machined optical apertures, motors, photodiodes sensors, and a cost-efficient camera, in comparison with commercial systems that are quoted in over 100× the value of our prototype;^[6] (d) easy to operate and to set up according to the specific application, because this prototype has been adapted for robot navigation,^[7] medical scanning,^[8] and structural health monitoring;^[9] (e) low memory storage requirement, because only the specific coordinates of interest in the scene are recorded instead of the whole scene;^[10] (f) simple digital processing^[4,10] (reduced computational time); (g) resolution nondependence to surface reflectance, as is the case of interferometric radar systems;^[5] and (h) accuracy nondependence to only the advantages of camera or range scanners properties, on the contrary, has been robust due to taking advantage of both optical sensors proposed by their fusion. The analysis of this method has been dedicated to civil engineering, especially for those old structures sensitive to aging, fatigue, damage due to overload, and environmental phenomena, such as earthquakes and hurricanes. These structures require a careful assessment of their structural integrity, along with a precise and quantitative understanding of the factors that may affect them, which can be only performed by noncontact and nondestructive method and technology.^[11,12] The proposed strategy computes the displacement field of the analyzed structure by a noncontact and nondestructive measurement by means of vision-based methods^[13]: (a) 2D vision-based method by a digital image from a camera mounted over an optical scanner aperture and (b) 3D vision-based method by an optical range scanner. In both cases, it is possible to measure points (spatial coordinates) on the structure,^[14] for displacement detection.^[15] The monitoring process by both 2D and 3D vision-based methods proposed generates streams of images and signals from where features are extracted as datasets that are transformed to information describing the current and projected integrity of the structure.^[16] The 2D image and 3D range scanner datasets fusion is based on data-driven techniques that only depend on the input–output data information by the artificial intelligence (AI) technique. Especially, the machine learning method has been formulated as a regression problem by support vector machine regression (SVMR), which has been previously applied to SHM.^[3,4,17–20] The accuracy analysis of both 2D and 3D methods and their fusion were investigated.

The paper is organized as follows: Section 2 describes the wide range of technologies toward diverse engineering applications of SHM and lays the base of this investigation, including the state of the art of 2D vision-based image and 3D vision-based range scanner and their fusion; Section 3 describes the objectives of the proposed system, the system overall technology (2D and 3D imaging and sensing

technology), the sensors, images and signals acquisition, image and signal processing for features extraction, registration and storage on datasets, fusion methodology of dataset by AI, and states results; Section 4 outlines the proposed strategy by AI, and the capability to process very large datasets and understand images and range scanner data through them, concludes this article, and indicates the future research.

2 | SHM THEORETICAL BACKGROUND AND APPLICATIONS

Even though structures have been designed to tolerate a certain degree of material failures, maintenance is required to guarantee the structural integrity for safety reasons, in order to reduce structural main damages. It is thereby necessary to detect and measure damages and fatigue, induced by aging, overload, or low-velocity impacts. In special for those damages that are invisible and undetected by visual inspection, various damage identification strategies have been developed in literature using a wide range of technologies. By these reasons, SHM has gained considerable attentions toward diverse engineering applications, due to it deals with damage identification for aerospace, civil, industrial, and mechanical structures, like bridges, dams, buildings, stadiums, vessels, platforms, airframes, wind turbines, and inclusive large machinery and equipments.^[21–24] Historic buildings are often designed and built with deficient construction details, and the poor state of conservation of materials and components has obvious consequences on their overall performance. SHM is considered nowadays a crucial phase during the processes of urban planning and civil protection. SHM of historical buildings may be a daunting task due to the lack of preexisting models for building stability and the presence of strict constraints on monitoring device deployment; however, technology has continued developing to monitor critical structures, like the building church of St. Teresa in the Kalsa district in Palermo, Italy, a baroque building dating back to early 1700;^[25] San Vigilio church, situated in the small city of Gandria, on Lugano lake in Switzerland, built in the XVI/XVII century; the Royal villa in Monza, close to Milan, Northern Italy, built in 1777–1779; Bolshoi Moskvoretskiy Russian Bridge built in 1936–37, over the Moscow River; a temple monument in Korea: Seok-Ga Pagoda, built in the VIII century in the court of the Bulkook (Bulguksa) temple, Kyung-Ju;^[26] the Seville cathedral's famous bell-tower La Giralda, from the 16th century,^[27] Torre Aquila, a medieval tower in Trento, Italy;^[28] the monuments: the Clock Tower of Mogadouro and the Church of Jerónimos, in Lisbon, Portugal;^[12] the Ducal Palace, in Mantua, Italy, built in the XIV century;^[29] Rognosa tower located in the medieval village of San Gimignano, Ibscany, Italy;^[30,31] and a XVI century building, Palazzina Della Viola in Bologna, Italy,^[32] just to name a few.

2.1 | SHM technologies

Traditionally, structures were monitored by visual inspections and with the aid of simple devices or tests. However, traditional methods have many drawbacks; first, they are limited to the accessible areas of the building; second, they can be performed only periodically, as they require the presence of onsite technicians and experts, and finally, this kind of inspections is highly subjective and relies on the experience and judgment of inspectors. Although these methods are still widely used, in the last decades, there has been a gradual shift towards the use of automatic systems and sensors in the field of SHM. Monitoring is very important to know the state of the structure health, in order to analyze any possible abnormal situation. Systems for SHM must have access to or contain intelligent features to take a potentially diverse array of data and create a picture of the structure's condition. SHM technology should be able to inspect or measure without doing any harm or damage to the structure, and should also be robust compared to the level of damage they are trying to detect in these critical structures. Furthermore, they need to be highly reliable and operate without input for the long term, potentially over years. Almost all of the SHM systems are composed of a network of sensors connected to an external data acquisition unit. The sensors' raw data are analyzed to derive the information structures health status. Usually, the sensors are wireless sensors distributed over a large area. The most modern systems incorporate wireless transmitters and receivers to overcome some limitations caused by the use of cables. The raw data can be collected from the sensors through wireless communication, and all data can be gathered in the central processor situated at a far distance.^[33] Monitoring systems are capable of assessing the structure continuously, providing real-time information on its health state, including identification, localization, and quantification of damage.^[34] The limitations of a wireless sensor network, such as low-bandwidth wireless communication, and limited resources on wireless sensors' nodes need to be addressed for a successful SHM system. While wireless sensors can include strain gauges, accelerometers, and thermocouples, wired sensors can include gyroscopes, accelerometers, and magnetometers. Other sensors used for SHM are the optical or light sensors used for optoelectronic image capture and/or scan, which are able to provide robustness against unfavorable environmental conditions (dim light, background image disturbance, and/or partial scene occlusion).^[5] Another usage can be found for position measurement and for 3D point's reconstructions. Optical sensors act as a transducer that receives photons and produces an electrical response that can be amplified and converted into a form of relevant parameters to handle the input data for results interpretation. These sensors can be classified as image sensors from cameras and analog waveform output from scanning systems. Image sensors are recognized as the most advanced technology to record electronic images, also known as 2D vision-based

image. These sensors are based on the photoelectric effect in silicon, which describes the interaction between a photon with an appropriate wavelength (in general, between 200 and 1000 nm) and a silicon atom generating an electron-hole pair. If an electric field is present, the electron and the hole are separated and charge is accumulated, proportional to the number of incident photons, and therefore the scene imaged onto the detector will be reproduced if a proper X-Y structure is present. Each basic element, defining the granularity of the sensor, is called a pixel (picture element). The most used for the SHM task are the charge-coupled device (CCD) sensor, complementary metal oxide semiconductor sensor, and position sensing detector, and can be found most commonly in cameras. Analogue waveform output detectors from scanning systems are used as an optical receiver to convert light into electricity. This principle applies to photodetectors, phototransistors, and other detectors as photovoltaic cells and photoresistance. However, the most widely used detectors today for position-measuring tasks are the photodiode and the phototransistors, and can be found most commonly in scanning systems, for 3D vision-based range scanner tasks.^[6] The requirements of sensors for monitoring of structures' health are presented to be cost-efficient, replaceable, durable, and low-power systems and on-site AI, which will be useful to distinguish abnormal behavior from the normal one. The damage detection techniques should be developed, which can recognize when damage has occurred and provide direction to the location of the damage. There are different types of sensor technologies available, which have to be chosen and fused depending on the application.

2.2 | 2D vision-based image approach

The 2D vision-based image approach, also called 2D luminance, images are also used to directly extract from them geometric features. The image acquisition is done under good illumination conditions using a normal light camera and without any background clutter. The 2D vision-based method by a digital image acquisition through a camera or close-range photogrammetry (CRP) has been used to produce realistic 3D textured models using various degrees of manual assistance. However, even state-of-the-art image-based modeling methods require a large number of photographs to create models with sufficient 3D geometric details to detect architectural damage using automatic detection and extraction of geometric features.^[35] Another method to produce realistic 3D textured models is defined by 2D depth images; one depth image of a 3D model is associated with a set of depth lines which will be afterward transformed into sequences. The depth sequence information provides a more accurate description of 3D shape boundaries than using other 2D shape descriptors.^[36] As an alternative, 3D data from a vision-based range scanner have been implemented; it is conjectured that 3D data can alleviate difficulties inherent in 2D modality, because 3D enables true surface

measurements, and hence, subtle differences surface features may be better discriminated and may go beyond the limits of 2D.^[37] One of the most important features that can be extracted from images is edges, which correspond to rapid changes in gray levels in the direction of the edges. Most of the time, such changes are the result of sudden changes in the reflection properties of the surface. Examples include shadows and markings. More important are boundaries of objects, which also cause edges in the images because the two faces of a boundary have different reflection properties.^[38] Initially, algorithms have been developed to process grayscale or color images. Today, the high accuracy of these algorithms, the huge amount of images in existing databases, and the availability of cheap cameras to acquire such images with satisfying quality enable most of the existing and upcoming applications,^[39] like SHM, fast and accurate digital acquisition by camera with CCD. These applications provide high resolution and quality images, that can be used for spatial coordinates measurement for SHM task, in order to analyze if elements in a structure are experiencing displacement, and can even be applied to analyze the structure's behavior answer due to dynamic load, as shown in the literature,^[40–42] obtaining satisfactory results in comparison with contact systems that measure vibration.

2.3 | 3D vision-based range scanner approach

In the 3D vision-based range scanner method by an optical range scanner or scanning technology, 3D resultant models are represented as low-level primitives and lack explicit encoding of high-level structures. 3D vision-based range scanners can use coherent or incoherent light emitters. The 3D vision-based range scanner with coherent light emitters, most commonly known as laser scanners, are used to carry out the laser scanning to acquire a discrete representation of an object or scene. The generation of range images entails the interpolation of the irregularly spaced laser points to a grid and the conversion of elevations to gray values. The available scanning systems extend to all objects types, almost regardless of the scale and complexity, and have the ability to rapidly collect high-resolution 3D surface information of an object or scene. The 3D point cloud allows for the construction of a 3D surface model of the object or scene. The resolution of the scan, which defines the number of points recorded in a scene and the level of detail visible in a scan, is simply the smallest change in distance that the scanner is capable of detecting. High-resolution laser scanners can be used for high-quality model acquisition even with mm-resolution accuracy. Such scanners, however, are slow and have small working volumes, making them unsuitable for digitizing buildings and city blocks. Alternately, 3D light detection and ranging scanners (LIDAR, as an acronym for various laser altimetry methods) are attractive as they are fast, easy to use, and capable of generating rough coherent scans of large structures like buildings.^[43] Unfortunately, such scans

are noisy, sparse, and typically have large features acquisition missing. Although they provide a cursory impression of the scanned buildings, in the raw point cloud form, they are unsuited for any practical application or digital inspection.^[44] By the other side, a 3D vision-based range scanner with incoherent light emitters is used to scan the scene in order to detect the incoherent light emitter to only extract the features of interest from an object or scene without the need of capturing the whole images. Because for some applications it is not necessary to acquire the whole vision of a scene as makes the human vision to extract the features of interest,^[45] it is possible to only extract the significant features from the scene by the use of a rotatory mirror scanner and dynamic triangulation.

2.4 | Fusion of 2D and 3D datasets background and related work

With 2D and 3D vision-based datasets, we can have a classical fusion scenario where the synergism of two sensory input data considerably exceeds the information obtained by the individual sensors.^[38] The fusion can be useful in texture mapping the point cloud to create photorealistic 3D models that are essential for a variety of applications, extraction of reference targets for registration and calibration purposes, automation of 3D measurement (automatic exterior orientation), 3D reconstruction, and if the data is georeferenced, it can be readily incorporated into existing geographic information system applications.^[44] 3D vision-based range scanning can be seen as a complement to 2D vision-based images; for instance, the fusion of CRP and the relatively new technology of terrestrial laser scanning methods offer new opportunities for photorealistic 3D models presentation, classification of real-world objects, and virtual reality creation (such as 3D city models, virtual tourist information, as well as visualization purposes). Terrestrial laser scanners (TLS) have the ability to rapidly collect high-resolution 3D surface information of an object. The same type of data can be generated by CRP techniques, but image disparities common to close-range scenes makes this an operator-intensive task. The imaging systems of some TLSs do not have very high radiometric resolution, whereas high-resolution digital cameras used in modern CRP do. Besides, TLSs are essentially earthbound, whereas cameras can be moved at will around the object being imaged.^[45] One method to perform the 2D and 3D fusion for building monitoring purpose is the development of Synthetic Camera Images (SCI). A correspondence matching or simply pairwise matching is performed, in which the first step is the extraction of features, from both 2D and 3D images using Harris corner detector. Initial correspondence between these points is then established by correlating regions around the features. The similarity is then judged by the accumulated development of corresponding interest points in the two 2D and 3D images.^[43] For 3D vision-based range scanner with the coherent light emitter, and 2D

vision-based image obtained with a camera with CCD sensor, fusion is interpolating the back-projected laser point (which contains irregular point spacing) into a regular grid at an even spacing using the intensity values from camera images to generate the SCI. For 2D and 3D fusion, there are two options related to this interpolation. The first option is to generate the SCI by keeping the original resolution of the point cloud data and to compute a new pixel size. The second option, on the other hand, is to keep the pixel size of the real camera image and then compute the number of pixels or the resolution. Conventional image processing techniques such as contrast stretching and image enhancement are then used to produce the final image. It is obvious that the geometric features in the SCI are easier to detect than those in the laser range data. This image offers a major advantage to interactively (controlled by a human operator) or automatically conjugate matching with the intensity images produced by a digital camera.^[44] Applications of this method can be seen in historical preservation, urban planning, digital mapping, structure, navigation, virtual reality, e-commerce, digital cinematography, and computer games, just to name a few. Historically, fusion has been used for automation, improved accuracy, and reliability; related work addressing 2D and 3D integration has been performed for automatic reconstruction of urban scenes,^[46] large-scale benchmark,^[47] face recognition,^[48] terrestrial mapping,^[49] medical imagining,^[50] and robot vision,^[51] to mention some. Now we are proposing a new method for 2D and 3D datasets fusion by an AI algorithm, which is a mathematical model that describes the integration of 2D vision-based (camera with CCD sensor) and a 3D vision-based (range scanner with the incoherent light emitter and photodiode sensor). Preliminary parts of our work on 2D and 3D fusion were presented in the literature.^[10] The AI algorithm is a technique of high-level inferences, which require human reasoning such as pattern recognition, planning, deduction, and learning. The processes of inference used by expert systems begin with a group of initial data (data prior) and some basic rules. The fuzzy logic and neural networks are examples of such methods. Several machine learning algorithms are investigated to fuse the sensor data, such as neuronal networks and support vector machine. The best model generated by each algorithm is called estimator. It is shown that the employment of estimators based on AI can improve significantly the performance achieved by each sensor alone.^[52,53]

3 | EXPERIMENTAL EVALUATION OF DEVELOPED PROTOTYPE

With the purpose of contribution to science and technology development of systems for SHM, a research group from the Universidad Autónoma de Baja California has consolidated a line of investigation in “Optoelectronics and automatic measurements,” and an optical scanning system

(OSS) prototype has been developed using a noncontact and nondestructive method. A first prototype has been experimentally tested in a laboratory environment with successful measurement accuracy results, but with limited area of scanning;^[4,9] the second prototype has been upgraded by improvements in the optical channel to expand the distance limits of scanning performance from 70 cm to approximately over 20 m with a single aperture. In order to perform experimentation outdoors, in a real environment, the proposed system was set up with two apertures in a dynamic triangulation model fixture with a distance of 1 m between apertures to perform measurements with a distance of 4 m from system to structure. Measurements have been performed in a structure outside of the Instituto de Ingeniería of the Universidad Autónoma de Baja California. Obtaining satisfactory results due to the increase of scanning area and accuracy enhancement by the implementation of 2D Image and 3D range scanner datasets fusion, giving place for a further stage of experimentation applied to a study with emphasis on outdoor urban environment, for damage assessment of new and aging structures.

3.1 | Prototype system description

This prototype has been designed to perform SHM using a noncontact nondestructive method and technology. A camera and OSSs were used to generate high resolution and quality images for 2D imaging and 3D accuracy range data from optoelectronic sensor signals. The theoretical and experimental aspects of 2D image and 3D range scanner datasets fusion using intelligent algorithms are detailed. The prototype design started with the OSS, it is a light scanning system, for SHM application, and it is a position measurement system. It is composed of a light emitter source installed on the structure under monitoring and an optical scanning aperture that is scanning the structure in the search of the light emitter source in order to determine if it is this source that moved. A light emitter source is used as a position indicator; it is mounted on the structure under monitoring and is used as a position indicator. This can be a coherent light emitter source such as a laser or an incoherent light source such as a bulb like the ones used in motor vehicles. We assume that for any light emitter source there is only one energy center that represents its point position. A rotating optical aperture was designed as a 45° slanted mirror surface attached to a cylindrical rod that deflects the light beam into a double convex lens provided with an interference filter and a photodiode. The cylindrical rod is mounted onto the shaft of a DC electrical motor, and as it rotates, an electronic signal is generated. Figure 1a shows the main elements of the optical scanning aperture. When the mirror starts spinning, the sensor “s” is synchronized when the origin generates a pulse indicating the 0° position and the starting of a cycle of 360° that finishes immediately before the “s” sensor generates the next beginning pulse. These pulses are used to calculate the scanning

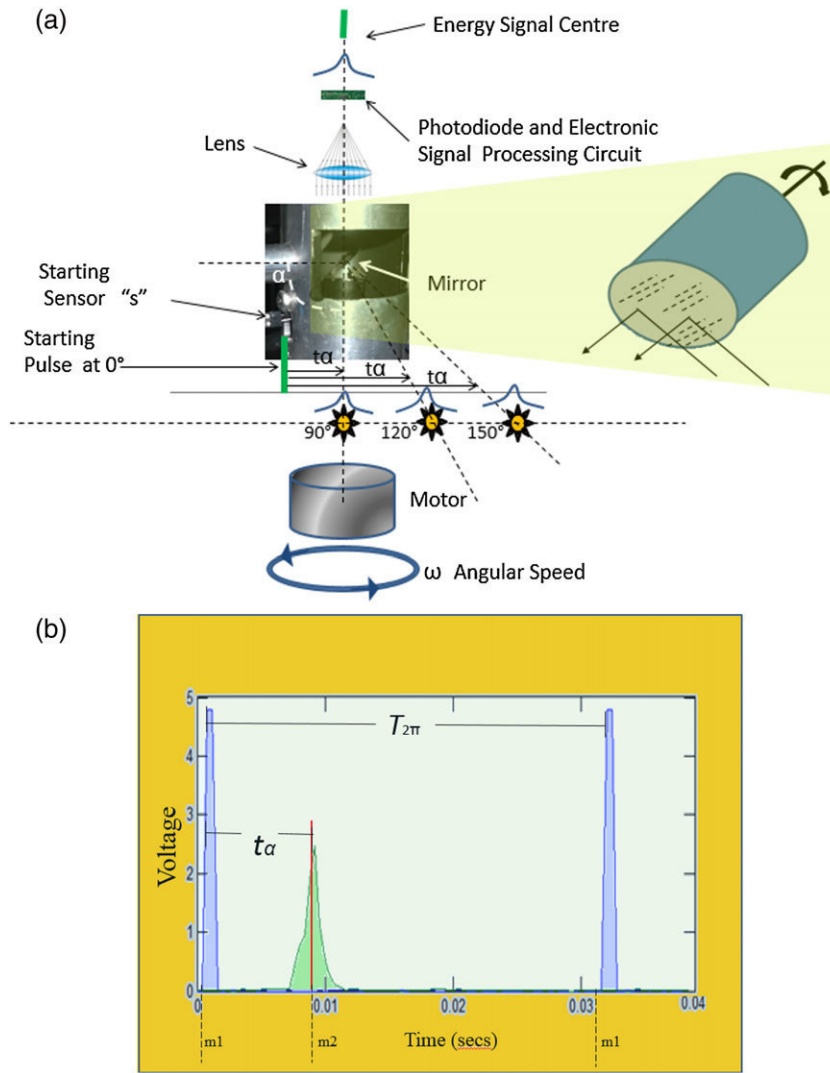


FIGURE 1 (a) Optical scanning aperture. (b) Optical Scanning aperture timing

frequency and the zero reference, which is used to measure the angle where the light emitter source is positioned.^[6,54]

The signal timing diagram in Figure 1b shows the starting pulse and the optoelectronic signal relation used to calculate the light emitted energy signal center position as described in the equations below. The period $T_{2\pi}$ is the time for one motor revolution, defined as the time between two consecutive m_1 as in Equation 1, which are expressed by the code $I_{2\pi}$ as defined in Equation 2. As for m_1 , it is the reference of the starting of one motor revolution (0°). The time t_α is the time between the reference of the starting of one motor revolution and the energy signal center, that is, the interval between m_1 and m_2 . This can be expressed by the code I_α as defined in Equation 3. As for m_2 , it is the energy signal center. The angle under measurement is then calculated by Equation 4.

$$T_{2\pi} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{2\pi f} = \frac{1}{f}. \quad (1)$$

$$I_{2\pi} = T_{2\pi} f. \quad (2)$$

$$I_\alpha = t_\alpha f. \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{2\pi I_\alpha}{I_{2\pi}} = \frac{2\pi t_\alpha f}{T_{2\pi} f} = \frac{2\pi t_\alpha f}{\frac{2\pi}{\omega} f} = t_\alpha \omega = t_\alpha 2\pi f, \quad (4)$$

where m_1 is the reference of the starting of one motor revolution, m_2 is the energy signal center, $T_{2\pi}$ is the time interval of one cycle, from m_1 to m_1 , ω is the angular speed, f is the scanning frequency (cycles per second), $I_{2\pi}$ is the interval code of one cycle, from m_1 to m_1 , I_α is the range code from the starting of one cycle to the energy signal center, and t_α is the interval from the starting of the signal to the energy signal center, from m_1 to m_2 .

