

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

***INSTITUTO DE INGENIERÍA***

***MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA***



**“DESARROLLO DE MÉTODO Y DISPOSITIVO ELECTRO-MECÁNICO PARA  
REALIZAR BARRIDO SELECTIVO CON LASER EN APLICACIÓN  
AEROSPACIAL ”**

***TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:***

***DOCTOR EN CIENCIAS***

***PRESENTA***

***XÓCHITL MARÍA GARCÍA CRUZ***

***DIRECTOR***

***OLEG YURÝEVICH SERGIYENKO***

***Mexicali, B. C.***

***Marzo 2015***

## DISTINCIONES

Dedico esta tesis a Dios que me ha permitido llegar a cumplir cada meta y me ha guiado en mis proyectos, también se la dedico a mis hijos Rafael e Israel.

Agradezco:

A mis padres y a mis hermanos por el apoyo brindado, su tiempo, consejos, y todo el amor.

A mi director de tesis el Dr. Oleg Yurýevich Sergiyenko por sus enseñanzas y guía.

Al Dr. Moisés Rivas por su apoyo incondicional y desinteresado.

A mis compañeros, que con sus actitudes me han hecho más fuerte y me han transmitido el espíritu de lucha.

A mis amigos, que me permitieron ser parte de sus vidas en este momento.

A mis alumnos por su apoyo que sin darse cuenta fueron una parte muy importante para obtener este grado.

Por ultimo agradezco:

A la Universidad Autónoma de Baja California por todo el apoyo brindado.

Al Dr. Benjamín Valdez Salas.

Al Dr. Daniel Hernández Balbuena

Al Dr. Juan Iván Nieto Hipólito

Al Dr. Luis Carlos Básaca Preciado

Al Instituto Tecnológico de Mexicali.

Al Ing. Francisco Javier Ortiz Serrano.

Al M.C. Hernán Daniel Magaña Almaguer.

Al M.C. Enrique Sánchez Limón.

Al Ing. Juan Abraham Pérez Ramos

A mis compañeros de trabajo que una vez fueron mis maestros, mis guías.

Por ultimo y muy especialmente agradezco al CONACyT por el apoyo ofrecido con la beca número 256891.

## RESUMEN

El Sistema Técnico de Visión tiene una desventaja el tiempo de exploración se realiza lentamente, la cual se convierte en la principal propuesta de solución en esta investigación. Se propone lograr mediante la aplicación de escaneo con ángulo de paso combinado para la búsqueda rápida de  $n$  obstáculos en un ambiente desconocido. Este problema es de principal importancia en la navegación robótica automática. Para mantener una velocidad razonable, el robot debe detectar obstáculos peligrosos en tiempo real; los exploradores conocidos son capaces de medir distancias con una precisión confiable y son incapaces de hacerlo en tiempo real. La tarea técnica relacionada con la exploración, la velocidad variable y cartografía digital precisa aplica para los sectores espaciales seleccionados están bajo consideración. Una amplia gama de simulaciones en MATLAB 7.12.0 de variantes en escenarios hipotéticos con variables de "n" obstáculos en cada escena (incluida la variación de formas y tamaños), fueron escaneadas con un incremento en el valor del ángulo (de  $0.6^\circ$  hasta  $15^\circ$ ). El objetivo de esta simulación fue detectar los valores angulares del intervalo que permitirán obtener la máxima información sobre los obstáculos sin pérdidas en el tiempo de escaneo. Tres de estos máximos locales se obtuvieron en la simulación y después se rectificaron con la aplicación de una red neuronal (Algoritmo de Levenberg-Marquardt). Los resultados obtenidos a su vez se aplicaron al diseño de una TME (Transmisión-Micro-Electromecánica) para la realización de exploración en nuestro prototipo experimental de escaneo láser

con paso variable combinado. Se pretende con este prototipo contribuir con investigación aplicada al sector aeroespacial de nuestro país.

## OBJETIVOS

### **GENERAL**

Esta tesis tiene como objetivo el desarrollo del método y diseño de dispositivo para realizar barrido con resolución selectiva para la visión de robot móvil en monitoreo de obstáculos sobre una superficie en terreno desconocido.

### **ESPECÍFICOS**

1. Calcular los pasos óptimos para definir teóricamente la cantidad finita de ajustes disponibles de la resolución de barrido.
2. Establecer el tiempo de recepción de imagen al sistema.
3. Analizar por computadora de los diferentes formas de trabajo del sistema; limitantes físicos y tecnológicos para funcionamiento del sistema bajo desarrollo.
4. Establecer la velocidad de funcionamiento, óptimo.
5. Maximizar la precisión respecto a la velocidad variable del sistema.
6. Mejorar la imagen cerca de las fronteras del ángulo de visión ya que no es muy precisa; se propone ser resuelta por un aditamento electromecánico que permita girar el enfoque de visión del prototipo, exactamente como las personas lo hacen para a mejorar la precisión de la imagen girando la cabeza.
7. Aumento de la resolución espacial del sistema mediante el desarrollo del diseño propuesto. Para eso:

- a. Ajuste y adecuación de los parámetros mediante simulación y experimentación.
8. Desarrollo del algoritmo y método de control de los elementos mecatrónicos del sistema.
9. Aplicación de métodos estadísticos para determinación del ángulo y/o ángulos óptimos.
10. Maximizar la velocidad de funcionamiento del sistema mediante nuevos dispositivos y algoritmos de trabajo.

## ÍNDICE

<b>1. Estado de arte</b> .....	11
1.1 Tecnologías para realizar escaneo por láser.....	12
1.2 Principio de triangulación.....	16
1.3 Transmisiones mecánicas en la actualidad.....	16
1.4 Preámbulo de sistemas inteligentes aplicados a sistemas mecánicos....	27
1.5 Aplicación aeroespacial y sistemas de visión.....	30
<b>2. Funcionamiento del SVT y Formulación del problema</b> .....	36
2.1. Descripción del sistema actual.....	36
2.2. Componentes mecánicos.....	36
2.3. Descripción del flujo del proceso en el SVT de los ejes X, Y.....	39
2.4. Formulación el problema e hipótesis general.....	42
2.5. Propuesta del problema.....	42
<b>3. Diseño del experimento con simulación de escenarios posibles que se     presentarán ante el SVT</b> .....	46
3.1. Características a analizar.....	46
3.2. Parámetros de los experimentos.....	46
3.3. Ejecuciones de cada experimento.....	47
3.4. Tipo de análisis.....	47
3.5. Objetivos de los experimentos.....	47

<b>4. Análisis virtual de los parámetros para optimizar el tiempo de barrido</b> .....	49
4.1 Parámetros de simulación del primer experimento.....	51
4.2 Parámetros de simulación del segundo experimento.....	54
4.3 Búsqueda de la propuesta de los ángulos óptimos.....	59
<b>5. Propuestas y comprobación de procedimientos para búsqueda de los ángulos óptimos</b> .....	61
5.1. Comprobación del procedimiento con análisis gráfico de máximos y mínimos.....	61
5.2. Comprobación del procedimiento con Programación Lineal.....	64
5.3. Comprobación del procedimiento con Regresión Curvilínea.....	66
5.4. Comprobación del procedimiento con el Método de medias y la relación Puntos detectados vs. Tiempo .....	69
5.5. Comprobación del procedimiento con la interpolación de "Z".....	74
5.6. Comprobación del procedimiento con el Método de Redes Neuronales.....	76
5.6.1. Método de Levenberg-Marquardt.....	76
5.6.2. Aplicación del Algoritmo de Levenberg-Marquardt (ALM) a resultados de la simulación.....	80

5.7. Análisis de resultados de los procedimientos aplicados.....	81
<b>6. Propuesta de la Transmisión-Micro-Electromecánica.....</b>	<b>86</b>
6.1. Transmisión de doble embrague.....	86
6.2. Transmisión continuamente variable.....	88
6.3. Análisis comparativo de TDDE y TCV.....	91
6.4. Modelo dinámico y cinemático del diseño de la TME.....	93
6.5. Análisis de la TME por medio de la ecuación de la energía.....	96
6.6. Propuesta del control de la TME.....	97
<b>7. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>100</b>
<b>Aportaciones realizadas directamente a nuestra disciplina.....</b>	<b>103</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>106</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>116</b>
Programas y tablas con resultados de simulación.....	116
Publicaciones.....	128
Artículo publicado en revista arbitrada de circulación internacional.....	129

# Capítulo I

## Estado del arte

Actualmente existen varios tipos de adquisición de datos espaciales en 3D, ya que es aplicable a diferentes actividades tales como: inspección de terreno después de un desastre natural, visión robótica, biometría, supervisión de las estructuras en completa oscuridad (por ejemplo: tuberías, minas, etc.), inspección de deterioro en estructuras de cualquier tipo (a causa del medio ambiente o desastres naturales: terremotos, sismos, etc.). El escaneo óptico, especialmente el escaneo basado en láser, es un método muy atractivo para la aplicación en estas necesidades propuestas, debido a las ventajas sobre otras soluciones reconocidas, como lo es el escáner de ángulo fijo, que podemos corroborar en [1], soluciones comerciales como podemos ver en [2]. Ni la literatura técnica ni soluciones comerciales ofrecen evidencias científicas y técnicas sobre las actuales aplicaciones, fiabilidad y campos aplicativos de los enfoques de seguimiento óptico. Por ejemplo, las aplicaciones industriales pueden implicar la reconstrucción de formas complejas mediante la alineación de varias vistas 3D capturadas sobre la base de exploración que debe ser resuelto durante el proceso de medición [3]. En estos casos, la robustez y la flexibilidad son los atributos fundamentales de una metodología de múltiples vistas, pero por ejemplo en la navegación del robot o cualquier otra aplicación dinámica no hay manera de usarse.

## 1.1 Tecnologías para realizar escaneo por láser

Como podemos ver en [4] se demostró dos dimensiones de escaneo láser xy, el uso de una computadora controlada, y la rotación de un cubo reflectante, dicha aplicación particular era la digitalización de láminas transparentes para lograr resoluciones de miliradianes. Este concepto puede ser fácilmente adaptado a otras aplicaciones de visión industrial, tales como productos de análisis en una cadena de montaje o en detección de dos dimensiones de código de barras. El método de cubo reflectante se describe en [4] es menos costoso, más simple y más duradero que otras técnicas tales como el uso de espejos planos montados en rotores de galvanómetros, como se muestra en [4]. Explicado el método de exploración óptica sencilla (basado en la misma idea que en [4]), es capaz de dar todavía un ángulo de vista más respecto a las técnicas conocidas, excepto la visión omnidireccional [5], esta visión da una curva que distorsiona mucho la imagen y que necesita un procesamiento posterior consumiendo mucho tiempo para la obtención de coordenadas. La aplicación en correspondencia de profundidades generando un mapa por el método de análisis de plano epipolar [6, 7] se analizó en [8] para la visión omnidireccional [9].

También encontramos la tendencia en el uso de sensores ópticos teniendo como una de las ventajas más atractivas el crecimiento en la última década de la fiabilidad en los sensores ópticos y la estabilidad de los datos. Hoy en día, ha habido una tendencia clara para los sensores sin contacto basado en

tecnologías ópticas [10]. Los sensores sin contacto pueden adquirir rápidamente un gran número de puntos (alrededor de 10.000 puntos por segundo). Sin embargo, los sensores de láser actualmente en el mercado no tienen la precisión de los sensores de contacto dinámicos clásicos. En general, la exactitud proporcionada por el fabricante de estos dispositivos presenta un factor de 10 en comparación a los sensores de contacto. Por ejemplo, con el sensor de METRIS CL50 que se usa en [10], la incertidumbre ampliada de medición de una esfera con 15 mm de diámetro es del orden de  $50\mu\text{m} \pm 3s$ . Esta precisión depende de diferentes parámetros tales como las propiedades de los materiales, textura de la superficie, el color del producto, entre otras. Por lo tanto, con el fin de usar esta técnica en el contexto, es necesario tener un buen control de sus propiedades metrológicas. En los últimos años diversos métodos ópticos [11] se han aplicado en el seguimiento de sistemas en general. A pesar de que los sistemas de seguimiento ópticos han sido usados en varios contextos, una aplicación alineada en la detección de puntos en 3D, generada por las técnicas expuestas, ha sido mal evidenciada en la literatura técnica. Por otra parte, algunas de las soluciones comerciales han sido propuestas (Naviscan3D, Leica T -Scan, MetraSCAN [11], y VitusSmart Escaneo Láser 3D [2]). Ni la literatura técnica ni comercial ofrece soluciones totalmente evidencias, científicas y técnicas sobre actuaciones, fiabilidad en campos aplicados en el seguimiento óptico. Por ejemplo, las aplicaciones industriales pueden aplicar en la reconstrucción de formas complejas mediante la alineación de varias vistas 3D capturadas sobre la base de una estrategia de exploración que deben resolverse

durante el proceso de medición [3]. En estos casos, la robustez y la flexibilidad son los atributos fundamentales de una multi-vista metodología, pero por ejemplo en la navegación de robots o cualquier otra dinámica aplicación no hay manera para su uso práctico. En la referencia [14] el barrido de dos dimensiones XY el láser uso una computadora controlando y girando un cubo reflectante. Esta aplicación en particular fue la digitalización de láminas transparentes y que lograron mili-radianes de resoluciones. Este concepto se puede adaptar fácilmente a otras aplicaciones industriales de visión, tales como productos de escaneo en una cadena de montaje o en extensiones de dos dimensiones de códigos de barras. Debido a la misma razón ahora no vamos a explicar la falta de rotores galvanómetro, pero avanzaremos en el método de exploración óptica sencilla y duradera (más o menos, basado en el misma idea que en [14]), que es capaz de dar aún más abierto el ángulo de visión que los de cualquier otra técnica conocida, salvo la omnidireccional visión (lente ojo de pez) [15]. Sin embargo, la lente de ojo de pez da mucha curvas e imagen distorsionada, que necesita un tiempo de post -procesamiento. La aplicación de un método de análisis en un plano epipolar eficiente lo podemos ver en [6, 7] se analizó en [8] para la visión estéreo omnidireccional [9]. Para la aplicación robótica en un entorno donde existen muchos obstáculos [20], es necesario evitar los obstáculos y detectar el mejor camino con el fin de seleccionar una vía válida para recorrer en el menor tiempo posible. Evitar los obstáculos según su forma, va a exigir una enfrente del sistema, por lo que este método va a exigir un software de alto rendimiento. El escáner de láser desarrollado en [20], no

proporciona información en 3D de los obstáculos detectados por la ausencia de suficiente potencia de cálculo para la forma de la reconstrucción 3D. Una buena revisión de Técnicas de adquisición de modelos en 3D se pueden encontrar en [21, 22]. Como ya podemos ver los sensores sin contacto los cuales adquieren un número aceptable de puntos al escanear superficies u obstáculos, basados en tecnologías óptimas tal es el caso de [10], analizando estas tecnologías láser no alcanzan la precisión de los sensores de contacto dinámico clásicos, aunado a lo anteriormente descrito existen sistemas de detección de mosaicos o escenarios para la adquisición de imágenes en áreas de grandes dimensiones, usando métodos de geometría tal y como nos muestra [24]. Otro tipo de tecnología que podemos mencionar es el de resolución al problema de SLAM por sus siglas en inglés (Simultaneous Localization and Mapping); esta tecnología hace uso de un solo sensor; este sistema puede predecir la localización del robot, como podremos ver en [25]. Dentro de la gama de tecnologías encontramos el control de movimiento de un robot basado en el flujo óptico del mismo, como se menciona en [26]. Todas estas tecnologías han sido diseñadas para la navegación de robots dentro de nuestro planeta.

## 1.2 Principio de triangulación

Actualmente existen varios tipos de navegación robótica basados en láser de 3D para diferentes aplicaciones [20, 11, 29], donde podemos ver que el principio de triangulación es el que rige a estos sistemas de navegación. En el laboratorio de optoelectrónica de la UABC se ha desarrollado una metodología denominada Sistema de Visión Técnica (SVT) aplicando el uso del principio de triangulación dinámica [30], en base a las investigaciones que nos han llevado a estos descubrimientos [31-36], el SVT nos permite una aproximación muy apegada a la realidad en las mediciones de coordenadas en el espacio 3D, con gran precisión en el campo de visión, también tiene la capacidad de detectar obstáculos en el interior de cualquier escenario; durante la navegación de un robot autónomo. Puede realizar un mapa digital de los obstáculos dentro del campo de visión en alta resolución optimizado el tiempo.

El principio básico de la triangulación dinámica y el SVT conjuntamente nos da una exploración en 3D el cual ya sido publicado [31-36], y que es el objetivo de desarrollar un mejoramiento electromecánico al SVT es la complicación en la presente tesis.

## 1.3 Las transmisiones mecánicas en la actualidad

Las pasadas dos décadas nos muestran el arduo esfuerzo en la investigación del desarrollo de transmisiones en vehículos favoreciendo la reducción en el

consumo de energía, este esfuerzo ha sido una consecuencia directa de la creciente preocupación ambiental la cual nos lleva a poner atención en las emisiones de escape para reducidas y una mayor eficiencia de los vehículos en los fabricantes de vehículos [12]. La transmisión continuamente variable (TCV) ofrece de relaciones de transmisión entre los límites deseados, lo que consecuentemente mejora la economía de combustible y el rendimiento dinámico de un vehículo por una mejor adecuación de las condiciones de funcionamiento del motor a los escenarios de conducción variables. A pesar de una formación profesional permanente desempeña un papel crucial en el plan para mejorar la economía de combustible del vehículo. El papel actual revisa la investigación del estado de la técnica en el modelado y control de las transmisiones continuamente variables. Los conceptos básicos, modelos matemáticos y esquemas de cálculo se discuten extensivamente en [12], también se discuten los desafíos y temas críticos para la investigación futura en el modelado y control de este tipo de la TCV, con la creciente preocupación socioeconómica y ambiental, el consumo de energía del automóvil se ha convertido en un elemento clave en el actual debate sobre el calentamiento global, en los últimos años, los vehículos se han enfrentado cada vez más a los reglamentos mundiales de control en el rendimiento, en emisiones y normas de economía de combustible. Por otro lado, las oportunidades de investigación significativa radican en el perfeccionamiento de las tecnologías de motor y de transmisión de corriente para cumplir con la primera ola de regulaciones de emisiones, mientras que el desarrollo de tecnologías de combustibles

alternativos continúa. Actualmente, las Transmisiones Continuasmente Variables (TCV) han despertado un gran interés en el sector automovilístico debido a la posibilidad de reducción de las emisiones y un mejor rendimiento. Las teorías subyacentes, los modelos matemáticos, y las direcciones futuras de investigación difíciles se discuten en [12].

La configuración básica de un TCV comprende dos poleas de diámetro variable se mantuvieron a una distancia fija aparte y conectados por un dispositivo de transmisión de potencia como correa o cadena. Una de las poleas en cada polea es móvil. La correa / cadena puede sufrir movimientos radial y tangencial, dependiendo de las condiciones de carga de torsión y las fuerzas axiales sobre las poleas. En consecuencia, esto provoca variaciones continuas en la relación de transmisión [12].

Otro de los usos de las transmisiones es a nivel industrial con esta propuesta actual de transmisión de doble embrague electro-riológico (ER) [13], esto es debido a la rápida velocidad de respuesta de salida de los actuadores ER, la utilidad de esta respuesta dinámica, en [12], se propone un mecanismo de doble embrague ER, el cual se compone de dos embragues idénticos que giran en direcciones opuestas, donde la dinámica de salida del mecanismo es bidireccional, el objetivo principal de ER es modelar las respuestas de movimiento alternativo del mecanismo de embrague y luego realizar la validación del modelo con los resultados de las pruebas de medición [13],

también podemos ver en [16] que se presenta otro ER pero de un solo embrague con aplicación para el control de posición del mecanismo propuesto. Como podemos ver en [17] que es otro uso de las transmisiones de división de potencia, el mecanismo propuesto es de un grupo de múltiples etapas donde se examina la transmisión de velocidad variable, estas transmisiones permiten un cambio de etapa de velocidad sin que se produzca una caída en la potencia transmitida y sin un cambio en la configuración de la unidad de relación variable, las restricciones cinemáticas impuestas sobre el mecanismo por el acoplamiento síncrono de las etapas de velocidad se describen para todas las secuencias posibles en las etapas de velocidad [17].

Como podemos ver en [18] tenemos otro uso de transmisiones mencionando el comportamiento dinámico de un motor de pistones axiales de una servo válvula controlada usando en un sistema de transmisión, en [19] encontramos la propuesta de una transmisión de doble embrague en la cual se mejora la eficiencia en cuanto al uso de energía incluyen modelo de cumplimiento de cada uno de los ejes de transferencia con los métodos convenientes para expresar el par del embrague sin tener que utilizar modelos complejos de fricción del embrague , y el modelo desarrollado se compara con los datos del experimento reales para validar su exactitud [19].

En [23] encontramos una transmisión mejorada particularmente adaptada para su uso con un motor de velocidad constante, la transmisión tiene un eje de

entrada para recibir potencia desde el motor, un generador está asociado con la transmisión donde el generador es accionado por el motor que es alimentado por el generador. La transmisión también emplea un conjunto de engranajes planetarios compuesto que tiene dos sub conjuntos de engranes planetarios, cada engranaje planetario tiene un elemento de engranaje interno y un miembro de engranaje exterior, esta transmisión se refiere en general a las transmisiones de vehículos, a transmisiones de división de potencia vehicular que reciben selectivamente energía directamente de un motor y continuamente a partir de un motor eléctrico, en otras palabras a las transmisiones de vehículos que incorporan un conjunto de engranajes planetarios compuesto en el que un conjunto de elementos de engranaje unidos recibe selectivamente potencia de un motor , y otro conjunto de miembros de engranajes unidos en el engranaje planetario compuesto establecer continuamente recibe energía desde el motor eléctrico [23].

A continuación podremos encontrar sistemas de transmisión mecánica automática, [27], transmisión automática continuamente variable y método para accionar mismo [28], la transmisión mecánica y el método de control [37], transmisión mecánica automática tipo divisor [38], transmisión mecánica semiautomática con cambio automático forzado [39].

En [27] encontramos los sistemas automáticos de transmisión mecánica en particular los sistemas de transmisión mecánica automática que comprenden un

compuesto de cambio de transmisión por engranajes que comprende una sección principal de la transmisión de múltiples velocidades conectada en serie con el divisor de la sección auxiliar de la transmisión de múltiples velocidades en el que la transmisión principal utiliza, asambles de embrague de mordazas elásticamente desplazado ni bloqueados ni sincronizadas para acoplarse selectivamente una relación de la sección principal seleccionada y en el que la sección auxiliar utiliza bloqueo elásticamente para desplazar conjuntos de embrague de mordazas aplicado selectivamente una relación de la sección auxiliar seleccionada y un sistema de control de los mismos. Preferiblemente, los bloqueadores de los elementos de embrague y asociados en la sección de transmisión auxiliar tienen rampas complementarias sobre los elementos de bloqueo de los mismos configurado para evitar la participación no sincronizada de los miembros del embrague de mordazas asociados cuando la sección principal se activa pero que tenderá a actuar como posicionadores para colocar el bloqueador y elemento de embrague en una condición de no bloqueo cuando la sección principal está en una condición neutral o en desembrague, los inconvenientes de la técnica anterior se han superado o minimizado mediante la provisión de un sistema automático de transmisión mecánica [27] que comprende un cambio de malla constante de transmisión de engranajes del tipo de divisor compuesto que comprende una sección principal de transmisión y una sección de transmisión auxiliar conectado en divisor serie a la misma en el que la sección de transmisión auxiliar utiliza conjuntos de embrague de mordazas bloqueados elásticamente desplazables, la sección de transmisión principal

utiliza preferiblemente conjuntos no bloqueados no sincronizadas elásticos del embrague de mordazas, y una unidad de procesamiento central para recibir ciertos insumos y para el mando de los cambios de marcha en la secuencia que comprenden cambiar la transmisión principal sección a neutro, a continuación, al mando de un cambio en la sección auxiliar de la transmisión para acoplarse a la relación de engranaje de transmisión auxiliar deseado y, posteriormente, al mando de un cambio en la sección principal de transmisión para acoplarse a la relación de transmisión principal deseado. La unidad central de procesamiento ordena cambios de transmisión en una secuencia que proporcionará cambios de transmisión rápida y segura y que utiliza las características de una transmisión bloqueada o semi- bloqueado para evitar los medios de procedimientos sincronizados necesarios en sistemas de transmisión mecánica de cambio de engranajes automáticos anteriores [27].