Different shapes of signals are generated by OSS, depending on the kind of light source and the sensor of the scanner. A typical position-measuring process includes an emitter source of light, the position-sensitive detector like photodiode, and CCD as a receiving device, which collects a portion of the source light from the target, as shown in Figure 2a. The spatial distribution function of light has an

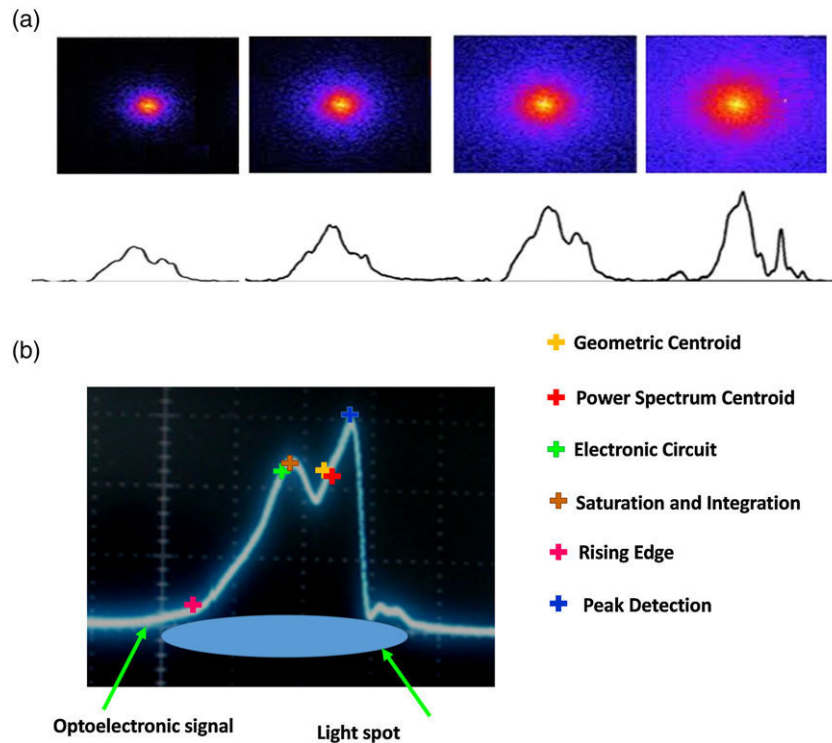


FIGURE 2 (a) Optoelectronic Signal. (b) Energy Centre Localization Methods graphic representation of optoelectronic signal detected by photodiode

Airy-function-like shape; when a photodiode is used as a sensor on a scanner with rotating mirror, it can also originate a similar Gaussian-like shape with some noise and deformation; by the other side, the CCD produces output currents related to the “centre of mass” of light incident on the surface of the device; CCD uses the light quantity distribution of the entire beam spot entering the light-receiving element to determine the beam spot center or centroid, and identifies this as the target position. Concluding that the photodiode signal originates a similar function to a CCD, consequently, it is possible to enhance the accuracy measurements in optical scanners with a rotating mirror, using a method for improving centroid accuracy by taking a measurement in the energy center of the signal.^[55]

The photodiode is the sensor that gives place to the range scanning.^[56] As SHM is an upcoming tendency of determining the integrity of structures and development of strategies to prevent undesirable damage, the OSS was designed. It complies the necessity of detecting a light emitter mounted on the structure under monitoring and measures the 3D spatial coordinates of its energy center. The OSS generates the targeted signals to be analyzed by the proposed methods previously assessed.^[57] Six Energy Centre Localization Methods (ECLM; *Geometric Centroid*, *Power Spectrum Centroid*, *Analogic Processing by Electronic Circuit*, *Saturation and Integration*, *Rising Edge*, and *Peak Detection*, Figure 2b) were assessed based on the assumption that the OSS signal from light emitter scanning is a Gaussian-like shape signal, the light emitter is an incoherent light, considered a punctual light source, and due to the fact that with distance the light source expands its radius, a cone-like or an

even more complex shape is formed depending on the properties of the medium through which the light is travelling. To reduce in position measurements errors, the best solution is taking the measurement in the energy center of the signal generated by the OSS. According to the results from the previous assessment made with the incoherent light source, the most accurate ECLM are the Geometric Centroid and the Power Spectrum Centroid. For this reason, the Power Spectrum Centroid ECLM was selected to perform the energetic center localization of the optoelectronic signal detected by photodiode through a range scanner, such that m_2 is calculated by Equation 5, where SC is the spectral centroid in frequency (Hertz), $X^d[k]$ is the magnitude corresponding to frequency bin k , k is the frequency bin (fs/N) in Hertz, fs is the frequency sample, and N is the length of the discrete Fourier transform. The centroid value is converted from frequency to time domain using (a) a frequency bin correlation with time scale or (b) performing the centroid calculation directly by Equation 6 where TC is the temporal centroid in time index, $x[n]$ is the input signal, n is the time index, and L is the time length. This sequence of L time samples is represented by N frequency samples making up a frame after the Fourier transform. Each frame consists of N frequency samples and is called a spectrum. The discrete points on the x axis (frequency axis) are commonly referred to as frequency bins or just bins.

$$SC_{Hz} = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} kX^d[k]}{\sum_{k=1}^{N-1} X^d[k]} \quad (5)$$

$$TC = \frac{\sum_{n=1}^{L-1} nx[n]}{\sum_{n=1}^{L-1} x[n]} \quad (6)$$

The CCD is the sensor that gives place to the close-range photogrammetry.^[58] Photogrammetry gives information about the geometry of an object or surface through the use of photographs and provides less dense surface information but with high quality, especially along object space discontinuities, edges, and borders. It can be defined as the automation of information extraction from digital images, based on image analysis methods. A cost-efficient Logitech camera model C920 with a maximum resolution of 1920×1080 pixels at 30 fps is located parallel to the OSS photodiode to obtain a second source of information regarding angle α , by using a CCD sensor to acquire an image of the Field of view (FOV) at the same time as the OSS photodiode. Two methods have been previously proposed;^[58,59] one focused in the determination of edges and the shape centroid and the other focused in the density of points measured. Both of them calculate the energetic center (image matrix centroid) applying morphological operations. Mathematical morphology is a tool for extracting image components that are useful in representation and description of region shape; it works directly on spatial domain. It represents a nonlinear approach for detection of edges, using image transformations based on simple expanding and shrinking operations. Edge detection identifies and locates discontinuities in an image. An edge may be regarded as the boundary between two dissimilar regions in an image; classical methods of edge detection involve the convolution of an image with an operator (like Canny and Prewitt), which is developed to be sensitive to gradients in the image and returning values of zero in uniform areas. In the method focused on the determination of edge and the shape centroid, the edge location is performed by an operator

like Canny or Prewitt. The light energetic center is localized by the application of a series of morphological operations as dilation, erosion, boundaries location, fill image regions, and remove open area. Detailed MATLAB Script is found in the literature.^[58] In the method focused on density of points, after the image is captured, and the red color spectrum is obtained, a Gaussian blur filter (5×5 averaging matrix) is applied to smooth the captured image. By calculating the convolution of the original image and a 5×5 averaging matrix, the desired smoother image is obtained, which allows finding the center of the light spot precisely. Straightforward formal implementation of the 2D convolution equation in spatial form is used, calculated for finite intervals, defined by image frame limits. After the image has been blurred, the maximum values of red color are calculated for each row (x) and column (y) of the 2D matrix representing the image; the brighter the red color in the image, the higher the red value. The final results are the x and y coordinates of the light spot center inside the captured image (i.e., these coordinates instantly represented in pixels and further converted to X and Y). Detailed MATLAB Script is found in the literature.^[59] For this fusion sensor purpose, the method focused in the density of points of light reflection has been selected to be used during the experimentation, as shown in Figure 3.

3.2 | Experimental measurements

This project consists of three main research stages, (laboratory, outdoor, and field). The design of experiment and measurements in this section describes the results of the laboratory research stage and takes them as background for outdoor research stage, where the fusion of 2D and 3D image and range scanner datasets is done, whereas the field research stage summarizes future challenges for accomplishing the project scope of SHM for heritage buildings in the

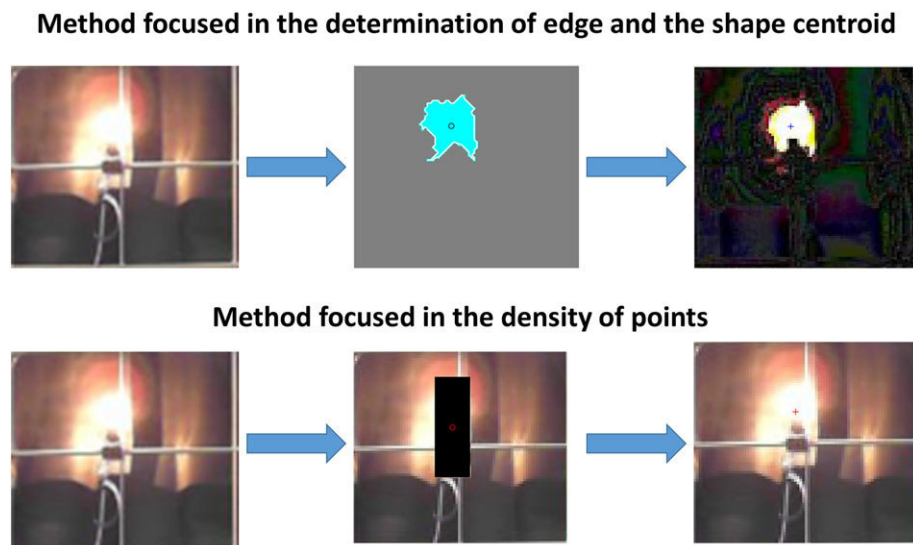


FIGURE 3 Energy Centre Localization Methods graphic representation of light image signal detected by charge-coupled device

Universidad Autónoma de Baja California at Mexicali city. The laboratory research stage started with the build of the one OSS for 3D measurements; the use of one OSS provides polar coordinates in a plane; the use of two OSS separated at known distances provide a spatial coordinate in a plane by dynamic triangulation calculations; and the use of three OSS provides the full scope of 3D spatial coordinates measurement. In this stage, one OSS was built and characterized at laboratory environment. During tests, it has been observed that a nonlinear behavior throughout the entire scanning scene is present, and in order to obtain an accuracy increase, the requirement of computational intelligence techniques support surged, for pattern recognition to produce an enhanced output in a modern approach to the prediction of the nonlinear measurement error of the OSS to compensate it. Figure 4 shows a general operation flow chart that explains how the OSS and computational intelligence are integrated, by an experiment performed through an optical table at laboratory environment. The flowchart is self-explanatory; nevertheless, a few aspects require further explanation.

Measurements were carried out during the scanning from 45° to 135° by Equation 5, with 32 checkpoints for each angle line. Ten measurements were taken at each checkpoint—that is, angle and distance, repeating this measurement process every 5° . A total of 6,020 measurements built the OSS measurements database of 6,020 instances (n rows) and four variables (p columns), as shown in Figure 5, where x_{ij} ($i = 1, \dots, n$), ($j = 1, \dots, p$) are the database values corresponding for column $p = 1$ the real objective angle under measurement (α_R), $p = 2$ the real objective distance under

x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$x_{(n-1)(p-3)}$	$x_{(n-1)(p-2)}$	$x_{(n-1)(p-1)}$	$x_{(n-1)p}$
$x_{n(p-3)}$	$x_{n(p-2)}$	$x_{n(p-1)}$	x_{np}

FIGURE 5 Optical scanning system measurements database

measurement, $p = 3$ the system scanning motor frequency, and $p = 4$ the measurement error (E) calculated by Equation 7, where E is the measurement error, representing how far the measurement from the real value is, α_R represents the angle real value, and α_M the angle measured by the system.

The fast computational algorithm “Square Robust Distance” was used for multivariate outlier detection, as defined by Equation 8, where RD is a matrix that diagonally contains the robust Mahalanobis distance of each multivariate instance x_i ($i = 1, \dots, n$), x is a matrix of n rows (instances) and p columns (variables), \bar{x} is a matrix of n row with p columns with mean \bar{x}_j ($j = 1, \dots, p$) from the group of instances (every row contains the same information; the column mean of all instances), and Σ^{-1} is the inverse covariance matrix.^[60–62] Obtaining a chi-critical value of 11.1433 for a 97.5% quantile chi-squared distribution.^[63] Detecting 136 outlier’s instances

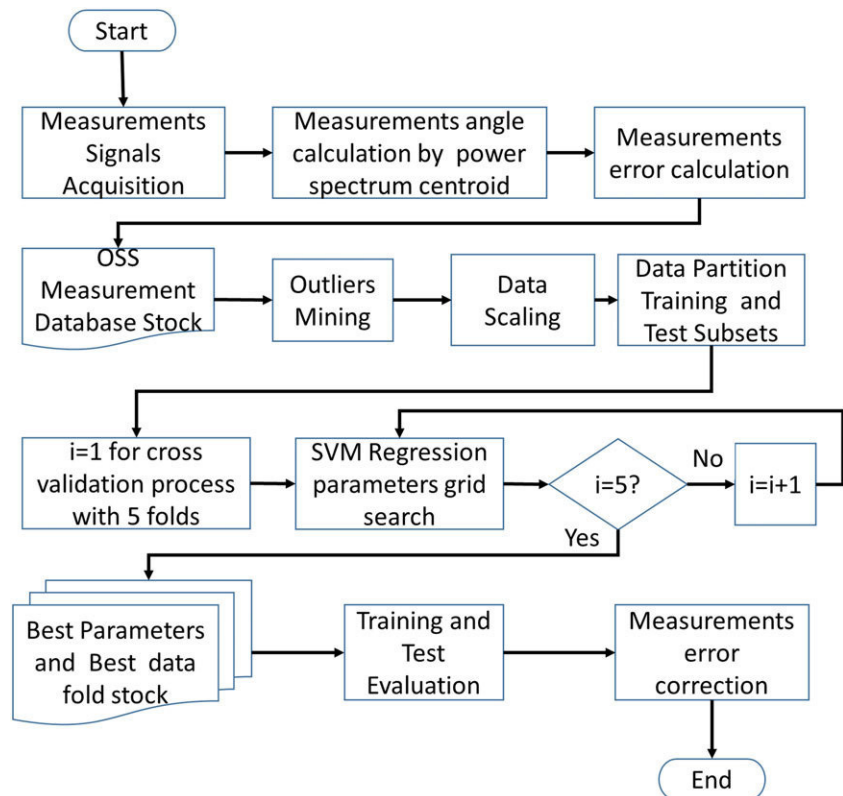


FIGURE 4 General operation flow through an optical table at laboratory environment

from 6,020 instances, presenting the 2.56% of instances from the original OSS measurement database. Obtaining New Database OSS measurement database of 5,884 instances, as shown in Figure 6.

$$E = \alpha_R - \alpha_M. \quad (7)$$

$$RD = ((x - \bar{x})^T \Sigma^{-1} (x - \bar{x})). \quad (8)$$

A scaling step on each column took place, from value 0 to 1 value. The new OSS measurement database was partitioned in two sets: the 80% training dataset and 20% test dataset, obtaining a training dataset of 4,708 instances, with four columns, and a test dataset of 1,176 instances, with four columns, indicating the first three columns as attributes and the last column as a target. To the prediction of the nonlinear measurement error, training data was given to the SVMR algorithm by a database: $\{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$, where x_i for $i = (1, \dots, n)$ are the attributes (independent variables) of n instances or observations and each x_i a vector of p columns, with p being the number of inputs variables (or attributes);

it means $x_1 = \{x_{11}, \dots, x_{1p}\}$ for $j = (1, \dots, p)$, y_i for $i = (1, \dots, n)$ are the outputs or targets values (dependent variable) of n instances or observations. To find a function $f(x)$ that has at most ε deviation from the actually obtained targets y_i for all the training data, and at the same time being as flat as possible. That is, acceptance of error prediction less than ε , but reject any deviation larger than ε . For a nonlinear function f defined by Equation 9, where $Q_{ij} = K(x_i, x_j)$ is one of the kernels Equations 11, 12, 13, or 14, subject to Equation 10 with constraint $0 \leq \beta_i, \beta_i^* \leq C$. Where, γ (gamma kernel), r (coefficient kernel), and d (degree of polynomial kernel) are kernel parameters.

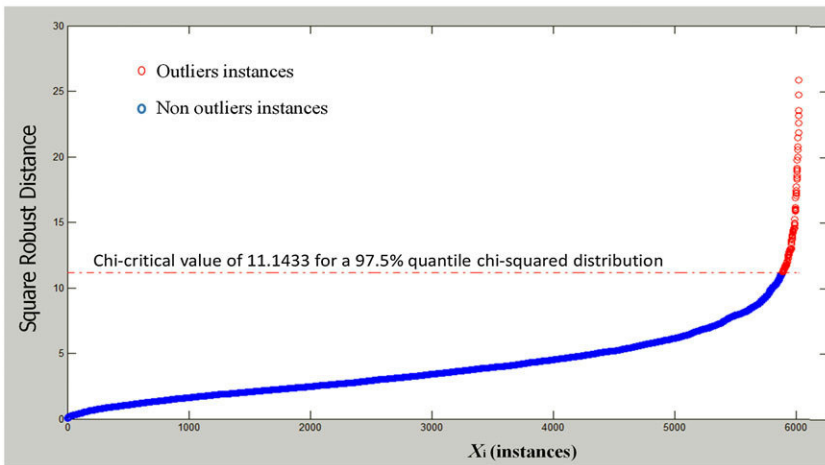
$$f(x_i) = \sum_j Q_{ij} (\beta_j - \beta_j^*) + b. \quad (9)$$

$$W = \frac{1}{2} \sum_{ij} (\beta_i - \beta_i^*) Q_{ij} (\beta_j - \beta_j^*) - \sum_i y_i (\beta_i - \beta_i^*) \quad (10)$$

$$+ \varepsilon \sum_i (\beta_i + \beta_i^*) + b \sum_{ij} (\beta_i - \beta_i^*).$$

$$K(x_i, x_j) = x_i^T x_j. \quad (11)$$

(a)



(b)

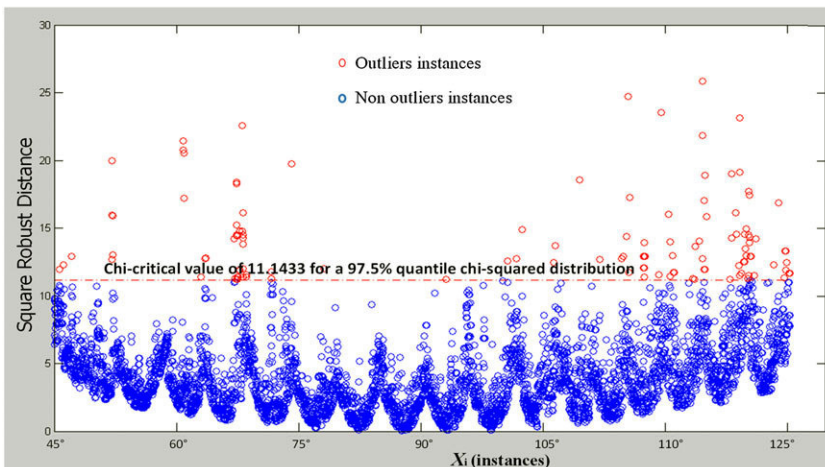


FIGURE 6 (a) Outlier sorted by square robust distance. (b) Outlier distribution through the scanning windows

TABLE 1 Support vector machine regression best parameters

Kernel type	Parameters							
	For original database				For new database without outliers			
	Gamma	C	NU	Degree	Gamma	C	NU	Degree
Lineal	—	2.00	0.015	—	—	0.250	0.015	—
Polynomial	—	4.00	0.500	1	—	2.00	0.500	1
RBF	11.31	8.00	0.650	—	11.31	2.00	0.700	—

TABLE 2 Support vector machine regression MSE results

Kernel	MSE results	
	For original database	For new database without outliers
Lineal	0.0144394	0.008840
Polynomial	0.014549	0.008817
RBF	0.008448	0.004192

Note. MSE = mean square error.

$$K(x_i, x_j) = (\gamma x_i^T x_j + r)^d, \gamma > 0. \quad (12)$$

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2), \gamma > 0. \quad (13)$$

$$K(x_i, x_j) = \tanh(\gamma x_i^T x_j + r). \quad (14)$$

In order to properly validate the data mining regression performance, the well-known k -fold cross-validation method was executed, repeating five times a fivefold and in each run performing grid search parameters. The following parameters were analyzed with an (a) original database and (b) new databases without declared outliers:

- Kernel type: [Lineal, Polynomial, RBF]
- Gamma: [2^{-5} , 2^{-4} , 2^{-3} , 2^{-2} , 2^{-1} , 2^0 , 2^1 , 2^2 , 2^3 , 2^4 , 2^5]
- C: [2^{-5} , 2^{-4} , 2^{-3} , 2^{-2} , 2^{-1} , 2^0 , 2^1 , 2^2 , 2^3 , 2^4 , 2^5]

- NU: [0.015, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9]
- Polynomial degree in Polynomial kernel:^[1–3]

The obtained result is shown in Table 1.

After performing the training with the best parameters, support vector machine weights were obtained, to subject the test dataset to it and predict the error. The comparison between predicted values and target values were evaluated by mean square error, and the obtained results are shown in Table 2, observing the lowest mean square error results from support vector machine regression with kernel RBF with new database without outliers. Figure 7 is a zoom of a section of the new database without outliers test dataset output prediction results by Lineal, Polynomial, and RBF Kernels, with the purpose of a graphical comparison of ε tube obtained with each Kernel.^[64] Obtaining an improvement on measurements by error correction by Equation 15, where α_{MC} is the angle measured corrected, α_M is the angle measured by the system, and E is the measurement error, representing how far the measurement from the real value is.

$$\alpha_{MC} = \alpha_M + E. \quad (15)$$

In the outdoor research stage, the second prototype has been used, which has been upgraded by improvements in the optical channel to expand the limits of scanning performance, in order to perform experimentation outdoors, using a real environment. The gain of the photodiode has been

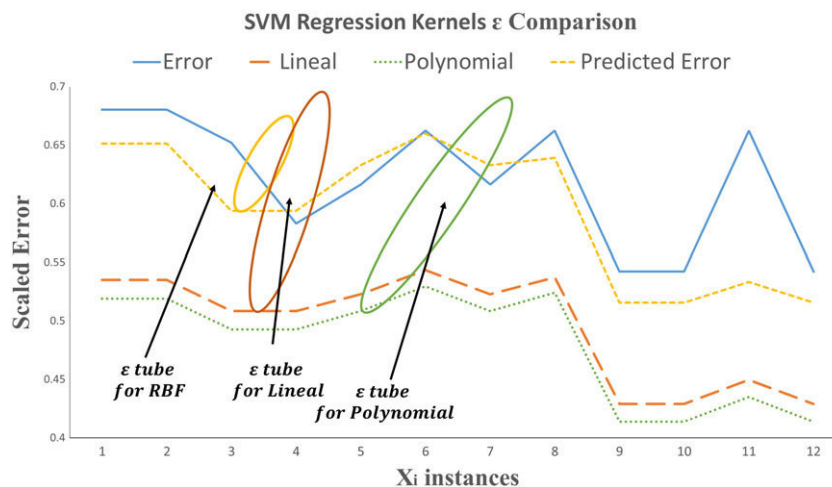


FIGURE 7 Support vector machine regression kernels results

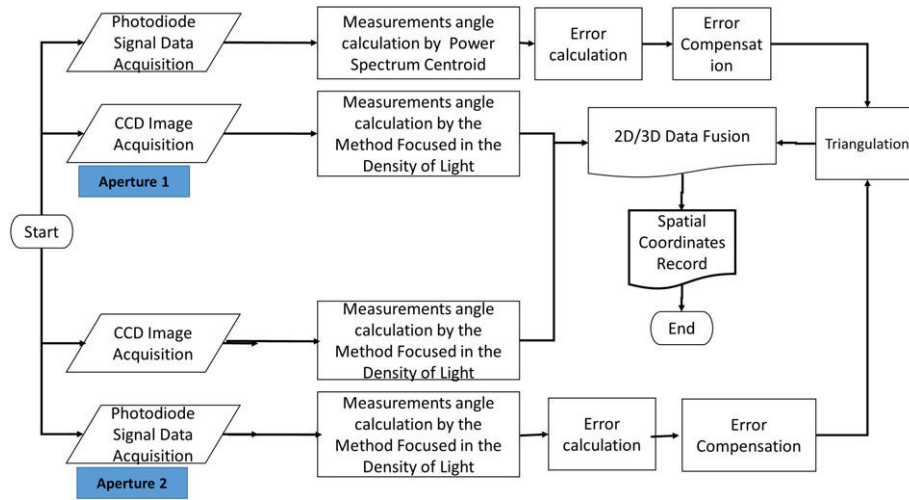


FIGURE 8 General operation flow through the outdoor environment

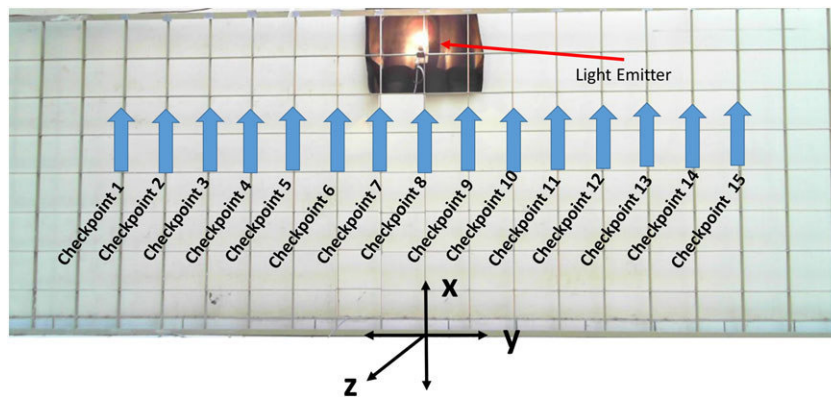


FIGURE 9 Structure checkpoints measurement at outdoor environment

increased, and the optical channel has been calibrated to align the mirror, lens, and photodiode. Measurements have been performed in a structure outside of the Instituto de Ingeniería of Universidad Autónoma de Baja California by two apertures in the OSS with photodiode and CCD sensors to be merged as described at the flow in Figure 8.

Fifteen measurement checkpoints were selected in the structure, the origin of a coordinate system was established coinciding with the center of the structure, and two apertures were used to perform dynamic triangulation, in order to obtain the Cartesian coordinate of checkpoints selected. The distance of 100 cm between the apertures was established, and the distance of 400 cm from apertures to the structure was established. The real coordinate of the 15 measurement points were dimensionally measured by a goniometer and a flex meter, with reference to the established origin coordinate. An incoherent light emitter has been positioned at the measurement checkpoints one by one; measurements have been performed by the OSS at each measurement point; both apertures sensed each one of the 15 checkpoint measurement points using photodiode

and CCD sensor at the same time, as shown in Figure 9. Angle measurement by photodiode sensor has been calculated by Power Spectrum Centroid, and their error measurement has been compensated by the trained support vector

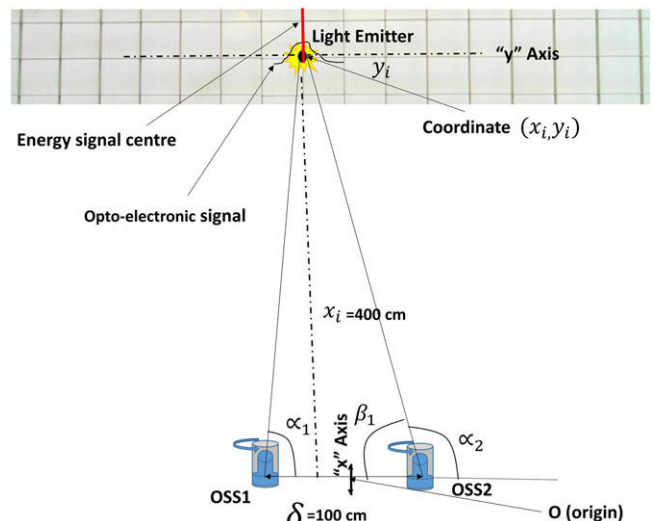


FIGURE 10 Dynamic triangulation system

TABLE 3 2D and 3D measurement process values

Reference		2D by CCD				3D by OSS												
Checkpoint	Real Cartesian coordinates in cm			Measured Cartesian coordinate in cm	Final Measurement error in cm	Real Alpha angles from apertures in degrees		Alpha Angles measurements by OSS without correction		Error correction of measurements by OSS							Measured Cartesian coordinate in cm	Final measurement Error in cm
	x	y	z	y	y Absolute error by CCD	Alpha 1	Alpha 2	Alpha 1	Alpha 2	Alpha 1 error	Alpha 2 error	Error prediction Alpha 1	Error prediction Alpha 2	Alpha 1 corrected	Alpha 2 corrected	Beta 2	y	y absolute error by OSS
1	160.02	-160.02	-400.00	-160.28	0.26	105.38	117.70	106.20	123.33	-0.82	-5.63	-0.81	-5.58	105.39	117.75	62.25	-159.72	0.30
2	160.02	-137.16	-400.00	-136.87	0.29	102.29	115.07	74.16	119.23	28.13	-4.16	27.90	-4.13	102.06	115.10	64.90	-133.82	3.34
3	160.02	-114.30	-400.00	-112.32	1.98	99.13	112.33	99.00	116.66	0.13	-4.33	0.13	-4.29	99.13	112.37	67.63	-114.08	0.22
4	160.02	-91.44	-400.00	-92.27	0.83	95.91	109.47	93.84	117.76	2.07	-8.29	2.05	-8.22	95.89	109.54	70.46	-91.02	0.42
5	160.02	-68.58	-400.00	-70.09	1.51	92.66	106.51	77.76	109.44	14.90	-2.93	14.78	-2.91	92.54	106.53	73.47	-67.55	1.03
6	160.02	-45.72	-400.00	-46.42	0.70	90.61	76.54	68.82	80.22	21.79	-3.68	21.62	-3.65	90.43	76.57	103.43	-46.94	1.22
7	160.02	-22.86	-400.00	-24.72	1.86	86.12	100.32	81.32	94.94	4.80	5.38	4.76	5.33	86.08	100.28	79.72	-22.58	0.28
8	160.02	0.00	-400.00	-2.11	2.11	82.87	97.12	80.96	80.81	1.91	16.31	1.89	16.17	82.85	96.99	83.01	0.57	0.57
9	160.02	22.86	-400.00	25.46	2.60	79.68	93.88	67.71	66.98	11.97	26.90	11.87	26.68	79.58	93.66	86.34	24.19	1.33
10	160.02	45.72	-400.00	46.63	0.91	76.54	90.62	81.33	94.44	-4.79	-3.83	-4.75	-3.80	76.58	90.65	89.35	45.49	0.23
11	160.02	68.58	-400.00	70.46	1.88	73.49	87.31	59.62	72.49	13.87	14.82	13.76	14.70	73.38	87.19	92.81	69.69	1.11
12	160.02	91.44	-400.00	93.20	1.76	70.53	84.05	75.96	74.70	-5.43	9.35	-5.39	9.27	70.57	83.97	96.03	92.73	1.29
13	160.02	114.30	-400.00	115.05	0.75	67.67	80.84	63.30	76.54	4.37	4.30	4.34	4.26	67.63	80.80	99.20	114.86	0.56
14	160.02	137.16	-400.00	137.66	0.50	64.93	77.71	65.58	60.72	-0.65	16.99	-0.64	16.85	64.94	77.57	102.43	139.13	1.97
15	160.02	160.02	-400.00	160.77	0.75	62.30	74.62	57.04	71.76	5.26	2.86	5.22	2.84	62.26	74.60	105.40	160.00	0.02

Note. CCD = charge-coupled device; OSS = optical scanning system.

machine weight using Equation 10 obtained from laboratory experiments (also called “support vector regression” by MATLAB software for SVMR command), and with both matrix of angles measured by both sensors at each aperture, Cartesian coordinates have been calculated by dynamic triangulation. The use of two OSS separated at known distances provide a spatial coordinate in a plane by dynamic triangulation calculations. This coordinate calculation method is called dynamic due to the rotation ability of the scanning apertures of the OSS, allowing having moving angles that can form triangles with different shapes for a very short period of time. When a triangle is formed thanks to the light emitter detected by two apertures, all the necessary information to calculate the coordinate of the light emitter are obtained. In order to calculate the coordinates, a set of equations derived from the law of sines as described in the literature^[7] are used. For our application with incoherent light instead of a laser and the use of two optical scanners apertures instead of a positioning laser and two scanner apertures, we used the law of sines and Pythagoras to calculate the coordinate described in Figure 10, and Equations 17 and 18 derived from these laws, where δ is the known distance between optical apertures, α_1 is the measured angle by aperture 1, α_2 is the measured angle by aperture 2, and (x_i, y_i) is the spatial coordinate of the i^{th} light emitter position. Cartesian coordinates measurement by OSS have been calculated by dynamic triangulation, whereas Cartesian coordinates measurement by CCD sensor have been calculated by the method focused in the density of light, as shown in Table 3, obtaining an absolute average error value of

0.93 cm from the OSS system and an absolute average error value of 1.25 cm from CCD.

$$\beta_1 = 180^\circ - \alpha_1. \quad (16)$$

$$x_i = \frac{\delta \sin \alpha_2 \cos(90 - \beta_1)}{\sin(\beta_1 + \alpha_2)}. \quad (17)$$

$$y_i = \frac{-\delta \sin \alpha_2 \sin(90 - \beta_1)}{\sin(\beta_1 + \alpha_2)} - 50 \text{ for } \delta = 100 \text{ cm}. \quad (18)$$

The fusion of 2D image and 3D range scanner datasets has been done by “wfun” and “wfunmat” commands from MATLAB wavelet toolbox to database enhanced by AI, which is a developing wavelet-based algorithm for signal analysis. Discrete wavelet transforms enable to detect patterns that are not visible in the raw data. Wavelets are used to obtain multiscale variance estimates of a measure, and the multiscale correlation between two measures. The “wfun” command was designed for fusion of functions, whereas the “wfunmat” command was designed for fusion of two matrices or arrays; the fusion method is classified as simple methods (max, min, mean, and rand), and the parameter depends on methods (linear, up-down fusion, down-up fusion, left-right fusion and right-left fusion).^[65] In this experimentation, 2D and 3D fusion have been assessed by both methods, which obtained the best results using the “wfun” command; Table 4 and Figure 11 show the 2D and 3D fusion results.

TABLE 4 2D and 3D fusion methods results

y Cartesian coordinate in cm				y Cartesian coordinate absolute error in cm		
Real	3D OSS measurement	2D CCD measurement	3D/2D Fusion	From 3D OSS	From 2D CCD	From 2D and 3D fusion
-160.02	-159.72	-160.28	-160.11	0.30	0.26	0.09
-137.16	-133.82	-136.87	-134.74	3.34	0.29	2.42
-114.30	-114.08	-112.32	-113.56	0.22	1.98	0.74
-91.44	-91.02	-92.27	-91.39	0.42	0.83	0.05
-68.58	-67.55	-70.09	-68.31	1.03	1.51	0.27
-45.72	-46.94	-46.42	-46.78	1.22	0.70	1.06
-22.86	-22.58	-24.72	-23.22	0.28	1.86	0.36
0.00	0.57	-2.11	-0.23	0.57	2.11	0.23
22.86	24.19	25.46	24.57	1.33	2.60	1.71
45.72	45.49	46.63	45.83	0.23	0.91	0.11
68.58	69.69	70.46	69.92	1.11	1.88	1.34
91.44	92.73	93.20	92.87	1.29	1.76	1.43
114.30	114.86	115.05	114.92	0.56	0.75	0.62
137.16	139.13	137.66	138.69	1.97	0.50	1.53
160.02	160.00	160.77	160.24	0.02	0.75	0.22
Average Error				0.93	1.25	0.81
Min Error				0.02	0.26	0.05
Max Error				3.34	2.60	2.42
MSE Error				1.56	2.07	1.16

Note. CCD = charge-coupled device; OSS = optical scanning system.

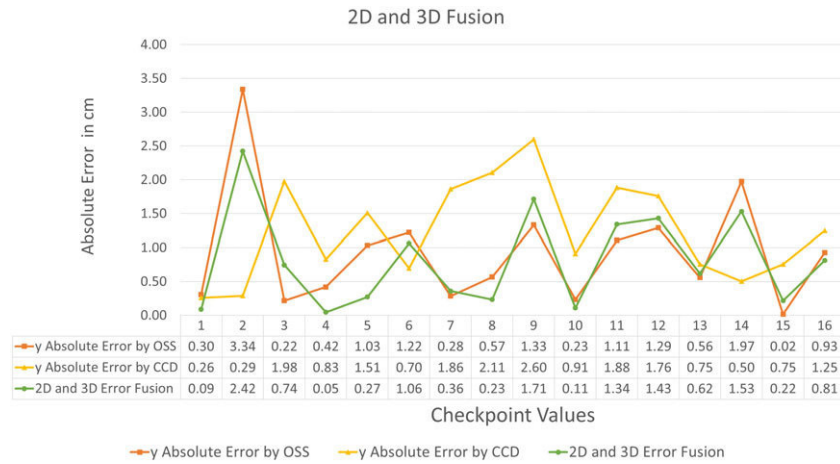


FIGURE 11 2D and 3D fusion results

The average measurement error with OSS is 0.93 cm, whereas the average measurement error with CCD is 1.25 cm, and after the 2D and 3D fusion, new measurement values (from 2D and 3D fusion) present the average measurement error of 0.81 cm, improving the measurement accuracy of 64.8% (decreasing the average error from 1.25 to 0.81 cm of error, corresponding to a decrease of 35.2% of error).

The laboratory and outdoor research stages provided satisfactory results as a product of the improvements applied to the OSS in development. However, the absolute error average has decreased to 35.2%; for the field research stage, there are still opportunities to increase the resolution, accuracy, and precision; measurements error at checkpoints 2, 6, 9, 11, 12, and 14 are bigger than 1 cm, and it is caused by optical noise from the environment, which affect both the OSS results and the CCD results. Polarized sheets will be implemented to address light from the light emitter to OSS photodiode sensor, to avoid reflection light that acts as noise to the machine vision system. Between laboratory and outdoor research, the increase of scanning area and accuracy enhancement by the implementation of 2D and 3D image and range scanner datasets fusion has been reached, giving place for a further stage of experimentation, called field research stage. Future challenges for accomplishing the project scope of SHM for heritage buildings in the Universidad Autónoma de Baja California at Mexicali city are

- Incorporate a third aperture to the OSS; the use of three apertures in the OSS provides the full scope of 3D spatial coordinates measurement.
- Perform real-time measurements by the integration of the signal processing stages (acquisition, energy signal center calculations, error compensations, fusion, and triangulation).
- Integrate the OSS signal processing by hardware, such as a field programmed gate array, to satisfy the monitoring system requirements to continue their tasks with

safety and high accuracy on temporary occlusion condition.

- Include adaptive elements to the signal processing task in order to enhance the system to be capable of performance in an unknown environment.
- Implementation a communication system to wireless record measurements.
- Evaluate the requirement of time processing reduction.
- Reduce the OSS energy consumption.
- Perform measurement analysis to identify structures natural patterns from damages.

4 | SUMMARY AND CONCLUSION

To design and implement a monitoring program, it is necessary to perform accurate analyses on the structural functioning of the building following a rigorous scientific process: from the study of the historical and geometrical evolution of the structure of a methodical survey of the displacements and damage pattern to interpret any active damage mechanisms and define the most important spatial coordinates to be monitored. The outcome of our project has been a prototypical system for supporting an expert user in conducting structural analyses on buildings using extracting spatial coordinate information from light emitters mounted over a structure as an indicator, in order to evaluate any structural displacement. Users thereby may monitor the state of previous interventions, reason about the stability and integrity of the structure, identify potential risks, and plan reinforcement activities accordingly. Besides the specific scenario considered here, such a system may find application in several areas, as for instance in a museum scenario, bridge, dam, industrial structures, or any other historical building monitoring projects. We conclude that this article outlines the proposed strategy using AI, and the capability to process very large datasets and understand images and range scanner data through their fusion.

REFERENCES

- [1] Z. Dworakowski, P. Kohut, A. Gallina, K. Holak, T. Uhl, *Struct. Control Health Monit.* **2016**, 23.1, 35.
- [2] M. M. Derriso, M. P. DeSimio, C. D. McCurry, C. M. S. Kabban, S. E. Olson, *Struct. Health Monit.* **2014**, 13.6.
- [3] Q. Xu, *Struct. Health Monit.* **2013**, 1475921713495083.
- [4] M. Rivas-Lopez, O. Sergiyenko, F. F. Gonzalez-Navarro, J. Rivera-Castillo, D. Hernandez-Balbuena, J. C. Rodríguez-Quiñonez, *Signal Processing* **2014**, 98, 37.
- [5] D. Feng, M. Q. Feng, *Struct. Control Health Monit.* **2015**, 23(5), 876.
- [6] M. R. Lopez, W. F. Fuentes, J. R. Castillo, O. Sergiyenko, D. H. Balbuena, A Method and Electronic Device to Detect the Optoelectronic Scanning Signal Energy Centre. *Tech*, Croatia ISBN **2012** 978.
- [7] L. C. Basaca-Preciado, O. Y. Sergiyenko, J. C. Rodríguez-Quinonez, X. García, V. V. Tyrsa, M. Rivas-Lopez, I. Tabakova, *Opt. Lasers Eng.* **2014**, 54, 159.
- [8] J. C. Rodríguez-Quinonez, O. Sergiyenko, F. F. Gonzalez-Navarro, L. Basaca-Preciado, V. Tyrsa, *Signal Processing* **2013**, 93.2, 378.
- [9] W. Flores-Fuentes, M. Rivas-Lopez, O. Sergiyenko, J. C. Rodríguez-Quiñonez, D. Hernández-Balbuena, J. Rivera-Castillo, *Sensors J, IEEE* **2014**, 14.2, 2355.
- [10] W. Flores-Fuentes, J. C. Rodríguez-Quiñonez, D. Hernandez-Balbuena, M. Rivas-López, O. Sergiyenko, J. Rivera-Castillo, P. Mayorga-Ortiz, *Industrial Electronics (ISIE), 2015 IEEE 24th International Symposium on.* IEEE, **2015**.
- [11] M. Ceriotti, L. Mottola, G. P. Picco, A. L. Murphy, S. Guna, M. Corra, P. Zanon, *Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks.* IEEE Computer Society, **2009**.
- [12] L. F. Ramos, L. Marques, P. B. Lourenço, G. De Roeck, A. Campos-Costa, J. Roque, *Mech. Syst. Signal Processing* **2010**, 24(5), 1291.
- [13] P. Breuer, T. Chmielewski, P. Górski, E. Konopka, L. Tarczyński, *Struct. Control Health Monit.* **2015**, 22(7), 1002.
- [14] P. Kohut, K. Holak, T. Uhl, Ł. Ortyl, T. Owerko, P. Kuras, R. Kocierz, *Struct. Health Monit.* **2013**, 12(5–6), 411.
- [15] J. Li, H. Hao, K. Fan, J. Brownjohn, *Struct. Control Health Monit.* **2015**, 22(4), 726.
- [16] L. Balsamo, R. Betti, *Struct. Control Health Monit.* **2015**, 22(10), 1240.
- [17] X. Zhao, W. Li, L. Zhou, G. Song, Q. Ba, S. C. M. Ho, J. Ou, *Struct. Control Health Monit.* **2015**, 22(6), 903.
- [18] A. Buluta, A. K. Singha, P. Shinb, T. Fountainb, H. Jassob, L. Yanc, A. Elgamac, *Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics.* International Society for Optics and Photonics, **2005**.
- [19] K. Worden, G. Manson, *Phil. Trans. Royal Soc. London A: Mathematical, Phys. Eng. Sci.* **2007**, 365(1851), 515.
- [20] L. Bornn, C. R. Farrar, G. Park, K. Farinholt, *J. Vibration Acoustics* **2009**, 131(2), 021004.
- [21] J. M. Ko, Y. Q. Ni, *Eng. Struct.* **2005**, 27(12), 1715.
- [22] D. J. Inman, M. Ahmadian, R. O. Claus, *J. Intelligent Material Syst. Struct.* **2001**, 12(11), 775.
- [23] W. Liu, B. Tang, Y. Jiang, *Renew. Energy* **2010**, 35(7), 1414.
- [24] R. Qu, J. Xu, R. Patankar, D. Yang, X. Zhang, F. Guo, *Struct. Health Monit.* **2006**, 5(2), 185.
- [25] G. Anastasi, G. L. Re, M. Ortolani. *Human System Interactions, 2009. HSI'09. 2nd Conference on.* IEEE, **2009**.
- [26] B. Glisic, D. Inaudi, D. Posenato, A. Figini, N. Casanova, *In Proceedings of the 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure-SHMI-3*, Vancouver, BC, Canada, **2007**, 13.
- [27] M. Solís, A. Romero, P. Galvín, *Struct. Health Monit.* **2010**, 9(1), 41.
- [28] D. Zonta, H. Wu, M. Pozzi, P. Zanon, M. Ceriotti, L. Mottola, M. Corrá, *Smart Struct. Syst.* **2010**, 6(5–6), 595.
- [29] F. D'Amato, P. Gamba, E. Goldoni, *In Environmental Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2012 IEEE Workshop on,* **2012**, 1.
- [30] A. Abrardo, L. Balucanti, M. Belleschi, C. M. Carretti, A. Mecocci, *In Environmental Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2010 IEEE Workshop on,* **2010**, 98. IEEE.
- [31] A. Mecocci, A. Abrardo, *Sensors* **2014**, 14(1), 770.
- [32] D. Balsamo, G. Paci, L. Benini, B. Davide, *In Environmental Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), 2013 IEEE Workshop on,* **2013**, 1. IEEE.
- [33] I. Lombillo, H. Blanco, J. Pereda, L. Villegas, C. Carrasco, J. Balbás, *Struct. Control Health Monit.* **2016**, 23(1), 69.
- [34] S. C. Mukhopadhyay, I. Ihara, Sensors and technologies for structural health monitoring: a review, in *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*, Springer Berlin Heidelberg **2011**, 1.
- [35] Y. Li, Q. Zheng, A. Sharf, D. Cohen-Or, B. Chen, N. J. Mitra, *In 2011 International Conference on Computer Vision, IEEE,* **2011**, 882.
- [36] M. Chaouch, A. Verroust-Blondet, *In 2007 IEEE International Conference on Image Processing, IEEE,* **2007**, 6, 373.
- [37] A. Savran, *Pattern Recognit.* **2012**, 45(2), 767.
- [38] T. Schenk, B. Csathó, *Int. Archives Photogrammetry Remote Sensing Spatial Inform. Sci.* **2002**, 34.3(A), 310.
- [39] M. Husken, M. Brauckmann, S. Gehlen, C. Von der Malsburg, *In 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)- Workshops on,* **2005**, 174. IEEE.
- [40] D. Feng, M. Q. Feng, E. Ozer, Y. Fukuda, *Sensors* **2015**, 15(7), 16557.
- [41] M. Q. Feng, Y. Fukuda, D. Feng, M. Mizuta, *J. Bridge Eng.* **2015**, 20(12) 04015023.
- [42] L.-J. Wu, F. Casciati, S. Casciati, *Eng. Struct.* **2014**, 60, 113.
- [43] J. L. Rothfeder, S. Feng, T. M. Rath, *In Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, 2003. CVPRW'03. Conference on,* **2003**, 3, 30. IEEE.
- [44] E. K. Forkuo, Doctoral dissertation, The Hong Kong Polytechnic University, **2005**.
- [45] M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle, Cengage Learning, **2014**.
- [46] S. M. Seitz, B. Curless, J. Diebel, D. Scharstein, R. Szeliski, *In 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06),* **2006**, 1, 519. IEEE.
- [47] B. Li, Y. Lu, C. Li, A. Godil, T. Schreck, M. Aono, H. Fu, *Comp. Vision Image Understanding* **2015**, 131, 1.
- [48] H. Li, H. Ding, D. Huang, Y. Wang, X. Zhao, J. M. Morvan, L. Chen, *Computer Vision Image Understanding* **2015**, 140, 83.
- [49] V. Grout, N. Houlden, *Procedia-Soc. Behav. Sci.* **2014**, 141, 680.
- [50] I. Bloch, H. E. N. R. I. MAITRE, *In Computer Graphics and Image Processing, 1997. Proceedings., X Brazilian Symposium on,* **1997**, 127. IEEE.
- [51] C. Sheng, T. Dawei, L. Guozheng, Y. Juan, *In TENCON'02. Proceedings. 2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering,* **2002**, 1, 565. IEEE.
- [52] K. Faceli, A. C. De Carvalho, S. O. Rezende, *Appl. Intelligence* **2004**, 20(3), 199.
- [53] T. P. Banerjee, S. Das, *Inform. Sci.* **2012**, 217, 96.
- [54] L. Lindner, O. Sergiyenko, J.C. Rodríguez-Quiñonez, M. Rivas-Lopez, D. Hernandez-Balbuena, W. Flores-Fuentes, F.N. Murrieta-Rico, V. Tyrsa, *Industrial Robot: An International Journal* **2016**, 43, 360.
- [55] B. Hou, Z. Y. Wu, P. Grosso, *Optical Eng.* **2011**, 50(3), 033603.
- [56] M. R. Lopez, O. Y. Sergiyenko, V. V. Tyrsa, W. H. Perdomo, L. D. Cruz, D. H. Balbuena, J. N. Hipolito, *Struct. Health Monit.* **2010**, 9(2), 105.
- [57] M. Rivas-Lopez, O. Sergiyenko, J. Rivera-Castillo, W. Flores-Fuentes, J. C. Rodríguez-Quiñonez, D. Hernández-Balbuena, J. L. Taddei-Bringas, *In 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE),* **2014**, 1955. IEEE.
- [58] J. C. Rodríguez-Quinonez, D. Hernandez-Balbuena, O. Segiyenko, M. Rivas-Lopez, W. Flores-Fuentes, L. C. Basaca-Preciado, *In 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE),* **2014**, 1944. IEEE.

- [59] L. C. Basaca-Preciado, J. C. Rodríguez-Quiñonez O. Segiyenko, W. Flores-Fuentes, P. Mercorelli, F. N. Murrieta-Rico, *In IECON 2014–40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, **2014**, 2406. IEEE.
- [60] Y.-L. Zhou, E. Figueiredo, N. Maia, R. Sampaio, R. Perera, *Struct. Control Health Monit.* **2015**, 22(10), 1209.
- [61] W. Flores-Fuentes, O. Sergiyenko, F. F. Gonzalez-Navarro, M. Rivas-López, D. Hernández-Balbuena, J. C. Rodríguez-Quiñonez, V. Tyrsa, L. Lindner, *Optical and Quantum Electronics*, **2016**, 48(8), 403.
- [62] W. Flores-Fuentes, O. Sergiyenko, F. F. Gonzalez-Navarro, M. Rivas-López, J. C. Rodríguez-Quiñonez, D. Hernández-Balbuena, V. Tyrsa, L. Lindner, *Optical and Quantum Electronics*, **2016**, 1.
- [63] P. Filzmoser, M. Gschwandtner, *R package version*, **2012**, 1(7).
- [64] A. J. Smola, B. Schölkopf, *Statistics Comp.* **2004**, 14(3), 199.
- [65] S. A. Hoseini, M. R. Ashraf, *arXiv preprint arXiv:1307.3005* **2013**.

How to cite this article: Rivera-Castillo J, Flores-Fuentes W, Rivas-López M, et al. Experimental image and range scanner datasets fusion in SHM for displacement detection. *Struct Control Health Monit.* 2017;24:e1967. <https://doi.org/10.1002/stc.1967>



Sample Issue

Signal Processing

An International Journal

A publication of the European Association for Signal Processing (EURASIP)

Signal Processing incorporates all aspects of the theory and practice of **signal processing (analogue and digital)**. It features original research work, tutorial and review articles, and accounts of practical...

[View full aims and scope](#)

Editor-in-Chief: B. Ottersten
[View full editorial board](#)

[Guide for Authors](#)

[Submit Your Paper](#)

[Track Your Paper](#)

[Order Journal](#)

[View Articles](#)

Impact Factor:
1.851


5-Year Impact Factor:
1.745

Imprint: ELSEVIER

ISSN: 0165-1684

Announcements

Engineering AudioSlides Challenge: Winners now announced!



AudioSlides competition for Top25 papers: and the winner is...

News

[Announcement - 2013 Best Paper Awards](#)

[VIEW ALL](#)



Publish your article
Open Access in
Signal Processing

Stay up-to-date

Register your interests and receive email alerts tailored to your needs

[Click here to sign up](#)

Follow us

[f](#) [t](#) [in](#)

Recent Open Access Articles

[Open Access](#)
Transcoding resilient video watermarking scheme based on spatio-temporal HVS and DCT
Antonio Cedillo-Hernandez | Manuel Cedillo-Hernandez | ...

[Open Access](#)
An inverse QRD-RLS algorithm for linearly constrained minimum variance adaptive filtering
César A. Medina S. | Raimundo Sampaio-Neto

Journal Insights

Discover this journal's metrics



Impact

Authors

Speed

[Subscribe to RSS](#)



Combined application of Power Spectrum Centroid and Support Vector Machines for measurement improvement in Optical Scanning Systems [☆], ^{☆☆}



Wendy Flores-Fuentes ^{a,*}, Moises Rivas-Lopez ^b, Oleg Sergiyenko ^b,
Felix F. Gonzalez-Navarro ^b, Javier Rivera-Castillo ^b,
Daniel Hernandez-Balbuena ^a, Julio C. Rodríguez-Quiñonez ^a

^a Faculty of Engineering of Autonomous University of Baja California, Mexicali, Baja California, Mexico

^b Engineering Institute of Autonomous University of Baja California, Mexicali, Baja California, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 June 2013

Received in revised form

31 October 2013

Accepted 7 November 2013

Available online 21 November 2013

Keywords:

Support Vector Machines

Power Spectrum Centroid

Energy Signal Centre

SHM

ABSTRACT

In this paper Support Vector Machine (SVM) Regression was applied to predict measurements errors for Accuracy Enhancement in Optical Scanning Systems, for position detection in real life application for Structural Health Monitoring (SHM) by a novel method, based on the Power Spectrum Centroid Calculation in determining the energy center of an optoelectronic signal in order to obtain accuracy enhancement in optical scanning system measurements. In the development of an Optical Scanning System based on a 45° – sloping surface cylindrical mirror and an incoherent light emitting source, surged a novel method in optoelectronic scanning, it has been found that in order to find the position of a light source and to reduce errors in position measurements, the best solution is taking the measurement in the energy centre of the signal generated by the Optical Scanning System. The Energy Signal Centre is found in the Power Spectrum Centroid and the SVM Regression Method is used as a digital rectified to increase measurement accuracy for Optical Scanning System.

© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Structural Health Monitoring (SHM) is a technology focused on data acquisition and analysis regarding man-made structures. The data is obtained from non-destructive sensors and its analysis allows the detection of anomalies to evaluate its health, by means of a comparison between those values and a well-known health profile. This technology is applied in a wide spectrum of engineering fields that

concerns with structures e.g. buildings, bridges, stadiums, tunnels and SHM systems design and development [1].

Over its useful life, a structure experiences deterioration and damage due to environmental conditions and excessive load conditions – e.g. corrosion, chemical reactions, humidity, fatigue, ground displacement and vibration, producing deformations, cracking, dislocation and even collapses. SHM provides valuable information to develop preventive maintenance programs, aiming to prevent disasters and elevated costs due to corrective actions.

Nowadays there exist SHM systems with sensors based in several technologies for example optical fiber, video cameras, and optical scanning systems. Each SHM system has its own advantages and disadvantages that respond to many situations – e.g. structure type, no. of features to be monitored, etc.

In this paper, an Optical Scanner System (OSS) is subject to be enhanced by increasing its accuracy by modeling

[☆] This document is a collaborative effort.

^{☆☆} This work was supported by the Engineering Institute of Autonomous University of Baja California, Campus Mexicali, Blvd. Benito Juarez, s/n, C.P. 21280, Mexicali, Baja California, Mexico.

* Corresponding author. Tel.: +52 686 566 41 50.

E-mail addresses: wendy.flores6@uabc.edu.mx,
wendy.flores@gmail.com, wfloresf@upbc.edu (W. Flores-Fuentes).

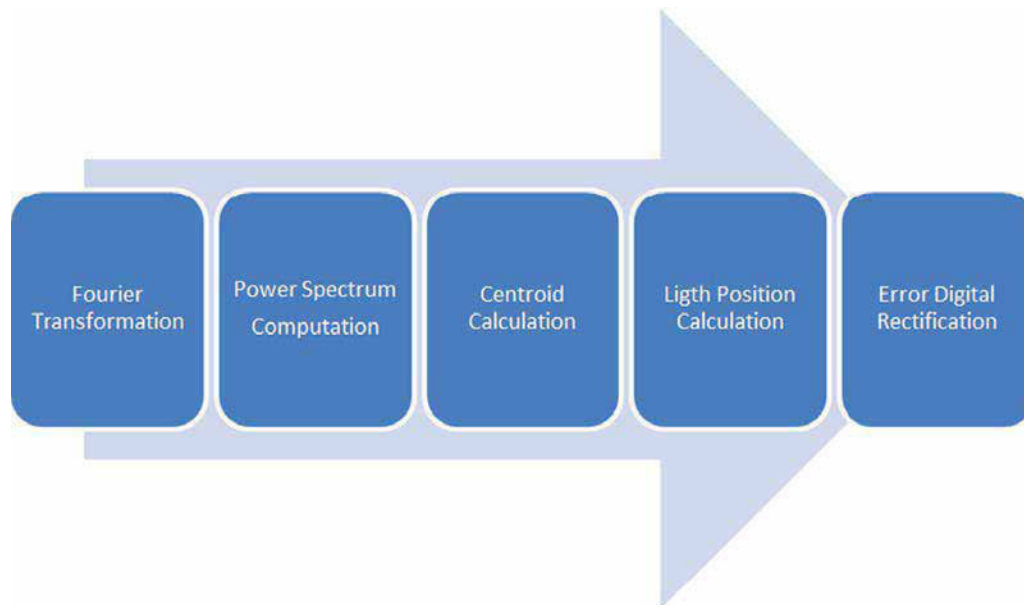


Fig. 1. Data management flow process.

possible errors in position measurements by means of machine learning techniques. Previously experimentation in [2–4] has been adapted and developed through the current paper to introduce the Power Spectrum Centroid and Support Vector Machine techniques.

Experiments on [2] shown that in the finding of the position of a light source, the measurement could be performed at the Signal Rising Edge or at the Signal Energy Centre due to the electrical signal resembles a Gaussian shaped signal with noise, with a slight deformation, or even a more complex shape. These variations depend on several field conditions, for example, the properties of the medium through which the light is travelling; some internal and external error sources – e.g. like the motor eccentricity at low speed scanning, noise that could interfere with the wavelength of the light sources; physical phenomena such as of reflection, diffraction, absorption and refraction.

The energy centre of the signal concept has been widely implemented in optical based systems [3,5–16].

Several mathematical principles and techniques have been developed in order to detect the physical position [17–22] of objects with maximum accuracy.

As example of these applications are the Charge-Couple Device (CCD) and the Position Sensitive Detectors (PSDs), they generate different shape of signals during an optical scanning process and output currents related to the “centre of mass” of light incident on the surface of the device, CCD and PSD both collect a portion of the back-reflected light from the target. The position of the spot is related to the target position and the distance from the source [23].

The Power Spectrum Centroid (PSC) is the energy maximum concentration of the power carried by the wave (signal) per unit frequency [24]. It is correlated with the energy centre of the signal since the power spectrum centroid can be thought as the centre of gravity for the frequency components in a spectrum. The PSC is a real positive valued function

(power per hertz or energy per hertz) of a frequency variable associated with the function of time.

In a SHM system, right after data acquisition stage takes place; a data management process is carried. It consists of five steps as shown in Fig. 1.

- Step 1. Data processing through Fourier Transformation to translate data from time domain to frequency domain.
- Step 2. Power Spectrum computation in order to represent the data in power per frequency unit.
- Step 3. Centroid calculation, which correspond to the energy centre of the signal (in frequency domain).
- Step 4. Convert this frequency domain coordinate to time domain coordinate to obtain the position where the light-emitting source under scanning is positioned.
- Step 5. A digital rectification in order to obtain accuracy enhancement.

It is necessary to recognize that each set of measurements could be affected by different error sources generated due to environmental conditions or even errors due to the mechanism by itself. Hence, systematic and random errors do not follow a linear function, since their behavior is by the position – i.e. angle and distance, scanning frequency. For this reason, a digital rectification by a linear function is not suitable to the task at hand.

Therefore, in this work it is proposed to use error approximation functions to perform the digital rectification by using a well known machine learning regression model, the Support Vector Machine (SVM). It is an intelligent algorithm to be trained with historical system behavior aimed to provide error predictions into the digital rectification process at each measurement.

2. Overall Optical Scanning System functioning

In this chapter, an OSS [2] will be described in detail. Theoretical Principles, measurements concepts and the Power Spectrum Centroid Computing Method will be described, as long as the accuracy enhanced proposal.

2.1. Scanning

Optoelectronic scanners are widely used in multiple applications. Objects detection in 2D or 3D Surface recognition [25,26]; thickness measurement [27]; medical, architectural and robotics applications [26,28,29] are active fields of practical use. Most of the position or geometry measurement by scanners uses the triangulation principle [27]. There are two types of scanners designed for position measurement tasks:

- a. Scanners with static sensors and,
- b. Scanners with rotating mirrors.

Optical triangulation sensors with CCD or PSD are typically used to measure position. In SHM, the scanners operational principle with rotating mirrors for large distances measurement, consist of a unit with a mirror(s) rotating at constant speed by means of an electrical motor. This configuration is set in order to find the light beam and

deviate it to a photodiode through the lens. Its primary advantages are speed and the capacity to scan wide-open angles. They are usually rotated continuously in one direction at a fixed speed to provide repetitive unidirectional scans which are superimposed in the scanning field, or plane [27].

2.1.1. The 45°-sloping cylindrical mirror scanner aperture

The OSS of this study – see in Fig. 2 – consists of the following elements:

- a. An incoherent light source emitter (non-rotating) mounted on the structure under monitoring. That could be placed at different angles to detect its position as shown in Fig. 2 at 90°, 120° and 150°.
- b. A passive rotating optical aperture sensor designed with a 45°-sloping mirror, and embedded into a cylindrical micro rod. The beam of light is deviated by the 45°-sloping mirror to a double convex lens and filtered, in order to remove any interference and enhance the focus.
- c. A photodiode to capture the beam of light while the cylindrical micro rod mounted on a DC electrical motor shaft is rotating.

This last element generates the targeted signals to be analyzed by the proposed method. In the case of that the incoherent light emitter source, mounted on the structure, changes its position, the possibility of deterioration or damage is present.

The light emitter source is set at a distance from the receiver; the receiver is compound by the mirror, which spins with an angular velocity ω . The beam emitted arrives with an incident angle β with respect to the perpendicular mirror, and is reflected with the same angle β , according to the reflecting principle to pass through the lens that concentrates the beam to be captured by the photodiode, which generates a signal with a shape similar to the Gaussian function. When the mirror starts to spin, the sensor “s” is synchronized with the origin generating a pulse that indicates the starting of measurement that finishes when the sensor “s” releases the next start signal. This signal is captured by National Instrument USB-6008 data acquisition module to start the signal processing method. Fig. 3 shows the timing diagram and how the light energy intensity increments in the centre of the signal generated by the scanner. The sensor “s” generates

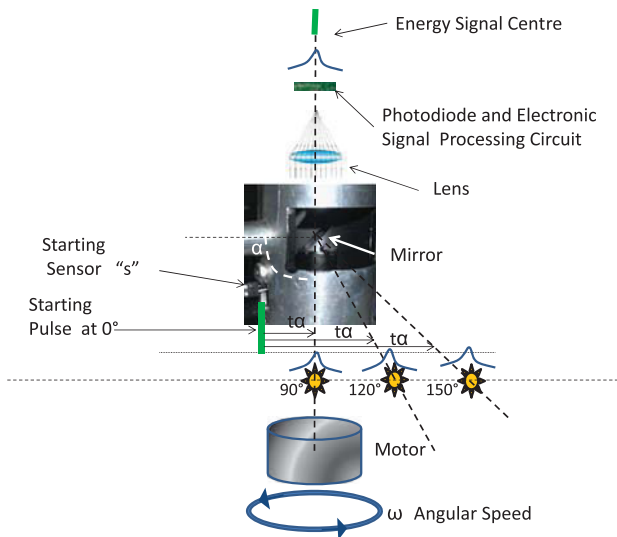


Fig. 2. The 45°-sloping cylindrical mirror scanner schematic.

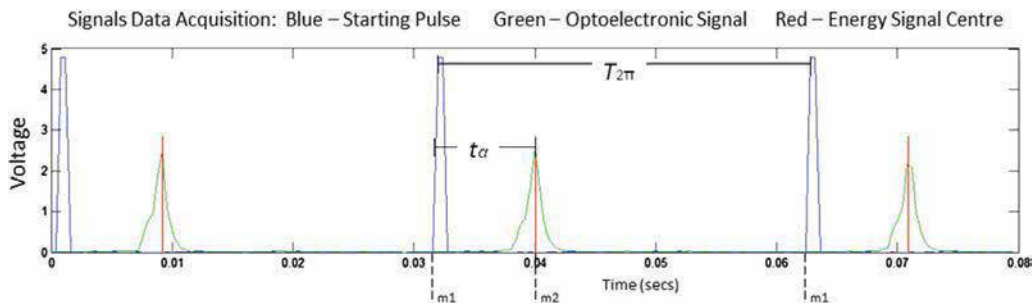


Fig. 3. Timing diagram. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

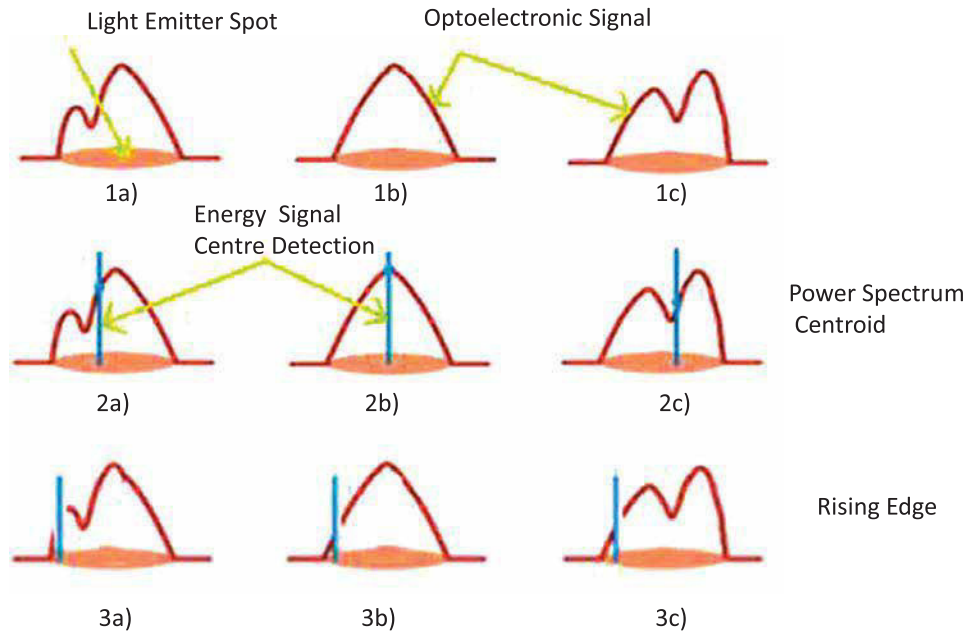


Fig. 4. Energy signal centre.

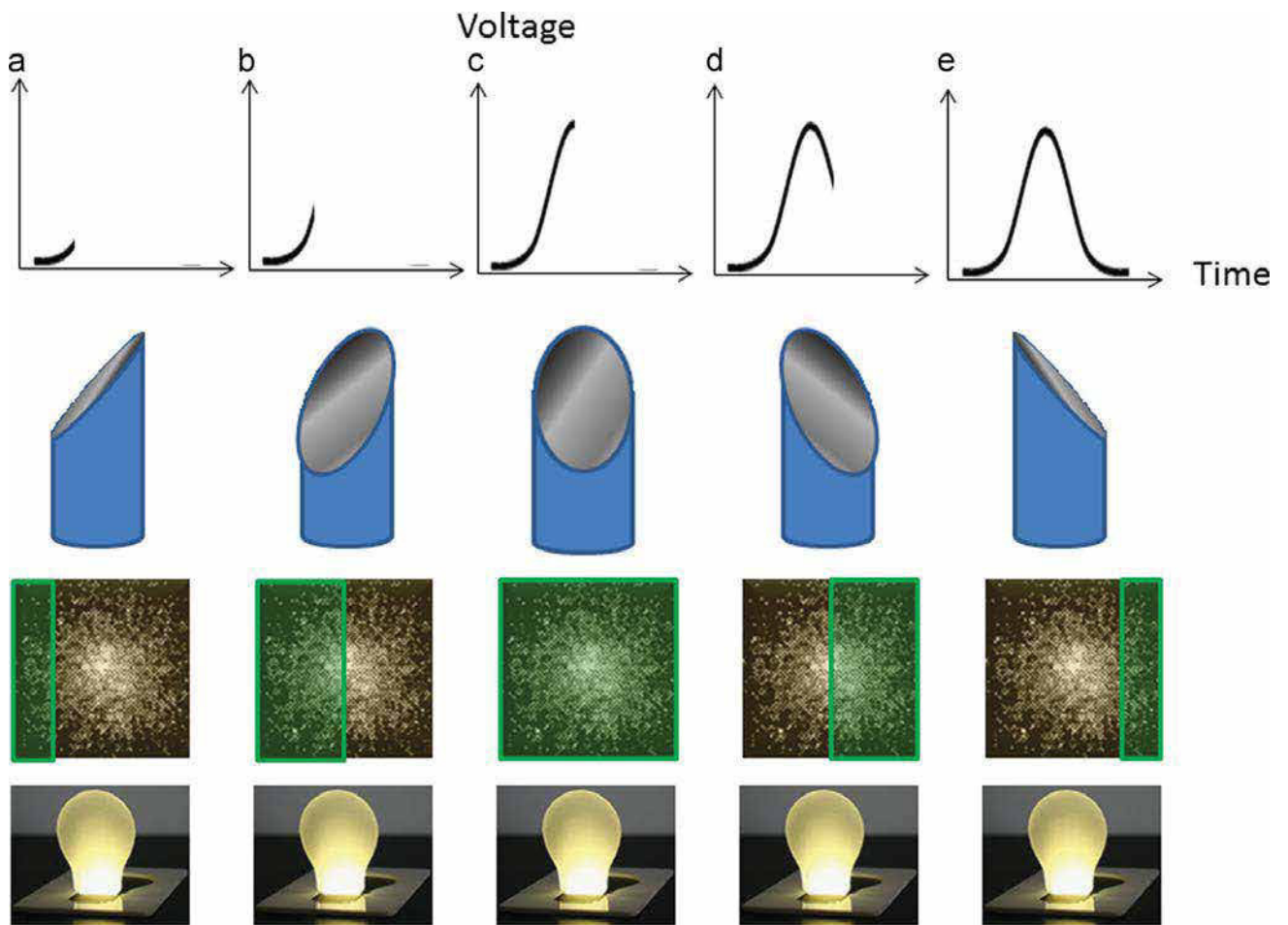


Fig. 5. Principle of electrical signal formation during rotational scanning: (a) Minimum mirror surface facing the light emitter at the beginning of rotation. (b) Half mirror surface facing the light emitter at the beginning of rotation. (c) Maximum mirror surface facing the light emitter. (d) Half mirror surface facing the light emitter at the end of rotation. (e) Minimum mirror surface facing the light emitter at the end of rotation.

a starting signal when $t_\alpha = 0$, then the signal is processed and its energy centre is detected.

The interval $T_{2\pi}$ is equal to the time between m_1 and m_2 , which are expressed by the code $\eta_{2\pi}$ as defined in (1), see [2].

$$\eta_{2\pi} = T_{2\pi} \cdot f \tag{1}$$

On the other hand, the time t_α is equal to the interval between m_1 and m_2 , could be expressed by the code defined in (2), see [2].

$$\eta_\alpha = t_\alpha \cdot f \tag{2}$$

Where, f is the motor frequency. With this consideration the time variable could be eliminated from (2) obtaining (3), see [2,4,30].

$$\alpha = 2\pi \cdot \eta_\alpha / \eta_{2\pi} \tag{3}$$

2.2. Energy signal centre

Experimental readings showed that, in order to find the position of a light source, the targeted signal resembles a Gaussian shaped signal. This is mainly observed when the light source searched by the optoelectronic scanning is a punctual light source. This last assertion corresponds to the fact that when the punctual light source expands

its radius, a cone-like or an even more complex shape is formed depending on the properties of the medium through which the light is travelling. To reduce errors in position measurements, the best solution is taking the measurement in the energy centre of the signal generated by the scanner [2]. As can be illustrated in Fig. 4, where is contrasted the difference from taking measurements in the rising edge of the signal versus taking the measurement in the signal energy centre.

The Energy Centre of the signal concept employs different mathematical methods, as a way to assess which one yields the most precise measurement. The geometric centroid, the power spectrum centroid, the energy peaks, and saturation method are some of them [3].

The Energy Centre of the signal can be found by the signal processing of the optoelectronic scanner sensor output. This mathematical treatment can be made through specialized computer software e.g. MATLAB, and some others.

3. An accuracy enhancement method

The proposed method is based on the assumption that the signal generated by optical scanners for position measurement is a Gaussian shaped signal. However, during experimentation it was seen that the optoelectronic scanning sensor output is a Gaussian shaped signal with some noise

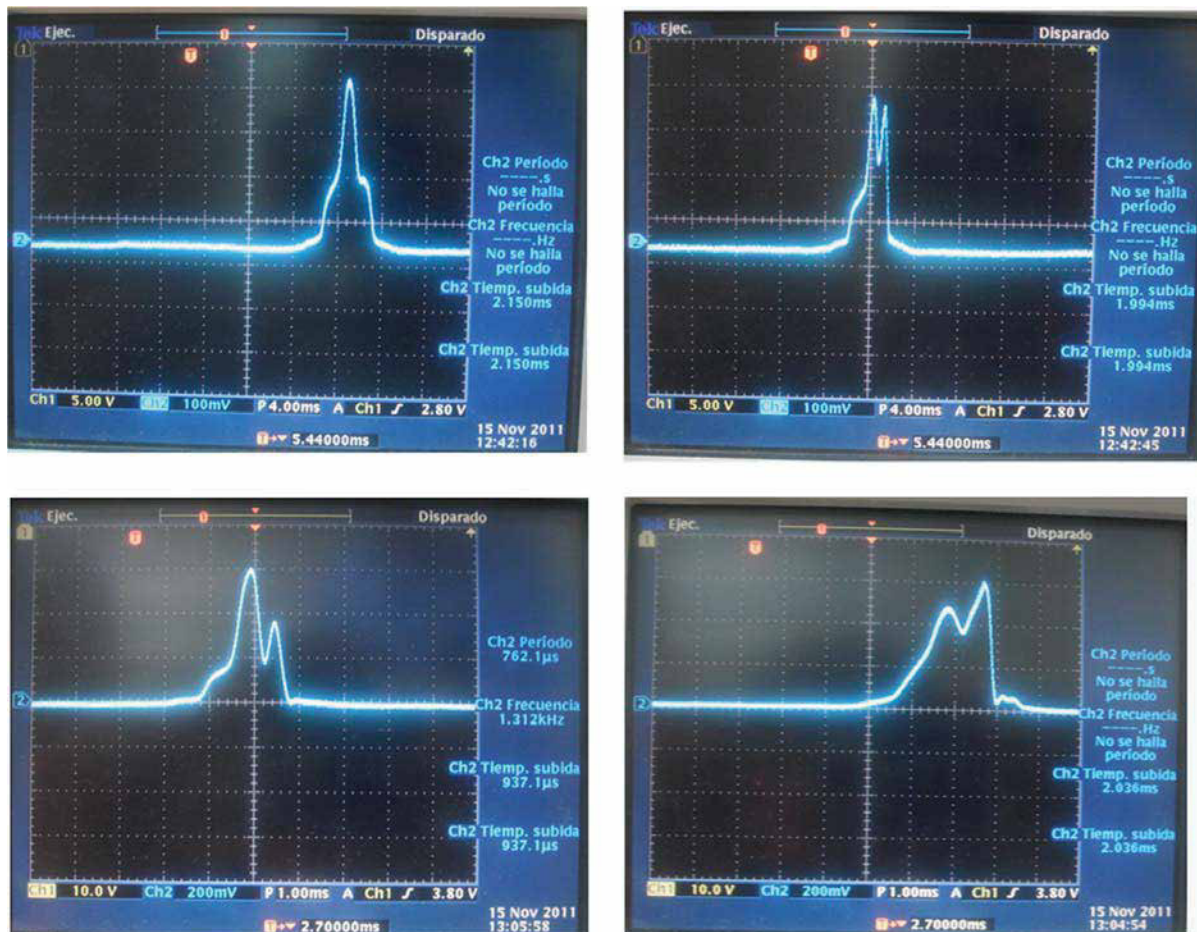


Fig. 6. OSS measurements at different light source, angle-distance positions.

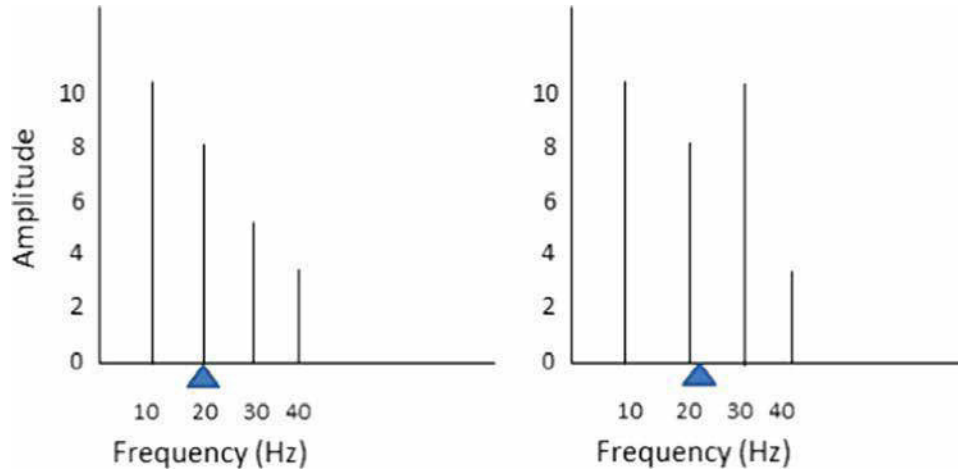


Fig. 7. Power Spectrum Centroid.

and deformation. This is due to some internal and external error sources like the motor excentricity at low speed scanning, noise and deformation that could interfere with the wavelength of the light sources. Other phenomena that could also affect are related with the reflection, diffraction, absorption and refraction. In this work a minimization of these undesirable effects is proposed. This minimization is implemented by taking measurements in the energy centre of the signal, applying PSC calculation and a posteriorly digital rectification by machine learning models.

3.1. Data acquisition

Signals of different shapes are generated during an optical scanning process, depending on the type of light source, the sensor of the scanner and the whole scanning system characteristics. Some precision semiconductor optical sensors like CCD, Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) or PSD produce output currents related to the “centre of mass” of light incident on the device surface.

It is well known that CCD, CMOS and PSD use the light quantity distribution of the entire beam spot. The light-receiving element sets the beam spot centre or centroid and identifies this as the target position.

Similar results are acquired from the photodiode used on the 45°-sloping cylindrical mirror scanner. A Gaussian shaped signal is obtained; where its energy signal centroid corresponds to the target position.

A hypothetical spot model attempts to explain how the signal is created by the photodiode on a scanner with a rotating mirror, has shown in Fig. 5. The signal created, as a similar Gaussian shaped, goes up (Fig. 5a) and falls down (Fig. 5e), and a fluctuating activity takes place around its maximum area – see Fig. 5(b–d).

However in experiments with the 45°-sloping cylindrical mirror scanner, it has been observed that the OSS output is a Gaussian shaped signal with some noise and deformations as shown in Fig. 6.

3.2. Power Spectrum Centroid

The centroid is an important feature of power spectrum. It can be seen as the gravity centre of the frequency

components in a spectrum. Fig. 7 shows two power spectrum centroids, the first at 20 Hz and the second at 21.5 Hz. The Power Spectrum Centroid exists in many variants including its mean, standard deviation, and square amplitude [31]. The Power Spectrum Centroid has been experimentally observed in works related to digital signal processing on audio signals. In Audio signals, the power spectral centroid corresponds to a timbral feature that describes the brightness of a sound to be used for bark frequency scale and to define the harmonic centroid [24].