En [28] refiere a una transmisión mecánica positiva continuamente variable automática, por lo que es posible evitar el uso de un convertidor de par hidrodinámico y una caja de cambios conmutable. Una transmisión de este tipo puede conducir el eje de salida a una velocidad continuamente variable entre cero y una velocidad igual o mayor que la del eje de entrada, se aplica a la conducción de vehículos o máquinas de velocidad variable, en [28] este problema se supera mediante una transmisión del tipo mencionado en el preámbulo, caracterizado.

Debido a este principio, se obtiene tanto una variación continua de la relación de transmisión, y por lo tanto la velocidad del eje de salida, en todo el rango de cero a la velocidad máxima, y al mismo tiempo el par de apriete se multiplica en el eje de salida debido a la presión de apoyo en el caso como un convertidor de par mullido hace, pero sin los inconvenientes de un dispositivo de este tipo [28].

Debido a la relación cinemática totalmente positiva, que puede ser proporcionada por ruedas dentadas que están siempre en el ataque, la transmisión según la invención constituye un convertidor de par totalmente mecánico, donde las únicas pérdidas de energía son las pérdidas habituales de engranajes y en los cojinetes, con el resultado de que la eficiencia está muy cerca de 1 en todas las velocidades [28].

En [60] nos describe la transmisión mecánica y el método de control, de acuerdo con lo presentado en [37], los inconvenientes de la técnica anterior se han superado en la medida en que, se proporciona un mecanismo de control y un método de control para una transmisión de cambios de engranaje mecánica, preferiblemente una transmisión no sincronizada de accionamiento manual que reduce sustancialmente el nivel de habilidad requerido para cambiar las transmisiones mecánicas no sincronizadas y se proporciona el compromiso más suave de los embragues de mandíbulas que pueden ser contratados en condiciones algo no síncronos. Entendiendo que el término "transmisión" como

se usa aquí se refiere tanto a las transmisiones simples y secciones de transmisión, tales como la sección principal de transmisión de transmisiones compuestas [37], lo anterior se consigue proporcionando una transmisión de cambio de engranaje mecánico que tiene un componente de entrada tal como un eje de entrada y el engranaje de la transmisión constantemente impulsado de ese modo, un componente de conexión tales como el eje principal de una transmisión compuesta, un componente de salida, como el eje de salida para la conducción las ruedas motrices del vehículo, una pluralidad de elementos del embrague de mordazas para acoplar selectivamente el componente de accionamiento que conecta al componente de entrada a una relación de transmisión seleccionada y un miembro de acoplamiento para acoplar y desacoplar selectivamente el componente de salida del componente de conexión. Medios de control se proporcionan para colocar el miembro de acoplamiento en la condición desactiva siempre que la transmisión principal se cambia a la condición neutra. Preferiblemente, los medios de control detectará automáticamente el desplazamiento de la transmisión a neutro para desenganchar automáticamente el elemento de acoplamiento. Por desacoplar el componente de conexión de la componente de salida con la transmisión en punto muerto, el componente de conexión se desacopla de tanto el componente de entrada y el componente de salida y por lo tanto se encuentra en una inercia rotacional relativamente baja que permite a los miembros del embrague de mordazas de transmisión pueda participar en algo asíncrono condiciones sin dureza objetable ni daños en los engranes [37].

En consecuencia [37] proporcionar un método mecanismo de control de la transmisión y el control, preferiblemente para una transmisión mecánica de accionamiento manual no sincronizado, lo que simplificará el cambio de transmisiones mecánicas mediante la reducción de la necesidad de una sincronización precisa de los embragues de mordazas de acoplamiento [37].

Método de cambio ascendente de una transmisión mecánica automática tipo divisor compuesto semi-bloqueado

En [38] se proporciona un método de control mejorado y sistema de control para el cambio ascendente de un sistema de transmisión automática La presente invención se refiere a un método de divisor compuesto de sistema de transmisión automática o semiautomática. De acuerdo con la presente invención, los inconvenientes de la técnica anterior se han minimizado o superado mediante la provisión de un método de cambio ascendente para un semibloqueo de transmisión automática, compuesto de tipo divisor que proporciona un cambio positivo de la rotación relativa de los elementos de embrague de la sección auxiliar preseleccionados. En consecuencia, los retrasos y los fallos en la sección de mecanismos de desbloqueo auxiliar debido a excesivas situaciones de fricción y arrastre se eliminan permitiendo un desplazamiento más rápido más positivo en la sección auxiliar de bloqueo [38].

Lo anterior se lleva a cabo mediante el desacoplamiento de la sección principal durante cada cambio ascendente, permitiendo que el eje de entrada para desacelerar y luego comenzando sección reacoplamiento principal a la vez que hará que el eje de entrada para activar y gire el engranaje de transmisión a una velocidad muy cerca a la velocidad síncrona para el eje de entrada en la proporción de recién contratado pero suficiente para causar una inversión de la rotación relativa de la sección auxiliar preseleccionado bloqueado elementos de embrague de mordaza para asegurar un cruce síncrono de los mismos para el acoplamiento seguro del mismo si la relación de la sección auxiliar seleccionado no está previamente enganchado bajo el efecto del sensor de desbloqueo de rampas [38].

En consecuencia [38] pretende proporcionar un nuevo y mejorado sistema de control y método de control para un tipo de cambio ascendente divisor de transmisión automática.

En [39] se proporciona un sistema y método de control para un sistema de transmisión mecánica automática operable en un modo de espera de la operación. De acuerdo con [39], los inconvenientes de la técnica anterior se superan o reducen al mínimo por la provisión de un sistema de control y método para transmisiones que operan en un modo de funcionamiento que requieren la selección manual de una implementación de cambio automático en la que, bajo ciertas condiciones de funcionamiento predeterminadas, cambios de la relación actualmente acoplada se inician y ejecutan automáticamente.

Se ha encontrado, en situaciones en las que el vehículo es operado en el modo de "espera" y la velocidad del motor cae fuera de un rango aceptable y o cuando se recupera a mayor velocidad seleccionada en un modo de control de crucero, se evita la operación del vehículo indeseable forzando iniciación de cambio automático y la ejecución.

En consecuencia en [39], proporciona un nuevo y mejorado método de control para sistemas de transmisión mecánica por lo menos parcialmente automatizados que operan en el modo de "espera", que, al detectar condiciones predeterminadas, obligará a la iniciación de cambio automático y la aplicación.

Este y otros objetos tienen como ventajas el sistema descrito en los cuales se harán evidentes a partir de una lectura de [39].

#### **1.4 Preámbulo de sistemas inteligentes aplicados a sistemas mecánicos**

Durante los últimos cincuenta años se han desarrollado gran número de algoritmos computacionales motivados por los sistemas o procesos biológicos, como los más conocidos son las redes neuronales artificiales. Estos algoritmos son comúnmente agrupados bajo los términos de computación suave o natural. Una propiedad compartida por la mayoría de los algoritmos de computación naturales es que permiten aprender y explorar los datos. Esta propiedad ha demostrado ser de gran valor en la solución de muchos problemas diversos de

la ciencia y la ingeniería. En [23] nos presenta una visión general de la teoría básica de algunos de los métodos más comunes de computación natural ya que se aplican en el contexto de la investigación de sistemas mecánicos. La aplicación de algunos de los principales algoritmos se ilustra el uso de estudios de casos, también de alguna indicación de cuál de los algoritmos emergentes ahora de la comunidad de aprendizaje de la máquina es probable que sean importantes para la investigación de sistemas mecánicos en el futuro.

Una de las novedades para el monitoreo de la condición de cajas de cambios en las condiciones de funcionamiento no estacionarias [40], un aspecto fundamental cuando se trata de los rodamientos, que a menudo representan un componente clave en los mecanismos giratorios, consiste en la correcta identificación de un mal funcionamiento de un rodamiento con un nivel razonable de confianza. Este es uno de los requisitos principales en monitoreo de un sistema de vigilancia en la salud, en [40] se presenta una técnica para el diagnóstico de fallas teniendo base en el Análisis de Componentes Principales (ACP), este método supera el problema de la adquisición de datos bajo diferentes condiciones ambientales, (casi no sesga los datos) y permite un reconocimiento preciso de los daños, también asegurando un bajo número de falsas alarmas (FA). Además, se propone un nuevo criterio con el fin de aislar el área en la que el rodamiento está defectuoso. Otra característica útil de este método se refiere a la capacidad de observar una tendencia creciente en la evolución de la degradación que lleva.

La técnica descrita se prueba en una plataforma industrial que consiste en una caja de cambios con aplicación aérea. Cojinetes sanos y dañados de diversas maneras, con un interior o rodadura dañada, se establecieron señales de vibración que se recogen y procesan en orden, para detectar correctamente una falla. Por último, los datos recogidos a partir de un banco de pruebas reunidas por el grupo de investigación Dinámica e Identificación (DIRG son sus siglas en inglés) se utilizan para demostrar que el método propuesto es capaz de detectar correctamente y clasificar los diferentes niveles del mismo tipo de fallo y también para localizarlos.

Encontramos en [41] un problema de la detección de impacto en paneles compuestos usando redes neuronales artificiales. Los datos fueron tomados de un experimento en el que los datos de deformación de tiempo dependiente se registraron en una red de sensores piezoeléctricos montados en la superficie cuando plana que se ve afectada del plato. Las redes neuronales fueron entrenadas para localizar y cuantificar el impacto de eventos cuando se presenta con características extraídas de los datos medidos. Un problema importante para los sistemas de detección como este es que la colocación óptima del sensor; esto se soluciona aquí por medio de un algoritmo genético. El estudio muestra que un número relativamente pequeño de sensores se puede utilizar para detectar de forma fiable los impactos sobre una placa de material compuesto. La estructura bajo examinación consistió en una placa rectangular

de 530mm x 300mm compuesta de cuatro canales de aluminio. Las alas superiores de los canales se unieron a la placa por una línea de remaches, la parte inferior de bridas se fijarán de forma rígida con tornillos a una mesa de medición. Esta estructura de caja se pretendía simular el panel de revestimiento de una aeronave [42].

## 1.5 Aplicación aeroespacial y sistemas de visión

A continuación presentaremos un histograma aeroespacial que nos podrá mostrar la evolución en aeroespacial [43, 44, 45 46]:

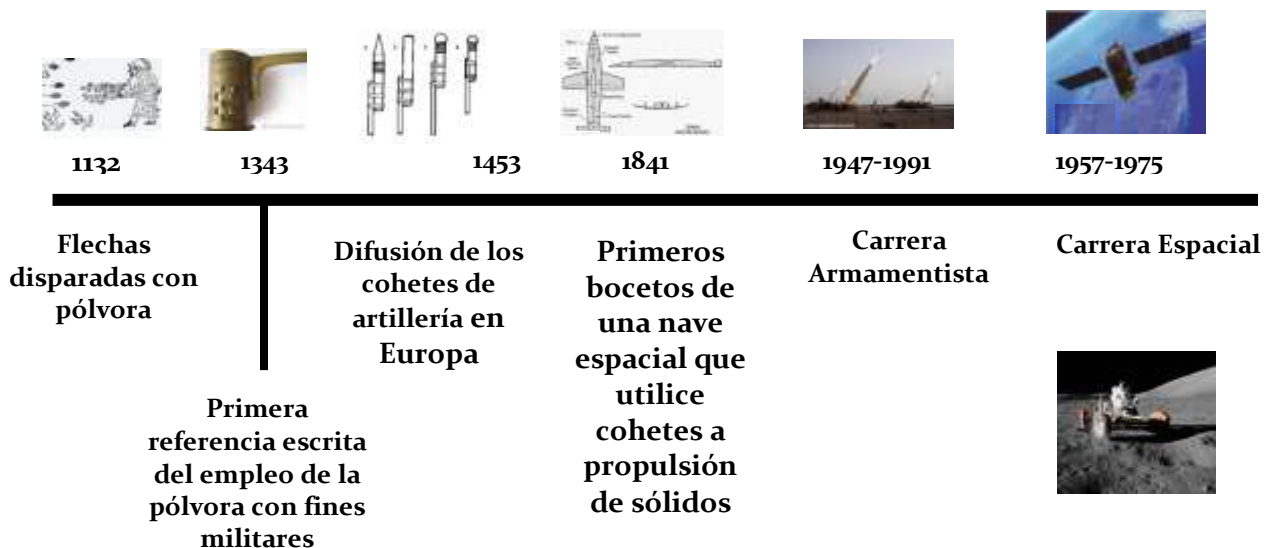


Figura 1.1 Histograma Aeroespacial [43, 44, 45 46]

En nuestros días la innovación tecnológica es parte de nuestro desarrollo diario, alguna de las herramientas más importantes es la simulación, dentro del capítulo

cuatro de esta tesis demostraremos la importancia de esta herramienta, la simulación nos ayuda a contribuir en la transformación de la vida humana, ya contribuir a en la disminución de costos de fabricación de nuevos prototipos dentro de la industria aeroespacial, una de las aportaciones de esta tesis es pretender contribuir con investigación aplicada al sector aeroespacial de nuestro país.



Figura 1.2 Software y hardware de simulación [53]

Actualmente nuestra población en aumento nos ha orillado a hacer uso del espacio en bienestar de la población el desarrollo económico y las inversiones extranjeras directas [53], nos ha colocado como país inversiones extranjeras directas han favorecido a México como podemos ver en [43, 52, 53] que se encuentra en un momento muy importante para el desarrollo de actividades espaciales, un despunte para la innovación en el sector aeroespacial con el empuje de nuestra Agencia Espacial Mexicana (AEXA), para la innovación

En el sector aeroespacial [47-53], atendiendo las necesidades sociales de nuestro país, La navegación robótica en el sector aeroespacial es un tema

importante de investigación alrededor del mundo, proponiendo los siguientes puntos que son de interés para aplicación en esta tesis:

- Proponer formas más seguras de operación.
- Mejorar sistemas de visión por medio de navegación.
- Incrementar la eficiencia de visión en robots aeroespaciales.
- Observar y explorar otros planetas para expandir el conocimiento científico.
- Transporte desde el medio ambiente espacial.
- El sector aeroespacial es sin duda de los más interesantes.

La innovación tecnológica a través de la simulación impacta en el desarrollo económico transformando las posibilidades de la vida humana, El sector aeroespacial ha sido un sector precursor, este sector ha detonado el posicionamiento de México en la industria espacial, lo cual lleva a que nuestro país incursione a usa el espacio para el bienestar de la población. Motivando a la comunidad internacional del sector espacial a la confianza en nuestro país para lograr que la ciencia y la tecnología contribuyan al desarrollo económico y social.

Un tema fuerte dentro del desarrollo de esta tesis es la visión y la navegación ya que son elementos esenciales de los robots móviles, en términos más generales, la visión y navegación nos ayudan a percibir el mundo y encontrar unos manera de navegar alrededor de el. En [45] encontramos un robot que

funciona como un recolector de datos de pruebas para la visión y la investigación en navegación. En [45] describe los experimentos utilizando su prototipo para entender la visión, la navegación en los sistemas móviles inteligentes.

Los robots móviles son donde la inteligencia artificial se encuentra con el mundo físico real, muchos componentes individuales pueden ser desarrollados y probados en el laboratorio: la planificación de la comprensión de imagen influye en la teoría de control, las redes neuronales y la navegación autónoma ha sido un problema difícil para las técnicas de visión y robótica tradicionales, principalmente por el ruido y la viabilidad asociado con ecenas mundo real sistemas de navegación autónomos basados en técnicas tradicionales de procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones a menudo tienen un desempeño bajo en ciertas condiciones, deriva del hecho de que el procesamiento realizado por estos restos fijos a través de diversas situaciones de conducción la redes neuronales artificiales han mostrado un rendimiento prometedor y flexibilidad en otros dominios que se caracterizan por un alto grado de ruido y variabilidad los ejemplos incluyen el reconocimiento de caracteres escritos a mano [28, 41] y el reconocimiento de voz [12] autónoma del vehículo en un terreno la red neuronal está diseñada para llevar la flexibilidad del técnicas conexionista a la tarea de navegación autónoma específicamente ALVINN es una red neuronal artificial diseñada para conducir el NavLab, el vehículo de prueba de navegación autónoma Carnegie Mellon [46]. La evolución de la tecnología en las últimas décadas ha estado al frente hacia sensores visuales

activos: la cámara ha evolucionado hacia una -end frontal visual en el que los puntos únicos o incluso varios de vista se controlan en línea este nuevo equipo ha fomentado el desarrollo de nuevas áreas de investigación tales como la visión exploratoria, un término introducido en el que el medio ambiente se analiza a través de una cámara controlable las investigaciones análogas de las enfocadas a los movimientos del ojo/cabeza/cuerpo en la visión humana [46]

En [45, 46] podemos encontrar diferentes partes de control se encuentran los casos en los que sólo el sistema de control de los actos de la orientetion de la cámara. La investigación en el campo de visión bilogica y humana, en particular, comenzó hace varias décadas. La grabadora de trayectorias de exploración por yarbus están ahora bien conocida, las secuencias de los puntos de fijación del ojo del observador (cuando se mira en las pinturas y otros artefactos o en escenas particulares de la vida ordinaria) en primer lugar se analiza el otro de los puntos de fijación, pero las características más destacadas del campo visual son inspeccionados siguiendo un camino con áreas densas alrededor de los puntos críticos. El tiempo medio entre dos puntos de fijación es de alrededor de 250 ms.

En el segundo nivel de la jerarquía, que se caracteriza por las exploraciones más sutiles y detalladas, es el escrutinio de elementos llevados a cabo por la abertura de movimiento rápido de un reflector de la atención (con pasos de duración 15-50 ms cada uno). En este caso no se requieren movimientos mecánicos, los ojos se dirigen a algún centroide de gravedad de los puntos de

interés, después de que un reflector escudriña cada punto de paso único que sea de interés.

En [45, 46] se tendrán en cuenta los procesos de atención del sistema visual humano, destacando algunas de las analogías y diferencias con respecto a los marcos introducidos por el científico informático en la visión artificial. En la siguiente sección de una revisión de la investigación psicológica en la atención de presencia, la carta incluye teorías de atención selectiva y espaciales. En la sección 1.4 se ocupa de las principales teorías y resultados de la investigación en sistemas inteligentes aplicados a sistemas mecánicos. Finalmente, una conjetura se introduce brevemente en relación con las características funcionales y organizacionales de supervisor de datos en alto nivel [46].

En el estudio de este capítulo encontramos información clave para poder tomar ideas y desarrollar el sistema que es objeto de esta tesis, al realizar el marco teórico plasmo la pauta que mostro la guía y trazo la ruta a seguir en el desarrollo del método y dispositivo tema de esta tesis.

# Capítulo II

## Funcionamiento del STV y Formulación del problema

### 2.1 Descripción del sistema actual

Las principales características del sistema de escaneo láser 3D propuesto en este trabajo en comparación con otros tipos de sistemas de sensores 3D para robots móviles son como siguen:

- En comparación con sensores de doble o triple visión, el escáner láser propuesto puede mantener más robusta la detección de 3D en virtud de las variaciones en la iluminación.
- En comparación con el tiempo máquina o en movimiento, el escáner propuesto tiene menos consumo de energía y es más barato.
- En comparación con el patrón de proyección en multi-líneas en un escáner estructurado, el escáner propuesto tiene una construcción más simple y una mecánica robusta.

### 2.2 Componentes mecánicos

El sistema mecánico actual del Posicionamiento del Láser (Emisor) según la figura 2.1, este cuenta con un engrane anti-retorno 48 pitch, ancho de cara de 0.104 pulg., 20° de ángulo de presión, 96 dientes, fabricado en acero inoxidable, PD 2.0000, 303 acero inoxidable, 2024-T4 aluminio, anodizado

antes de cortar; el tornillo sin fin tiene 48 pitch, 20° ángulo de engrane, de doble rosca, el material es de bronce ASTM B21, aleación 464, el engrane y el tornillo sin fin fueron fabricados por PIC DESIGN. En la Figura 2.1 podemos observar la vista superior del PL en el STV, el motor de 12 VCC bipolar, paso a paso con ángulo de paso de 1.8°, el par torsional de 2,100 g-cm, 200 pasos por revolución y es fabricado por JRP, [36 y54 ]. El diseño actual del sistema del PL del SVT se representa en la Figura 2.1.

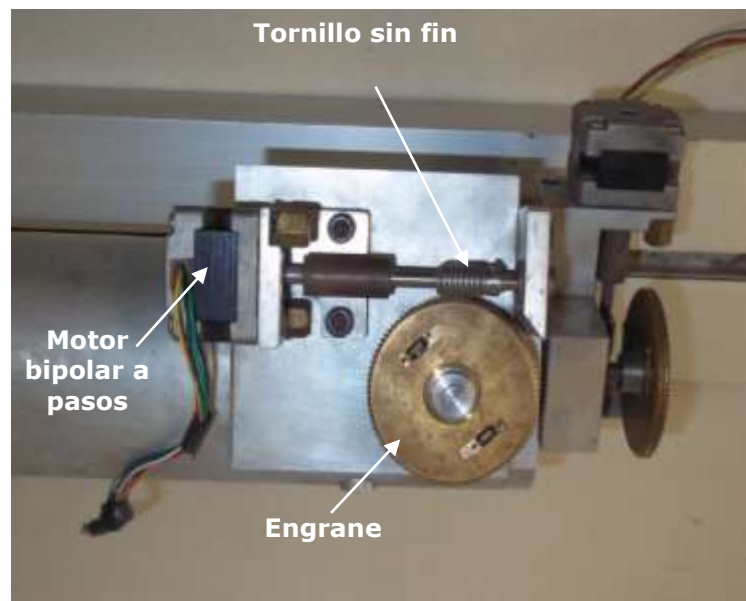


Figura 2.1 Prototipo [60]

El SVT funciona con principio de la teoría de triangulación dinámica para la obtención de coordenadas 3D en objetos u obstáculos para visión de robots móviles, como se muestra en la Figuras. 2.2a, 2.2b

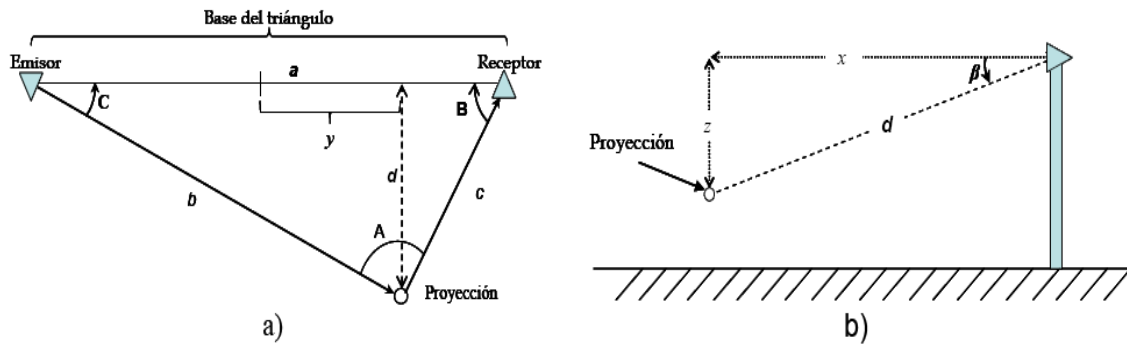


Figura 2.2 Variables del Sistema Técnico de Visión a) Vista frontal, b) Vista lateral

Un rayo láser es proyectado por un mecanismo de transmisión (que se llama Posicionamiento del Láser (PL)) el cual se refleja en la superficie del obstáculo hasta que el sensor giratorio detecta es haz de luz que es el que coincide con la Apertura de Escaneo (AE) [54]. El SVT actual tiene un funcionamiento de paso de exploración constante, que no es eficiente para la navegación del robot y el objetivo de una navegación confiable durante la exploración de escenarios desconocidos [35 y36].

El SVT tiene el PL y AE, que funciona con el principio de triangulación dinámica, el PL tiene la capacidad de girar y dirigir el haz de láser en  $180^\circ$ , teóricamente y cuenta con el AE [36]. Con este sistema es posible obtener cualquier punto al frente del robot móvil, como se ve en la Figura 2.3. En esta parte del sistema se explican los parámetros y funcionamiento. El PL y AE están comunicados por un eje hueco, el PL cuenta con un mecanismo para controlar el láser.

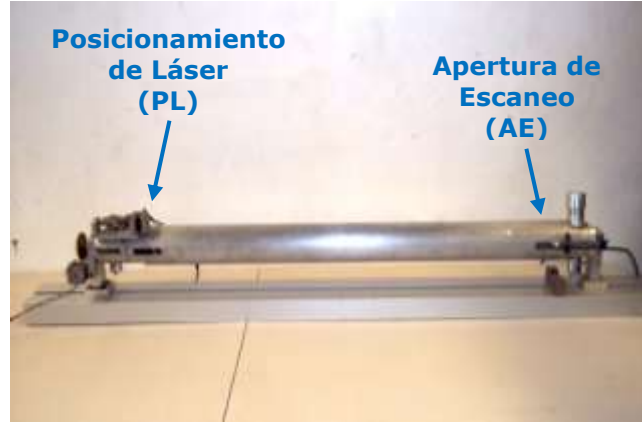


Figura 2.3 Ubicación del PL y AE en el prototipo [60]

Para calcular cualquier punto en 3D se usaron los teoremas de senos [55 y 56] podemos encontrar las ecuaciones que nos generan tales puntos en [31-36] que han sido publicadas en bastantes artículos científicos.

$$x_{ij} = a \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \cos \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]}, \quad (2.1)$$

$$y_{ij} = a \left( \frac{1}{2} - \frac{\sin B_{ij} \cdot \cos C_{ij}}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right) \quad \text{at } B_{ij} \leq 90^\circ, \quad (2.2)$$

$$y_{ij} = -a \left( \frac{1}{2} + \frac{\sin B_{ij} \cdot \cos C_{ij}}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right) \quad \text{at } B_{ij} \geq 90^\circ, \quad (2.3)$$

$$z_{ij} = a \cdot \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \sin \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \quad (2.4)$$

### 2.3 Descripción del flujo del proceso en el SVT de los ejes X, Y

Con base en nuestras investigaciones anteriores [31-34, 36, 56, 57], el STV nos permite una aproximación muy apegada a la realidad en las mediciones

de coordenadas en el espacio 3D, con gran precisión en el campo de visión, también tiene la capacidad de detectar obstáculos en el interior de cualquier escenario; durante la navegación del robot autónomo. Puede realizar un mapa digital de los obstáculos dentro del campo de visión de alta resolución, el STV actual tiene un funcionamiento de paso de exploración constante, que no es eficiente para la navegación del robot y el objetivo de una navegación confiable durante la exploración de escenarios desconocidos es la variable de barrido, en otras palabras una combinación del ángulo de apertura (se denomina ángulo de apertura de barrido a el espacio entre dos haz de luz del rayo láser) la combinación de estos ángulos de apertura son los que minimizarán el tiempo de exploración, garantizando la detección de obstáculos críticos dentro del campo de visión, es muy importante detectar cualquier obstáculo tan pronto como sea posible con alta resolución para los obstáculos más críticos que podrían poner en peligro la seguridad del robot. Se pretende que las simulaciones realizadas en este trabajo nos indiquen los ángulos de apertura de barrido óptimos, con base en estos resultados, podremos ofrecer la construcción tentativa de una micro-transmisión-electromecánica. Su aplicación puede optimizar la función del STV con un criterio de uso de tiempo mínimo en condiciones de mantener la resolución máxima en el borde más cercano de los objetos analizados. Para la mejor comprensión de la oportunidad de mejora que se presenta aquí, el principio básico de la triangulación dinámica y el STV conjuntamente nos da una exploración en 3D el cual ya sido publicado en [31-34, 36, 56, 57], y que es

el objetivo de un mayor desarrollo y complicación en el presente documento. El STV funciona con principio de la teoría de triangulación dinámica para la obtención de coordenadas 3D en objetos u obstáculos para visión de robots móviles, como se muestra en la Figura. 2.3 [29], un rayo láser es proyectado por un mecanismo de transmisión (que se llama Posicionamiento del Láser (PL)) el cual se refleja en la superficie del obstáculo hasta que el sensor giratorio detecta es haz de luz que es el que coincide con la Apertura de Escaneo (AE) [31]. La velocidad escaneo es lenta, como en nuestro país para lograr que la ciencia y la tecnología contribuyan al desarrollo económico y social.

En la figuras 2.4 y 2.5 podemos ver el motor a pasos que manda el flujo de energía para mover el tornillo sin fin en los ejes x y z respectivamente este por medio de la transmisión de movimiento hace que el engrane de retroceso se mueva realizándolo por medio de contacto directo con deslizamiento entre los dientes del tornillo y los del engrane, la eficiencia de trasmisión de potencia tiende ha ser baja debido a la alta resistencia a la fricción [59], esta transmisión, se da sin ruido si las ruedas están bien diseñadas

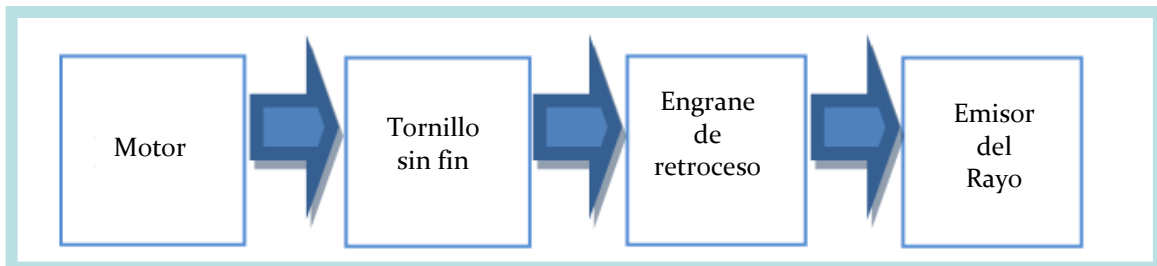


Figura 2.4 Flujo del proceso en el eje X

En la figura 2.5 podemos ver el flujo de energía en el eje "Z"

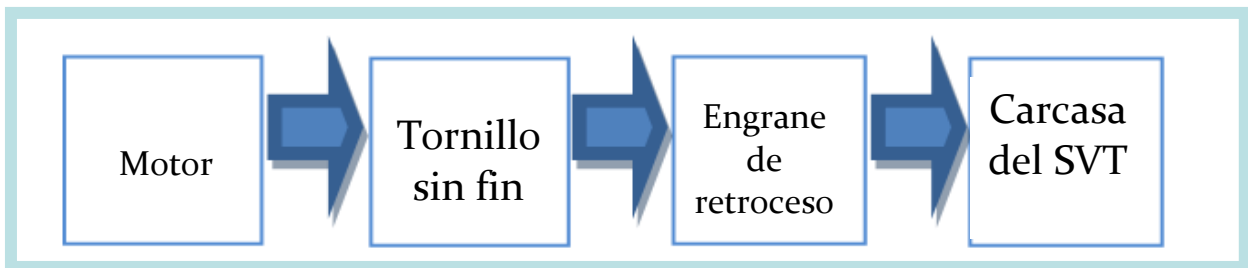


Figura 2.5 Flujo del proceso en el eje Z

## 2.4 Formulación del problema e hipótesis general

Creando un mapa digital con coordenadas en tercera dimensión, el sistema de barrido con láser es capaz de detectar cualquier obstáculo que se encuentre dentro de su campo de visión. Por lo cual se propone mejorar el sistema electromecánico en términos de velocidad de escaneo y resolución para ser implementado en un robot móvil, desarrollando así a partir de este método un sistema de navegación (para otro planeta por ejemplo) que le permitirá al robot desplazarse en ambientes desconocidos, variando la velocidad de escaneo, sin impactar con algún obstáculo logrando llegar a su objetivo por medio de una navegación inteligente.

## 2.5 Propuesta del problema

De acuerdo con nuestras investigaciones anteriores [54,12], el SVT nos presenta una idea de medición en coordenadas de 3D, con suficiente precisión en el campo de visión, sino que también tiene la capacidad de detectar

obstáculos dentro de cualquier escenario durante la navegación del robot - autónomo. Se puede hacer un mapa digital de los obstáculos dentro del campo de visión de alta resolución (la corriente de STV utiliza constante el escaneo de tono que no es óptima para la navegación eficiente del robot. El objetivo de una navegación fiable en la exploración de desconocido escenas es la variable de barrido (combinado) etapa de exploración, que minimizará el tiempo de exploración, con detección garantizada de crítico obstáculos en el campo de vista). Se debe detectar cualquier obstáculo tan pronto como sea posible, con alta resolución en los obstáculos más críticos (peligrosos para la seguridad de los robots). Se pretende que las simulaciones realizadas en este trabajo deben responder a esta pregunta con los resultados de la simulación. Sobre la base de estos resultados, se puede proporcionar una construcción provisional de una transición-miro-electromecánica. Su aplicación puede optimizar la función SVT por el criterio de tiempo mínimo bajo la condición de mantener el Resolución máxima en el borde más cercano de los objetos analizados. Para una mejor comprensión del problema usamos el principio básico de triangulación dinámica de la y sistema de exploración láser correspondiente formando conjuntamente con la abertura pasiva Sistema completo 3D Visión Técnica (TVS), introducido en primer lugar en nuestras publicaciones anteriores [5,12], y que es el objeto de un mayor desarrollo y complicación en el presente documento. SVT funciona en la teoría dinámica triangulación con el fin de obtener Coordenadas 3D de los objetos u obstáculos que se encontraron dentro de la visión del robot móvil, como se muestra en la Fig. 1 [7], un haz láser se proyecta por un mecanismo

transmisor (que se llama posicionamiento láser (PL)) en el superficie con obstáculos, lo que refleja el rayo del láser en un rotatorio sensor en el interior, que se llama escaneo de apertura (SA) [43].

Velocidad ha sido optimizado en comparación con el que la velocidad del escáner es inferior. El sistema dispone de posicionamiento láser (PL) y escaneo de Apertura (SA), y el método de triangulación es dinámica, debido al hecho de que el posicionamiento láser tiene la capacidad de rotar y redirigir el láser haz por 180° gira en teoría y (SA) 360° en una constante velocidad, lo que significa que la SVT tiene dos ángulos dinámicos; con este sistema es posible obtener cualquier punto en el frente de la robot móvil como se ve en la Figura 2.2a. PL SA y se comunican por un hueco eje; PL tiene un mecanismo para controlar el láser. Con el fin de calcular cualquier de coordenadas en el plano cartesiano, sinusoidal leyes sobre la dinámica de la triangulación fue utilizado y los resultados obtenidos son las siguientes ecuaciones.

Este capítulo es uno de los más importantes ya que nos muestra el sistema actual, la evolución de este durante sus diferentes etapas de desarrollo; al conocer el sistema mecánico, electrónico, y como fluyen dentro del sistema el movimiento y el comportamiento del prototipo en los planos cartesianos, se pudo llegar a una formulación del problema que es el punto que llevó mas tiempo dentro de esta investigación, una vez formulada y propuesta la oportunidad de mejora fue más fácil seguir con el plan trazado ya que cuando se tiene que

resolver un problema de esta magnitud facilita el ambiente para encontrarse en un cuello de botella, en el cual toma tiempo aplicar estrategias y herramientas que ayuden a despuntar la ruta a seguir, este capítulo fue el más enriquecedor y una buena base para seguir con el diseño del experimento que encontraremos en el siguiente capítulo.

# Capítulo III

## Diseño del experimento con simulación de escenarios posibles que se presentaran ante el SVT

El diseño de experimentos fue una pauta para cubrir la necesidad de análisis del experimento es por eso que surgen las siguientes propuestas:

### 3.1 Características a analizar

- ✿ La cantidad de puntos detectados por el SVT.
- ✿ La velocidad de escaneo.
- ✿ El porcentaje de error.

### 3.2 Parámetros de los experimentos

La Tabla 3.1 que a continuación se muestra nos define los parámetros que afectarán las características que se van a analizar:

Parámetros	1er experimento	2do experimento
Ángulo inicio-fin	1.5°-15°	0.6°-15°
Incremento en el ángulo de apertura ( $\Delta\theta$ )	0.45°	0.1455°
Número de obstáculos	5-9	1-13
Longitud de laser (mts.)	15	25-30
Posiciones de los obstáculos	Fija	Al azar
Número de escenarios	31	101

Tabla 3.1 parámetros a analizar

### 3.3 Ejecuciones de cada experimento:

El primer experimento solo se realizó con 31 ejecuciones del programa en MATLAB, a diferencia del segundo experimento el cual contaba con 101 ejecuciones del programa en la Tabla 3.1 nos muestra los parametros y los limites de las variables que fueron propuestas, la Tabla 3.2 es un concentrado de las cantidades de ejecuciones por experimento.

Experimento	Número de Ejecución
1er	31
2do	101

Tabla 3.2 Ejecuciones por experimento

### 3.4 Tipo de análisis

- Una serie de propuestas de hipótesis que se analizarán en el capítulo 5 de esta tesis.

### 3.5 Objetivos de los experimentos

- Proporcionar la máxima cantidad de información pertinente a la detección de ángulos óptimos.

- Se pretende que el diseño y programa deben ser tan simples como sea posible.
- La investigación se efectuara lo más eficientemente posible; ahorrando tiempo, dinero, horas hombre y material experimental. Proporcionar la máxima cantidad de información al mínimo costo.

Este capítulo mostro la forma en la cual diseñamos, planeamos el experimento para reunir la información pertinente al problema bajo investigación.

El diseño de este experimento es la secuencia completa de pasos tomados de antemano para asegurar que los datos apropiados se obtendrán de modo que permitan un análisis objetivo que conduzca a deducciones válidas con respecto al problema establecido en el capítulo tres. Una vez establecido el diseño podremos describir el capítulo que sigue en el cual analizaremos virtualmente nuestro diseño.

# Capítulo IV

## **Análisis virtual de los parámetros para optimizar el tiempo de barrido**

Como pudimos observar en el capítulo tres se describe la planeación del diseño de experimentos, esta información nos ayudará a tener más claro lo que a continuación describiremos, como se realizó el análisis virtual del diseño de los experimentos, la Figura 4.1 nos muestra las pantallas de los escenarios simulados en MATLAB ambos experimentos (1er experimento de 31 escenarios, 2do experimento de 101 escenarios) en el anexo 1 encontraremos el display del programa general, la figura 4.1b nos muestra el ángulo de apertura (ángulo entre dos posiciones consecutivas del rayo láser entre pasos de exploración). Los puntos detectados son los lugares en los que el rayo láser se refleja a la AE lo podemos ver en la Figura 4.1.a. El campo de visión del SVT esta propuesto empezando en 10 grados y terminando en 170 grados en ambos experimentos. En la Figura 4.1 tenemos PL y AE, relacionando este con la Figura 2.3 del prototipo y la escena actual. Las dimensiones del escenario fueron simuladas con un ancho de 30mts. y profundidad de 15 mts., para ambos experimentos.

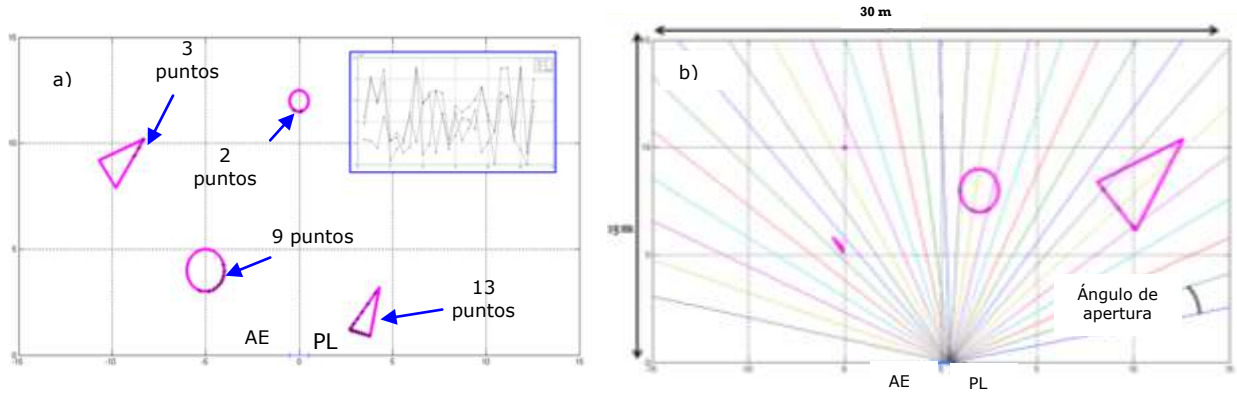


Figura 4.1 Ejemplos de escenarios: a) 1<sup>er</sup> experimento, b) 2<sup>do</sup> experimento.

Debido a la naturaleza MATLAB para poder simular el rayo láser que debe tener una discretización definida por el tiempo finito de cálculos, se usó el siguiente modelo basado en la identidad de Euler [60]:

$$Ae^{i\theta} = A \cos \theta + iA \sin \theta \quad (4.1)$$

Donde  $\theta$  es el valor instantáneo del ángulo de apertura, y  $A$  es la longitud simulada del rayo láser (discretizado con una resolución radial de 0.002mts. hasta 15 m en el experimento "1", y una resolución radial de 0.002mts. hasta 25-30 m en el 2<sup>do</sup> experimento, el desarrollo del programa en MATLAB podemos verlo en el anexo 1.

Se utilizaron líneas para dibujar un triángulo (con la secuencia de que la línea más corta es la primera en ser delineada, siguiendo con la segunda más larga y así terminar de dibujar la más larga como el último lado del triángulo).

$$Y_{r1} = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)}(x - x_1) + y_1 \quad (4.2)$$

$$Y_{r2} = \frac{(y_2 - y_3)}{(x_2 - x_3)}(x_2 - x_1) + y_2 \quad (4.3)$$

$$Y_{r3} = \frac{(y_1 - y_3)}{(x_1 - x_3)}(x_3 - x_1) + y_3 \quad (4.4)$$

Dónde:  $Y_{r1}$ ,  $Y_{r2}$ ,  $Y_{r3}$ , son las ecuaciones de las líneas para los triángulos,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ ,  $y_3$ , son las coordenadas cartesianas de los vértices del triángulo. El desarrollo del programa en MATLAB podemos verlo en el anexo 2.

Para simular los círculos fue utilizado ( $r$ ) para definir el radio arbitrariamente, el centro con ( $C$ ), y la discretización del círculo ( $DC$ ) en grados, (donde el valor que toma es tres veces menor que la discretización del rayo láser), todo fue modelado con las siguientes ecuaciones [60]:

$$\Delta\alpha = \frac{(DC \times \pi)}{180^\circ} \quad (4.5)$$

Donde  $\alpha$  son incrementos de  $\Delta\alpha$ , y a su vez es el incremento en la discretización de los círculos.

$$Circle_n = C + re^{j \times \alpha} \quad (4.6)$$

Donde  $Circle_n$  es el dibujo del obstáculo para  $n$  círculos. El desarrollo del programa en MATLAB podemos verlo en el anexo 3.

#### 4.1 Parámetros de simulación del primer experimento

Basándonos en el formalismo matemático introducido anteriormente, fueron simulados 31 escenarios y 30 ángulos de apertura,

En el este experimento, cada escenario fue escaneado con 30 diferentes ángulos de apertura.

Los ángulos se variaron según los siguientes parámetros (ver tabla 3.1): Ángulo inicio-fin, incremento del ángulo de apertura, número de obstáculos, Longitud del laser, obteniendo así 31 marcos para ser analizadas; las observaciones fueron las siguientes :

1. Como se muestra en la Figura 4.2 con un ángulo de escaneo de barrido de  $1.95^\circ$ , se llevo un tiempo de 0.083 segundos y detecto 27 puntos en cuatro obstaculos.

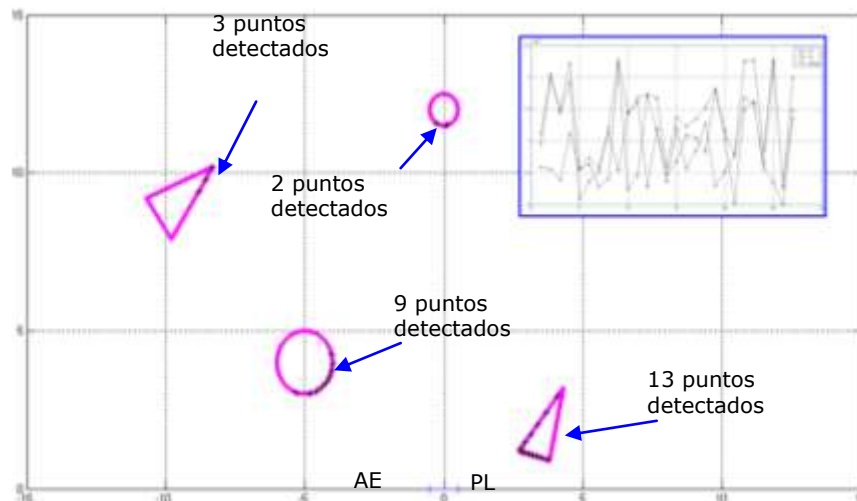


Figura 4.2 Simulación No. 2 del primer experimento.

2. Como se muestra en la Figura 4.3 la con un ángulo de escaneo de barrido de  $8.25^\circ$ , se llevó un tiempo de 0.02 segundos y detecto 7 puntos en cuatro obstáculos

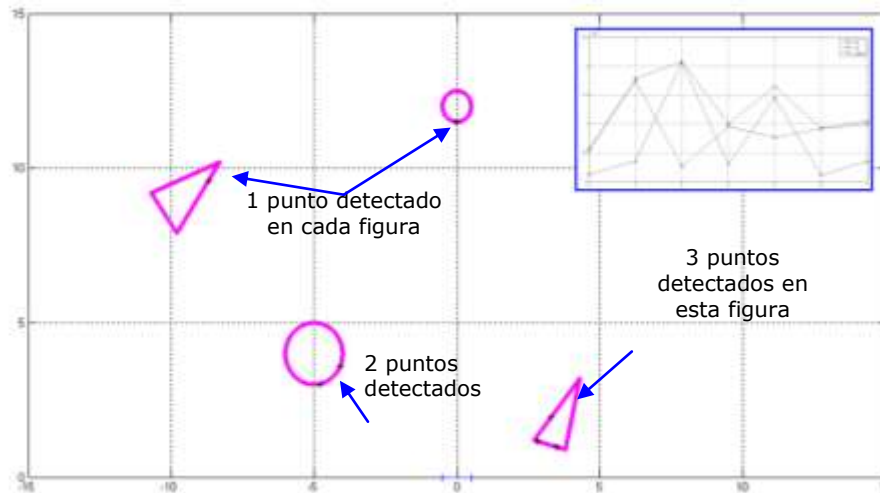


Figura 4.3 Simulación No. 16 del primer experimento.

3. Como se muestra en la Figura 4.4 la con un ángulo de escaneo de barrido de  $14.1^\circ$ , se llevó un tiempo de 0.012 segundos y detecto 5 puntos en tres obstáculos

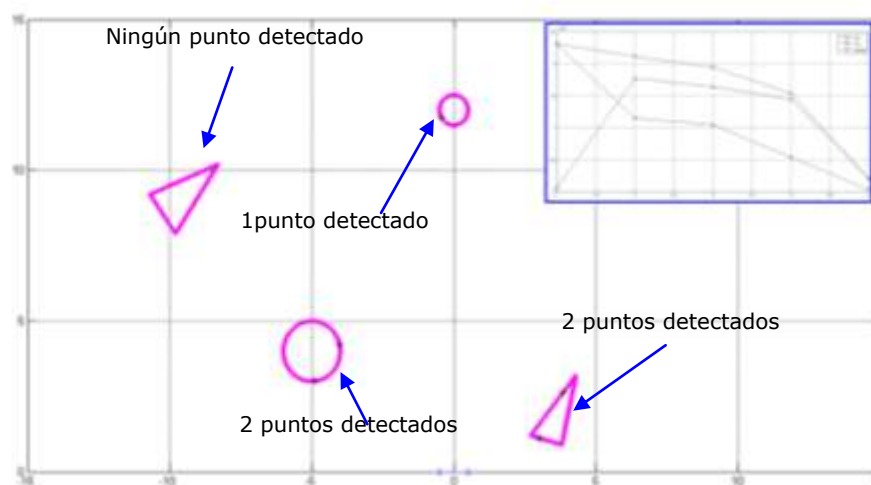


Figura 4.4 Simulación No. 26 del primer experimento.