In the method proposed in this work, it is intend to apply the PSC concept in order to find the energy signal centre by establishing a correlation between both concepts.

3.2.1. The Power Spectrum Centroid computing method

The power spectrum is a positive real function of a frequency domain variable associated with a time domain function, whose dimensions are power per hertz or energy per hertz. This means that the power carried by the wave (signal) per unit frequency and its centroid is calculated in the frequency domain by (4) and the temporal centroid in the time domain by (5), both of them representing the same energy signal centre [24].

$$SC_{Hz} = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} k \cdot X^d[k]}{\sum_{k=1}^{N-1} X^d[k]} \quad (4)$$

where SC is the spectral centroid in frequency (Hertz). $X^d[k]$ is the magnitude (voltage amplitude) corresponding to frequency bin k . k is the frequency bin (fs/N) in hertz and fs is the frequency sample. N is the length of the DFT (Discrete Fourier Transform).

$$TC = \frac{\sum_{n=1}^{L-1} n \cdot x[n]}{\sum_{n=1}^{L-1} x[n]} \quad (5)$$

where TC is the temporal centroid in time index. $x[n]$ is the input signal. n is the time index. L is the time length.

One Scanning cycle time its determined by the starting signal generated by the sensor “s” in the OSS. Between the starting signal and the next one, exists a complete electrical motor revolution, corresponding to 360°.

This sequence of L time samples is represented by N frequency samples making up a frame after the Fourier

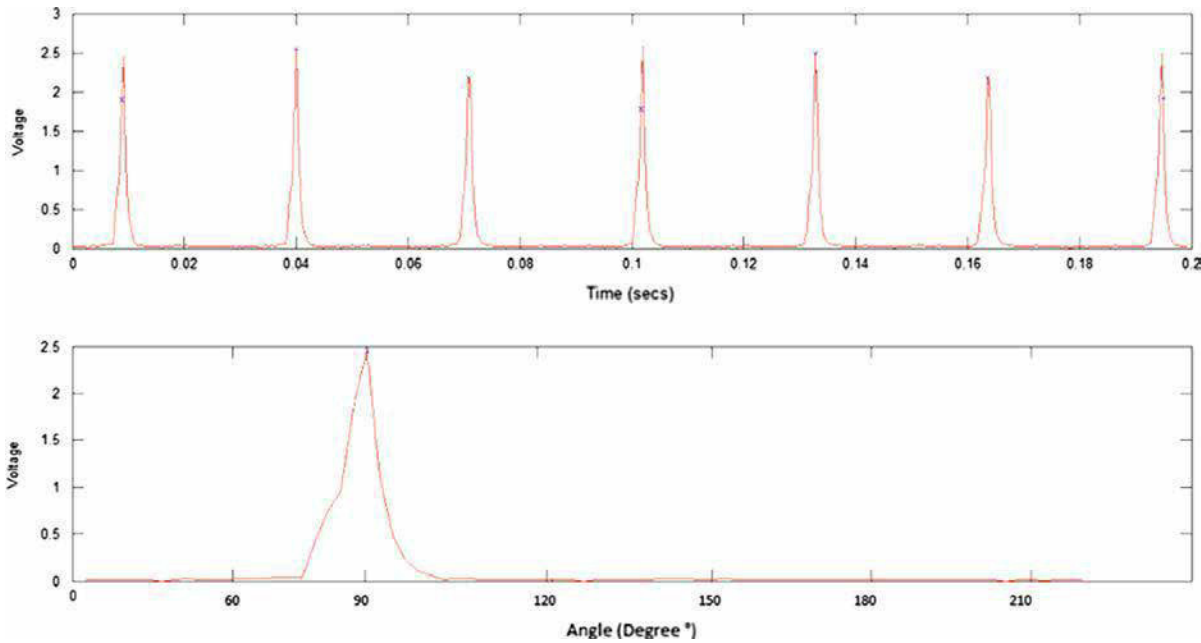


Fig. 8. Scanning optical signal Power Spectrum Centroid.

transform. Each frame consists of N frequency samples, and is called a spectrum. The discrete points on the x-axis (frequency axis) are commonly referred to as frequency bins or just bins.

Next we describe the procedure steps. The first step consists in define the following concepts:

- (a) Fourier Transformation: The Fourier transform is a mathematical transform with many applications in physics and engineering. Very commonly it transforms a mathematical function of time, $f(t)$, into a new function, sometimes denoted by F , whose argument is frequency with units of cycles/s (hertz) or radians per second. The new function is then known as the Fourier transform and/or the frequency spectrum of the function f . The Fourier transform is also a reversible operation.
- (b) Fourier Series: Fourier series decomposes periodic functions or periodic signals into the sum of a (possibly infinite) set of simple oscillating functions, namely sines and cosines (or complex exponentials).
- (c) Fast Fourier Transform: A fast Fourier transform (FFT) is an algorithm to compute the discrete Fourier transform (DFT) and its inverse.
- (d) Discrete Fourier Transform: The discrete Fourier transform (DFT) converts a finite list of equally spaced samples of a function into the list of coefficients of a finite combination of complex sinusoids, ordered by their frequencies, that has those same sample values. It can be said to convert the sampled function from its original domain (often time or position along a line) to the frequency domain.

The second step to transit from time domain to frequency domain is to apply the Fourier transformation, which provides an alternative way of representing data, instead of representing the voltage signal amplitude as a

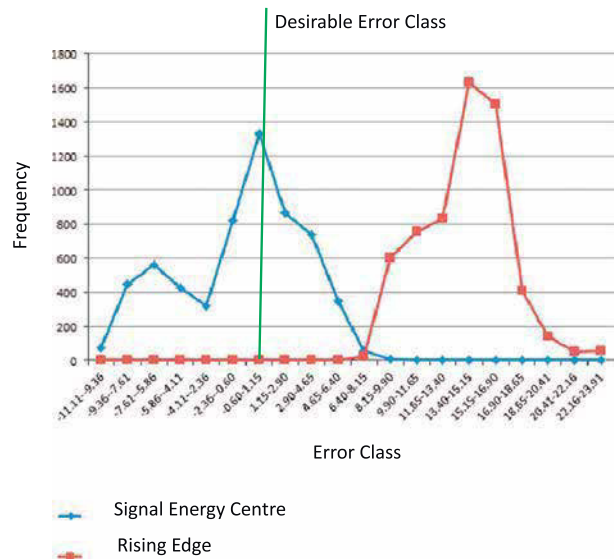


Fig. 9. Signal Energy Centre Measurement vs. Signal Rising Edge Measurement Error Distribution.

Table 1
Central tendency and dispersion for Signal Energy Centre and Signal Rising Edge Measurement Error.

Statistical parameters	Measurement by method	
	Signal Energy Centre	Signal Rising Edge
Arithmetic mean	-0.8200	14.0100
Median	-0.0100	14.3200
Mode	3.3700	14.7200
Range	20.0000	16.6700
Variance	17.4200	7.9000
Standard Deviation	4.1700	2.8100

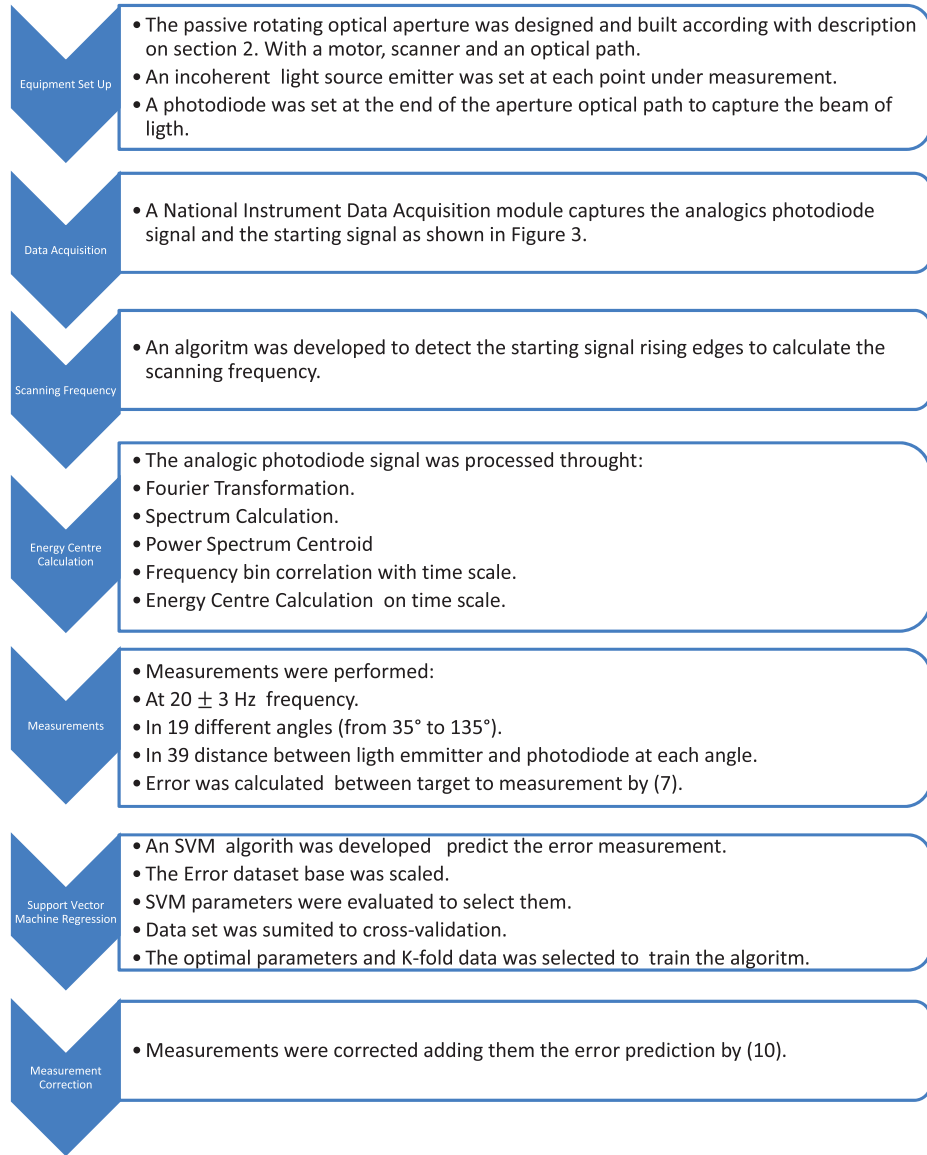


Fig. 10. Detailed experimentation set up flowchart.

time domain function. Fourier transformation represent the signal by how much information (power) is contained at different frequencies and also allow to isolate certain frequency ranges (that could come from noise sources) if necessary. For OSS applications with a vector of data (finite series) the Fast Fourier Transform (FFT) is applied to compute from time domain to frequency domain. The discrete Fourier transform (DFT) algorithm was used as a Fourier application for discrete data whose non-zero values have a limited (finite) duration.

The third step is to compute the power spectrum by (6), which is the square of the absolute value of the FFT, see [24]. Its result is considered as the power of the signal at each frequency.

$$\phi(\omega) = \left| \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n e^{-i\omega n} \right|^2 = \frac{F(\omega)F^*(\omega)}{2\pi} \quad (6)$$

where $\phi(\omega)$ is the power spectrum. ω is the angular frequency (2π times the ordinary frequency). $F(\omega)$ is the

Discrete Time Fourier Transform of $f(n)$. $F^*(\omega)$ is the $F(\omega)$ complex conjugate.

The third step consists to calculate the power spectrum centroid by (4).

And finally, the centroid value is converted from frequency domain to time domain. The domain conversion is performed by

- A frequency bin correlation with time scale.
- Or performing the centroid calculation directly by (5).

Results (@35 Hz motor spinning frequency) obtained are shown in Fig. 8. In 0.2 s, seven measurements were performed to a light emitter source positioned at 90° . And the 7 centroids measurements were averaged to represent the angle measurement.

Fig. 9 and Table 1 shown a statistically comparison between traditional measurement at the Signal Rising

Edge versus measurement at the Signal Energy Centre. Where can be confirmed that taking measurements in the Signal Energy Centre the data population is around the distribution class that contain the zero error, which is the desirable error measurement for any system.

3.3. Support Vector Machines and digital rectification

Support Vector Machines (SVMs) were developed to solve classification and regression problems in machine learning or pattern recognition area. The statistical learning theory goal in modelling is to choose a model from the hypothesis space, which is closest (with respect to some error measure) to the underlying function in the target space as described on [32,33].

Support vector regression can be applied to:

- a. Linear regression by the introduction of an alternative loss function (as Quadratic, Laplace, Huber and ϵ -insensitive);

- b. Non-linear regression by a non-linear mapping of the data into a high dimensional feature space where linear regression is performed.

SVM for Regression is an algorithm used in the forecasting of several kinds of applications as described in [34]. One of these examples is in the error prediction aimed to do some measurement corrections – see [35,36].

In this paper our goal is predict the measurement error by means of a SVM regression to perform the digital rectification by measurement correction – i.e. adding the predicted error to a measurement.

Given the Energy Signal Centre measurements found in the Power Spectrum Centroid and the target angle value under measurement, the measurement error was calculated by (7).

$$E = |\alpha_R - \alpha_M| \tag{7}$$

where E is the measurement error, representing how far the measurement from the real value is. α_R is the angle real value. α_M is the angle measured by the system.

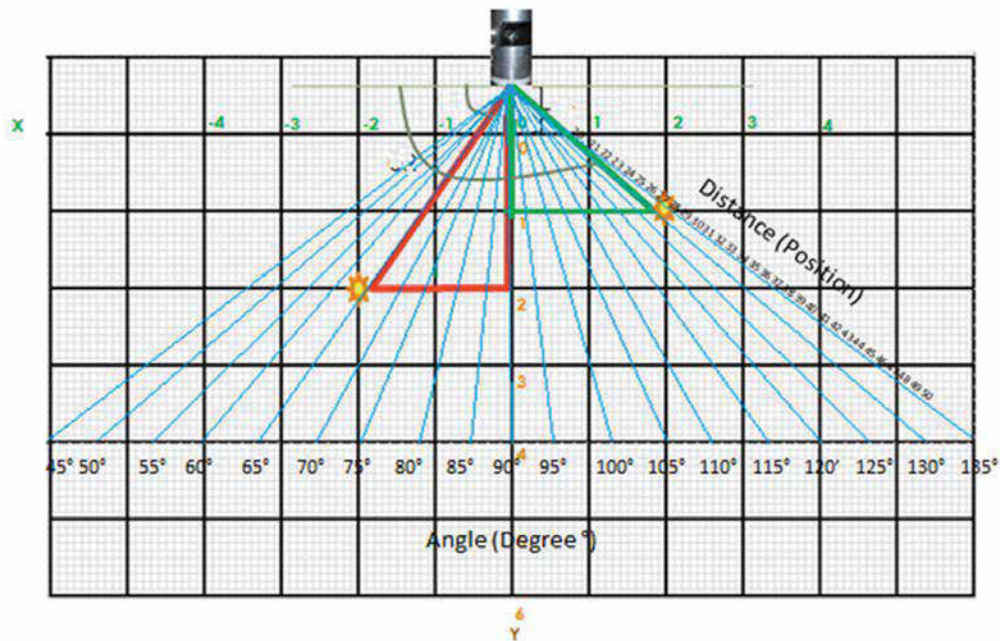


Fig. 11. Measurements angle and distance representation (Angle of Scanning every 5° and Distance of Scanning every 1 cm).

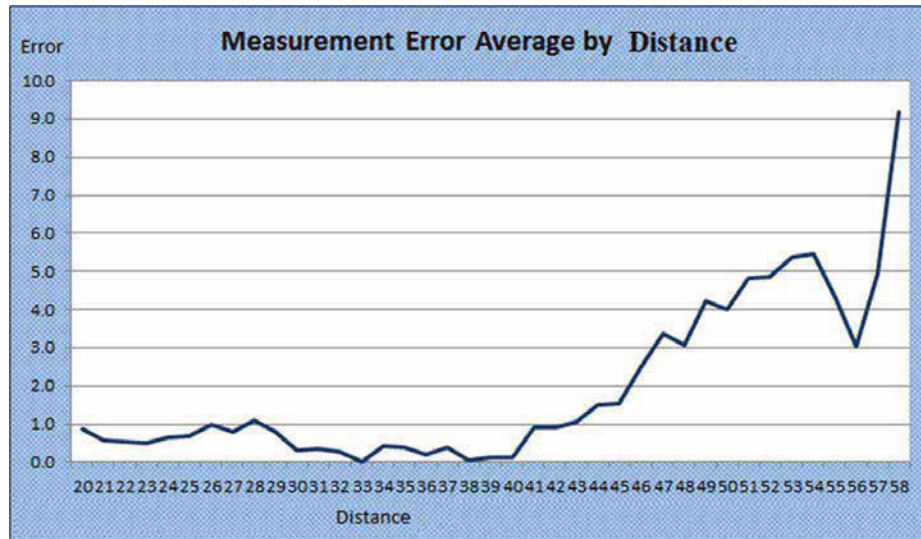


Fig. 12. Measurement error average by position.

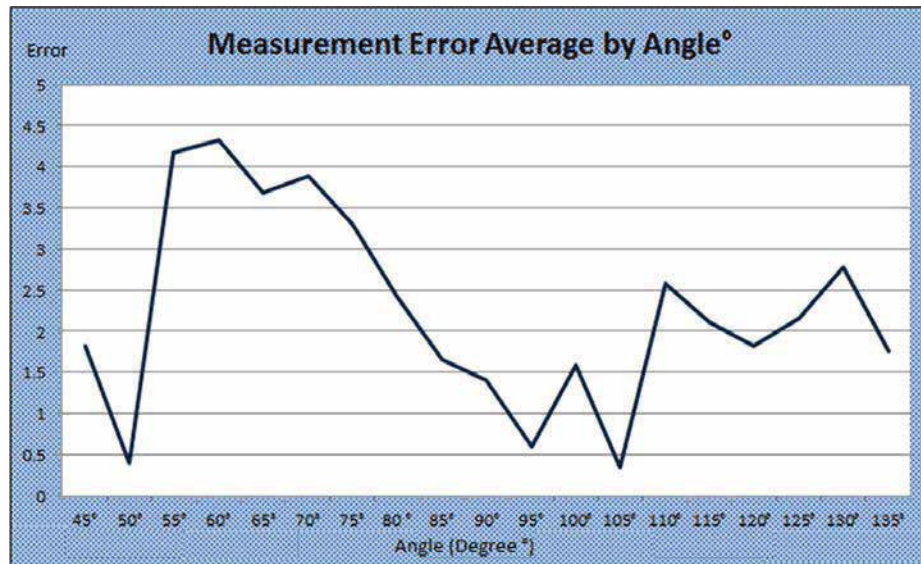


Fig. 13. Measurement error average by angle°.

4. Experimental work

According detailed experimentation set up flowchart in Fig. 10 measurements were carried out during the scanning from 45° to 135°, moving the position of light emitter source from the nearest distance to the optical aperture sensor to the farthest position from the optical aperture sensor along the same angle line (32 check-points for each angle-line). Ten measurements were taken at each check-point – i.e. angle, distance, repeating this measurement process every 5°.

Fig. 11 depicts this process. A total of 6020 measurements built the dataset that was used to train and to test the SVM algorithm in the error prediction. Note all measurements were performed over a High Quality Optical Table and Breadboard ± 0.1 mm (± 0.004 " surface flatness over any 1 m² (11 ft²) area, to provide quality

measurements and vibration isolation, see specifications at [37,38]. This table permits verify geometric configuration of any experimental set in the area of 33 × 57 holes (1831 squares of English System) with laboratory precise length standard of 1 ± 0.004 ". It corresponds to 25.4 mm ± 0.1 mm in metric system where experimentation was carried out. Corresponding angular metric accuracy was deduced from trigonometric formalism basing on metric linear accuracies guaranteed by equipment brand.

Figs. 12 and 13 gives an error profile by position and angle. It is seen that the error does not follows a well-defined behavior or any known function.

As far as the light emitter source is moved away from the optical aperture sensor, the error increments. Also, it was noticed that the best scanning window angle was close the 90°.

4.1. SVM training and testing

The following steps were used to train and to test the SVM regression algorithm:

- After data was acquired, a scaling step on each column or feature took place.
- In order to properly validate the SVM regression performance, the well-known k -fold cross-validation method was used.
- SVM parameters were selected by means of a grid-search strategy, i.e. for each parameter, a group of several parameters values were tested by k -fold cross-validation. The best parameters were the ones with the best performance measure [39,40].

The data was separated in two sets, training data set and test data set. Each instance in the training-test sets contains one target value (error measurement) and three attributes or features, angle, distance and frequency.

In order to estimate how accurately the predictive model will perform in practice, the k -fold cross-validation technique was used to randomly partition the training dataset into k equal size subsamples. The $k-1$ subsamples were used to train the SVM algorithm and last one was used to test the trained SVM. This process is repeated k -times and rotating the subsamples.

The SVM algorithm needs what is called a Kernel function, in order to map the original data into the feature space, on which the classification or regression task is performed [41]. Two kernel functions were tested:

Polynomial

$$K(x_i, x_j) = (\gamma x_i^T x_j + r)^d, \gamma > 0 \tag{8}$$

Radial basis function (RBF)

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2), \gamma > 0 \tag{9}$$

where γ (gamma kernel), r (coefficient kernel) and d (degree of polynomial kernel) are kernel parameters.

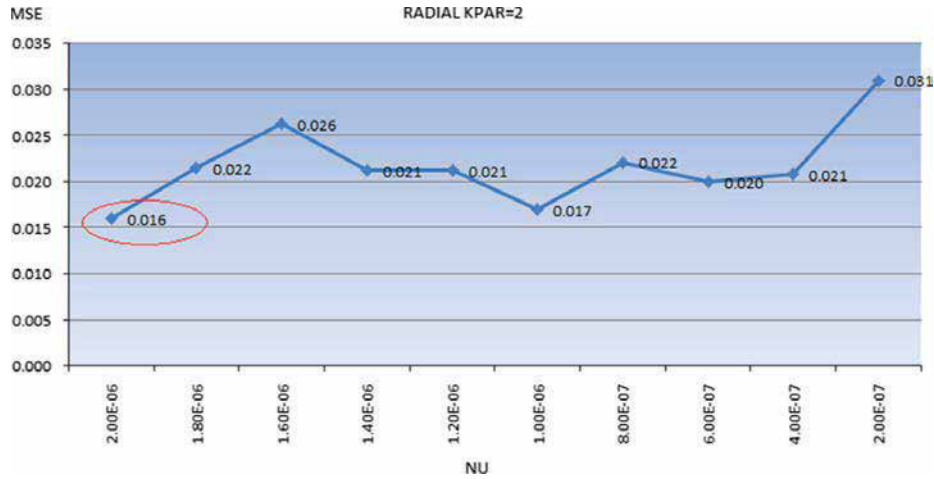


Fig. 14. First parameters value search.

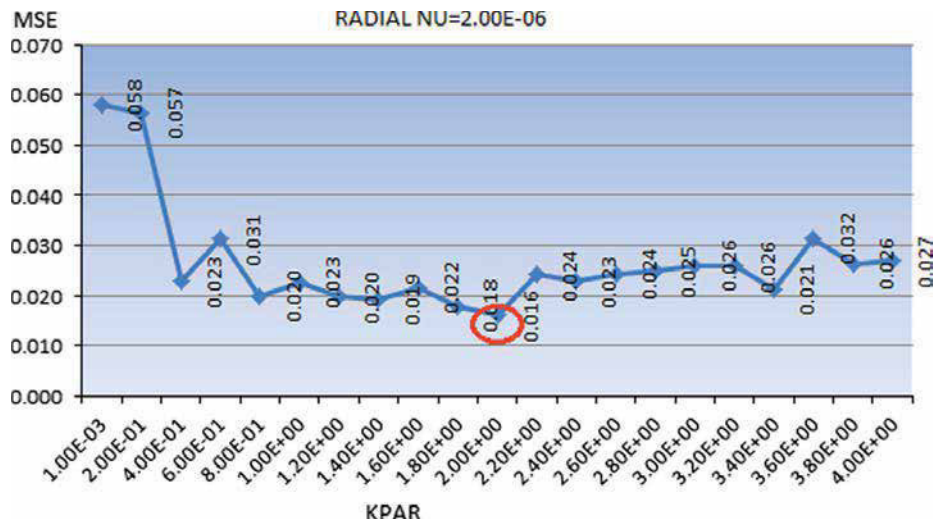


Fig. 15. Second parameters values search for $NU = 2E^{-6}$.

All experiments were conducted in MATLAB 2011b (7.13.0.564) 32 bits version. The SVM regression algorithm from the PRTools Toolbox for MATLAB was used.

The original data was randomly partitioned into 2/3 for training data – i.e. the whole k -fold cross-validation – and 1/3 to construct an independent test set. The entire process was repeated 200 times.

The following kernel parameters were analyzed – 200 runs for each parameter combination:

1. Kernel type=[polynomial, radial]
2. NU-parameter=[$2E^{-8}$, $2E^{-7}$, $2E^{-6}$, ..., $2E^6$, $2E^7$, $2E^8$]
3. Polynomial degree in Polynomial kernel=[1, 2]

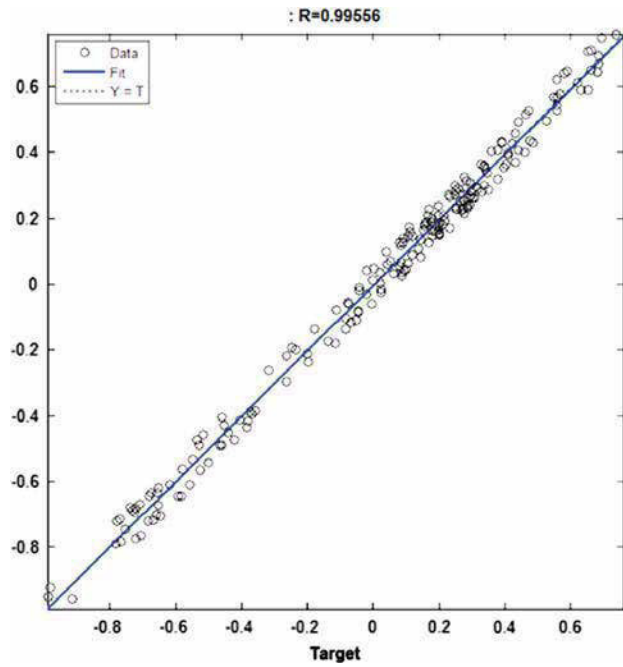


Fig. 16. Plot regression.

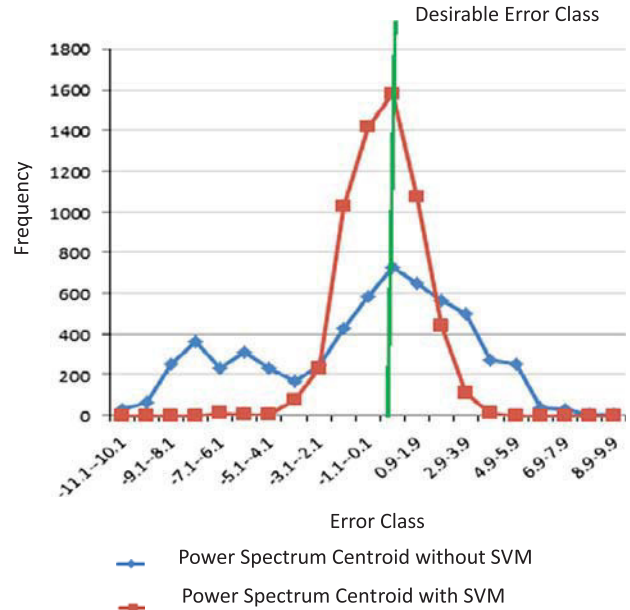


Fig. 18. Signal Energy Center Measurement Error Distribution.

Table 2
Measurement error central tendency and dispersion for Signal Energy Centre without and with SVM.

Statistical parameters	Measurement	
	Without SVM	With SVM
Arithmetic mean	-0.8200	-0.0113
Median	-0.0100	0.0385
Mode	3.3700	-2.0000
Range	20.0000	11.1056
Variance	17.4200	1.4926
Standard deviation	4.1700	2.2279

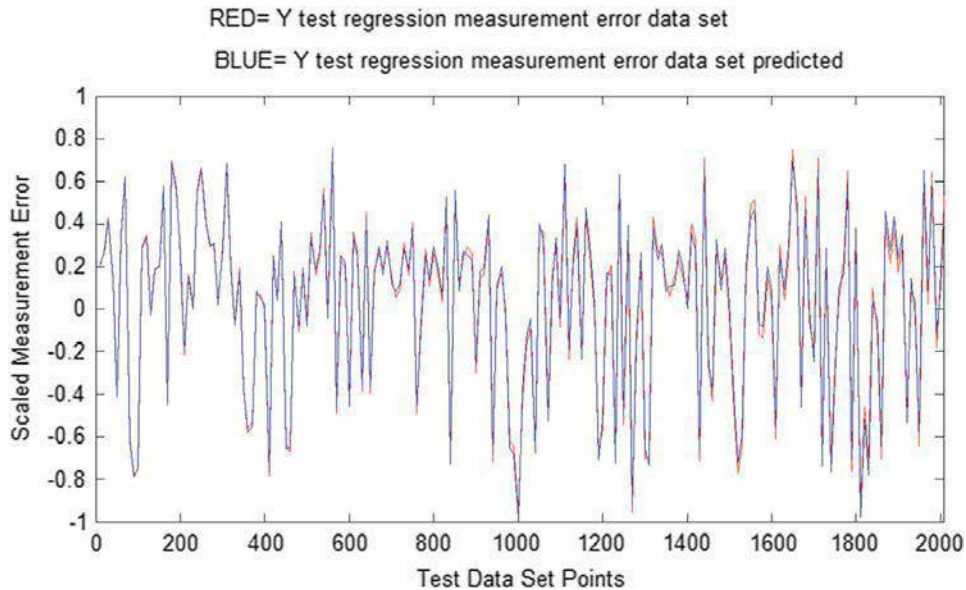


Fig. 17. Real vs. predicted scaled measurement error. (For interpretation of the references to color in this figure caption, the reader is referred to the web version of this article.)

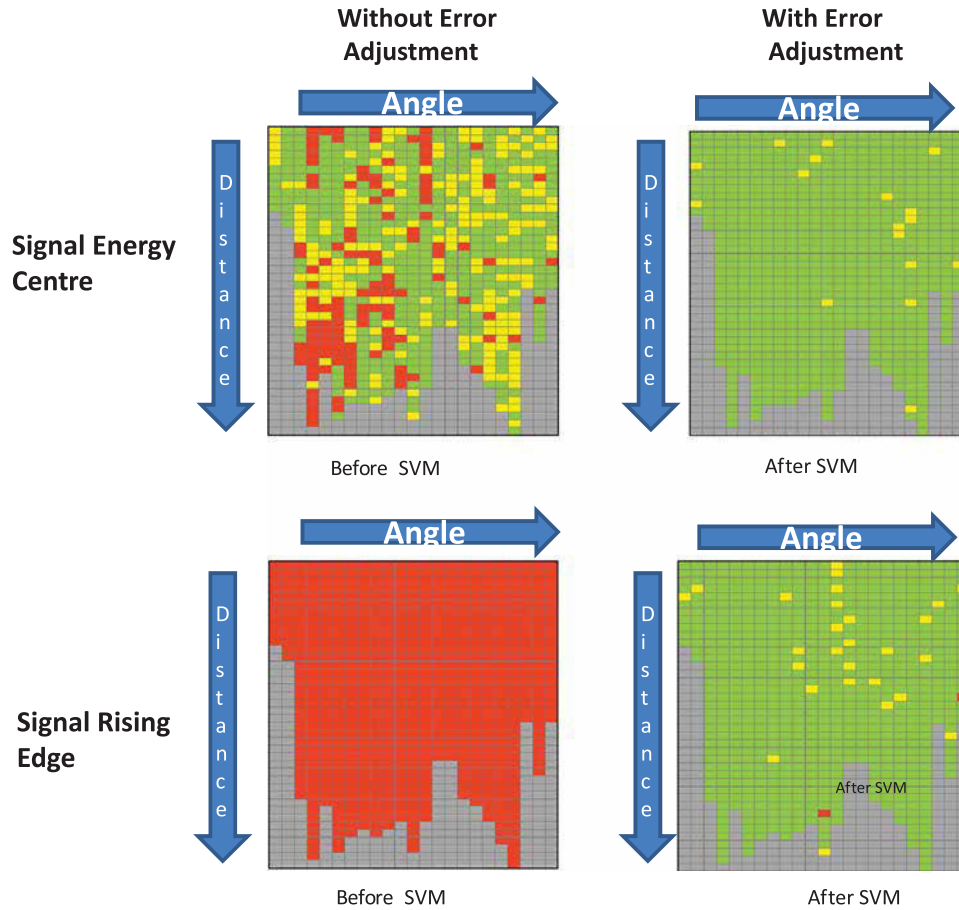


Fig. 19. Color map for visual comparison: each point measurement corresponds to (Angle, Distance). Angles increase from left (45°) to right (135°) each 5°. Distance increase from up (20 cm) to down (50 cm) each 1 cm. Red points—significance error of Tables 3 and 4 bigger than 6.00°. Yellow points—significance error of Tables 3 and 4 bigger than 3.00° and less than 5.99°. Green points—significance error of Tables 3 and 4 less than 2.99°. (For interpretation of the references to color in this figure caption, the reader is referred to the web version of this paper.)

Table 3
Error range quantitative analysis (without error adjustment).

Error classification	Measurement by method	
	Signal Energy Centre (%)	Signal Rising Edge (%)
Error > 6.00°	17.80	100.00
3.00° < Error < 5.99°	28.81	0.00
Error < 2.99°	53.39	0.00

Table 4
Error range quantitative analysis (with error adjustment).

Error classification	Measurement by method	
	Signal Energy Centre (%)	Signal Rising Edge (%)
Error > 6.00°	0.00	0.28
3.00° < Error < 5.99°	2.40	3.81
Error < 2.99°	97.60	95.90

- Kernel width in Radial kernel = $[2E^{-8}, 2E^{-7}, 2E^{-6}, \dots, 2E^6, 2E^7, 2E^8]$
- C-Complexity parameter = $[2E^{-8}, 2E^{-7}, 2E^{-6}, \dots, 2E^6, 2E^7, 2E^8]$

All the data sets values were linear scaling to the range $[-1, 1]$ to avoid attributes dominance and/or numerical difficulties during kernel calculations. Performance measure in the k -fold cross-validation was the Mean Square Error (MSE).

5. Results and discussion

Experimental results show that, after testing several values in SVM regression training parameters, the configuration that yields to get the best MSE are – see Fig. 14:

- NU-parameter = $[2E^{-6}]$
- Kernel type = [Radial]
- C-Complexity Parameter = [2]
- With a MSE = 0.016

Educated practices in machine learning literature indicate, if possible, to run a second search or fine parameters

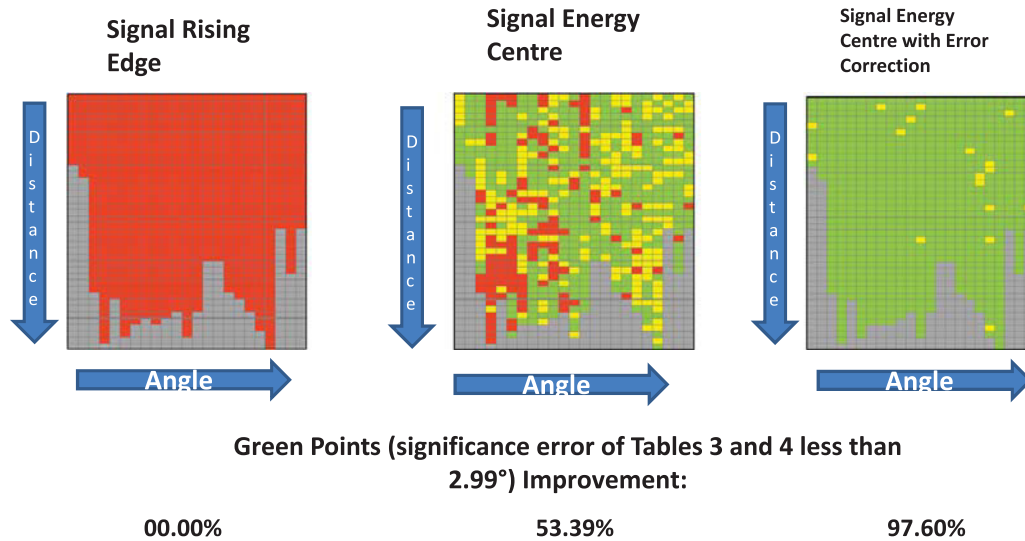


Fig. 20. Color map for visual comparison. Note: each point measurement corresponds to (Angle, Distance). Angles increase from left (45°) to right (135°) each 5° . Distance increase from up (20 cm) to down (50 cm) each 1 cm. Red points—significance error of Tables 3 and 4 bigger than 6.00° . Yellow points—significance error of Tables 3 and 4 bigger than 3.00° and less than 5.99° . Green points—significance error of Tables 3 and 4 less than 2.99° . (For interpretation of the references to color in this figure caption, the reader is referred to the web version of this paper.)

search, by taking a narrow neighborhood around numerical ones. Hence NU was set at $2E^{-6}$ and the C parameter was varied from $1E^{-3}$ to $4E^0$ as describe in Fig. 15.

Using the final SVM regression model with best parameters values found, i.e. NU –parameter = $[2E^{-6}]$, Kernel type = [Radial], C-Complexity Parameter = [2], independent test set was feed as input, and predicted values were obtained. Fig. 16 shows a simple correlation between predicted values and target values. A R-correlation coefficient was calculated, achieving a value of 0.99556. As complement, Fig. 17 shows test set target regression data and test set predicted regression data. It is seen the both charts profiles match with a highly degree of similarity.

Finally, adding the predicted error to the measurements as described by (10),

$$\alpha_{MC} = \alpha_M + E_p \quad (10)$$

where α_{MC} is the angle measurement by the system corrected (digital rectified). α_M is the angle measured by the system. E_p is the predicted Error

Therefore, the measurements were digital rectified, increasing the accuracy of the optical scanning system. Fig. 18 shows the Signal Energy Center Measurement Error Distribution from original measurements (without error adjustment) and with measurements adjusted by SVM, where it could be seen the statistical error tendency to zero and it is resumed in Table 2.

The Measurement at Signal Energy Centre is compared with Measurement at Signal Rising Edge with and without error adjustment, results in Fig. 19 by a color map visual comparison, where the maps represent the measurement error distribution through the optic table described in Fig. 11. Measurements errors lower than 3.00° are green marked, measurement errors between 3.01° and 5.99° are yellow marked and measurements errors higher than 6.00° are red marked. Corresponding Error Range Quantitative analysis is described in Tables 3 and 4. Where can be

observed the measurement improvement by taking the measurement at the Signal Energy Centre and applying measurement error adjustment by SVM.

Hence, more than 98.3% of measurements with an error lower than 3° were achieved.

6. Conclusion

Power Spectrum Centroid method improvement by machine learning techniques was performed in optical scanning systems for accuracy enhancement with successfully results [26,42–44]. Measurements at power spectrum centroid before digital rectification presented errors from (0.00°) (at near distance – e.g. Angle = 130° , Distance = 24) to 10.3° (at long distance – e.g. Angle = 105° , Distance = 53). A total of 51.3% of position measurement presented a lower error of 3° , and the remaining 48.7% showed errors from 3° to 10.3° , increasing the error at long distance due to incoherent light emitter source effects through distance, and others internal and external error sources previously described.

After digital rectification, errors shown values from 0.00° (e.g. Angle = 95° , Distance = 23) to 4.87° (e.g. Angle = 100° , Distance = 47). 98.3% of measurements digitally rectified presented an error value lower than 3° , and the remaining 1.7% from 3° to 4.87° . Experimental results showed that take the measurement at the signal energy centre and apply the digital rectification algorithms have a positive performance on measurement adjustments, as it is summarized in Fig. 20, due to the 97.6% of measurements decrease the error until less or equal to 2.99° . Also, other improvements have been visualized for further research on the mechanical-electrical optical system, as in the energy signal centre digital processing and its rectification by the analysis of the motor rotation frequency effects.

References

- [1] Y. Bao, H. Li, X. Sun, Y. Yu, J. Ou, **Compressive sampling-based data loss recovery for wireless sensor networks used in civil structural health monitoring**, *Struct. Health Monit.* 12 (1) (2013) 78–95.
- [2] M. Rivas Lopez, O.Y. Sergiyenko, V. Tyrsa, W. Hernandez Perdomo, L. Devia Cruz, D. Hernandez Balbuena, L. Burtseva, J. Nieto Hipolito, **Optoelectronic method for structural health monitoring**, *Struct. Health Monit.* 9 (2) (2010) 105–120. ISSN 1475-9217, URL <http://shm.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/1475921709340975>.
- [3] W. Flores Fuentes, M. Rivas Lopez, O. Sergiyenko, J. Rivera Castillo, **Comparison of signal peak detection algorithms in the search of the signal energy center for measuring with optical scanning**, in: *Proceedings of the IEEE Seccion Mexico, IEEE ROC and C2011:XXII Autumn International Conference on Communications, Computer, Electronics, Automation, Robotics and Industrial Exposition*, Guerrero, Mexico, CP10, PON15, 2011.
- [4] M. Rivas Lopez, W. Flores Fuentes, J. Rivera Castillo, O. Sergiyenko, D. Hernandez Balbuena, **A Method and Electronic Device to Detect the Optoelectronic Scanning Signal Energy Centre**, In Tech, Croatia ISBN 978-953-51-0922-8, 30 (in Europe), 2012.
- [5] H. Wang, M. Fan, **Centroid-based semi-fragile audio watermarking in hybrid domain**, *Sci. China Inf. Sci.* 53 (3) (2010) 619–633. ISSN 1674-733X, URL <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11432-010-0058-0>.
- [6] H. Hong, X.-l. Wang, Z.-y. Tao, S.-p. Du, **Centroid-based sifting for empirical mode decomposition**, *J. Zhejiang Univ. Sci. C* 12 (2) (2011) 88–95. ISSN 1869-1951, URL <http://www.springerlink.com/index/10.1631/jzus.C1000037>.
- [7] A. Esquivel, A. Lazarian, S. Horibe, J. Cho, V. Ossenkopf, J. Stutzki, **Statistics of velocity centroids: effects of density-velocity correlations and non-Gaussianity**, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 381 (4) (2007) 1733–1744. ISSN 0035-8711, URL <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2966.2007.12359.x>.
- [8] A. Lazarian, **Obtaining spectra of turbulent velocity from observations**, *Space Sci. Rev.* 143 (1–4) (2009) 357–385. ISSN 0038-6308, URL <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11214-008-9460-y>.
- [9] S. Schuhmann, K. Herrmann, K. Rothermel, J. Blumenthal, D. Timmermann, **Improved weighted centroid localization in smart ubiquitous environments**, *Ubiquitous Intell. Comput.* (2008) 20–34.
- [10] E. Weisstein, **Function Centroid**, From MathWorld—A Wolfram Web Resource, URL <http://mathworld.wolfram.com/FunctionCentroid.html>, 2012.
- [11] M. Rivara, C. Calderon, **Lepp terminal centroid method for quality triangulation: a study on a new algorithm**, *Adv. Geometric Modeling Process.* (2008) 215–230.
- [12] D. Proffitt, J. Cutting, **Perceiving the centroid of configurations on a rolling wheel**, *Attention Percept. Psychophys.* 25 (5) (1979) 389–398.
- [13] X.-Z. Lai, S.X. Yang, G.-X. Zeng, J.-H. She, M. Wu, **New distributed positioning algorithm based on centroid of circular belt for wireless sensor networks**, *Int. J. Autom. Comput.* 4 (3) (2007) 315–324. ISSN 1476-8186, URL <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11633-007-0315-x>.
- [14] V.I. Lyashuk, E.G. Novikov, **Search for acoustic effects from extensive atmospheric showers in Baikal**, *Phys. At. Nuclei* 69 (11) (2006) 1922–1929. ISSN 1063-7788, URL <http://www.springerlink.com/index/10.1134/S1063778806110172>.
- [15] P. Kathirvel, M. Sabarimalai Manikandan, S. Prasanna, K. Soman, **An efficient R-peak detection based on new nonlinear transformation and first-order Gaussian differentiator**, *Cardiovas. Eng. Technol.* (2011) 1–18.
- [16] **Peak Detection Using LabVIEW and Measurement Studio**, URL <http://www.ni.com/white-paper/3770/en>, 2012.
- [17] P. Schaefer, R. Williams, G. Davis, R. Ross, **Accuracy of position detection using a position-sensitive detector**, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 47 (4) (1998) 914–919.
- [18] C. Narayanan, A. Buckman, I. Busch-Vishniac, **Position detection of multiple light beams using phase detection**, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 43 (6) (1994) 830–836.
- [19] A. Rohrbach, E. Stelzer, **Three-dimensional position detection of optically trapped dielectric particles**, *J. Appl. Phys.* 91 (8) (2002) 5474–5488.
- [20] S. Suzuki, T. Yagi, Y. Kuno, Y. Uchikawa, **A study on processing of position detection and data communication using illuminant devices and image sensor**, in: *Industrial Electronics Society, 2000. IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE*, vol. 2, IEEE, 2000, pp. 936–941.
- [21] F. Wells, S. Jachim, **A technique for improving the accuracy and dynamic range of beam position-detection equipment**, in: *Particle Accelerator Conference, 1989. Accelerator Science and Technology, Proceedings of the 1989 IEEE, IEEE, 1989*, pp. 1595–1596.
- [22] W. Guanghui, P. Shum, X. Guoliang, Z. Xuping, **Position detection improvement of position sensitive detector (psd) by using analog and digital signal processing**, in: *2007 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing, IEEE, 2007*, pp. 1–4.
- [23] **What is the difference between PSD and CCD sensor technology?**, URL <http://www.fasep.it>, 2012.
- [24] T. Park, **Introduction to Digital Signal Processing: Computer Musically Speaking**, World Scientific Publishing Company Incorporated, 2010.
- [25] **The Basics of Triangulation Sensors**, URL <http://archives.sensorsmag.com/articles/0598/tri0598/main.shtml>, 2012.
- [26] J.C. Rodriguez-Quinonez, O. Sergiyenko, F.F. Gonzalez-Navarro, L. Basaca-Preciado, V. Tyrsa, **Surface recognition improvement in 3D medical laser scanner using Levenberg–Marquardt method**, *Signal Process.* 93 (2) (2013) 378–386. ISSN 0165-1684, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.sigpro.2012.07.001>.
- [27] B. Siegmund, **Optoelectronic scanner for sewing machine**, 1986.
- [28] M. Alba, L. Fregonese, F. Prandi, M. Scaioni, P. Valgoi, **Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning**, in: *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, Dresden, 2006*.
- [29] L. Ebert, W. Ptacek, S. Naether, M. Fürst, S. Ross, U. Buck, S. Weber, M. Thali, **Virtobot—a multi-functional robotic system for 3D surface scanning and automatic post mortem biopsy**, *Int. J. Med. Robotics Comput. Assisted Surg.* 6 (1) (2010) 18–27.
- [30] M. Rivas, O. Sergiyenko, M. Aguirre, L. Devia, V. Tyrsa, I. Rendon, **Spatial data acquisition by laser scanning for robot or SHM task**, in: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008, IEEE, 2008*, pp. 1458–1462.
- [31] A. Sekey, **Improved 1-Bark bandwidth auditory filter**, *J. Acoust. Soc. Am.* 75 (6) (1984) 1902, <http://dx.doi.org/10.1121/1.390954>. ISSN 00014966.
- [32] A. Smola, B. Schölkopf, **A tutorial on support vector regression**, *Stat. Comput.* 14 (3) (2004) 199–222.
- [33] K. Shinoda, N. Inoue, **Reusing speech techniques for video semantic indexing [Applications Corner]**, *IEEE Signal Process. Mag.* 30 (2) (2013) 118–122.
- [34] J. Gascón-Moreno, E. Ortiz-García, S. Salcedo-Sanz, A. Paniagua-Tineo, B. Saavedra-Moreno, J. Portilla-Figuera, **Multi-parametric Gaussian kernel function optimization for ϵ -SVMr using a genetic algorithm**, *Adv. Comput. Intell.* (2011) 113–120.
- [35] Z. Zhang, **Some recent progresses in network error correction coding theory**, in: *Fourth Workshop on Network Coding, Theory and Applications, 2008. NetCod 2008, IEEE, 2008*, pp. 1–5.
- [36] J. Choi, S. Park, D. Cho, K. Seo, **Correction error generation algorithm for differential positioning performance analysis of navigation equipment**, in: *International Conference on Control, Automation and Systems, 2008. ICCAS 2008, IEEE, 2008*, pp. 1099–1103.
- [37] **Small Table Support System and Accessories, PFR, PFP and PFH Series Breadboard Support System**, Thorlabs Ltd, Newton, NJ07860, URL <http://www.thorlabs.com/Thorcat/25000/PFR90150-8-Manual.pdf>, HA0289T Rev A Jan 2013.
- [38] **Optical Breadboard Drawing, Nexus Breadboard, Mounting Holes**, Thorlabs Ltd, Newton, NJ07860, URL <http://www.thorlabs.com/Thorcat/25400/B3660G-AutoCADPDF.pdf>, 2013.
- [39] C. Hsu, C. Chang, C. Lin, et al., **A practical guide to support vector classification**, 2003.
- [40] R. Duin, P. Juszczak, P. Paclik, E. Pekalska, D. De Ridder, D. Tax, S. Verzakov, **A matlab toolbox for pattern recognition**, PRTTools version 4.1.
- [41] F. Pérez-Cruz, O. Bousquet, **Kernel methods and their potential use in signal processing**, *IEEE Signal Process. Mag.* 21 (3) (2004) 57–65.
- [42] L.C. Basaca-Preciado, O.Y. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quinonez, X. Garca, V.V. Tyrsa, M. Rivas-Lopez, D. Hernandez-Balbuena, P. Mercorelli, M. Podrygalo, A. Gurko, I. Tabakova, O. Starostenko, **Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot**, *Opt. Lasers Eng.*, 2013, ISSN 0143-8166, <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.08.005>, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816613002480>, this issue.
- [43] H. Surmann, K. Lingemann, A. Nüchter, J. Hertzberg, **A 3D laser range finder for autonomous mobile robots**, in: *Proceedings of the 32nd ISR (International Symposium on Robotics)*, vol. 19, Citeseer, 2001, pp. 153–158.
- [44] S. Winkelbach, S. Molkenstruck, F.M. Wahl, **Low-cost laser range scanner and fast surface registration approach**, in: *Pattern Recognition*, Springer, 2006, pp. 718–728.