Podemos observar las figuras 4.2, 4.3 y 4.4, en la esquina superior derecha de cada gráfica del error entre la discretización del láser y la discretización del contorno del obstáculo durante la simulación MATLAB, detecto el error máximo que fue de  $2.5 \times 10^{-3}$  en la intersección de puntos entre el contorno de los obstáculos y el haz de láser. En conclusión, el error se minimiza con un ángulo de paso mayor que con un ángulo de paso pequeño.

La tabla 4.1 en los números 22, 25, 26, 27, 30 y 31 de las simulaciones, no detecta un obstáculo peligroso para el robot, analizando las figuras 4.2, 4.3, 4.4 y la Tabla 4.1 se puede decir que al menor ángulo de paso se obtienen más puntos en el contorno de los obstáculos y más tiempo para la exploración del escenario completo, a un ángulo más grande obtenemos menos puntos y menos tiempo para una exploración completa [54].

## 4.2. Parámetros de simulación del segundo experimento

Según la Tabla 3.2 para el segundo experimento se simularon 101 escenarios diferentes que fueron escaneados con 100 ángulos de apertura cada uno, ángulo inicio-fin, incremento del ángulo de apertura, número de obstáculos, longitud del laser, posición de obstáculos, número de escenarios; obteniendo así 10,100 marcos para ser analizados; las observaciones fueron las siguientes:

Tabla 4.1 Resultados de simulación 1<sup>er</sup> experimento [54]

No.	Ángulos de apertura	Tiempo de escaneo	Puntos detectados
1	1.5	0.107	34
2	1.95	0.083	27
3	2.4	0.067	21
4	2.85	0.057	17
5	3.3	0.049	16
6	3.75	0.043	13
7	4.2	0.039	12
8	4.65	0.035	11
9	5.1	0.032	9
10	5.55	0.029	10
11	6	0.027	9
12	6.45	0.025	9
13	6.9	0.024	8
14	7.35	0.022	8
15	7.8	0.021	6
16	8.25	0.02	7
17	8.7	0.019	6
18	9.15	0.018	6
19	9.6	0.017	5
20	10.05	0.016	5
21	10.5	0.016	5
22	10.95	0.015	4
23	11.4	0.015	4
24	11.85	0.014	5
25	12.3	0.014	4
26	12.75	0.013	4
27	13.2	0.013	3
28	13.65	0.012	5
29	14.1	0.012	5
30	14.55	0.011	3
31	15	0.011	3

1. Los obstáculos más pequeños y situados cerca, fueron difíciles de detectar, para eso se usaron ángulos de apertura alrededor de  $0.6^\circ$  a  $0.7455^\circ$ ; estos ángulos detectan más puntos en el contorno de los obstáculos pero en un tiempo mayor.

2. La Figura 4.5 nos muestra un triángulo con un comportamiento similar al de una pared, en este fenómeno todos los ángulos toman más tiempo en comparación con otros escenarios.

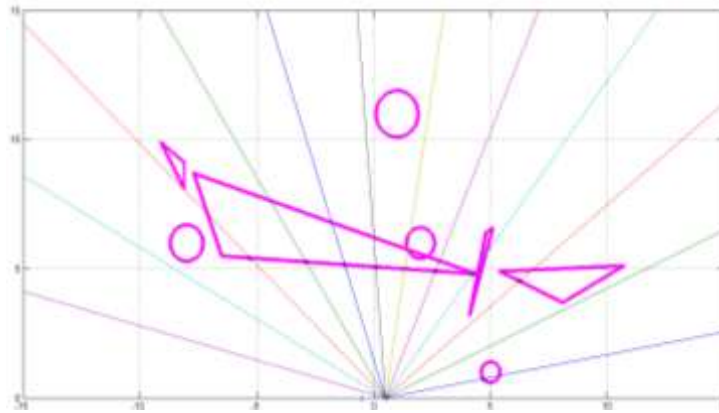


Figura 4.5 Simulación con comportamiento similar al de una pared en la figura del triángulo mas grande del 2<sup>do</sup> experimento.

3. En la Figura 4.6 se usaron 12 obstáculos, y el tiempo de exploración fue alto en la mayoría de los ángulos.

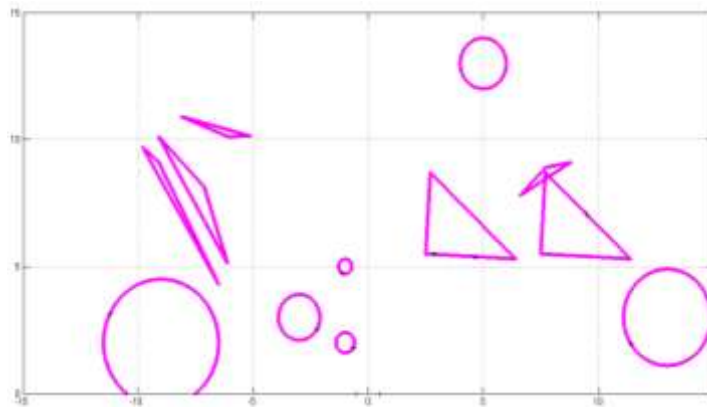
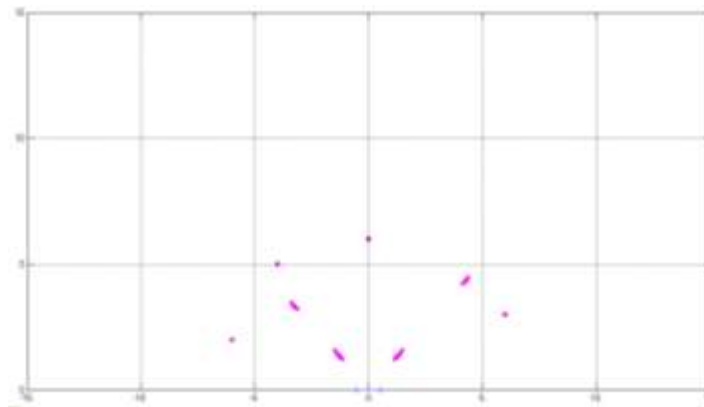


Figura 4.6 Escenario con 12 obstaculos en el segundo experimento

4. En la Figura 4.7 con 8 obstáculos, los ángulos de abertura 15° y 14.8545° detecta un obstáculo en menor tiempo.

5. Si los obstáculos son más grandes y cercanos, el tiempo de exploración es más largo con la mayoría de los ángulos.

Los círculos son más confiables en la resolución que los triángulos. Esto significa que en la práctica los obstáculos afilados son más peligrosos para el robot. Pero la presente simulación nos permite buscar la condición numérica más sencilla para clasificar la escena real por la cantidad de obstáculos suaves u objetos cortantes en su interior.



**Figura 4.7 Escenario con 8 obstáculos en el segundo experimento**

Esta es una de las ventajas más útiles de nuestro método de exploración.

En la figura 4.8 podemos ver la pantalla de salida del programa para la simulación de un escenario, en la primera columna nos muestra el ángulo que se usó para hacer el barrido del escenario, la segunda columna nos muestra el tiempo que se llevó en realizar el escaneo del escenario con el ángulo de la primera columna, la tercera columna nos muestra el número de puntos detectados en los obstáculos del escenario correspondiente.

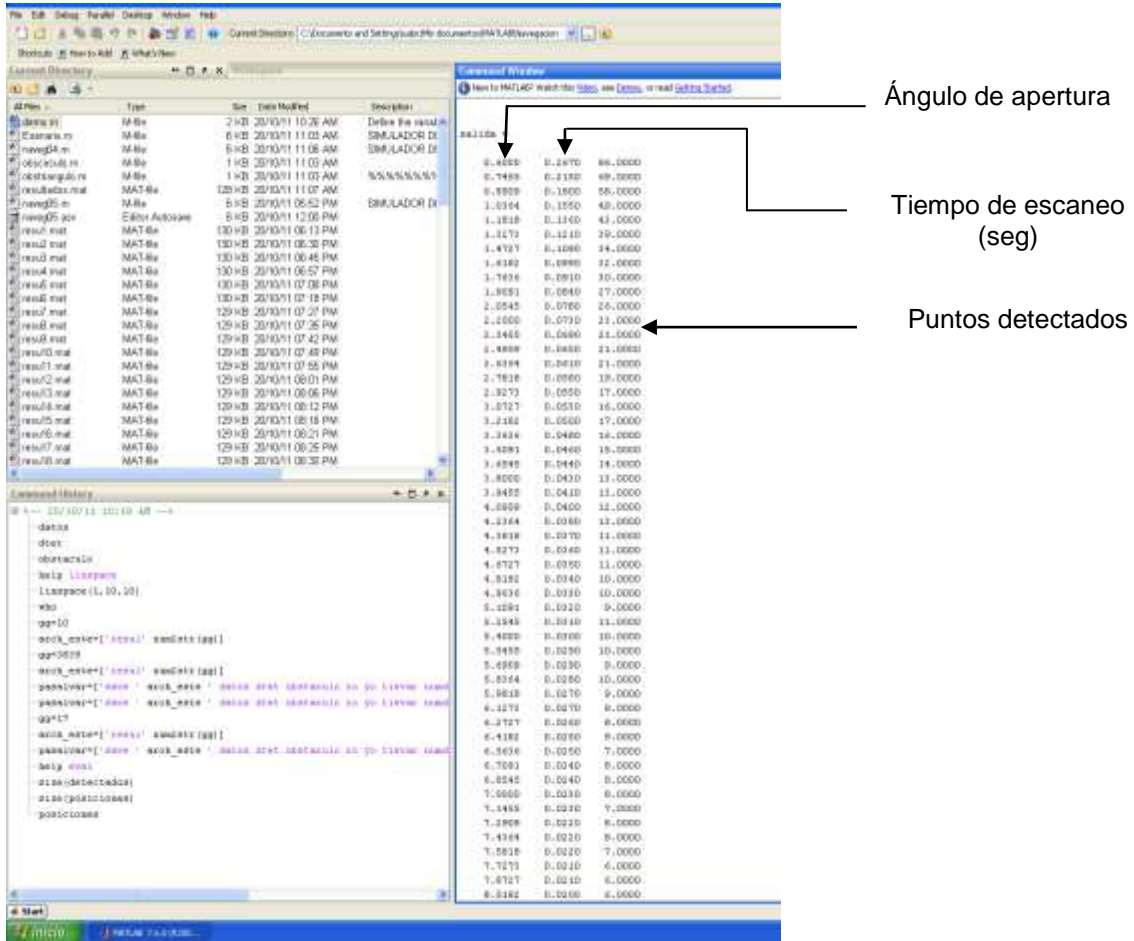


Figura 4.8 Pantalla de datos obtenidos en la simulación

La información presentada en la Figura 4.8, nos da los datos obtenidos de la simulación de un solo escenario, por lo que para cada escenario tenemos estos mismos datos, en la segunda simulación analizamos 101 escenarios diferentes por lo que tenemos 10,100 datos que se muestran en los anexos 4, 5, y 6. Esto nos lleva a tratar de buscar los ángulos óptimos en los cuales en menos tiempo

de escaneo se detecten más puntos en los obstáculos, a continuación se muestra las propuestas para la búsqueda.

### 4.3 Búsqueda de la propuesta de los ángulos óptimos

En la simulación variamos el valor del ángulo de paso, con incrementos de  $\Delta\theta_1=0.45^\circ$  y  $\Delta\theta_2=0.1455^\circ$ , donde  $\Delta\theta_1$  son los incrementos en el ángulo para el primer experimento y  $\Delta\theta_2$  son los incrementos en el ángulo para el segundo experimento, de acuerdo a los parametros del capítulo cuatro. Para cada valor de paso de exploración fueron detectados:

- I. El tiempo total necesario para la digitalización completa de la estructura definida.
- II. La cantidad de puntos detectados en obstáculos situados en las superficies arbitrarias durante un ciclo completo de escaneo del escenario.
- III. La simulación aporta información estadística a partir de dos experimentos computacionales diferentes con 30 y 100 valores de paso diferentes.

Este capítulo en mi muy humilde opinión es el que más fácil y preciso esta diseñado, en comparación del capítulo dos que es el que más tiempo y esfuerzo consumo, este capítulo es de información para ordenar los parametros y la búsqueda de la propuesta de los ángulos óptimos, en comparación del capítulo

siguiente podemos concluir que este capítulo esta en función de la información adquirida en los capítulos uno y dos.

# Capítulo V

## Propuestas y comprobación de procedimientos para búsqueda de los ángulos óptimos

A continuación presentamos el diseño de una serie de seis procedimientos que someteremos a prueba con el fin de determinar el más idóneo para comprobar nuestra hipótesis.

### 5.1 Comprobación del procedimiento con análisis gráfico de máximos y mínimos

La información de la simulación para la búsqueda de los obstáculos, como se ve en la Figura 4.8, variando el valor instantáneo de la exploración de ángulo de paso (ver primera columna de la tabla en la Figura 4.8) con incremento de  $\Delta\theta = 0,1455^\circ$  de acuerdo a las condiciones del capítulo 3. Para cada valor de paso de exploración se detectaron: 1 El tiempo total necesario para la digitalización completa de la trama definida (ver segunda columna de la tabla en la Figura 4.8) y 2 La cantidad de puntos detectados en las superficies de obstáculos durante un ciclo completo de la exploración del escenario (ver tercera columna de la tabla en la Figura 4.8). La simulación aporta información estadística a partir de dos experimentos computacionales diferentes con 30 y 100 valores de paso diferentes.

Procedimiento propuesto: **Encontrar tres ángulos de apertura óptimos en base a los datos obtenidos de 31 y 101 escenarios diferentes utilizando el Método gráfico de la relación Puntos detectados vs. Tiempo de escaneo, el cual nos muestre los ángulos óptimos.**

La primera simulación de 31 experimentos presentados en [43] (véase Figura 5.1) muestra la gráfica de los puntos detectados en función del ángulo de apertura. Nos da el comportamiento generalizado de los tres ángulos que tiene los máximos locales de información sobre obstáculos. Esta información no es suficiente para tomar una decisión estadísticamente con retroalimentación para el diseño de MET. Así que el segundo experimento en conjunto ampliado de datos que proporcionan para mejorar la muestra representativa estadísticamente significativa para el diseño riguroso y más seguro de la MET. Sin embargo, los resultados presentados en [43] y en la Figura. 5.1 ayudarnos a obtener una primera vista de la cantidad y los valores tentativos de tales ángulos de paso para el diseño de la transmisión preliminar.

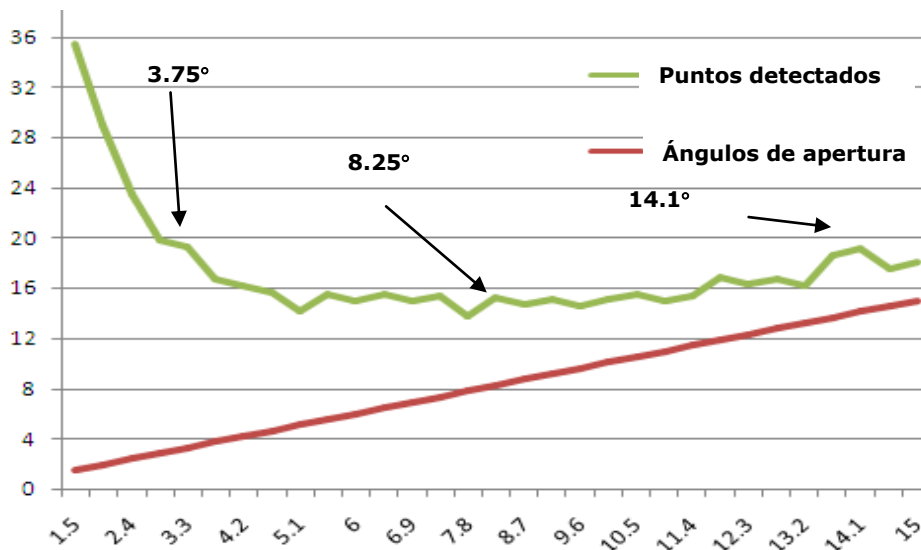


Figura 5.1 Gráfica de puntos detectados vs ángulos de apertura 1<sup>er</sup> experimento

Los resultados nos muestran que a mayor ángulo obtenemos menos puntos detectados, en la Figura 5.1 podemos ver señalados los ángulos óptimos

En la segunda simulación fueron suficientes datos para aplicar algunos métodos estadísticos (la gráfica de simulación muestra: los puntos detectados contra los ángulos de apertura) para comparar las gráficas que en el primer experimento fueron 31 y en el segundo fueron 101 experimentos (ver Figuras 5.1 y 5.2, respectivamente).

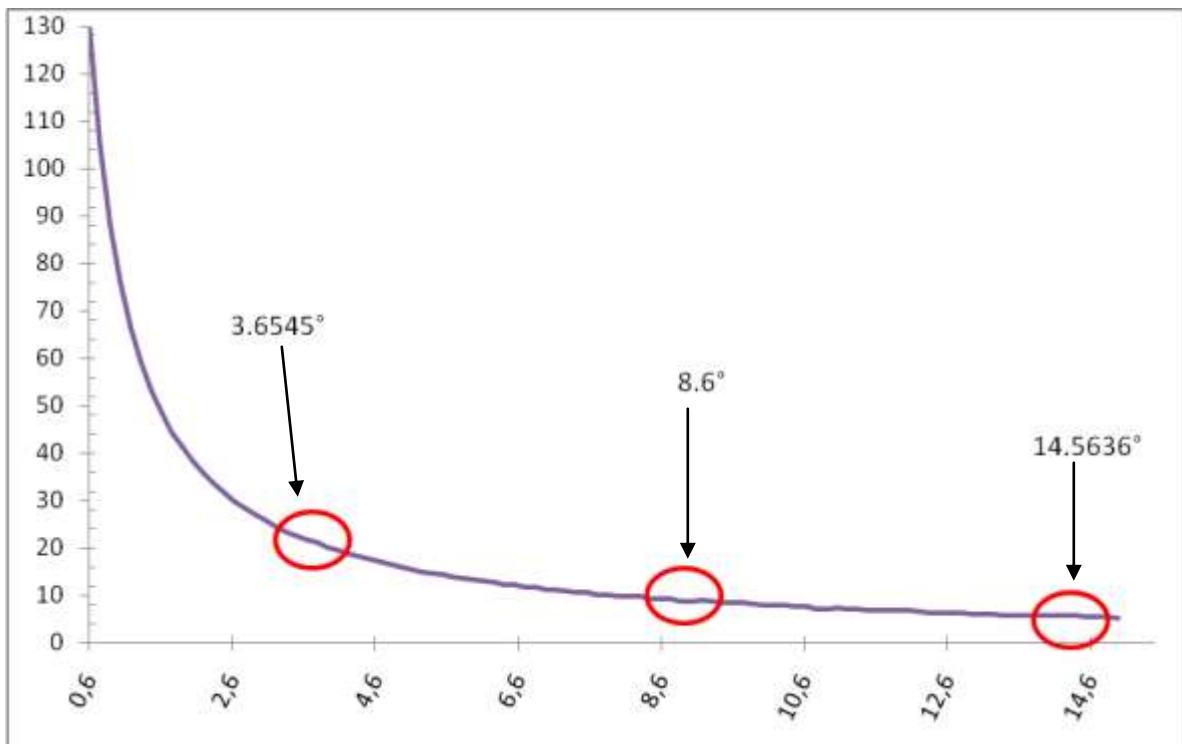


Figura 5.2 Gráfica de puntos detectados vs ángulos de apertura 2<sup>do</sup> experimento

La Tabla 5.1 nos muestra los ángulos óptimos obtenidos del análisis gráfico de los datos de ambos experimentos, como podemos ver gráficamente en las figuras 5.1 y 5.2 los máximos obtenidos son los siguientes:

Tabla 5.1 Tabla que nos muestra los ángulos obtenidos del método gráfico

Experimentos	1 <sup>er</sup> ángulo	2 <sup>do</sup> ángulo	3 <sup>er</sup> ángulo
Primer experimento (31 escenarios)	3.75°	8.25°	14.1°
Segundo experimento (101 escenarios)	3.6545°	8.6°	14.5636°

Analizando los datos de la Tabla 5.1, podemos ver que en ambos experimentos conciden los ángulos, no coinciden en milésimas, sin embargo estos datos no son suficientes para emprezar el diseño de la Transmisión-Micro-Electromecánica (TME), es por eso que se hace la siguiente propuesta en la sección que continuación mostramos.

## 5.2 Comprobación del procedimiento con Programación Lineal

Procedimiento propuesto: **Encontrar tres ángulos de apertura óptimos en base a los datos obtenidos de 101 escenarios diferentes utilizando Programación Lineal con un modelo de optimización, donde maximice el número de puntos y minimice el tiempo de escaneo.**

La Tabla 5.2 nos muestra el análisis de las variables, y restricciones que nos ayudaran a definir el método de programación lineal.

Tabla 5.2 Analisis de variables

<b>Variable</b>	<b>Medición</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Restricciones</b>
Ángulo de apertura	Angular	Independiente/Continua	0.6° 15°
Tiempo de escaneo	Segundos	Dependiente	0.11seg–0.264seg
Puntos detectados	Cantidad	Dependiente	1–245
No. de obstáculos	Cantidad	Independiente	1-13
No. de escenarios	Cantidad	Independiente	1-101

F1= Número de puntos

F2= Tiempo de escaneo

F.O. Max (F1), Min (F2)

En la gráfica 5.3 podremos encontrar un diagrama del procedimiento que estamos mencionando en esta sección.

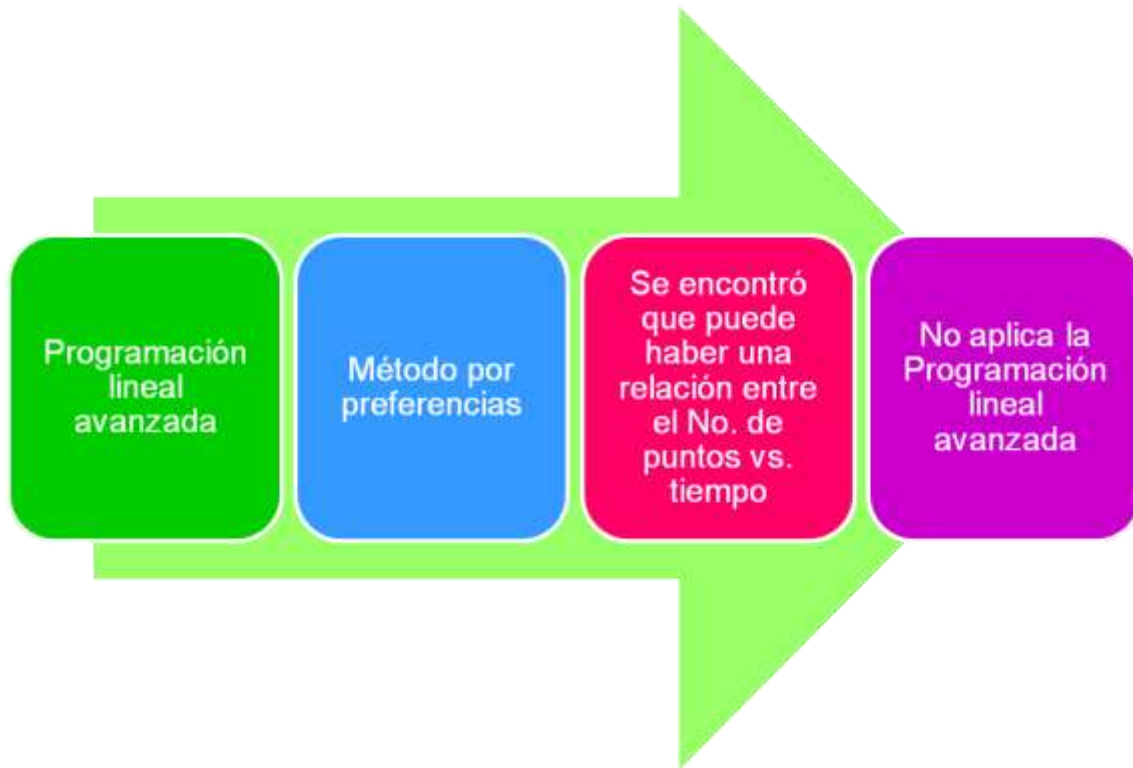


Figura 5.3 Gráfica de  $Z_m$ .vs. ángulos de apertura

Al analizar los datos respecto al número de puntos detectados y el tiempo de escaneo, podemos encontrar una relación que analizaremos en la siguiente sección, es por eso que este procedimiento se descartó.

### 5.3 Comprobación del procedimiento con Regresión Curvilínea

Procedimiento propuesto: **Encontrar tres ángulos de apertura óptimos en base a los datos obtenidos de 101 escenarios diferentes utilizando el Método de Regresión Curvilínea el cual nos muestre los ángulos óptimos.**

Según la teoría matemática de regresión curvilínea encontramos las siguientes ecuaciones normales (con subíndices omitidos por facilidad):

$$\Sigma Y = nb_0 + b_1 \Sigma X + \dots + b_p \Sigma X^p \quad (5.3)$$

$$\Sigma XY = b_0 \Sigma X + b_1 \Sigma X^2 + \dots + b_p \Sigma X^{p+1} \quad (5.4)$$

.

.

.

$$\Sigma X^p Y = b_0 \Sigma X^p + b_1 \Sigma X^{p+1} + \dots + b_p \Sigma X^{2p} \quad (5.5)$$

En base al modelo expuesto anteriormente podemos aplica a nuestros datos en la Tabla 5.3:

Tabla 5.3 Aplicación de Regresión Curvilínea a nuestros datos

I	X	Y	X <sup>2</sup>	X <sup>3</sup>	X <sup>4</sup>	XY	X <sup>2</sup> Y
1	0.6	485.26	0.36	0.22	0.13	291.15	174.7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	15	48466.2	225	7209.72	50625	726993	10904895
<b>n=100</b>	<b>ΣX=780</b>	<b>ΣY=48466.20</b>	<b>ΣX<sup>2</sup>=7846.90</b>	<b>ΣX<sup>3</sup>=88707.2</b>	<b>ΣX<sup>4</sup>=1069616</b>	<b>ΣXY=376526</b>	<b>ΣX<sup>2</sup>Y=3778761</b>

Sustituyendo los datos en las ecuaciones 5.3, 5.4 y 5.5 tenemos:

$$100b_0 + 780b_1 + 7846.91b_2 = 48466.21 \quad (5.6)$$

$$780b_0 + 7846.91b_1 + 88707.24b_2 = 376526.43 \quad (5.7)$$

$$7846.91b_0 + 88707.24b_1 + 1069616.09b_2 = 3778761.26 \quad (5.8)$$

Resolviendo con el método de ecuaciones simultaneas tres ecuaciones y tres incógnitas obtuvimos los valores:

$$b_0 = 489.98$$

$$b_1 = -0.645$$

$$b_2 = -0.031$$

La ecuación que representa la regresión curvilínea de los datos es la siguiente:

$$F(X) = 489.98 - 0.365X - 0.031X^2 \quad (5.9)$$

Derivando una vez a  $F(X)$  e igualando a cero la derivada, encontramos que:

$$X = -5.88$$

En la Figura 5.9 podemos ver la gráfica de los datos versus la gráfica de la regresión curvilínea. La gráfica color vino nos muestra las medias de las Z's vs. el ángulo y la gráfica azul la ecuación  $F(X)$ .

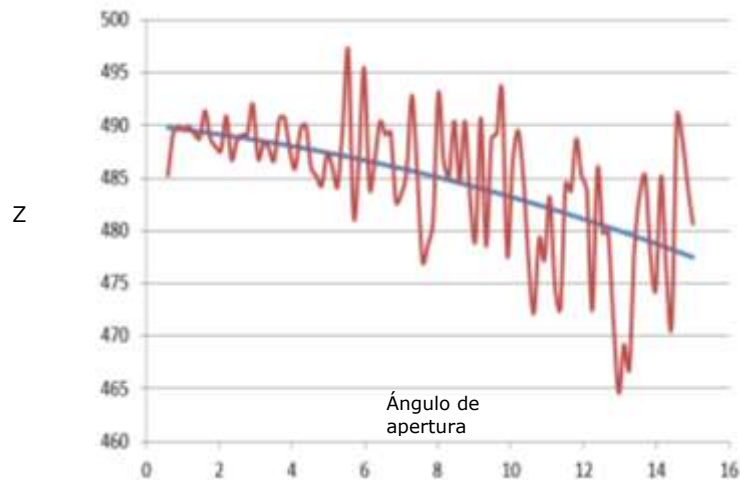


Figura 5.9 Línea azul regresión curvilínea versus línea color vino valor "Z"

Por lo tanto, este procedimiento es nulo, en la siguiente sección demostraremos la comparación del siguiente procedimiento

#### 5.4 Comprobación del procedimiento con el Método de medias y la relación Puntos detectados vs. Tiempo

Procedimiento propuesto: **Encontrar tres ángulos de apertura óptimos en base a los datos obtenidos de 101 escenarios diferentes utilizando el Método de medias y la relación Puntos detectados vs. Tiempo, el cual nos muestre gráficamente los ángulos óptimos.**

En la Figura 5.4 nos muestra una hoja de Excel donde encontramos los datos de la simulación del escenario 051a, la cual podemos ver que esos datos solo son para un escenario, el segundo experimento cuenta con 101

escenarios diferentes, donde  $s$  es el tiempo en segundos y  $P$  es el número de puntos detectados.

	C	D	E	G	H	I
1						Z
2	Ángulo(°)	s	P		Ángulo(°)	P/t
3	0.6	0.267	86		0.6	322.0974
4	0.7455	0.215	69		0.7455	320.9302
5	0.8909	0.18	58		0.8909	322.2222
6	1.0364	0.155	49		1.0364	316.129
7	1.1818	0.136	43		1.1818	316.1765
8	1.3273	0.121	39		1.3273	322.314
9	1.4727	0.109	34		1.4727	311.9266
10	1.6182	0.099	32		1.6182	323.2323
11	1.7636	0.091	30		1.7636	329.6703
12	1.9091	0.084	27		1.9091	321.4286
13	2.0545	0.078	26		2.0545	333.3333
14	2.2	0.073	23		2.2	315.0685
15	2.3455	0.069	21		2.3455	304.3478
16	2.4909	0.065	21		2.4909	323.0769
17	2.6364	0.061	21		2.6364	344.2623

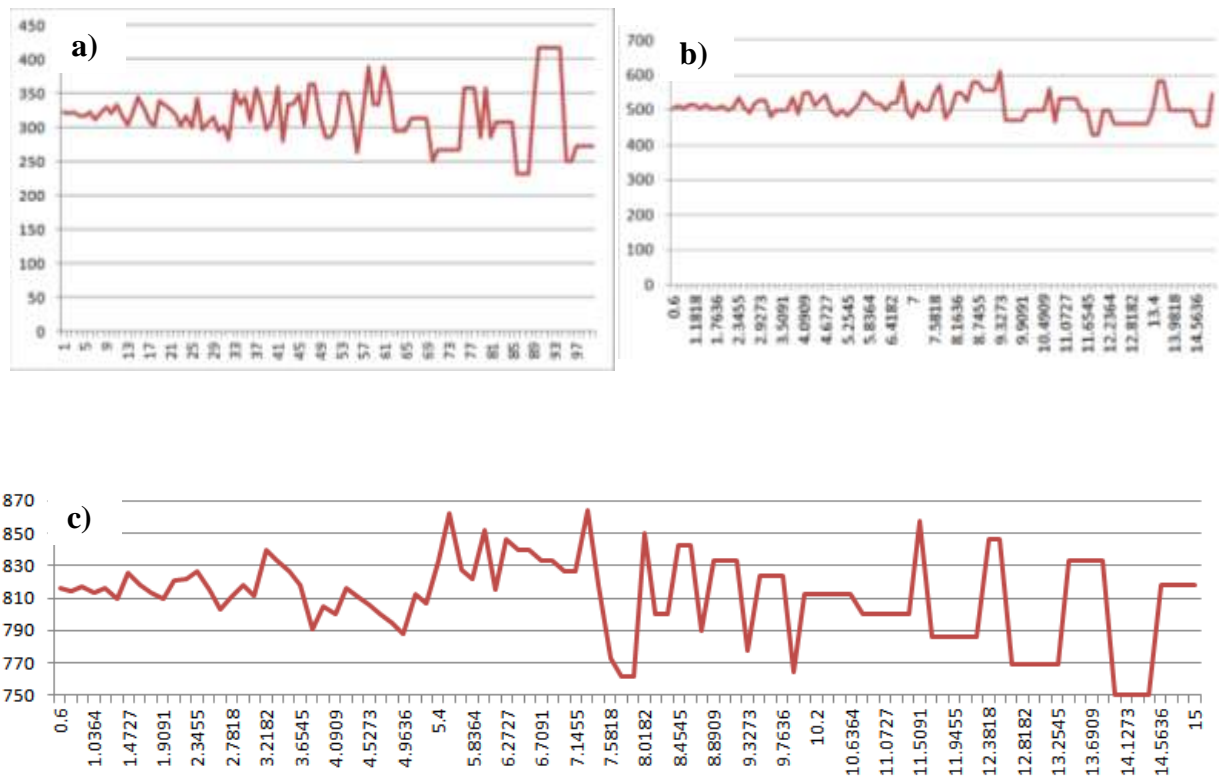
Figura 5.4 Datos de la simulación del escenario 051a del 2<sup>do</sup> experimento

Para realizar el análisis de los datos se procedió a definir el valor "Z", que está en función de:

$$Z = \frac{P}{t} \quad (5.1)$$

Donde  $P$  es el número de puntos detectados en los obstáculos,  $t$  es el tiempo de exploración en segundos. En la Figura 5.5 a-c, podemos ver "Z" para los

escenarios 052a, 059a y 067a. La grafica no se puede analizar fácilmente, esta es la razón por la cual se usó el método estadístico para analizar uno por uno todos los escenarios gráficamente



**Figura 5.5 Graficas de ángulo de apertura vs. "Z": a) Escenario 052a, b) Escenario 067a, c) Escenario 059a**

En la Figura 5.6 podemos encontrar los valores de "Z" contra los ángulos de apertura de todos los escenarios ya que es muy difícil de analizar de esta forma, se usó el método de medias, sacando la media de  $Z_1$  hasta  $Z_{101}$ , con la siguiente relación:

$$Z_m = \frac{(\sum_{i=1}^{101} Z_i)}{101} \tag{5.2}$$

La Figura 5.6 nos muestra los datos de los valores "Z" de cada escenario y también nos muestra los valores de los ángulos de apertura.

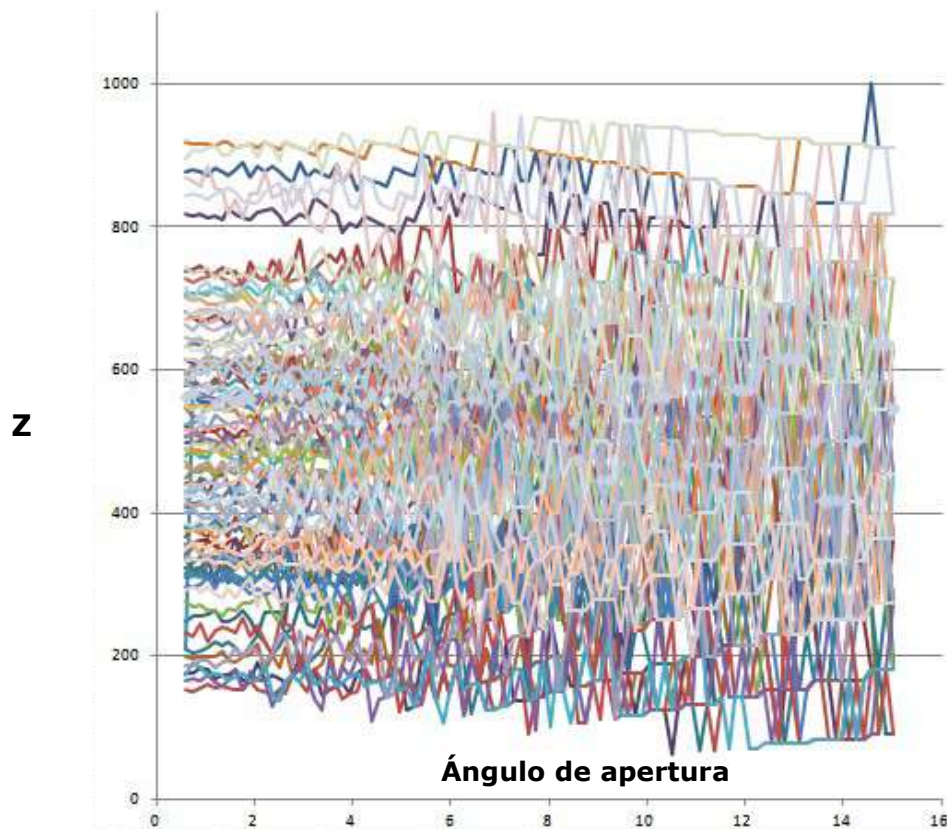


Figura 5.6 Graficas de ángulo de apertura vs. "Z", de 101 escenarios

El uso del método de máximos y mínimos, en esta grafica se utilizó el parámetro "Z" con el procedimiento propuesto al inicio de esta sección, basándonos en los datos obtenidos de la simulación a partir de 101 escenarios con el método de conexión entre medias y los puntos detectados contra el tiempo, la Figura 5.7 nos muestra los ángulos óptimos encontrados.

	CV	CW	CX	CY	CZ
1					
2	148	149	150		media
3	z99	z100	z101		zm
4	632.958801	385.76779	423.220974	0.6	485.259762
5	627.906977	381.395349	423.255814	0.7455	489.201013
6	627.777778	388.888889	422.222222	0.8909	489.823982
7	638.709677	380.645161	412.903226	1.0364	489.61993
8	632.352941	375	419.117647	1.1818	489.807804
9	636.363636	371.900826	421.487603	1.3273	489.158007
10	633.027523	376.146789	412.844037	1.4727	488.781906
11	636.363636	383.838384	424.242424	1.6182	491.349135
12	637.362637	384.615385	417.582418	1.7636	488.738984
13	642.857143	380.952381	428.571429	1.9091	487.977369
14	641.025641	371.794872	423.076923	2.0545	487.560294
15	643.835616	383.561644	410.958904	2.2	490.844975

Figura 5.7 Datos de las medias de los escenarios 099, 100, 101 y  $Z_m$ .

El parámetro "Z" lo podemos definir como la cantidad de números detectados entre el tiempo que se llevo en escanear el escenario.

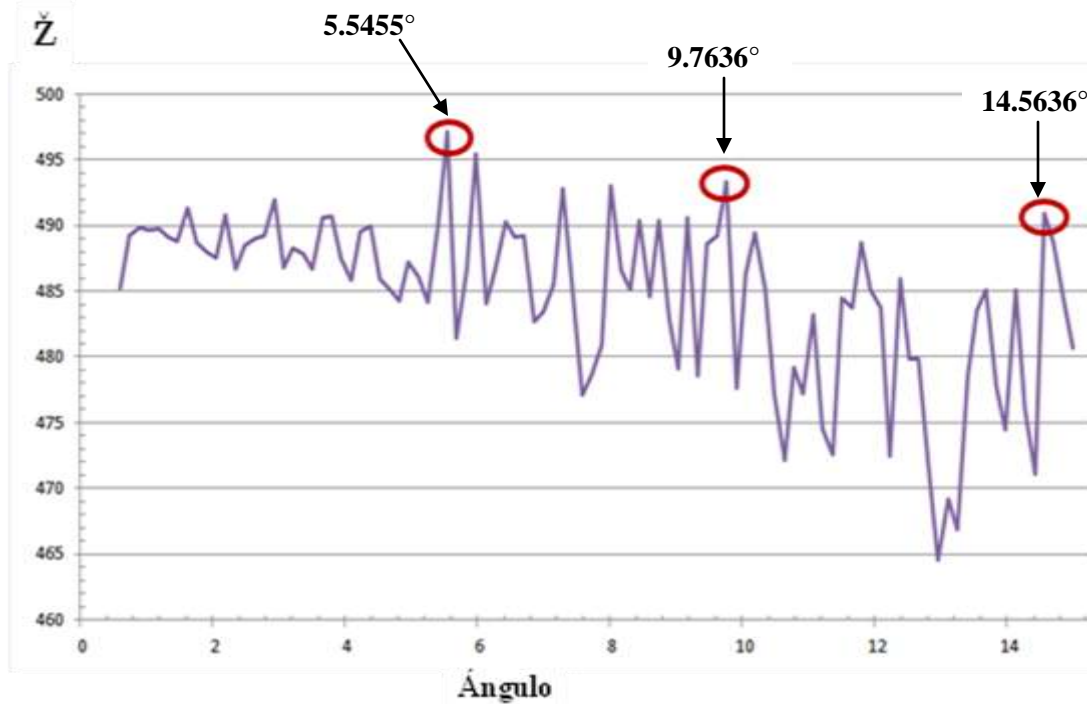


Figura 5.8 Grafica de  $Z_m$ .vs. ángulos de apertura

Analizando los datos de la Figura 5.8, podemos concluir que el único ángulo que coincide con la comprobación de la primera hipótesis es el de  $14.5636^\circ$  por lo tanto estos datos no son suficientes para emprezar el diseño de la TME, es por eso que se elabora la propuesta de la siguiente sección.

### 5.5 Comprobación del procedimiento con la interpolación de "Z"

Procedimiento propuesto: **Encontrar tres ángulos de apertura óptimos en base a los datos obtenidos de 101 escenarios diferentes utilizando el Método de interpolación entre el mayor y menor valor del parámetro Z, el cual nos muestre estadísticamente los valores de los ángulos óptimos.**

En base a los datos de presentación en la comprobación de la hipótesis anterior se realizó un análisis del parámetro "Z" que podemos ver en la tabla 5.4, en una muestra de 101 escenarios y en cada escenario se corrieron 100 ángulos de barrido diferentes se obtuvieron los siguientes ángulos óptimos; la resolución 466.66 se sacó de una interpolación entre 1000 y 62.5 de todos los datos de la simulación ver anexos 4, 5 y 6.

Tabla 5.4: Comparación de los ángulos obtenidos.

<b>Ángulos óptimos</b>	<b>No. de escenario</b>	<b>Puntos detectados</b>	<b>Z</b>	<b>Tiempo de escaneo (s)</b>
14.5636	13	11	1000	0.011
9.9091	93	16	941.18	0.017
0.6	30	245	917.6	0.267
0.6	93	239	895.13	0.015
11.3636	91	7	466.66	0.15
10.7812	78	7	466.66	0.15
0.8909	68	84	466.66	0.18
0.6	44	41	153.53	0.267
11.3636	44	1	66.67	0.015
10.4909	4	1	62.5	0.016

## 5.6 Comprobación de el procedimiento con Redes Neuronales

Procedimiento propuesto: **Encontrar ángulos de apertura óptimos en base a los datos obtenidos de 101 escenarios diferentes utilizando una Red Neuronal entrenada con los datos adquiridos en la simulación.**

### 5.6.1 Método de Levenberg-Marquard

En base a nuestras investigaciones anteriores [21, 30-36, 54, 57, 58 y 60] con este tipo de escáner podemos aplicarlo a al monitoreo biométrico estático, navegación de automoviles, navegación de robots, análisis de estructuras, y otras aplicaciones más, el uso de una red neuronal en conjunto de las matemáticas pueden ser útil para la rectificación de los datos obtenidos experimentalmente. Para la aplicación de navegacion robótica como podemos ver en el primer capítulo de esta tesis en algunas de las aplicaciones de inteligencia artificial se uso este algoritmo que a continuación se describe para aprovechar los datos que genera comparandolos con el porcentaje menor de error tomando los que más se asemejan a los datos de set up usandolos así con este algoritmo y seleccionar el que mas bajo error muestra y poder emplearlo en la toma de desiciones en el funcionamiento del proyecto objeto de esta tesis.

De acuerdo con [58] no es necesario aplicar la amplia variedad de métodos existentes, porque [58] muestra claro que la herramienta más

adecuada en este caso es el Algoritmo de Levenberg-Marquardt (ALM). La principal aplicación del ALM es en el ajuste de curvas de mínimos cuadrados, dado un conjunto de pares de referencia supuestos " $m$ " de las variables independientes y dependientes,  $(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$ , optimizando la variable  $\beta$  para el modelo de curva de  $f(\mathbf{x}, \beta)$  de modo que la suma de los cuadrados de las desviaciones se convierte en mínima como podemos consultar en [58],

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^m [y_i - f(x_i, \beta)]^2 \quad (5.10)$$

Al igual que otros algoritmos de minimización numéricos, el ALM trabaja con un procedimiento iterativo. Para iniciar una minimización, ofrece una aproximación inicial para el vector de parámetros,  $\beta$ . En cada paso de iteración, el vector de parámetros,  $\beta$ , se sustituye por una nueva estimación,  $\beta + \delta$ . Para determinar  $\delta$ , las funciones  $f(\mathbf{x}, \beta + \delta)$  se aproximan por su linealización

$$f(x_i, \beta + \delta) \approx f(x_i, \beta) + J_i \delta \quad (5.11)$$

Donde,

$$J_i = \frac{\partial f(x_i, \beta)}{\partial \beta} \quad (5.12)$$

es el gradiente (fila-vector en este caso) de la " $f$ " con respecto a  $\beta$ . En su mínimo, la suma de cuadrados,  $S(\beta)$ , el gradiente de  $S$  con respecto a  $\delta$  será cero. La aproximación de primer orden de  $f(x, \beta + \delta)$  se obtiene:

$$S(\beta + \delta) \approx \sum_{i=1}^m [y_i - f(x_i, \beta) - J_i \delta]^2 \quad (5.13)$$

o en notación vectorial,

$$S(\beta + \delta) \approx \|\mathbf{y} - f(\beta) - \mathbf{J}\delta\|^2 \quad (5.14)$$

Tomando la derivada con respecto al establecimiento y el resultado a cero da:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J})\delta = \mathbf{J}^T [\mathbf{y} - f(\beta)] \quad (5.15)$$

donde  $\mathbf{J}$  es la matriz Jacobiana [15, 21], cuya  $i$ -ésima fila es igual a  $\mathbf{J}_i$ , y donde  $f$ ,  $\mathbf{y}$  son vectores con componente  $i$ -ésima  $f(x_i, \beta)$  y  $y_i$ , respectivamente. Este es un conjunto de ecuaciones lineales que pueden ser resueltos para  $\delta$ .

La contribución de Marquardt [58], es sustituir esta ecuación por una "versión amortiguada",

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I})\delta = \mathbf{J}^T [\mathbf{y} - f(\beta)] \quad (5.16)$$

donde  $\mathbf{I}$  es la matriz identidad, dando como el incremento,  $\delta$ , para el vector de parámetro estimado,  $\beta$ . El factor (no negativo) de amortiguación,  $\lambda$ , se ajusta en cada iteración. Si la reducción de  $\mathbf{S}$  es rápida, un valor más pequeño se puede utilizar, con lo que el algoritmo más cerca del algoritmo de Gauss-Newton, mientras que si la iteración da una reducción insuficiente en el residual,  $\lambda$  se puede aumentar, dando un paso más cerca a la dirección de descenso de gradiente. Tenga en cuenta que el gradiente de  $\mathbf{S}$  con respecto a  $\beta = -2(\mathbf{J}^T [\mathbf{y}-\mathbf{f}(\beta)])^T$ . Por lo tanto, para valores grandes de  $\lambda$ , el paso será tomar aproximadamente en la dirección del gradiente Si bien la longitud del. paso calculado,  $\delta$ , o la reducción de la suma de cuadrados a partir del vector de parámetros último,  $\beta+\delta$ , caen por debajo de los límites predefinidos, paradas de iteración y el vector de parámetros último,  $\beta$ , se considera que es la solución. ALM tiene la desventaja de que si el valor de factor de amortiguamiento,  $\lambda$ , es grande, invirtiendo  $\mathbf{J}^T\mathbf{J}+\lambda\mathbf{I}$  no se utiliza en absoluto. Marquardt proporcionado la idea de que se puede escalar cada componente del gradiente de acuerdo con la curvatura de manera que hay un movimiento más grande a lo largo de las direcciones donde el gradiente es más pequeño Esto evita una lenta convergencia en la dirección del gradiente. Por lo tanto, Marquardt [58] sustituyen la matriz de identidad,  $\mathbf{I}$  que, con la diagonal de  $\mathbf{J}^T\mathbf{J}$ , lo que resulta en el algoritmo de Levenberg-Marquardt:

$$(\mathbf{J}^T\mathbf{J} + \lambda\text{diag}(\mathbf{J}^T\mathbf{J}))\delta = \mathbf{J}^T[\mathbf{y} - \mathbf{f}(\beta)] \quad (5.17)$$

## 5.6.2 Aplicación del Algoritmo de Levenberg-Marquard (ALM) a resultados de la simulación

En base a la información de la simulación, se concentró en una matriz de [3 X 10,100] datos, estos se usarón para la preparación de la red neuronal con la aplicación del ALM, se usaron los siguientes porcentajes, para el entrenamiento fue de 50/100, el de la de validación de 25/100 (estos se utilizan para medir la generalización de red), el de la prueba 25/100 (cuando se detiene la generalización). ALM de regresión es eficaz para el siguiente ángulo de predicción, según los datos adquiridos en el entrenamiento, puede verificar que los valores pronosticados se ajustan a los valores reales con 2% de error como podemos observar en la Figura 5.5 de [60]). La red se ajusta de acuerdo al error, esta herramienta de software inteligente que ya se entreno para adquirir las constantes de los componentes dentro del escenario, con base en la información previa podra decidir cuál es el mejor ángulo para la próxima exploración [32].