IEEE

SENSORS JOURNAL

A PUBLICATION OF THE IEEE SENSORS COUNCIL

WWW.IEEE.ORG/SENSORS

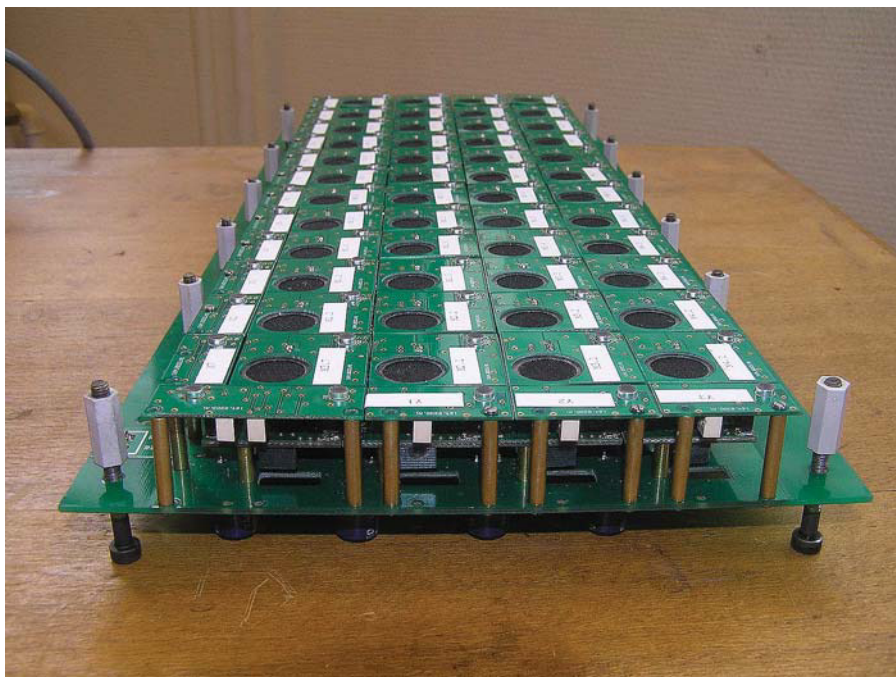
JULY 2014

VOLUME 14

NUMBER 7

ISJEAZ


(ISSN 1530437X)



Acoustic adaptive metacomposite modeled experimentally by a 4×12 array of individual active acoustic cells, each comprising four microphones, a DSP, and a loudspeaker (see page 2146).

Sensors Journal, IEEE

 Add Journal To My Alerts 

-  Popular Early Access Current Issue Past Issues **About Journal** Submit Your Manuscript

About this Journal

- [Aims & Scope](#)

Editorial Board

- [IEEE Sensors Journal publication information](#)


Content Announcements

- [Special issue on sensing technologies for intelligent urban infrastructures](#)
- [Special Issue on wireless sensor systems for space and extreme environments \(WSSSEE\)](#)
- [Special issue on printable sensors and systems](#)

Author Resources

- [IEEE Author Digital Toolbox](#)
- [Additional Information](#)
- [IEEE Open Access Publishing Options](#)

Sponsor



Aims & Scope

According to the IEEE Sensors Council's constitution, "The fields of interest of the Council and its activities shall be the theory, design, fabrication, manufacturing and application of devices for sensing and transducing physical, chemical, and biological phenomena, with emphasis on the electronics and physics aspects of sensors and integrated sensor-actuators." The IEEE Sensors Journal focuses on the numerous sensor technologies spanned by the IEEE, and on emerging sensor technologies.

Persistent Link: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7361> [More »](#)

Frequency: 12

ISSN: 1530-437X

Published by:

Publication Details: [IEEE Sensors Journal](#)

• [IEEE Sensors Council](#)

Subjects

Communication, Networking & Broadcasting
Signal Processing & Analysis

Contacts

Editor-in-Chief
Krikor Ozanyan
Professor, Head of Sensing, Imaging and
Signal Processing

IEEE

SENSORS JOURNAL

A PUBLICATION OF THE IEEE SENSORS COUNCIL

WWW.IEEE.ORG/SENSORS

JULY 2014

VOLUME 14

NUMBER 7

ISJEAZ

(ISSN 1530-437X)

SPECIAL ISSUE ON MATERIAL-INTEGRATED SENSING, DATA PROCESSING AND COMMUNICATION

Guest Editorial *D. Lehmkus, S. Bosse, W. Lang, P. C.-P. Chao, and F.-K. Chang* 2077

SPECIAL ISSUE PAPERS

Sensorial Surfaces-Embedding Sensor Structures Into the Surface of Materials	<i>C. Winkelmann and W. Lang</i>	2078
Optimizing the Output of a Human-Powered Energy Harvesting System With Miniaturization and Integrated Control	<i>V. Goudar, Z. Ren, P. Brochu, M. Potkonjak, and Q. Pei</i>	2084
Unobtrusive Sleep Stage Identification Using a Pressure-Sensitive Bed Sheet	<i>L. Samy, M.-C. Huang, J. J. Liu, W. Xu, and M. Sarrafzadeh</i>	2092
Integration Without Disruption: The Basic Challenge of Sensor Integration	<i>G. Dumstorff, S. Paul, and W. Lang</i>	2102
A Microfluidic Impedance Cytometer on Printed Circuit Board for Low Cost Diagnosis	<i>J. Guo, H. Li, Y. Chen, and Y. Kang</i>	2112
Effects of the Artificial Skin's Thickness on the Subsurface Pressure Profiles of Flat, Curved, and Braille Surfaces	<i>J.-J. Cabibihan, S. S. Chauhan, and S. Suresh</i>	2118
Evaluation of Actuator, Sensor, and Fatigue Performance of Piezo-Metal-Composites	<i>W.-G. Drossel, S. Hensel, M. Nestler, and L. Lachmann</i>	2129
Microfabricated Expandable Sensor Networks for Intelligent Sensing Materials	<i>N. P. Salowitz, Z. Guo, S.-J. Kim, Y.-H. Li, G. Lanzara, and F.-K. Chang</i>	2138

(Contents Continued on Page 2070)



Adaptive Metacomposites for Vibroacoustic Control Applications	<i>M. Collet, M. Ouisse, and F. Tateo</i>	2145
Power Modulation-Based Optical Sensor for High-Sensitivity Vibration Measurements	<i>Z. T. Nishino, K. Chen, and N. Gupta</i>	2153
Distributed Agent-Based Computing in Material-Embedded Sensor Network Systems With the Agent-on-Chip Architecture	<i>S. Bosse</i>	2159
Wireless Power Transmission for Structural Health Monitoring of Fiber-Reinforced-Composite Materials	<i>M. Salas, O. Focke, A. S. Herrmann, and W. Lang</i>	2171
Integrated Powder-Based Thick Films for Thermoelectric, Pyroelectric, and Piezoelectric Energy Harvesting Devices	<i>R. A. Dorey</i>	2177
A New Active 3D Optical Proximity Sensor Array and Its Readout Circuit	<i>S.-C. Huang, W.-H. Hsu, P. C.-P. Chao, and C. H. Tsai</i>	2185
Miniaturized Flexible Interdigital Sensor for <i>In Situ</i> Dielectric Cure Monitoring of Composite Materials	<i>D. Boll, K. Schubert, C. Brauner, and W. Lang</i>	2193
Smart Sensing Materials for Low-Cost Chipless RFID Sensor	<i>E. Md Amin, J. K. Saha, and N. C. Karmakar</i>	2198
Investigation of the Effectiveness and Robustness of an MEMS-Based Structural Health Monitoring System for Composite Laminates	<i>F. Caimmi, S. Mariani, M. D. Fazio, and P. Bendiscioli</i>	2208
A Tensor-Based Pattern-Recognition Framework for the Interpretation of Touch Modality in Artificial Skin Systems	<i>P. Gastaldo, L. Pinna, L. Seminara, M. Valle, and R. Zunino</i>	2216

REGULAR ISSUE-SENSORS PAPERS

SENSORS LETTERS

Interferometer-Based Microwave Microscopy Operating in Transmission Mode	<i>K. Haddadi and T. Lasri</i>	2226
Application of Blind Source Separation Methods to Ion-Selective Electrode Arrays in Flow-Injection Analysis	<i>L. T. Duarte, J. M. T. Romano, C. Jutten, K. Y. Chumbimuni-Torres, and L. T. Kubota</i>	2228
Adaptive Compressive Fusion for Visible/IR Sensors	<i>A. Jameel, A. Ghaffoor, and M. M. Riaz</i>	2230

SENSORS PAPERS

Empirical Studies of Bio-Inspired Self-Organized Secure Autonomous Routing Protocol	<i>K. Saleem, N. Fisal, and J. Al-Muhtadi</i>	2232
Characterization of Electrical Capacitance Tomography Sensors With Different Diameter	<i>J. Ye, H. Wang, and W. Yang</i>	2240
High-Sensitivity Wideband Magnetic Field Sensor Using Nonlinear Resonance Magnetoelectric Effect	<i>Y. K. Fetisov, D. A. Burdin, D. V. Chashin, and N. A. Ekonomov</i>	2252
Scalable Dynamic Routing Protocol for Cognitive Radio Sensor Networks	<i>P. Spachos and D. Hantzinakos</i>	2257
Visual Tracking of Human Head and Arms Using Adaptive Multiple Importance Sampling on a Single Camera in Cluttered Environments	<i>C.-M. Huang, Y.-R. Chen, and L.-C. Fu</i>	2267
Preliminary Study on Planar Electromagnetic Microfluidics Based a Microsensor by Finite Element Analysis	<i>Q. Li and Y. J. Yuan</i>	2276
A Region Growing Method for Detecting Interfaces in X-Ray View Cell Images	<i>P. Jampana, S. L. Shah, and J. Shaw</i>	2283
Optical Fiber Acoustic Sensor Based on Nonstandard Fused Coupler and Aluminum Foil	<i>S. Wang, P. Lu, L. Zhang, D. Liu, and J. Zhang</i>	2293
Autonomous Wearable Sensor Nodes With Flexible Energy Harvesting	<i>W. Y. Toh, Y. K. Tan, W. S. Koh, and L. Siek</i>	2299
Modeling Wearable Bend Sensor Behavior for Human Motion Capture	<i>G. Orengo, A. Lagati, and G. Saggio</i>	2307
Nighttime Turn Signal Detection by Scatter Modeling and Reflectance-Based Direction Recognition	<i>D.-Y. Chen, Y.-J. Peng, L.-C. Chen, and J.-W. Hsieh</i>	2317
Detection and Compensation of Interchannel Time Offsets in Indirect Fetal ECG Sensing	<i>P. Melillo, D. Santoro, and M. Vadursi</i>	2327
Fiber-Optic EFPI Pressure Sensors for <i>In Vivo</i> Urodynamic Analysis	<i>S. Poeggel, D. Tosi, F. Fusco, J. Ippolito, L. Lupoli, V. Mirone, S. Sannino, G. Leen, and E. Lewis</i>	2335
Functionalization of Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes by 1-Pyrenebutyric Acid and Its Application for Biosensing	<i>X. Xu, J. Yu, J. Qian, D. Cui, and S. Liu</i>	2341

Resonant Energy Scavenger for Sensor Powering by Spurious Emissions from Compact Fluorescent Lamps	2347
..... G. Monti, F. Congedo, P. Arcuti, and L. Tarricone	
Energy Center Detection in Light Scanning Sensors for Structural Health Monitoring Accuracy Enhancement	2355
..... W. Flores-Fuentes, M. Rivas-Lopez, O. Sergiyenko, J. C. Rodríguez-Quñonez, D. Hernández-Balbuena, and J. Rivera-Castillo	
Fabrication and Characterization of Amino Group Functionalized Multiwall Carbon Nanotubes (MWCNT) Formaldehyde Gas Sensors	2362
..... H. Mu, K. Wang, S. Zhang, K. Shi, S. Sun, Z. Li, J. Zhou, and H. Xie	
Correlation Analysis on Interferometric Coherence Degree and Probability of Residue Occurrence in Interferogram	2369
..... Z. Chang, H. Gong, J. Zhang, and M. Chen	
Lifetime Maximization in Cognitive Sensor Networks Based on the Node Selection	2376
..... M. Najimi, A. Ebrahimzadeh, S. M. H. Andargoli, and A. Fallahi	
Inscription of Multiple Bragg Gratings in a Single-Mode Polymer Optical Fiber Using a Single Phase Mask and Its Analysis	2384
..... G. Rajan, M. Y. M. Noor, E. Ambikairajah, and G.-D. Peng	
Extraction of Spatial Ultrasonic Wave Packet Features by Exploiting a Modified Hough Transform	2389
..... P. Ploß, S. J. Rupitsch, and R. Lerch	

About the Cover: “Acoustic adaptive metacomposite modeled experimentally by a 4×12 array of individual active acoustic cells, each comprising four microphones, a DSP, and a loudspeaker.” For more information see “Adaptive Metacomposites for Vibroacoustic Control Applications,” by Collet *et al.*, which begins on p. 2145.

Energy Center Detection in Light Scanning Sensors for Structural Health Monitoring Accuracy Enhancement

Wendy Flores-Fuentes, Moises Rivas-Lopez, Oleg Sergiyenko, Julio C. Rodríguez-Quíñonez, Daniel Hernández-Balbuena, and Javier Rivera-Castillo

Abstract—This paper introduces a novel electronic circuit that has to be embedded in a photodiode sensor as an integrated circuit board for electronic signal processing that detects the energy center of an optical signal, which represents the most accurate position measurement from a light emitter source mounted on a structure (such as a building, a bridge, or a mine). The optical scanning sensor for structural health monitoring proposed is a flexible system that can operate with a coherent or incoherent light emitter source. It is conformable to any kind of structure surfaces and data storage budget thanks to the signal processing stage being embedded into the sensor and does not require additional software processing, which reduces the time and memory spacing requirements for information recording. The theoretical principle of operation, as well as the technological and experimental aspects of design, development, and validation is presented.

Index Terms—Centroid, energy signal centre, estimation error, light source, optical scanning, optical signal detection, optical signal processing, peak detection, SHM, SVMR.

I. INTRODUCTION

STRUCTURES experience deterioration and damage through their lifetimes due to environmental and excessive load conditions such as humidity, corrosion, earthquakes, gust waves, and traffic, among others. This results in structure deformation, cracking, dislocation and even collapse. Structures play an important role in safety and economy. Thus, the increasing demand for the safest and most functional structures has driven the SHM research of data acquisition and its analysis to the obtention of indicators of the structure health.

Nowadays, there are SHM systems with sensors based on a wide variety of technologies such as optical fiber, video cameras or optical scanner sensors. Each one has their own

Manuscript received April 18, 2013; revised October 18, 2013 and March 1, 2014; accepted March 1, 2014. Date of publication March 6, 2014; date of current version May 29, 2014. This work was supported by the Engineering Institute of Autonomous University, Baja California, Mexicali, Mexico. The associate editor coordinating the review of this paper and approving it for publication was Dr. David Hecht.

The authors are with the Engineering Institute, Autonomous University of Baja California, Mexicali 21280, Mexico (e-mail: wendy.flores6@uabc.edu.mx; mrivas@uabc.edu.mx; srgnk@uabc.edu.mx; julio.rodriguez37@uabc.edu.mx; dhernan@uabc.edu.mx; javier.rivera.castillo@uabc.edu.mx).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/JSEN.2014.2310224

advantages and disadvantages depending on the type of structure and the variables to be monitored and analyzed, which in turn depend on the kind of potential damage that they are intended to prevent.

This work introduces a position measurement method based on an optical scanning sensor consisting of a light emitter source mounted on a structure together with an optical scanning aperture. The light beam is deflected through a lens and directed into a photodiode that converts it into a voltage output signal. Such output signal is electronically processed in order to detect the light energy centre, that is, its most accurate position measurement. This measurement is used to finally determine if a displacement has occurred [1].

The concept of energy signal centre has been used previously in different applications with signals from several types of transducers, and many mathematical methods have been developed to do the post processing [2]–[14]. Some of these mathematical methods have been evaluated for optical scanning sensing; like the Geometric Centroid, the Power Spectrum Centroid and Peak Detection but all of them require digital signal post processing time and memory storage [15]–[21].

Instead of a digital signal post processing, a real time electronic signal processing, embedded into the photodiode sensor, is developed.

II. THEORETICAL PRINCIPLE OF OPERATION

The light scanning system sensor presented for SHM is a position measurement system. It is composed of a light emitter source installed on the structure under monitoring and an optical scanning aperture that is scanning the structure in the search of the light emitter source in order to determine if it has undergone a displacement.

A. Position Indicator

A light emitter source, mounted on the structure under monitoring, is used as a position indicator. This can be a coherent light emitter source such as a laser or an incoherent light source such as a bulb like the ones used in motor vehicles. We assume that for any light emitter source there is only one energy centre that represents its point position.

B. Optical Scanning Aperture

The rotating optical aperture is designed as a 45° slanted mirror surface attached to a cylindrical rod that deflects

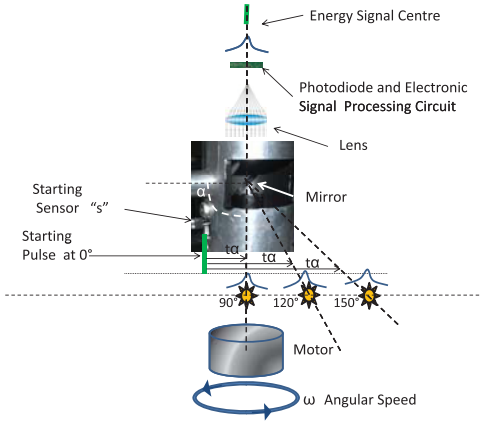


Fig. 1. Optical scanning aperture.

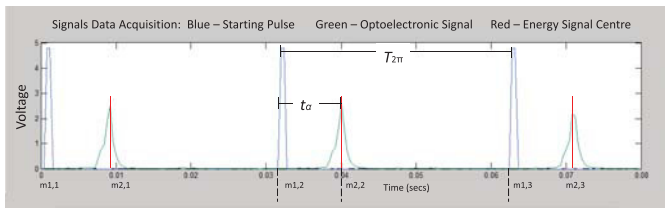


Fig. 2. Optical scanning aperture diagram.

the light beam into a double convex lens provided with an interference filter and a photodiode. The cylindrical rod is mounted onto the shaft of a dc electrical motor, and as it rotates, an electronic signal is generated. Fig. 1 shows the main elements of the optical scanning aperture. When the mirror starts spinning, the sensor “s” is synchronized when the origin generates a pulse indicating the 0° position and the starting of a cycle of 360° that finishes immediately before the “s” sensor generates the next beginning pulse. These pulses are used to calculate the scanning frequency and the zero reference, which is used to measure the angle where the light emitter source is positioned [22], [23].

The signal timing diagram in Fig. 2 shows the starting pulse and the optoelectronic signal relation used to calculate the light emitter energy signal centre position as described in the equations below. The interval $T_{2\pi}$ is the time for one motor revolution, defined as the time between m_1 and m_1 as in (1), which are expressed by the code $I_{2\pi}$ as defined in (2). As for m_1 , it is the reference of the starting of one motor revolution (0°).

$$T_{2\pi} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{2\pi f} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

$$I_{2\pi} = T_{2\pi} f \quad (2)$$

The time $t\alpha$ is the time between the reference of the starting of one motor revolution and the energy signal centre, that is, the interval between m_1 and m_2 . This can be expressed by the code I_α as defined in (3). As for m_2 , it is the energy signal centre. The angle under measurement is then calculated

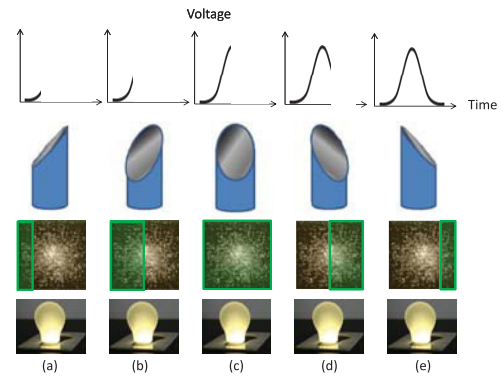


Fig. 3. Light to voltage conversion.

by (4) [24].

$$I_\alpha = t_\alpha f \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{2\pi I_\alpha}{I_{2\pi}} = \frac{2\pi t_\alpha f}{T_{2\pi} f} = \frac{2\pi t_\alpha f}{\frac{2\pi}{\omega} f} = t_\alpha \omega = t_\alpha 2\pi f \quad (4)$$

Where:

m_1 is the reference of the starting of one motor revolution

m_2 is the energy signal centre

$T_{2\pi}$ is the time interval of one cycle, from m_1 to m_1

ω is the angular speed

f is the scanning frequency (cycles per second).

$I_{2\pi}$ is the interval code of one cycle, from m_1 to m_1

I_α is the range code from the starting of one cycle to the energy signal centre

t_α is the interval from the starting of the signal to the energy signal centre, from m_1 to m_2 .

C. The Energy Signal Centre

The optoelectronic signal generated has a Gaussian-like shape as described in Fig. 3. The photodiode transforms the light input into a voltage as the mirror rotates. This is mainly observed at a long distance: at a short distance the light emitter source looks like a point source, but at a distance the source expands its radius as a cone-like or an even more complex shape depending on the properties of the medium through which the light is travelling.

To minimize errors in the position measurements, the best solution is to take any measurement in the energy centre of the optoelectronic signal.

Some digital methods for energy signal centre detection are: 1) Geometric Centroid and Power Spectrum Centroid, 2) Peak Detection and 3) our proposed method, and an Electronic Circuit method called “Saturation and Integration” [15]. In Fig. 4 a graphical representation of each method is observed. Centroid calculation and peak calculations give excellent results when the optoelectronic signal has an almost perfect Gaussian-like shape. But most of the times the optoelectronic signals are observed to be asymmetrical as shown in Fig. 5, with different shapes influenced by the scanning frequency, the light emitter source distance to the optical scanning aperture, the t_α length (the interval from the starting signal to the energy signal centre) and

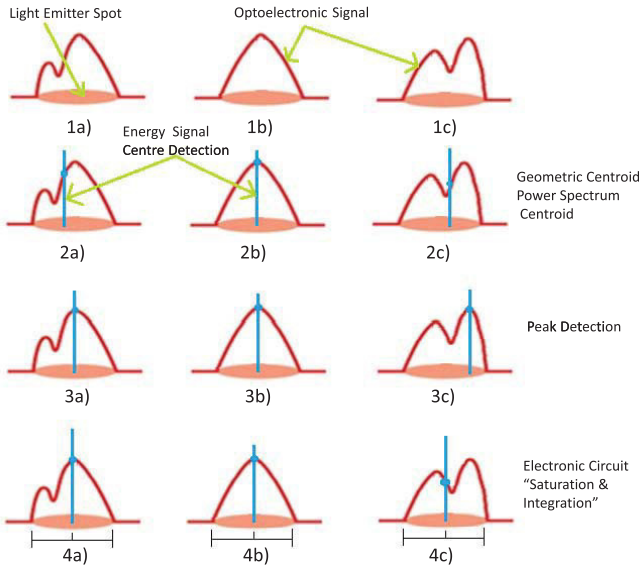


Fig. 4. Optoelectronic energy signal centre detection methods.

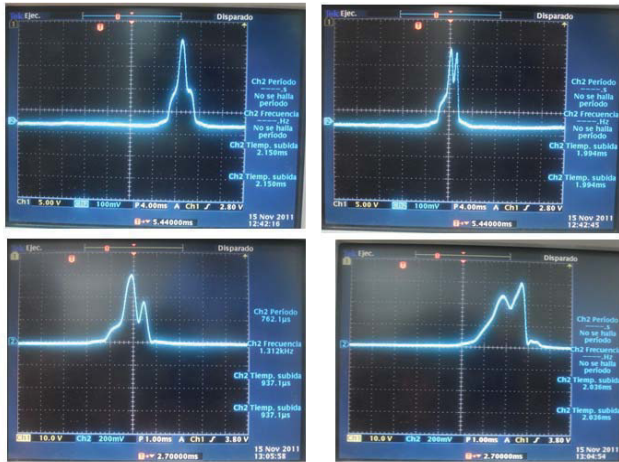


Fig. 5. Optoelectronic signals.

the light emitter source tilt over the surface, due to motor eccentricity at low speed scanning, light emitter montage and other optical phenomena such as reflection, diffraction, absorption and refraction. The luminous flux loss (energy loss) due to these phenomena could result in signals with an asymmetrical shape (signals with more than one peak, with a shifted peak, or even more unusual shapes, etc) instead of a symmetric Gaussian-like shape. Although sometimes the signal looks like two different functions it is still not a piecewise function, but one continuous function, as it is apparent from our experimental screenshots at Fig. 5. As a consequence, when the signal is asymmetrical the results are biased to the highest light density side, and the electronic circuit “Saturation and Integration” method is not affected by the signal deformation, because of the fact that after the optoelectronic signal reaches the voltage reference level the measurement is performed at its half time interval.

1) *Geometric Centroid and Power Spectrum Centroid*: These methods make a correlation between the energy signal centre with “the centre of mass” of the light incident onto the surface of the optical scanner mirror. The Geometric Centroid for continuous 1-D light intensity distribution is given by (5) where $f(x)$ is the irradiance distribution at the position x of the 1-D light intensity distribution (a voltage function of the signal shape generated by the scanner).

$$x = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx} \quad (5)$$

The Power Spectrum Centroid is calculated as follows

- Data processing through Fourier Transformation for translating data from the time domain to the frequency domain.
- Power Spectrum computation in order to represent the data in units of power per frequency.
- Centroid calculation by (6), which correspond to the energy centre of the signal (in the frequency domain) [25], [26].
- Conversion of this frequency domain coordinate to the time domain coordinate for obtaining the position of the light-emitting source under scanning.

$$SC_{Hz} = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} k * X^d[k]}{\sum_{k=1}^{N-1} X^d[k]} \quad (6)$$

Where:

- SC is the spectral centroid in frequency (Hertz).
- $X^d[k]$ is the magnitude (voltage amplitude) corresponding to frequency bin k .
- k is the frequency bin (fs/N) in hertz and fs is the frequency sample.
- N is the length of the DFT (Discrete Fourier Transform).

2) *Peak Detection*: Peak Signal Algorithms are simple statistic algorithms to find the peak of a non Gaussian data series signal through threshold criteria. The algorithms which identify peaks in a given normally distributed time-series are selected to be applied in a power distribution data, the peaks of which indicate high demands, and the highest corresponds to the energy centre. Each different algorithm is based on a specific formalization of the notion of a peak according to the characteristics of the optical signal, as (7) for this kind of optoelectronic signals.

$$S(k, i, x_i, T) = \frac{\sum_{d=1}^k x_i - x_{i-d}}{k} + \frac{\sum_{d=1}^k x_i - x_{i+d}}{k} \quad (7)$$

where T is an optoelectronic signal containing N values. x_i is a given i^{th} point in T . $k > 0$ is a given integer of k temporal neighbours of x_i (around the i^{th} point), and S is a given peak function, $S(i, x_i, T)$ with an i^{th} element x^i of the given time-series T . A given point x^i in T is a peak if $S(i, x^i, T) > \theta$, where θ is a user-specified (or suitably calculated) threshold value.