Una vez que la red neuronal fue entrenada se capturaron los siguientes datos para que la red predijera según los datos aprendidos en el entrenamiento la Tabla 5.6 nos muestra la informacion capturada y los resultados predichos.

Tabla 5.5: Información para predecir y resultados [6]

Variables	1	2	3	4
No. de obstáculos	24	25	26	27
Tiempo de escaneo	0.02	0.02	0.02	0.02
No. de puntos detectados	18	19	20	22
No. de escenario	106	106	106	106
Datos arrojados por la RN	8.2269°	8.2101°	8.1851°	8.1046°

Los ángulos predichos por la red neuronal se pueden utilizar en el control inteligente para que el PL cambie de velocidad en la aplicación propuesta del diseño de TME, para apuntar de exploración escena desconocida cuando el sistema de control sabrá primario de acuerdo con escena real escanear los lugares provisionales de obstáculos, y elegir el ángulo óptimo de los resultados del entrenamiento de la Red Neuronal para obtener la mayoría de los escáneres de resolución sólo en pequeños sectores de interés dentro del marco de toda la escena.

### 5.7 Análisis de resultados de los procedimientos aplicados

Para analizar toda la información obtenida se estructura la Tabla 5.6, en la primera fila se analizó con 31 simulaciones presentadas en [31], y de los puntos 2-6 se usó la información de la segunda simulación con 101

escenarios, la información presentada se analizó basándose en diferentes criterios de estimación.

Tabla 5.6 Comparación de los ángulos obtenidos.

Método	1 <sup>er</sup> ángulo	2 <sup>do</sup> ángulo	3 <sup>er</sup> ángulo
1.- Método gráfico 31 experimentos	3.75°	8.25°	14.1°
2.- Método gráfico 101 experimentos	3.6545°	8.6°	14.5636°
3.- Regresión Curvilínea	-5.88°	-	-
4.- Parámetro "Z"	5.5455°	9.7636°	14.5636°
5.- Interpolación del parámetro "Z"	0.8909°	10.7812°	11.3636°
6.- Aplicación de la RN	-	8.1046°	-
	-	8.1851°	-
	-	8.2101°	-
	-	8.2269°	-

Por lo tanto, en el supuesto de toda consideración anterior, en el punto de vista de la optimización de la velocidad de exploración se puede concluir lo siguiente. En todos los valores posibles de paso de exploración hay valores de ángulo donde la velocidad de exploración aumenta continuamente, pero la cantidad de información acerca del obstáculo está cambiando con nivel discreto. Estos ángulos son ángulos alrededor de 0.8909° a 5.5455° para la segunda columna de la Tabla 5.6, de 8.1046° a 10.7812° ver columna 3 de la Tabla 5.6 y de 11.3636° a 14.5636° ver columna 4 de la Tabla 5.6. Esto significa que el siguiente ángulo más grande alrededor de 14° nos permite

analizar el escenario lo más rápido posible según las 10,100 simulaciones previas no se pierde ningún obstáculo dentro del escenario simulado; los ángulos mayores a este valor no detectan algunos obstáculos.

Por lo tanto, en el supuesto de toda consideración anterior, en el punto de vista de la optimización de la velocidad de exploración se puede concluir lo siguiente. En todos los valores posibles de paso de exploración hay tres valores de ángulo donde la velocidad de exploración aumenta continuamente, pero la cantidad de información acerca del obstáculo está cambiando con nivel discreto. Estos ángulos son ángulos alrededor de  $0.8909^\circ$  a  $5.5455^\circ$  (ver columna 2 de la Tabla 5.6), de  $8.1046^\circ$  a  $10.7812^\circ$  (ver columna 3 de la Tabla 5.6) y de  $11.3636^\circ$  a  $14.5636^\circ$  (ver columna 4 de la Tabla 5.6). Esta situación es muy conveniente para nosotros en esta tarea en particular. Prácticamente, esto significa que el siguiente ángulo más grande (alrededor de  $14^\circ$ ) nos permite analizar algún escenario lo más rápido posible. Este es el ángulo que según todas las 10,100 simulaciones previas no se pierde ningún obstáculo dentro del escenario simulado; los ángulos mayores a este valor no detectan algunos obstáculos. El siguiente ángulo seleccionado de  $8.6^\circ$  es apropiado para la digitalización rápida, la Tabla 5.7 nos muestra los datos analizados. El ángulo de alrededor del  $8.6^\circ$  parece ser el mejor candidato para una exploración óptima,  $8.6^\circ$  nos da 9.47 veces más rápido que  $0.8909^\circ$  pero 1.72 veces menos que  $14.5636^\circ$ . Pero al mismo tiempo sigue siendo 2.33 veces más rápido que  $3.65454^\circ$ , pero más lento 1.11 veces que  $9.7636^\circ$ , véase la

Tabla 5.7 para la comparación de los ángulos. Así, la exploración con tal valor de paso debe ser condicionalmente óptima bajo el análisis "velocidad contra resolución" (ver detalle en la Tabla 5.7).

Tabla 5.7 Comparación del ángulo de escaneo 8.6.

<b>Ángulo de apertura</b>	<b>Puntos detectados</b>	<b>Tiempo de escaneo</b>	<b>Resolución</b>	<b>Conclusiones Comparando el ángulo 8.6°</b>
0.8909°	84	0.18	Alta	8.6° detectó 75 puntos menos que este, pero fue 9.47 veces más rápido.
3.6545°	21	0.044	Alta	8.6° detectó 12 puntos menos que este, pero fue 2.33 veces más rápido.
5.5455°	14	0.029	Mediana	8.6° detectó 5 puntos menos que este, pero fue 1.53 veces más rápido
9.7636°	8	0.017	Baja	8.6° detectó 1 punto más que este, pero fue 1.11 veces más lento.
14.5636°	5	0.019	Bajo	8.6° detectó 4 puntos más que este, pero fue 1.72 veces más lento.

El último valor extremo obtenido experimentalmente el ángulo de paso alrededor de 0.8909° a 5.5455° ofrece el escaneo lento, prácticamente sólo se aplica para la medición de coordenadas precisas en el borde del obstáculo bajo el más alto interés para la prevención de colisiones en la tarea de planificación de la trayectoria del robot.

Sin embargo, como una variación de los ángulos óptimos de valor obtenida por el análisis de datos manual, no es aceptable para el diseño final

TME. Por lo tanto, el siguiente paso es aplicar el formalismo matemático especial para rectificar estos valores de los ángulos. La herramienta adecuada en este caso, en nuestra opinión, es la utilización de analizadores de rectificación digital, los métodos de gradiente no lineal, por ejemplo.

Una serie de propuestas y comparaciones de seis procedimientos fueron desarrollados en este capítulo el cual se consolida como la pieza medular de la tesis en cuestión; el consumo de tiempo en este capítulo fue alrededor de 60% del tiempo total asignado para esta tesis; en este capítulo encontramos desarrollo de programas, bases de datos, simulaciones, aplicación de formalismos matemáticos, aplicación de herramientas básicas y complejas para cumplir con varios de los objetivos específicos que encontramos descritos dentro de la primera parte de esta tesis, debemos tomar en cuenta que sin el desarrollo de este capítulo fuera imposible seguir al siguiente paso que es la propuesta de la Transmisión-Micro-Electro-mecánica.

# Capítulo VI

## Propuesta de la Transmisión-Micro-Electromecánica

### 6.1 Transmisión de doble embrague

La Transmisión-Micro-Electromecánica (TME) tiene como objetivo el cambio en el valor del ángulo de barrido en el menor tiempo posible. Los componentes mecánicos del prototipo que se describe en [29, 31], podemos observarlos en la sección 2.2 de esta tesis; el diseño actual del SVT se representa en la Figura 2.3 y la propuesta del TME instalada en el SVT se muestra en la figura 6.1.

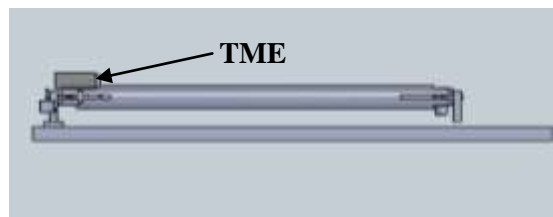


Figura 6.1 Grafica de la TME propuesta

En [60] se propuso un sistema electro-mecánico ideal, con ángulo de apertura variable como una Transmisión De Doble Embrague (TDDE). Dado que permiten la obtención de transferencia de par de un embrague a otro sin interrumpir la tracción, gracias al deslizamiento controlado de los engranes por medio de dos embragues, un embrague para las relaciones impares primarias

y un segundo embrague para la relaciones pares secundaria, con accionamiento eléctrico para ahorro de energía. Estos parámetros se aplican a los vehículos automotrices, se pretende usar el mismo principio para el PL.

Para la TDDE que se propuso en [54], el espacio disponible para reconstruirla es alrededor de 0.115 mts. de ancho y 0.03 mts. de alto, este espacio no es suficiente para el diseño propuesto, el mantenimiento de este tipo de propuesta de transmisión necesita lubricante para su funcionamiento y pueda reducir la fricción, TDDE necesita variar la velocidad en tres cambios de velocidad rigurosamente fijadas y una marcha atrás, ver Figura 6.2.

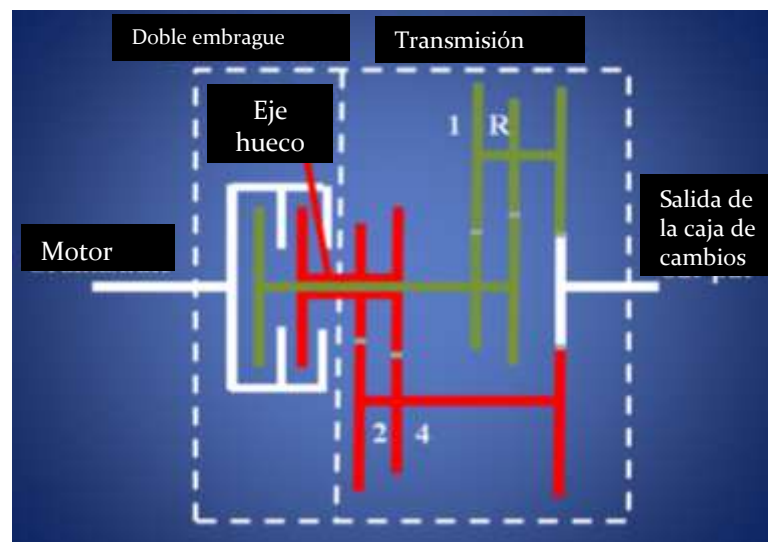


Figura 6.2 Propuesta de TDDE [5].

La TCV utiliza dos conos poleas que se ajustan a sus anchuras axiales simultáneamente en direcciones opuestas para cambiar la relación de transmisión, la relación deseada también tiene una infinidad de posibles



para adaptarlo a nuestras condiciones del caso que estudiamos en este documento, por ejemplo, el de cono doble del tipo de la TCV. Por lo general, la TCV trabaja con eslabones de la cadena, poleas, y el principio de dos conos con las mismas dimensiones, colocados con diámetros encontrados entre sí. El principio propuesto tiene infinidad de posibles relaciones entre dos límites. Para una solución económica, proponemos el diseño con un solo cono, este será para la TME de "Cono con seguidor", en este diseño llamaremos cono accionador y seguidor accionado, para referencia véase la Figura 6.4.

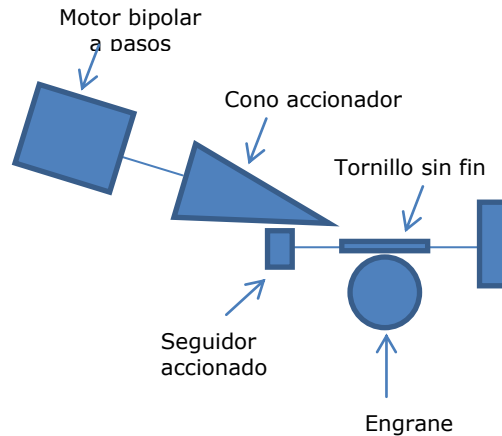


Figura 6.4 Propuesta de TME de "Cono con seguidor" [60]

La Figura 6.4 es la introducción y representación de componentes de la TME, en la Figura 6.5 podemos ver el modelo simplificado de la propuesta de la TME.

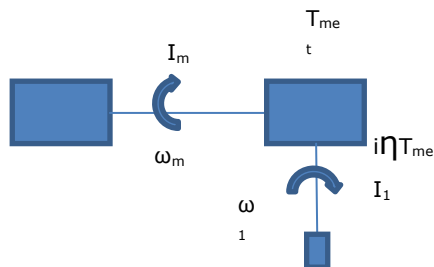


Figura 6.5 Modelo simplificado de la TME [6]

De la Figura 6.5 podemos obtener las ecuaciones dinámicas de la TME como sigue [22]:

$$I_m \omega_m + B_m \omega_m = T_m \quad (6.1)$$

$$I_1 \omega_1 + B_1 \omega_1 = i \eta T_{TEM} - T_1 \quad (6.2)$$

Donde  $I_m$  es la inercia rotacional equivalente de motor,  $I_1$  es la inercia rotacional equivalente de la polea activa de TME,  $\omega_m$  es la velocidad angular del motor,  $\omega_1$  es la velocidad angular de la polea activa de TME,  $B_m$ ,  $B_1$ , representan el equivalente coeficiente de amortiguación de cada eje, respectivamente;  $i$  es la relación de velocidad de TME y  $\eta$  es la eficiencia de la transmisión.  $T_m$  es el par de salida del motor;  $T_1$  es el par de salida de la unidad de rayo láser (par motor equivalente de todas las unidades de suma del sistema de posicionamiento láser) [44]:

$$T_1 = F_1 \omega r = r \left[ G + \left( m + \frac{\Sigma I_2}{r^2} + \frac{I_f i^2 \eta}{r^2} \right) \right] \quad (6.3)$$

En esta ecuación,  $r$  es el radio de la unidad de rayo láser;  $G$  es el peso de toda la suma de las unidades TME;  $S_i$  es la inercia de rotación de la unidad de rayo láser,  $m$  es la masa de las partes rotativas [44]. De acuerdo a nuestro diseño presentado en las Figuras 2.1 y 2.3, y las recomendaciones derivadas finalmente en este documento, el TME debe proporcionar los pasos de escaneo


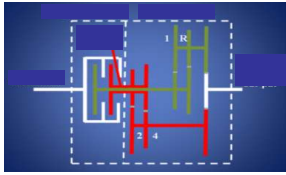
de ángulo variable al valor tan pronto como sea posible, y como se desprende de (6.12) y (6.13) no hay demasiadas opciones que le faciliten. La mayoría de los parámetros en (6.12) y (6.13) son constantes físicas, incluso  $\omega_m$  es la constante en nuestra propuesta debido al diseño más simple y fiable del SVT, y así, sólo la  $\omega_1$  es la única candidata bajo consideración para la función de control de la variable de programación. En nuestra opinión, esta es otra pequeña ventaja de nuestra propuesta: los controles más simples siempre son más robustos. De hecho, se propone programar los cambios de procesador del sistema de la posición de la polea activa (véase la Figura 6.5) para satisfacer la condición de que el valor numérico de la relación de  $\omega_1$  controlada y constante  $\omega_m$  Además es importante tener en cuenta que prácticamente recibió bordes difusos de intervalos de estos tres ángulos ( $0.8909^\circ$  a  $5.5455^\circ$ ,  $8.25^\circ$  a  $9.76^\circ$  y  $11.3636^\circ$  a  $14.6^\circ$ ) en la forma más sencilla se procedió a ofrecer la TCV debido a su naturaleza de valor continuo de su relación de transmisión.

### 6.3 Análisis comparativo de TDDE y TCV

Un tema de análisis muy importante para la propuesta de la TME es lo siguiente, analizaremos la Transmisión Continuamente Variable (TCV) contra TDDE en la Tabla 6.1 podemos concluir que para el SVT la aplicación de la TCV es la mejor opción, como diseño, por que el consumo de energía es menor, tiene un bajo mantenimiento, menor peso, la reducción en la fricción, la

TCV es mejor que la TDDE ya que evita saltos durante el cambio de velocidad como veremos en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Comparación entre TDDE y TCV [6].

TCV	TDDE
	
Diseño sencillo	Diseño complicado
Mantenimiento preventivo	Mantenimiento preventivo, predictivo, correctivo
Lubricación sencilla	Lubricación detallada
Infinidad de ángulos de paso entre dos límites	Solo tres ángulos de pso
Uso de materiales de fabricación especiales	Uso de materiales estándar localizados en el mercado
Respuesta del sistema lenta	Respuesta del sistema rápida
Diseño único	Diseño existente para aplicaciones mecánicas
Difícil de automatizar	Sencilla de automatizar
Modelo matemático sencillo	Modelo matemático con mas dificultad
Mayor ahorro en tiempo	Menor ahorro en tiempo
Menor uso de energía	Mayor uso de energía
Mayor peso	
Menor movimiento durante el cambio de velocidad	Mayor movimiento durante el cambio de velocidad
Para evitar la fricción en este tipo de transmisión de su necesidad presión hidráulica [61].	Influencia de contacto de la zona entre los eslabones de la cadena en la capacidad de par y rendimiento dinámico [12]

Sin embargo, en la investigación según [54] podemos observar que los ángulos óptimos de exploración no deben ser fijos, y que varía un poco según el criterio que se presenta en diferentes escenarios, la TDDE permite

debido a su diseño sólo la relación de transmisión fija, con tres ángulos de apertura especificados, por lo que se debe a aplicar otro principio que permita la variación infinita de ángulos entre dos límites. En comparación con nuestro primer diseño de TME presentado en [54] observamos que el diseño es especialmente para tres ángulos de exploración fijas lo cual conlleva a realizar tres relaciones de transmisión diferentes, para que supuestamente sean los ángulos encontrados en la simulación, que no fue este el caso.

#### 6.4 Modelo dinámico y cinemático del diseño de la TME

Derivando de la Figura 6.3 podemos apreciar el modelo matemático definido, con el objetivo de establecer las ecuaciones que describan el comportamiento dinámico y cinemático de los componentes teniendo en cuenta las posibles configuraciones que pueden pasar [62].

Para definir la relación de transmisión convencionalmente:

$$\tau = \frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} \quad (6.4)$$

Donde:  $\omega_{in}$  es la velocidad angular de entrada,  $\omega_{out}$  es la velocidad angular de salida.

Las relaciones de transmisión entre los dos ejes y el emisor de  $S_1$  y  $S_2$  [61]

son:

$$\tau_{e1} = \frac{\omega_{s1}}{\omega_e} \quad (6.5)$$

$$\tau_{e2} = \frac{\omega_{s2}}{\omega_e} \quad (6.6)$$

Donde:  $\tau_{e1}$  es la transmisión del emisor con el eje  $S_1$  y  $\tau_{e2}$  es la transmisión con el eje  $S_2$ ;  $\omega_{s1}$  es la velocidad angular del eje  $S_1$ ,  $\omega_{s2}$  es la velocidad angular del eje  $S_2$ ,  $\omega_e$  es la velocidad angular del emisor.

Por lo tanto, las relaciones entre las velocidades de los ejes secundarios será:

$$\frac{\omega_{s2}}{\omega_e} = \frac{\tau_{e1}}{\tau_{e2}} \quad (6.7)$$

Donde:  $\tau_{e1}$  es la transmisión de relación del emisor con el eje  $S_1$  y  $\tau_{e2}$  es la transmisión del emisor con el eje  $S_2$ ,  $\omega_{s2}$  es la velocidad angular del eje  $S_2$ ,  $\omega_e$  es la velocidad angular del emisor.

El eje de marcha atrás (RS) velocidad puede ser calculada conociendo la velocidad del eje de  $P_1$  y la relación de transmisión:

$$\tau_{R1} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (6.8)$$

Donde:  $\tau_{R1}$  es la transmisión de relación del eje de reversa,  $Z_2$  número de dientes del engrane,  $Z_3$  número de dientes del engrane 3.

Y en consecuencia:

$$\tau_{P1,R} = \frac{Z_2 \cdot Z_4}{Z_1} \quad (6.9)$$

Si **R** esta engranado

Donde:  $\tau_{P1}$  es la transmisión de relación del eje primario,  $\tau_{R1}$  es la transmisión del eje de reversa,  $Z_1$  número de dientes del engrane 1,  $Z_2$  número de dientes del engrane 2,  $Z_4$  número de dientes del engrane 4.

Definiendo los momentos de inercia  $J_{P1}$ ,  $J_{P2}$ ,  $J_{S1}$ ,  $J_{S2}$ , representan, respectivamente, los momentos equivalentes en  $P_1$  interior del eje principal,  $P_2$  exterior eje principal,  $S_1$ ,  $S_2$  los ejes secundarios [61]:

$$J_{P1} = J_{C1} + J_{S1P1} + J_7 + J_8 + J_{10} \left( \frac{Z_7}{Z_{10}} \right)^2 + J_{11} \left( \frac{Z_8}{Z_{11}} \right)^2 + \left[ J_3 \left( \frac{Z_1}{Z_3} \right)^2 + J_{S1RS} + J_1 \right] + Z_6^2 \quad (6.10)$$

$$J_{P2} = J_{C2} + J_{S1P2} + J_3 + J_4 + J_5 \left( \frac{Z_3}{Z_8} \right)^2 + J_6 \left( \frac{Z_4}{Z_6} \right)^2 + J_1 \left( \frac{Z_4}{Z_1} \right)^2 \quad (6.11)$$

$$J_{S1} = J_{S,S1} + J_9 + J_{Sy,I,III} + J_{Sy,II,R} \quad (6.12)$$

$$J_{S2} = J_{S,S2} + J_2 + J_{Sy,II} \quad (6.13)$$

## 6.5 Análisis de la TME por medio de la ecuación de la energía

Donde: **J** son los momentos de inercia, **C** es subíndice relativo al embrague, **Z<sub>g</sub>** número de dientes del engrane **g**. [61]:

$$P_{x,y} = \frac{Sv}{\eta m} \left\{ \sum mg \left[ C_R + \frac{s}{100} + \frac{a}{g} (1 + m_w) \right] + 0.5 C_D A_\rho (C_v + C_w)^2 \right\} \quad (6.14)$$

$$P_z = \frac{Sv}{\eta m} \left\{ \sum mg \left[ C_R + \frac{s}{100} + \frac{a}{g} (1 + m_w) \right] + 0.5 C_D A_\rho (C_v + C_w)^2 \right\} \quad (6.15)$$

Donde: **P<sub>x,y</sub>** es la potencia de salida de la transmisión (W) para los ejes "y" y "x", **P<sub>z</sub>** es la potencia de salida de la transmisión (W) para el eje "z", **S<sub>v</sub>** es la velocidad de escaneo (m/s), **a** es la aceleración de barrido (m/s<sup>2</sup>), **s** es el gradiente de la tierra (°), **m<sub>w</sub>** es la masa de las partes giratorias (kg), **A<sub>ρ</sub>** es el área del sistema frente a la densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>), **C<sub>v</sub>** la velocidad del viento (m/s), **C<sub>D</sub>** es el coeficiente de resistencia al aire dinámico, **C<sub>R</sub>** es el coeficiente de resistencia a la rodadura, **ηm** es el coeficiente de eficiencia

## 6.6 Propuesta del control de la TME

Existen gran cantidad de sistemas automatizados sin embargo, sufren una falta grave de automatización general, con las consiguientes repercusiones en la producción y disponibilidad de fabricación de prototipos.

Esta carencia de funcionamiento automático es debida a diversas circunstancias, pero cabe agrupar bajo un solo concepto el de la complejidad.

La producción de prototipos son complejos en tres sentidos 1. Cantidad de elementos que comprenden el sistema, 2. Conjunto entre dichos elementos, 3. Incomprensión de la interacción entre los elementos, estos aspectos hacen más difícil la implementación de sistemas de control, la complejidad se incrementa cuando solo aplicamos el control clásico y sus técnicas, que son las únicas que se emplean en el diseño de prototipos

Como por ejemplo en [63] podemos ver que el control inteligente comprende una serie de técnicas tomadas fundamentalmente de la inteligencia artificial con las que se pretenden resolver problemas de control inabordables por los métodos clásico.

El control clásico consta esencialmente de tratamiento de información en un nivel numérico y actuación sobre el mundo, no apareciendo en el

actividades cognitivas de alto nivel de abstracción. El termino control inteligente se utiliza para hacer referencia a un control en el que las actividades cognitivas tienen especial importancia. Dentro de este tipo de problemas son importantes los derivados de los comportamientos impredecibles como los ocasionados por un mal funcionamiento de los sistemas a controlar.

En la Figura 6.6 se presenta un preámbulo del sistema de control para la TME:

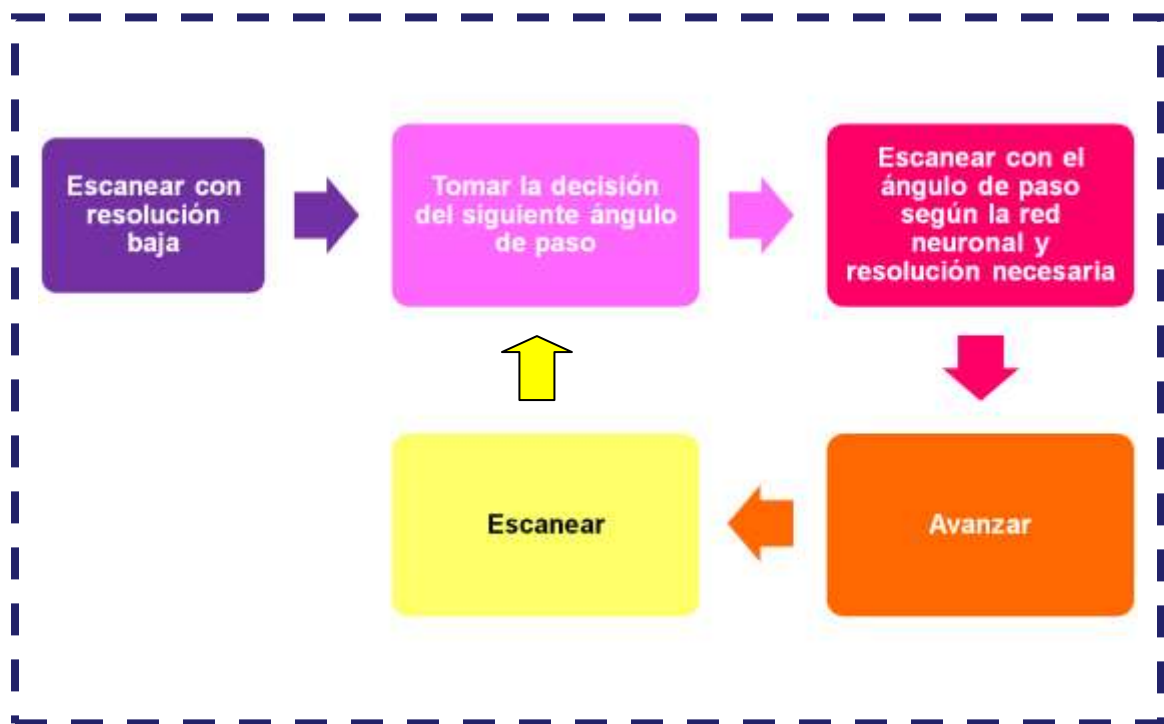


Figura 6.6 Unidad de control del SVT

La Figura 6.7 nos muestra la unidad de control simplificada para una mejor comprensión.

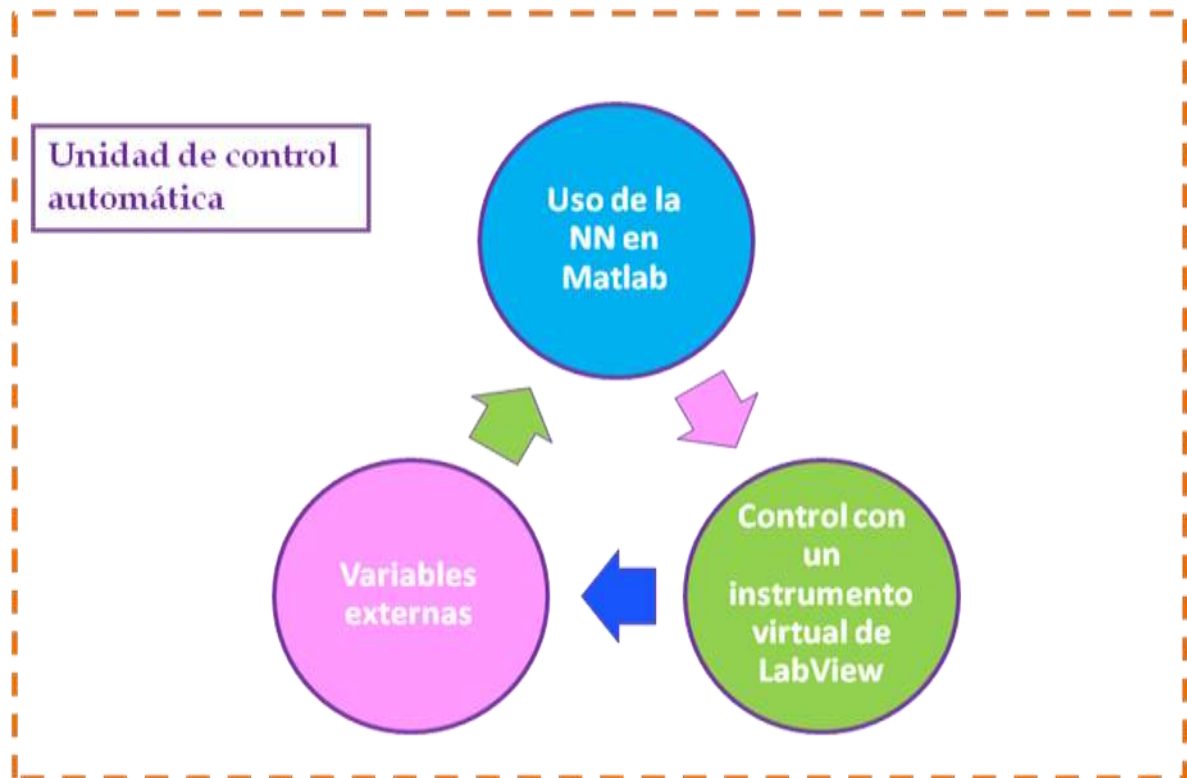


Figura 6.7 Unidad de control simplificada

En el desarrollo de este capítulo pudimos hacer uso de herramientas mecatrónicas y la puntualización de dos diferentes transmisiones mecánicas que pueden ser aplicables a este proyecto, como lo son la TDDE y la TCV, basandonos en los datos de los capítulos anteriores, y así poder concluir con la presentación de dos propuestas de diseño que comparamos en la sección 6.3 y en base a todo lo antes mencionando se tomó una decisión en la selección de una TME, estableciendo los modelos dinámico y cinemático aunados a la aplicación de la ecuación de la energía al diseño de la TME, concluyendo con el modelo matemático para la TME y así poder concluir nuestra investigación en el siguiente capítulo.

# Capítulo VII

## Conclusiones y recomendaciones

Puntualizando lo expuesto anteriormente: las aplicaciones espaciales dan un despunte a la industria aeroespacial en nuestro país, trayendo beneficios a los ámbitos científico y social ya que a nuestro punto de vista este sector tiene potencial; la simulación es una ventaja ante el costo de producción de prototipos funcionales aunque también es una de las etapas previas a la fabricación de los mismos ya que para evitar inversiones fuertes viene la etapa de la simulación. Al obtener los datos finales de simulación nos propusimos una serie de hipótesis donde nuestro objetivo general era encontrar los ángulos óptimos para usarlos en el diseño de la TME, la comprobación de la hipótesis presentada en la sección 5.5 no fue la esperada ya que al aplicar una Red Neuronal pensamos que nos daría los ángulos óptimos y el descubrimiento fue que usando esta red entrenada con nuestros datos podemos usarla para el control inteligente de nuestra TME por supuesto que el STV se tendrá que mejorar para poder aplicar lo descubierto en la comprobación de la hipótesis presentada en la sección 5.5 claro que sabemos que la navegación robótica es una tarea compleja, y como cualquier fenómeno complejo tiene su estructura grande y con varias ramas. En la mayoría de las aplicaciones robóticas es necesario tener sistemas para la navegación con varias opciones disponibles. La navegación de robots, específicamente en condiciones completamente desconocidas una de las

mejores soluciones es el SVT que aplica: escaneo tridimensional, láser para ubicación y mapeo de obstáculos en tiempo real y con calidad metrológica en coordenadas obtenidas. Esta investigación presenta la oportunidad de mejora en la velocidad lenta de escaneo ya que detecto los intervalos de ángulos óptimos en los que podemos variar la TCV, usando estos datos en el diseño original de la transmisión que representa la mejora final al problema.

Sumando todo lo dicho anteriormente, se puede concluir lo siguiente. La navegación de robot es una tarea significativamente compleja, y como cualquier fenómeno complejo tiene su estructura grande y con varias ramas. Por ejemplo, los robots más sencillos que trabajan siempre en una misma área haciendo pocas operaciones típicas pueden navegar de la manera fácil: con sensores ópticos que detectan una línea blanca (como trayectoria predeterminada) y los distanciometros sencillos para parar el robot en caso de aparecerse un obstáculo. Aunque hay muy pocas clases de tareas prácticas que requieren nada más eso. En la mayoría de las aplicaciones es necesario tener sistemas para la navegación con mucho más opciones disponibles. La navegación de robot, específicamente en las condiciones completamente desconocidas una de las mejores soluciones es el Sistema Técnico de Visión que aplica escaneo tridimensional laser para ubicación y mapeo de obstáculos que aparecen en tiempo real y con calidad metrológica de coordenadas obtenidas.

Su desventaja principal – relativamente es la velocidad lenta de barrido – se puede modificar a través del uso del concepto de “paso variable combinado”. El presente trabajo resolvió completamente este problema. Están detectados los

valores óptimos de paso de barrido y los resultados obtenidos fueron utilizados en diseño original de transmisión, que representa la solución final técnica del problema.

## Aportaciones realizadas directamente a nuestra disciplina

Este sistema aborda el diseño y la implementación de un activo escáner láser 3D triangulación. La contribución de este papel y el campo científico del sistema propuesto son en el uso de un de bajo coste y método simple para construir un láser y de gran angular sistema de sensor que se utiliza para la navegación de robots móviles en entornos desconocidos [64]. El punto más importante en este caso es momento de la exploración. En otras palabras, el obstáculo debe ser detectada en el intervalo de tiempo más corto posible, pero precisas coordinar las mediciones no son necesarias para todas las formas de obstáculos, pero sólo para su borde más cercano a la trayectoria segura deseada del robot (ver [64, 35, 36]). Es evidente que esto es posible sólo bajo la condición de que el láser puede escanear robot del campo de visión con una velocidad variable.

### **Revistas especializadas con arbitraje**

- 1 X.M. Garcia-Cruz, et. al., Optimization of laser scanning speed by use of combined variable step, Optics and Lasers in Engineering, Agosto de 2013, ISSN: 0143-8166
2. L.C. Basaca, O.Y. Sergiyenko, J.C. Rodriguez-Quiñonez, X.M Garcia-Cruz, Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot, Optics and Lasers in Engineering, Agosto de 2013, ISSN: 0143-8166
3. X.M. Garcia-Cruz, et. al., Neural network application for directing Technical Vision System on scanning angles for a gearbox on robot navigation, Mechatronics Elsevier, bajo revision.
4. X.M. Garcia-Cruz, et.- al., Transmisión electromecánica con visión artificial en navegación de un robot, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial Elsevier, bajo revision.

### **Artículos publicados en extenso en memorias de congresos nacionales e internacionales, con arbitraje**

1. X.M. Garcia-Cruz et. al., Optimization of laser TVS for robot navigation using combined scanning, with variable step, Reunion de otoño, IEEE sección México, - ROC&C 2011 IEEE, Acapulco Guerrero México, 27 de Noviembre al 3 de Diciembre de 2011, CP-34, ISBN: 978-607-95630-1-1.
2. X.M. Garcia-Cruz et. al., Intelligent feedback for robot navigation using NN-methods for electromechanical transmission control, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences 2013 ICCES'13 Seattle, USA, May 24 - 28, 2013, [http://www.icces.org/icces13/icces13\\_tp.pdf](http://www.icces.org/icces13/icces13_tp.pdf).
3. X.M. Garcia-Cruz et. al., Fast Obstacle Detection by Variable Step of 3D Laser Scanning

for Robot Navigation on Unknown Planet, Journal of Applied Mechanical Engineering, Septiembre 30 – Octubre 02 de 2013, San Antonio Texas, USA, OMICS Group, ISSN: 2168-9873, doi: 10.4172/2168-9873.1000124

4. M. Molina, F. Murrieta, O. Sergiyenko, V. Pentranovskii, D. Henrandez, Tysa, Rivas, X.M Garcia-Cruz. D. Journal aeronaut Aerospace Eng. 2013, 2:3, USA, OMICS Group, Volumen 2 Issue 3 1000111, ISSN: 2168-9792, <http://dx.doi.org/10.4172/2168-9792.1000111>

5. X.M. Garcia-Cruz, Aplicación de una red neuronal para el barrido selectivo del Sistema Técnico de Visión en aplicación aeroespacial, ESCALA 2013.

## Referencias

- [1] Andersen, J. C., Blas M. R., Ravn, O., Andersen, N.A., Blanke, M., 2006. Traversable terrain classification for outdoor or autonomous robots using single 2D laser scans. *Integrated Computer-Aided Engineering* 13, No. 3:223-232. ISSN: 1069259
- [2] A. Abba, F. Caponio, A. Geraci, G. Ripamontii, Non-linear least-squares in fpga devices for digital spectroscopy, *Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC)*, Orlando, 2009, pp. 563-568.
- [3] Lerch, T.; MacGillivray, M.; Domina, T. (2007). *3D Laser Scanning: A Model of multidisciplinary research*, *Journal of Textil and Apparel, Technology and Management*, Vol. 5, No. 4 (October 2007) pp 1-21, ISSN: 1533-0915.
- [4] D.L. MacFarlane, W.Y. Kim, J.S. Nilvi, T. Nuth, V. Tan "Novel two-dimensional laser scanning technique", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 17, Issue 1, 1992, pp. 1–8.
- [5] Basu, Anup, and Sergio Licardie. "Modeling fish-eye lenses". *Intelligent Robots and Systems'93, IROS'93. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on*. Vol. 3. IEEE, 1993.
- [6] Zhu, Z, 1997. *Environment Modeling for Visual Navigation*, PhD. Dissertation, Tsinghua University, May 1997, A revised version with title " Full view spatio-temporal visual navigation-imaging, modeling and representation of real scenes" will be published by China Higher Education Press, 2001.

- [7] Zhu Z, Xu G., Lin X., 1999. Panoramic EPI generation and analysis of video from moving platform with vibration, Proc. IEEE CVPR'99 pp. 531-537.
- [8] Zhu, Zhigang. "Omnidirectional stereo vision." Proceedings of the workshop on Omnidirectional Vision, Buda Basu, Anup, and Sergio Licardie. "Modeling fish-eye lenses". Intelligent Robots and Systems'93, IROS'93. Proceedings of the workshop on Omnidirectional Vision, Budapest, Hungary. 2001.
- [9] Christiano Couto Gava<sup>1</sup>, Raquel Frizera Vassallo, Flavio Roberti and Ricardo Carelli<sup>2</sup> Catadioptric Omni-directional Stereo Vision and Its Applications in Moving Objects Detection Chapter 5 pp.71-98 ISBN 978-953-7619-21-3
- [10] A. Isheil, J.-P. Gonnet, D. Joannic, J.-F. Fontaine "Systematic error correction of a 3D laser scanning measurement device", Optics and Lasers in Engineering; Vol. 49, Issue 1, January 2011, pp. 16–24.
- [11] Sandro Barone, Alessandro Paoli, Armando Viviano Razionale, "Shape measurement by a multi-view methodology based on the remote tracking of a 3D optical scanner", Optics and Lasers in Engineering, vol. 50, Issue 3, March 2012, pp. 380–390.
- [12] Srivastava, Nilabh, and Imtiaz Haque. "A review on belt and chain continuously variable transmissions (CVT): Dynamics and control." Mechanism and machine theory 44.1 (2009): 19-41.
- [13] Tan, K. P., et al. "Model validation of the output reciprocating dynamic responses of a twin electro-rheological (ER) clutch mechanism." Mechanism and Machine Theory 42.11 (2007): 1547-1562.

- [14] D.L. MacFarlane, W.Y. Kim, J.S. Nilvi, T. Nuth, V. Tan "Novel two-dimensional laser scanning technique", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 17, Issue 1, 1992, pp. 1–8.
- [15] Basu, Anup, and Sergio Licardie. "Modeling fish-eye lenses". Intelligent Robots and Systems'93, IROS'93. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on. Vol. 3. IEEE, 1993.
- [16] Han, Sang-Soo, Seung-Bok Choi, and Chae-Cheon Cheong. "Position control of  $X$ - $Y$  table mechanism using electro-rheological clutches." *Mechanism and machine theory* 35.11 (2000): 1563-1577.
- [17] White, G. "Multiple-stage, split-power transmissions." *Journal of Mechanisms* 5.4 (1971): 505-520.
- [18] Dasgupta, K., J. Watton, and S. Pan. "Open-loop dynamic performance of a servo-valve controlled motor transmission system with pump loading using steady-state characteristics." *Mechanism and Machine Theory* 41.3 (2006): 262-282.
- [19] Oh, Jiwon J., Seibum B. Choi, and Jinsung Kim. "Driveline modeling and estimation of individual clutch torque during gear shifts for dual clutch transmission." *Mechatronics* (2014).
- [20] Fu, Guoqiang, Arianna Menciassi, and Paolo Dario. "Development of a low-cost active 3D triangulation laser scanner for indoor navigation of miniature mobile robots", Robotics and Autonomous Systems, Vol. 60, Issue 10, October 2012, pp. 1317-1326.

[21] Oleg Sergiyenko et al. INTECH, 2011 Book title: "Optoelectronic Devices and Properties". Edited by Oleg Sergiyenko / Chapter XX "Electromechanical 3D optoelectronic scanners: resolution constraints and possible ways of its improvement". Authors: Oleg Sergiyenko, Vira Tyrsa, Luis Carlos Basaca Preciado, Julio Cesar Rodriguez Quinonez, Wilmar Hernandez, Juan Ivan Nieto Hipolito and Oleg Starostenko. Editorial: IN-TECH, Vienna, Austria, 2011. - 660 p. ISBN 978-953-307-204-3.

[22] Xiong Zhihui, Chen Wang and Zhang Maojun INTECH, 2008 Book title: "Computer Vision". Edited by Xiong Zhihui,/Chapter 26 " Catadioptric Omnidirectional Stereo Vision and Its Applications in Moving Objects Detection", pp 493-518 ISBN 978-953-7619-21-3

ISSN: 1069259

[23] Schmidt, Michael R. "Two-mode, split power, electro-mechanical transmission." U.S. Patent No. 5,577,973. 26 Nov. 1996.

[24] Prados, R., García, R., Neumann, L., 2013. Construcción automática de ortofotomapas: una aproximación fotométrica. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, Vol. 10, Issue 1, pp.104-115.

[25] Gil, A., Valiente, D., Reinoso, O., Marín, J.M., 2012. Creación de un modelo visual del entorno basado en imágenes omnidireccionales. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, Vol. 9, Issue 4, pp. 441-452.

[26] Sanahuja, G., Valera, A., Sánchez, A.J., Ricolfe-Viala. C., Valles, M., Marín, L., 2011. Control embebido de robots móviles con recursos limitados basados en

flujo óptico. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, Vol. 8, Issue 3, pp. 250-257.

[27] Richards, Elmer A. *Automatic mechanical transmission system*. U.S. Patent No RE32,591, 9 Feb. 1988.

[28] Valdenaire, Jean. "Automatic continuously variable positive mechanical transmission with adjustable centrifugal eccentric weights and method for actuating same." U.S. Patent No. 5,967,933. 19 Oct. 1999.

[29] Lerch, T.; MacGillivray, M.; Domina, T. (2007). 3D Laser Scanning: A Model of multidisciplinary research, *Journal of Textil and Apparel, Technology and Management*, Vol. 5, No. 4 (October 2007) pp 1-21, ISSN: 1533-0915.

[30] Oleg Y. Sergiyenko, Vera V. Tyrsa, et al. Dynamic Laser Scanning Method for Mobile Robot Navigation, proceedings of ICCAS-SICE 2009, ICROS-SICE International Joint Conference, Fukuoka, Japan, August 18-21, 2009, pp. 4884-4889, ISBN: 978-4-907764-33-3.

[31] O. Sergiyenko, V. Tyrsa, D. Hernandez-Balbuena, M. Rivas-Lopez, I. Rendon-Lopez, L. Devia-Cruz, 2008 Precise Optical Scanning for practical multiapplications. Proceedings of IEEE 34th Annual IEEE Conference IECON'08, Florida, USA, pp. 1656-1661.

[32] O. Sergiyenko, 2010. Optoelectronic system for mobile robot navigation. Springer/Allerton Press, Inc., Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, Vol. 46, No. 5, pp. 414-428- ISSN 8756-6990

[33] M. Rivas, M., O. Sergiyenko, M. Aguirre, L. Devia, V. Tyrsa, V., I. Rendón, 2008. Spatial data acquisition by laser scanning for robot or SHM task. IEEE-IES

Proceedings "International Symposium on Industrial Electronics"(ISIE-2008), Cambridge, United Kingdom, 30 of June -2 of July, 2008, pp.1458-1463.

[34] M. Rivas, O. Sergiyenko, V. Tyrsa, 2008. Editor Xiong Zhihui, Computer vision, Editorial: I-TECH, Vienna, Austria, Ch. 22, pp. 395-428., ISBN 978-953-7619-21-3.

[35] L.C. Básaca, J. C., Rodríguez, O.,Sergiyenko, V., Tyrsa, 2010. 3D Laser Scanning Vision System for Autonomous Robot Navigation, Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE-2010), Bari, Italy, July 4-7, 2010, pp.1773-1779, ISBN 978-1-4244-6391-6/10.

[36] L. C.; Basaca, J.; Rodríguez, O.Yu.;Sergiyenko, V.V Tyrsa.; D, Hernandez.; J.I.N.; Hipólito, O. Startostenko 2010 Resolution improvement of dynamic triangulation method for 3D vision system in robot navigation task. IECON 2010-36<sup>th</sup> Annual Conference on IEEE Industrial Electronics 10.1109/IECON.20105675082, pp.2886-2891.

[37] Davis, Alan R., and John R. Vandervoort. "Mechanical transmission and control method therefor." U.S. Patent No. 4,788,889. 6 Dec. 1988.

[38] Stainton, John E. "Method for upshifting a compound semi-blocked splitter type automatic mechanical transmission." U.S. Patent No. 5,042,327. 27 Aug. 1991.

[39] Bates, Ian RJ, Michael Daly, and Paul M. Fowler. "Semi-automatic mechanical transmission with forced automatic shifting." U.S. Patent No. 5,592,851. 14 Jan. 1997.