3) *Electronic Circuit “Saturation and Integration”*: In this method the optoelectronic signal is processed by means of an electronic circuit. The signal captured by the photodiode

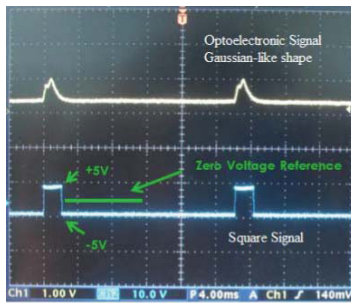


Fig. 6. Optoelectronic signal and square signal from level detector output.

is processed through a circuit. It sets a threshold to the optoelectronic signal produced by the light emitter spot for measuring the time at which it reaches the threshold and calculating its half time interval, corresponding to the energy signal centre.

On the base of these previous analysis we assume that there is only one energy centre in the light source that represents the position that is being monitored. These approaches come from the analysis of the signal energy centre through the several methods just mentioned, on which we could find that even if the optoelectronic signal had more than one peak (light emitter source energy peaks), the energy signal centre can be found by the centroid calculation on both time and frequency domains by geometric centroid and by power spectrum centroid calculation respectively. However although the results of the power spectrum centroid and the geometric centroid agree well with our experiments, when the signal is affected by noise in any of its sides, the centroid position is shifted to the corresponding side with noise. The improvement developed in the proposed method consist of saturating the signal and establishing a threshold from which noise is left out in order to calculate its half time interval, which correspond to the energy signal centre concept we are trying to correlate with the position under monitoring.

III. TECHNOLOGICAL AND EXPERIMENTAL DESIGN

A. Measurement

The procedure below describes the steps needed to obtain the energy signal centre through the electronic circuit “Saturation and Integration” method:

1) *Level Detector*: A JFET operational amplifier is used as a voltage level detector to convert the optoelectronic Gaussian-like signal to a square signal. If the optoelectronic signal is lower than the reference voltage, the JFET goes down to the negative saturation voltage, but if the optoelectronic signal reaches the voltage reference the JFET goes up to the positive saturation voltage resulting in the signal shown in Fig. 6.

2) *Integrator*: A JFET operational amplifier is used as an integrator to convert the square signal to a ramp signal in order to make the energy signal centre cross the zero reference as shown on Fig. 7.

3) *Zero-Crossing Detector*: A low input current voltage comparator with a zero-crossing configuration is used to determine by means of a rising edge pulse, the point where

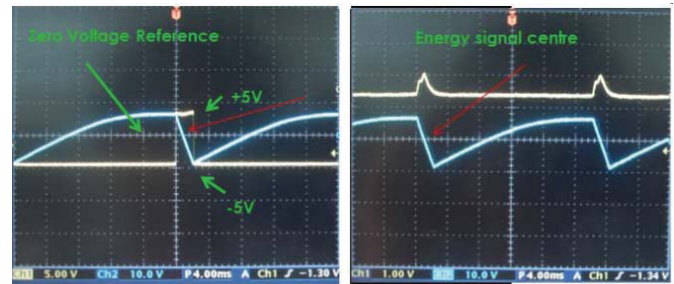


Fig. 7. Square signal from level detector output and ramp signal from integrator.

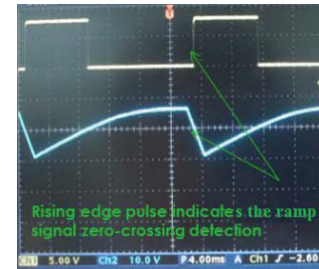


Fig. 8. Zero-crossing detector signal and ramp signal from integrator output.

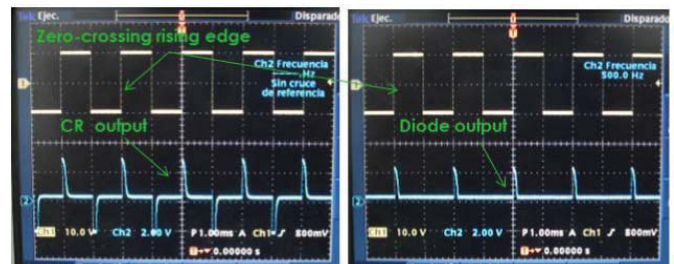


Fig. 9. CR output and final diode output (energy signal centre).



Fig. 10. Electronic optoelectronic signal processing steps.

the ramp signal crosses the zero voltage reference, which corresponds to the energy signal centre as shown in Fig. 8.

4) *CR Circuit*: A capacitor and a resistor are set in series with the zero-crossing detector output to obtain a pulse signal at the edges. Then a diode is used to keep only the rising edge which corresponds to the energy signal centre, as shown in Fig. 9.

Fig. 10 shows a correlation between the optoelectronic signal, the square signal, the ramp signal and the diode output, which represents the energy signal centre.

The time measurement between m_1 and m_2 , described in Fig. 2, is used to calculate the angle by the application of (4) without any requirement of digital signal processing.

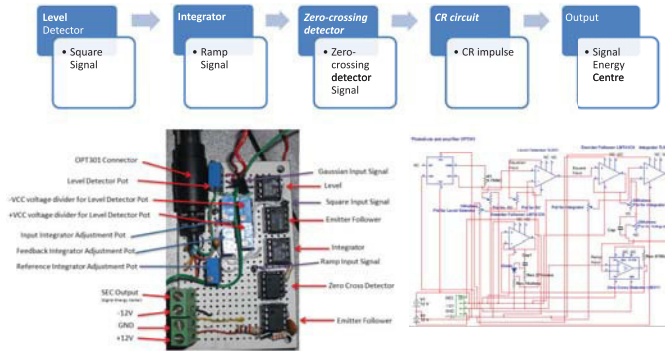


Fig. 11. Electronic optoelectronic signal processing prototype.

Detailed electronic optoelectronic signal processing is described in Fig. 11.

B. Measurement Correction

It was seen during experimentation that the optoelectronic Gaussian-like shape signal experiences distortion due to internal and external error sources, as shown in Fig. 5.

It is necessary to be aware of the fact that each set of measurements could be affected by different error sources stemming from environmental conditions or even errors intrinsic to the mechanism. Hence, systematic and random errors do not follow a linear function, since their behavior is related to the position -i.e. angle and distance or scanning frequency. For this reason, a digital rectification by means of a linear function is not suitable to the task at hand. Therefore, in this work error approximation functions are used instead in order to perform the digital rectification by using a well known machine learning regression model: the Support Vector Machine (SVM). This is an intelligent algorithm that has to be trained with historical system behavior aimed to feed error predictions into the correction process at each measurement. The measurement correction that minimizes random and systematic error is performed by (8) by way of a (SVMR) Support Vector Machine Regression in order to predict the error based on system historical behaviour [27]–[32].

$$\alpha_{MC} = \alpha_M + E_p \quad (8)$$

Where:

α_{MC} is the angle measurement by the system corrected.

α_M is the angle measured by the system.

E_p is the predicted error by SVMR.

IV. DEVELOPMENT AND VALIDATION

A. Experimental Work

With the Energy Signal Centre measurements and the real value, the measurement error was calculated by (9).

$$E = |\alpha_R - \alpha_M| \quad (9)$$

where:

E is the measurement error, representing how far the measurement is from the real value.

α_R is the target angle.

α_M is the angle measured by the system.

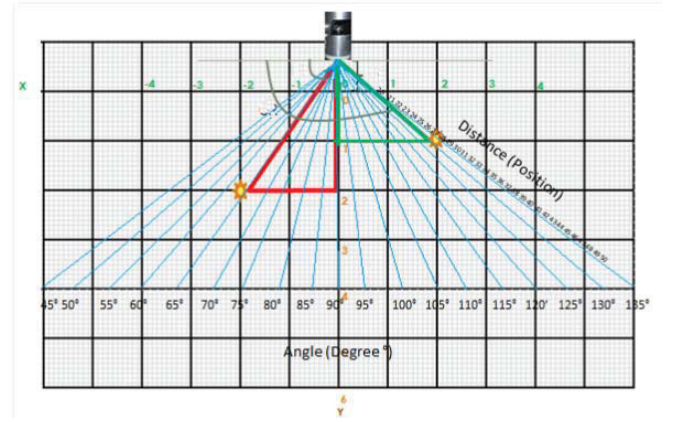


Fig. 12. Measurement map.

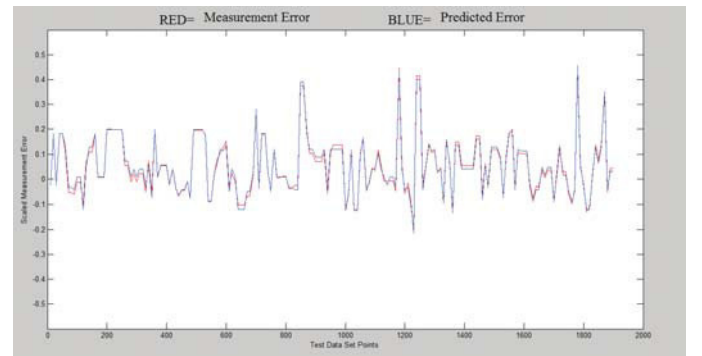


Fig. 13. Real versus predicted scaled measurement error.

Measurements were performed by scanning from 45° to 135°, in 5° steps, at ten different positions by angle (10 measurements were taken at each point (angle, distance)), as represented at Fig. 12 resulting in a dataset with 1900 measurements.

All the values in the data sets were linearly scaled to the range [-1, 1] and separated into a training data set and a testing data set. The X training regression data set was composed of 1266 objects with 3 attributes (Angle, Distance, and Frequency). The Y training regression data set was composed of 1266 targets (Error measurement). The X test regression data set was composed of 634 objects with 3 attributes (Angle, Distance, and Frequency). The Y test regression data set was **predicted** to be composed of 634 targets (Error predicted). The SVMR was performed with the radial basis function (RBF) kernel described by (10), with the following settings:
 NU Fraction of objects outside the ‘data tube’ = $[2E^{-6}]$
 $KPAR$ Parameter = [2]
 EP Epsilon (ϵ), with of the ‘data tube’ = default value.

$$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma(x_i - x_j)^2), \quad \gamma > 0 \quad (10)$$

B. Results

Measurements show that the error distribution depends on the angle under measurement and the distance from the light emitter source to the aperture sensor. SVMR was successfully used to predict the error as is shown in Fig. 13, where the red

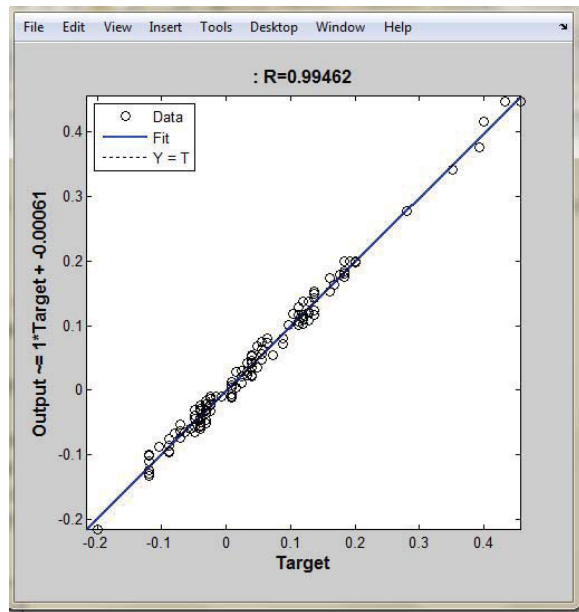


Fig. 14. Plot regression.

TABLE I
MEASUREMENTS ERRORS AVERAGE MAPPING

Angle °	Position									Average	
	20	21	22	23	24	25	26	27	28		29
45	0.92	1.42	1.29	2.93	2.36	1.02	0.92	1.29	1.75	1.22	1.45
50	1.04	1.12	1.06	0.89	0.79	1.93	0.34	0.66	0.65	0.59	0.91
55	0.41	0.34	2.13	0.73	1.33	1.48	0.02	0.71	0.99	1.42	0.96
60	0.71	0.41	0.45	0.95	1.11	1.04	0.47	0.36	0.57	1.14	0.72
65	0.27	1.63	0.61	1.27	2.27	0.27	0.73	1.86	0.75	0.65	1.03
70	0.62	1.16	0.40	1.15	2.19	0.15	1.36	0.31	1.11	0.08	0.85
75	1.18	0.67	0.20	1.01	0.76	1.15	2.12	0.61	1.20	0.73	0.96
80	0.69	1.02	1.76	0.82	0.76	1.65	0.14	1.07	0.32	1.56	0.98
85	0.43	0.17	1.34	1.96	1.43	1.95	2.10	0.40	2.03	1.34	1.31
90	1.43	1.49	0.88	0.97	1.09	1.12	0.75	1.26	0.73	0.38	1.01
95	0.62	0.65	0.07	0.07	0.39	0.34	0.68	1.25	0.22	0.24	0.45
100	1.62	0.45	1.93	0.70	0.54	1.75	0.52	2.33	0.15	0.42	1.04
105	0.85	1.28	1.96	3.11	0.51	0.08	0.78	0.36	0.31	1.91	1.12
110	0.61	0.73	0.79	0.26	1.90	0.31	1.61	1.61	0.17	0.40	0.84
115	1.96	0.47	1.26	0.51	1.11	1.82	1.95	0.71	1.56	1.02	1.24
120	0.78	1.61	0.08	0.90	0.26	0.12	0.33	1.50	1.23	0.04	0.68
125	0.20	0.42	0.26	1.31	1.28	2.48	1.34	0.16	0.67	1.03	0.91
130	0.98	3.18	1.64	3.15	4.84	0.56	0.85	0.98	0.92	0.74	1.78
135	0.99	0.14	0.84	1.98	0.18	1.85	0.17	0.14	0.25	1.36	0.79
Average	0.86	0.97	1.00	1.27	1.32	1.11	0.90	0.92	0.82	0.86	1.00

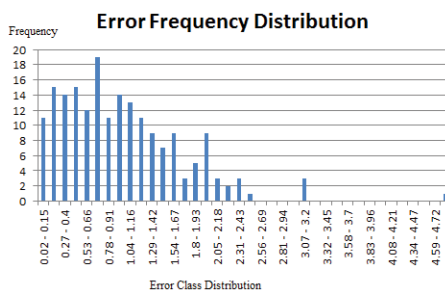


Fig. 15. Poisson distribution.

signal corresponds to the real measurement error and the blue signal corresponds to the predicted error. Linear regression is represented in Fig. 14 obtaining an R SVM coefficient value of 0.99556 where data and fit results approaches to the plot regression target. Finally, the angle measurement error was corrected as shown in Table I with the Poisson distribution shown in Fig. 15 with the probability of getting a

measurement error $\geq \pm 4$ of 0.5% by (11), resulting in a 99.5% of probability on getting measurements with an error less than 4°

$$p(x, \lambda) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \tag{11}$$

V. CONCLUSION AND FUTURE WORK

This paper proposes a novel electronic circuit design that has to be embedded in a photodiode sensor integrated circuit for optical signal processing that detects the energy centre, which represents the most accurate position measurement from a light emitter source mounted on a structure in order to monitor any shifts, without the need of signal post processing. Measurement errors were successfully corrected, enhancing the scanning system accuracy for all the angles and distances under measurement. Even more, other improvements have been spotted for further research on both the mechanical-electrical optical system, as in the energy signal centre processing and its correction by the analysis of effects in the motor rotation frequency. Further research will continue to increase measurement accuracy for Optical Scanning System.

REFERENCES

- [1] M. Rivas Lopez *et al.*, "Optoelectronic method for structural health monitoring," *Struct. Health Monitor.*, vol. 9, no. 2, pp. 105–120, Mar. 2010.
- [2] H. Wang and M. Fan, "Centroid-based semi-fragile audio watermarking in hybrid domain," *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 53, no. 3, pp. 619–633, Mar. 2010.
- [3] H. Hong, X.-L. Wang, Z.-Y. Tao, and S.-P. Du, "Centroid-based sifting for empirical mode decomposition," *J. Zhejiang Univ. Sci. C*, vol. 12, no. 2, pp. 88–95, Feb. 2011.
- [4] A. Esquivel, A. Lazarian, S. Horibe, J. Cho, V. Ossenkopf, and J. Stutzki, "Statistics of velocity centroids: Effects of density-velocity correlations and non-Gaussianity," *Monthly Notices R. Astronomical Soc.*, vol. 381, no. 4, pp. 1733–1744, Nov. 2007.
- [5] A. Lazarian, "Obtaining spectra of turbulent velocity from observations," *Space Sci. Rev.*, vol. 143, nos. 1–4, pp. 357–385, Mar. 2009.
- [6] S. Schuhmann, K. Herrmann, K. Rothermel, J. Blumenthal, and D. Timmermann, "Improved weighted centroid localization in smart ubiquitous environments," in *Ubiquitous Intelligence and Computing* (Lecture Notes in Computer Science). Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008, ch. 4, pp. 20–34.
- [7] E. W. Weisstein. (2014). *Function centroid*. From *Mathworld—A Wolfram Web Resource* [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/FunctionCentroid.html>
- [8] M. Rivara and C. Calderon, "Lepp terminal centroid method for quality triangulation: A study on a new algorithm," in *Advances in Geometric Modeling and Processing* (Lecture Notes in Computer Science). Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008, ch. 17, pp. 215–230.
- [9] D. Proffitt and J. Cutting, "Perceiving the centroid of configurations on a rolling wheel," *Attention, Perception, Psychophys.*, vol. 25, no. 5, pp. 389–398, 1979.
- [10] X.-Z. Lai, S. X. Yang, G.-X. Zeng, J.-H. She, and M. Wu, "New distributed positioning algorithm based on centroid of circular belt for wireless sensor networks," *Int. J. Autom. Comput.*, vol. 4, no. 3, pp. 315–324, Jul. 2007.
- [11] V. I. Lyashuk and E. G. Novikov, "Search for acoustic effects from extensive atmospheric showers in baikal," *Phys. Atomic Nuclei*, vol. 69, no. 11, pp. 1922–1929, Nov. 2006.
- [12] P. Kathirvel, M. Sabarimalai Manikandan, S. Prasanna, and K. Soman, "An efficient R-peak detection based on new nonlinear transformation and first-order Gaussian differentiator," *Cardiovascular Eng. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 408–425, 2011.
- [13] National Instruments, Austin, TX, USA. (Feb. 2012). *Peak Detection Using Labview And Measurement Studio* [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/3770/en>

- [14] National Instruments, Austin, TX, USA. (Jul. 2009). *Wavelet-Based Peak Detection* [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/5432/en>
- [15] W. Flores Fuentes, M. Rivas Lopez, O. Sergiyenko, and J. Rivera Castillo, "Comparison of signal peak detection algorithms in the search of the signal energy center for measuring with optical scanning," in *Proc. IEEE Section Mexico, IEEE ROC Autom. Int. Conf. Commun., Comput., Electron., Autom., Robot. Ind. Exposit.*, Guerrero, Mexico, Jan. 2011, pp. 1–3.
- [16] P. Schaefer, R. Williams, G. Davis, and R. Ross, "Accuracy of position detection using a position-sensitive detector," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 47, no. 4, pp. 914–919, Aug. 1998.
- [17] C. Narayanan, A. Buckman, and I. Busch-Vishniac, "Position detection of multiple light beams using phase detection," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 43, no. 6, pp. 830–836, Dec. 1994.
- [18] A. Rohrbach and E. H. K. Stelzer, "Three-dimensional position detection of optically trapped dielectric particles," *J. Appl. Phys.*, vol. 91, no. 8, pp. 5474–5488, 2002.
- [19] S. Suzuki, T. Yagi, Y. Kuno, and Y. Uchikawa, "A study on processing of position detection and data communication using illuminant devices and image sensor," in *Proc. 26th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 2, Oct. 2000, pp. 936–941.
- [20] F. Wells and S. Jachim, "A technique for improving the accuracy and dynamic range of beam position-detection equipment," in *Proc. IEEE Accel. Sci. Technol.*, Mar. 1989, pp. 1595–1596.
- [21] W. Guanghui, P. Shum, X. Guoliang, and Z. Xuping, "Position detection improvement of position sensitive detector (PSD) by using analog and digital signal processing," in *Proc. IEEE 6th Int. Conf. Inf., Commun., Signal Process.*, Dec. 2007, pp. 1–4.
- [22] (Jun. 2012). *The Basics of Triangulation Sensors* [Online]. Available: <http://archives.sensormag.com/articles/0598/tri0598/main.shtml>
- [23] M. Rivas Lopez, W. Flores Fuentes, J. Rivera Castillo, O. Sergiyenko, and D. Hernandez Balbuena, "A method and electronic device to detect the optoelectronic scanning signal energy center," in *Proc. Tech.*, 2012, pp. 1–30.
- [24] M. Rivas, O. Sergiyenko, M. Aguirre, L. Devia, V. Tyrsa, and I. Rendon, "Spatial data acquisition by laser scanning for robot or SHM task," in *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, Jun./Jul. 2008, pp. 1458–1462.
- [25] A. Sekey, "Improved 1-bark bandwidth auditory filter," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 75, no. 6, p. 1902, 1984.
- [26] T. Park, *Introduction to Digital Signal Processing: Computer Musically Speaking*. Singapore: World Scientific, 2010.
- [27] A. J. Smola and B. Scholkopf, "A tutorial on support vector regression," *Statist. Comput.*, vol. 14, pp. 199–222, 2004.
- [28] J. Gascón-Moreno, E. Ortiz-García, S. Salcedo-Sanz, A. Paniagua-Tineo, B. Saavedra-Moreno, and J. Portilla-Figueras, "Multi-parametric Gaussian kernel function optimization for ϵ -SVMr using a genetic algorithm," in *Advances in Computational Intelligence* (Lecture Notes in Computer Science). Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2011, ch. 15, pp. 113–120.
- [29] Z. Zhang, "Some recent progresses in network error correction coding theory," in *Proc. 4th Workshop Netw. Coding, Theory Appl.*, Oct. 2008, pp. 1–5.
- [30] J. K. Choi, S. H. Park, D. J. Cho, and K. Y. Seo, "Correction error generation algorithm for differential positioning performance analysis of navigation equipment," in *Proc. Int. Conf. Control, Autom. Syst.*, 2008, pp. 1099–1103.
- [31] C.-W. Hsu, C.-C. Chang, and C.-J. Lin, "A practical guide to support vector classification," Dept. Comput. Sci., Nat. Taiwan Univ., Taipei, Taiwan, Tech. Rep., 2003.
- [32] R. P. W. Duin *et al.*, "PRTTools4: A MATLAB toolbox for pattern recognition, version 4.1," Ph.D. dissertation, Faculty EWI-ICT, Delft Univ. Technol., Delft, The Netherlands, Aug. 2007.



Wendy Flores-Fuentes received the M.E. degree from the Technologic Institute of Mexicali, México, in 2010. She has published different papers and a book chapter on topics in optical scanning for structural health monitoring.

She is currently a Professor of Electronic Topics in Engineering with the Faculty of Autonomous, University of Baja California, where she is involved in the development of optical scanning prototype for Structural Health Monitoring with the Applied Physics Department, Engineering Institute.



Moises Rivas-Lopez was born in 1960. He received the B.S. and M.S. degrees from Baja California Autonomous University, México, in 1985, and 1991, respectively, where he received the Ph.D. degree in optical scanning for structural health monitoring in 2010.

He has written six book chapters and 24 Journal and Proceedings Conference papers. Since 1992, he has presented different works in several International Congresses of the IEEE, ICROS, SICE, AMMAC, in USA, England, Japan, and Mexico.

Dr. Rivas was Head of the Engineering Institute, Baja California Autonomous University from 1997 to 2005, and a Rector with Baja California Polytechnic University from 2006 to 2010. He is currently a Full Researcher with the Applied Physics Department, Engineering Institute, Baja California Autonomous University, Mexico.



Oleg Sergiyenko received the B.S. and M.S. degrees from Kharkiv National University of Automobiles and Highways, Kharkiv, Ukraine, and the Ph.D. degree from Kharkiv National Polytechnic University in tools and methods of non-destructive control in 1991, 1993, and 1997, respectively. In 1997, he joined the Kharkiv National University of Automobiles and Highways. He has written 67 papers and holds one patent of Ukraine. He is currently a Reviewer for the IEEE TRANSACTION ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, the IEEE TRANSACTION ON MECHATRONICS, etc. He participates as a reviewer and Section Chair in several IEEE conferences in Japan, USA, U.K., Italy, etc. In 2004, he was invited by the Engineering Institute of Baja California Autonomous University for a Researcher position. He is currently Head of the Applied Physics Department, Engineering Institute, Baja California Autonomous University, Mexico. His current research interests include automated metrology and smart sensors, control systems, robot navigation, and 3D coordinates measurement.



Julio C. Rodríguez-Quñonez received the Ph.D. degree from Baja California Autonomous University, México, in 2013. He is currently a Professor of Electronic Topics with the Engineering Faculty, Autonomous University of Baja California, where he is involved in the development of optical scanning prototype in the Applied Physics Department.



Daniel Hernández-Balbuena received the Ph.D. degree from Baja California Autonomous University, México, in 2010. He has written three book chapters and 36 Journal and Proceedings Conference papers. He is currently an Academics Assistant Director with the Engineering Faculty, Baja California Autonomous University, Mexico.



Javier Rivera-Castillo received the M.S. degree from Baja California Autonomous University, México, in 2006. He has written two book chapters and seven Journal and Proceedings Conference papers. He was in charge of the Calibration Laboratory, Engineering Institute, Baja California Autonomous University, and Head of the Mechatronic Program with Baja California Polytechnic University from 2006 to 2011. He is currently a Full Researcher with the Applied Physics Department, Engineering Institute, Baja California Autonomous University, Mexico.

Mexico.