- [40] Bartelmus, W.; Zimroz, R. A new feature for monitoring the condition of gearboxes in non-stationary operating conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, vol. 23, no 5, p. 1528-1534.
- [41] Worden, K.; Staszewski, W. J. Impact location and quantification on a composite panel using neural networks and a genetic algorithm. *Strain*, 2000, vol. 36, no 2, p. 61-68.
- [42] Srivastava, Nilabh, Haque, I. "Clearance and friction-induced dynamics of chain CVT drives." *Multibody System Dynamics* 19.3 (2008): 255-280.
- [43] Wilamowski, B. M., Yu, H., Improved computation for Levenberg-Marquardt training, *IEEE Transactions on Neural Networks* 21 (6) (2010) pp. 930-937.
- [44] Zhou, M., et al. 2008 Modeling and performance simulation of transmission system for car equipped with metal pushing V-belt type CVT." *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2008. VPPC'08. IEEE.
- [45] Thorpe, Charles, and Takeo Kanade. *Vision and navigation*. Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [46] Powers, Edward J., Doug Gray, and Richard C. Green. *Artificial Vision: Image Description, Recognition, and Communication*. Eds. Stefano Levialdi, Virginio Cantoni, and Vito Roberto. Academic Press, 1996.
- [47] RJ Overy 1980 - Oxford Univ Press *The Air War*. Papermac, Macmillan, 1980.
- [48] Carlier, Claude. Marcel Dassault. La legend d'un siècle. France, Perrin, 2002.

- [49] Le Roy, Thierry. Les Bretons et l'aéronautique des origines à 1939. France, Presses Universitaires de Rennes (Histoire), 2002.
- [50] Llagué, Félix. Astronáutica soviética. Barcelona, Picazo, 1972
- [51] Tobin, James. To Conquer the Air. The Wright Brothers and the Great Race for flight. USA, Free Press, 2003.
- [52] Simons, David y Thomas Withington. Historia de la aviación. Desde los pioneros hasta la exploración del espacio. Barcelona, Parrangon Books, 2007
- [53] A.T. Kearney FDI Confidence Index, Washington, D.C., Kearney, January 23, 2012, 20 p.
- [54] X.M. Garcia-Cruz, et al., "Optimization of Laser TVS for robot navigation using combined scanning with variable step" in ROC&C'2011, Acapulco, Guerrero, Mexico, 2011, pp. CP-34, PON 57.
- [55] Stewart, J. (2011). Single variable calculus: early transcendentals. Brooks/Cole Publishing Company.
- [56] Básaca, L. C., Rodríguez, J. C., Sergiyenko, O., Tyrsa, V., 2010. 3D Laser Scanning Vision System for Autonomous Robot Navigation, Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE-2010), Bari, Italy, July 4-7, 2010, pp.1773-1779, ISBN 978-1-4244-6391-6/10.
- [57] Rodriguez, J.C.; Sergiyenko, O.; Tyrsa, V.V.; Basaca, L.C.; Hipolito, J.I.N.; 2011. Continuous monitoring of rehabilitation patients with scoliosis using automatic laser scanning. Health Care Exchanges (PAHCE), Pan American. 10.1109/PAHCE.2011.5871941, pp. 410-414.

- [58] Rodriguez-Quinonez, J. C., Sergiyenko, O., Gonzalez-Navarro, F., Basaca-Preciado, L.C., Tyrsa, V., "Surface recognition improvement in 3D medical laser scanner using Levenberg–Marquardt method", Elsevier, Signal Processing, Vol. 93, Issue 2, February 2013, pp. 378-386
- [59] Tadakuma, R., Tadakuma, K., Takagi, M., Onishi, S., Matsui, G., Ioka, K., ... & Kaneko, M. (2013, May). The gear mechanism with passive rollers: The input mechanism to drive the omnidirectional gear and worm gearing. In *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on* (pp. 1520-1527). IEEE.
- [60] Garcia-Cruz, X. M., Sergiyenko, O. Y., Tyrsa, V., Rivas-Lopez, M., Hernandez-Balbuena, D., Rodriguez-Quinonez, J. C. et al., (2013). Optimization of 3D laser scanning speed by use of combined variable step. *Optics and Lasers in Engineering*.
- [61] Kulkarni, M.; Shim, T. Zhang, Y. "Shift dynamics and control of dual-clutch transmissions" *Mechanism and Machine Theory*, 42 (2007), pp. 168–182.
- [62] Galvagno E., Velardocchia M. and Vigliani A. Dynamic kinematic model of a dual clutch transmission. *Mechanism and Machine Theory* 46 (2011) 794–805 Elsevier, C.so Duca degli Abruzzi, 24-10129 Torino, Italy
- [63] Galán, R., Jiménez, A., Sanz, R., & Martía, F. "Control Inteligente." *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial* 4.10 (2000): 43-48.
- [64] O. Yu. Sergiyenko. "Optoelectronic System for Mobile Robot Navigation". Springer/Allerton Press, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, Vol. 46. No. 5, October, 2010, pp. 414-428 ISSN 8756-6990



## Anexo 1 Programación general de la simulación

```
93 %Calculo de la posicion de emision del laser con respecto a la posicion del
94 %robot
95 - xoo=xo+do/2;
96 - yoo=yo;
97 %discretizacion del laser
98 - r=dx:dx:dL;
99 %Rango de barrido angular
100 - ang=tetmin:dtet:tetmax;
101 - numpun=length(ang);
102 %Tiempo de barrido en segundos;
103 - tievar=numpun*To;
104 - posiciones=[];
105 %Se generan las rectas discretas que modelan el laser, para cada angulo de
106 %paso
107 - for n=1:1:length(ang) %Barrido del angulo del laser
108     laser(:,n)=xoo+j*yoo+r'*exp(j*ang(n)*pi/180);
109 - for k=1:1:length(laser(:,1))
110     h=find(abs(obstaculo-laser(k,n))<dx/2); %indice de los elementos del obstaculo
111     %que estan mas cercanos a un punto dado del laser.
112     if ~isempty(h) %Si el numero de elemento es mayor a cero
113         dife=abs(obstaculo(h)-laser(k,n));%distancia del punto del laser a los puntos del obstaculo
114         %que distan de el menos que dr/2
115         m=find(dife==min(dife));%Busca la distancia menor
116         %punto en el obstaculo.
117         if length(m)==1
118             posiciones=[posiciones; k n h(m)];%Guada las posiciones del puento en el laser y del
119         else
120             posiciones=[posiciones; k n h(m(1))];%Guada las posiciones del puento en el laser y del
121         end
122     break;
123     %Para un trazo de laser dado, solo almacena la primera interseccion
124     %con un objeto, porque se asume que es la mas proxima dada la
```

## Anexo 2 Programación específica de los triángulos

```
1 function [obstaculo]=obstriangulo(P,delX)
2
3
4 xs=P(:,1); %Valores de X de los puntos que delimitan el triangulo
5 xs=sort(xs);%Ordenar de menor a mayor
6 for k=1:1:3
7     ks(k)=find(xs(k)==P(:,1));
8 end
9 xr1=P(ks(1),1):delX:P(ks(2),1);
10 yr1=(P(ks(1),2)-P(ks(2),2))/(P(ks(1),1)-P(ks(2),1))*(xr1-(P(ks(1),1)))+(P(ks(1),2));
11
12 xr2=P(ks(2),1):delX:P(ks(3),1);
13 yr2=(P(ks(2),2)-P(ks(3),2))/(P(ks(2),1)-P(ks(3),1))*(xr2-(P(ks(2),1)))+(P(ks(2),2));
14 xr3=P(ks(1),1):delX:P(ks(3),1);
15 yr3=(P(ks(1),2)-P(ks(3),2))/(P(ks(1),1)-P(ks(3),1))*(xr3-(P(ks(1),1)))+(P(ks(1),2));
16 *****
17
18 %nuevoobstaculo=... %Vector renglon
19
20 obstaculo=[xr1+j*yr1 xr2+j*yr2 xr3+j*yr3];
21
```

### Anexo 3 Programación específica de los círculos

```
54 %Resolucion angular (angulo de paso).
55 dtet=14.1;
56
57 %Resolucion radial (m)
58 dx=0.005;
59 %Espacio de simulacion (m)
60 xmin=-15;
61 xmax=15;
62 ymin=0;
63 ymax=15;
64
65
66 %OBSTACULOS
67 %TRIANGULO
68 P1=[6.6 6.5; 3.2 2.3; 2.4 6.4]; %puntos que delimitan el triangulo
69 % P1(:,1)=P1(:,1)-3;
70 % P1(:,2)=P1(:,2)+8;
71 %TRIANGULO
72 P2=[-4.6 4.5; -2.3 3.3; -2.5 6.5];
73 % P2(:,1)=P2(:,1)- 0.01;
74 delX=dx/3; %Resolucion de los lados del triangulo
75
76 %CIRCULOS
77 %Datos del circulo
78 radio=1.1;
79 centro=[-2 2];
80 deltang=.1;%en grados
81
82 %Datos del circulo
83 radio2=1.9;
84 centro2=[0 5];
85 deltang2=.1;%en grados
```

```
1 function [obstaculo]=obtriangulo(P,deI2)
2
3
4 xm=P(:,1); %Valores de X de los puntos que delimitan el triangulo
5 ym=P(:,2); %Valores de y de los puntos que delimitan el triangulo
6 for k=1:1113
7     kx(k)=find(xm(k)==P(1,1));
8 end
9 xc1=P(kx(1),1)+deI2:P(kx(2),1);
10 yc1=(P(kx(1),2)-P(kx(2),2))/(P(kx(1),1)-P(kx(2),1))*(xc1-P(kx(1),1))+P(kx(1),2));
11
12 xc2=P(kx(2),1)+deI2:P(kx(3),1);
13 yc2=(P(kx(2),2)-P(kx(3),2))/(P(kx(2),1)-P(kx(3),1))*(xc2-P(kx(2),1))+P(kx(2),2));
14 xc3=P(kx(1),1)+deI2:P(kx(3),1);
15 yc3=(P(kx(1),2)-P(kx(3),2))/(P(kx(1),1)-P(kx(3),1))*(xc3-P(kx(1),1))+P(kx(1),2));
16 %Vector zanglon
17 %nuevobstaculo...
18 obstaculo=[xc1+j*yc1 xc2+j*yc2 xc3+j*yc3];
19
20
21
```

```
1 function[obstaculo]=obscirculo(r,c,delang)
2 delta=delang*pi/180;
3 ang=delta:delta:2*pi;
4 obstaculo=c(1)+j*c(2)+r*exp(j*ang);
5
```

**Anexo 4 Datos obtenido de simulación del escenario No. 050a**

**Mediciones realizadas en el escenario No. 050a**

No. de Ángulo	Ángulo de apertura (°)	No. obstáculos	Tiempo de escaneo (seg)	No. puntos detectados
1	0.6	6	0.267	86
2	0.7455	6	0.215	69
3	0.8909	6	0.18	58
4	1.0364	6	0.155	49
5	1.1818	6	0.136	43
6	1.3273	6	0.121	39
7	1.4727	6	0.109	34
8	1.6182	6	0.099	32
9	1.7636	6	0.091	30
10	1.9091	6	0.084	27
11	2.0545	6	0.078	26
12	2.2	6	0.073	23
13	2.3455	6	0.069	21
14	2.4909	6	0.065	21
15	2.6364	6	0.061	21
16	2.7818	6	0.058	19
17	2.9273	6	0.055	17
18	3.0727	6	0.053	16
19	3.2182	6	0.05	17
20	3.3636	6	0.048	16
21	3.5091	6	0.046	15
22	3.6545	6	0.044	14
23	3.8	6	0.043	13
24	3.9455	6	0.041	13
25	4.0909	6	0.04	12
26	4.2364	6	0.038	13
27	4.3818	6	0.037	11
28	4.5273	6	0.036	11
29	4.6727	6	0.035	11
30	4.8182	6	0.034	10
31	4.9636	6	0.033	10
32	5.1091	6	0.032	9
33	5.2545	6	0.031	11
34	5.4	6	0.03	10
35	5.5455	6	0.029	10
36	5.6909	6	0.029	9

**"Desarrollo de método y dispositivo electro-mecánico para realizar Barrido Selectivo con Laser en aplicación Aeroespacial"**

---

37	5.8364	6	0.028	10
38	5.9818	6	0.027	9
39	6.1273	6	0.027	8
40	6.2727	6	0.026	8
41	6.4182	6	0.025	9
42	6.5636	6	0.025	7
43	6.7091	6	0.024	8
44	6.8545	6	0.024	8
45	7	6	0.023	8
46	7.1455	6	0.023	7
47	7.2909	6	0.022	8
48	7.4364	6	0.022	8
49	7.5818	6	0.022	7
50	7.7273	6	0.021	6
51	7.8727	6	0.021	6
52	8.0182	6	0.02	6
53	8.1636	6	0.02	7
54	8.3091	6	0.02	7
55	8.4545	6	0.019	6
56	8.6	6	0.019	5
57	8.7455	6	0.019	6
58	8.8909	6	0.018	7
59	9.0364	6	0.018	6
60	9.1818	6	0.018	6
61	9.3273	6	0.018	7
62	9.4727	6	0.017	6
63	9.6182	6	0.017	5
64	9.7636	6	0.017	5
65	9.9091	6	0.017	5
66	10.0545	6	0.016	5
67	10.2	6	0.016	5
68	10.3455	6	0.016	5
69	10.4909	6	0.016	5
70	10.6364	6	0.016	4
71	10.7818	6	0.015	4
72	10.9273	6	0.015	4
73	11.0727	6	0.015	4
74	11.2182	6	0.015	4
75	11.3636	6	0.015	4
76	11.5091	6	0.014	5
77	11.6545	6	0.014	5
78	11.8	6	0.014	5
79	11.9455	6	0.014	4

**"Desarrollo de método y dispositivo electro-mecánico para realizar Barrido Selectivo con Laser en aplicación Aeroespacial"**

---

80	12.0909	6	0.014	5
81	12.2364	6	0.014	4
82	12.3818	6	0.013	4
83	12.5273	6	0.013	4
84	12.6727	6	0.013	4
85	12.8182	6	0.013	4
86	12.9636	6	0.013	3
87	13.1091	6	0.013	3
88	13.2545	6	0.013	3
89	13.4	6	0.012	4
90	13.5455	6	0.012	5
91	13.6909	6	0.012	5
92	13.8364	6	0.012	5
93	13.9818	6	0.012	5
94	14.1273	6	0.012	5
95	14.2727	6	0.012	3
96	14.4182	6	0.012	3
97	14.5636	6	0.011	3
98	14.7091	6	0.011	3
99	14.8545	6	0.011	3
100	15	6	0.011	3

**Anexo 5 Datos obtenido de simulación del escenario No. 105a**

**Mediciones realizadas en el escenario No. 105a**

No. de Ángulo	Ángulo de apertura (°)	No. obstáculos	Tiempo de escaneo (seg)	No. puntos detectados
1	0.6	12	0.267	194
2	0.7455	12	0.215	155
3	0.8909	12	0.18	131
4	1.0364	12	0.155	113
5	1.1818	12	0.136	100
6	1.3273	12	0.121	88
7	1.4727	12	0.109	79
8	1.6182	12	0.099	71
9	1.7636	12	0.091	66
10	1.9091	12	0.084	62
11	2.0545	12	0.078	57
12	2.2	12	0.073	53
13	2.3455	12	0.069	50
14	2.4909	12	0.065	49
15	2.6364	12	0.061	44
16	2.7818	12	0.058	42
17	2.9273	12	0.055	40
18	3.0727	12	0.053	39
19	3.2182	12	0.05	37
20	3.3636	12	0.048	35
21	3.5091	12	0.046	33
22	3.6545	12	0.044	32
23	3.8	12	0.043	32
24	3.9455	12	0.041	30
25	4.0909	12	0.04	30
26	4.2364	12	0.038	27
27	4.3818	12	0.037	27
28	4.5273	12	0.036	26
29	4.6727	12	0.035	25
30	4.8182	12	0.034	26
31	4.9636	12	0.033	24
32	5.1091	12	0.032	23
33	5.2545	12	0.031	23
34	5.4	12	0.03	22
35	5.5455	12	0.029	21

**"Desarrollo de método y dispositivo electro-mecánico para realizar Barrido Selectivo con Laser en aplicación Aeroespacial"**

---

36	5.6909	12	0.029	21
37	5.8364	12	0.028	21
38	5.9818	12	0.027	20
39	6.1273	12	0.027	20
40	6.2727	12	0.026	19
41	6.4182	12	0.025	18
42	6.5636	12	0.025	19
43	6.7091	12	0.024	17
44	6.8545	12	0.024	17
45	7	12	0.023	17
46	7.1455	12	0.023	17
47	7.2909	12	0.022	15
48	7.4364	12	0.022	17
49	7.5818	12	0.022	16
50	7.7273	12	0.021	14
51	7.8727	12	0.021	15
52	8.0182	12	0.02	14
53	8.1636	12	0.02	16
54	8.3091	12	0.02	16
55	8.4545	12	0.019	15
56	8.6	12	0.019	14
57	8.7455	12	0.019	13
58	8.8909	12	0.018	13
59	9.0364	12	0.018	13
60	9.1818	12	0.018	13
61	9.3273	12	0.018	13
62	9.4727	12	0.017	13
63	9.6182	12	0.017	14
64	9.7636	12	0.017	12
65	9.9091	12	0.017	12
66	10.0545	12	0.016	11
67	10.2	12	0.016	12
68	10.3455	12	0.016	13
69	10.4909	12	0.016	13
70	10.6364	12	0.016	13
71	10.7818	12	0.015	11
72	10.9273	12	0.015	10
73	11.0727	12	0.015	10
74	11.2182	12	0.015	10
75	11.3636	12	0.015	11
76	11.5091	12	0.014	10
77	11.6545	12	0.014	11
78	11.8	12	0.014	11

**"Desarrollo de método y dispositivo electro-mecánico para realizar Barrido Selectivo con Laser en aplicación Aeroespacial"**

---

79	11.9455	12	0.014	10
80	12.0909	12	0.014	10
81	12.2364	12	0.014	10
82	12.3818	12	0.013	9
83	12.5273	12	0.013	10
84	12.6727	12	0.013	10
85	12.8182	12	0.013	10
86	12.9636	12	0.013	10
87	13.1091	12	0.013	10
88	13.2545	12	0.013	10
89	13.4	12	0.012	8
90	13.5455	12	0.012	8
91	13.6909	12	0.012	8
92	13.8364	12	0.012	9
93	13.9818	12	0.012	9
94	14.1273	12	0.012	9
95	14.2727	12	0.012	10
96	14.4182	12	0.012	9
97	14.5636	12	0.011	8
98	14.7091	12	0.011	8
99	14.8545	12	0.011	8
100	15	12	0.011	8

**Anexo 6 Datos obtenido de simulación del escenario No. 150a**

**Mediciones realizadas en el escenario No. 150a**

No. de Ángulo	Ángulo de apertura (°)	No. obstáculos	Tiempo de escaneo (seg)	No. puntos detectados
1	0.6	13	0.267	113
2	0.7455	13	0.215	91
3	0.8909	13	0.18	76
4	1.0364	13	0.155	64
5	1.1818	13	0.136	57
6	1.3273	13	0.121	51
7	1.4727	13	0.109	45
8	1.6182	13	0.099	42
9	1.7636	13	0.091	38
10	1.9091	13	0.084	36
11	2.0545	13	0.078	33
12	2.2	13	0.073	30
13	2.3455	13	0.069	32
14	2.4909	13	0.065	27
15	2.6364	13	0.061	27
16	2.7818	13	0.058	25
17	2.9273	13	0.055	22
18	3.0727	13	0.053	22
19	3.2182	13	0.05	23
20	3.3636	13	0.048	20
21	3.5091	13	0.046	18
22	3.6545	13	0.044	19
23	3.8	13	0.043	18
24	3.9455	13	0.041	18
25	4.0909	13	0.04	17
26	4.2364	13	0.038	17
27	4.3818	13	0.037	15
28	4.5273	13	0.036	16
29	4.6727	13	0.035	14
30	4.8182	13	0.034	14
31	4.9636	13	0.033	15
32	5.1091	13	0.032	13
33	5.2545	13	0.031	12
34	5.4	13	0.03	13
35	5.5455	13	0.029	13
36	5.6909	13	0.029	13

**"Desarrollo de método y dispositivo electro-mecánico para realizar Barrido Selectivo con Laser en aplicación Aeroespacial"**

---

37	5.8364	13	0.028	11
38	5.9818	13	0.027	12
39	6.1273	13	0.027	10
40	6.2727	13	0.026	12
41	6.4182	13	0.025	12
42	6.5636	13	0.025	10
43	6.7091	13	0.024	10
44	6.8545	13	0.024	9
45	7	13	0.023	9
46	7.1455	13	0.023	10
47	7.2909	13	0.022	9
48	7.4364	13	0.022	9
49	7.5818	13	0.022	9
50	7.7273	13	0.021	9
51	7.8727	13	0.021	9
52	8.0182	13	0.02	10
53	8.1636	13	0.02	10
54	8.3091	13	0.02	9
55	8.4545	13	0.019	9
56	8.6	13	0.019	9
57	8.7455	13	0.019	8
58	8.8909	13	0.018	9
59	9.0364	13	0.018	9
60	9.1818	13	0.018	9
61	9.3273	13	0.018	8
62	9.4727	13	0.017	9
63	9.6182	13	0.017	9
64	9.7636	13	0.017	9
65	9.9091	13	0.017	8
66	10.0545	13	0.016	7
67	10.2	13	0.016	6
68	10.3455	13	0.016	6
69	10.4909	13	0.016	5
70	10.6364	13	0.016	5
71	10.7818	13	0.015	5
72	10.9273	13	0.015	5
73	11.0727	13	0.015	6
74	11.2182	13	0.015	6
75	11.3636	13	0.015	6
76	11.5091	13	0.014	6
77	11.6545	13	0.014	5
78	11.8	13	0.014	6
79	11.9455	13	0.014	6

**"Desarrollo de método y dispositivo electro-mecánico para realizar Barrido Selectivo con Laser en aplicación Aeroespacial"**

---

80	12.0909	13	0.014	6
81	12.2364	13	0.014	5
82	12.3818	13	0.013	5
83	12.5273	13	0.013	6
84	12.6727	13	0.013	6
85	12.8182	13	0.013	6
86	12.9636	13	0.013	5
87	13.1091	13	0.013	4
88	13.2545	13	0.013	4
89	13.4	13	0.012	4
90	13.5455	13	0.012	4
91	13.6909	13	0.012	4
92	13.8364	13	0.012	4
93	13.9818	13	0.012	4
94	14.1273	13	0.012	6
95	14.2727	13	0.012	5
96	14.4182	13	0.012	4
97	14.5636	13	0.011	4
98	14.7091	13	0.011	4
99	14.8545	13	0.011	5
100	15	13	0.011	5

## Publicaciones

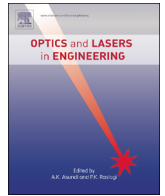
ROC&C 2011 IEEE

### Optimization of laser TVS for robot navigation using combined scanning with variable step

<p>Intelligent feedback for robot navigation using NN-methods for electromechanical transmission control</p> <p><a href="http://www.icces.org/icces13/icces13_tp.pdf">http://www.icces.org/icces13/icces13_tp.pdf</a></p>	<p>ICCES 2013</p>
---	-------------------

<p>Electromechanical transmission control for Robot navigation on scanning speed <a href="http://dx.doi.org/10.4172/2168-9873.1000124">http://dx.doi.org/10.4172/2168-9873.1000124</a></p>	<p>Mechanical &amp; Aerospace Eng. 2013</p>
--	---

**Artículo publicado en revista arbitrada de circulación  
internacional**



## Optimization of 3D laser scanning speed by use of combined variable step

X.M. Garcia-Cruz<sup>a,c</sup>, O.Yu. Sergiyenko<sup>a,\*</sup>, Vera Tyrsa<sup>b</sup>, M. Rivas-Lopez<sup>a</sup>,  
D. Hernandez-Balbuena<sup>a</sup>, J.C. Rodriguez-Quiñonez<sup>a</sup>, L.C. Basaca-Preciado<sup>a</sup>, P. Mercorelli<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Laboratory of Optoelectronics and Automatic Measurements, Engineering Institute and Faculty of Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez y Calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este, 21280 Mexicali, Baja California, Mexico

<sup>b</sup> Automation Department of Kharkov National Automobile and Highway University, Petrovskiy-street 25, Kharkov, Ukraine

<sup>c</sup> Mechanical Laboratory, Instituto Tecnológico de Mexicali, Tecnológico Ave., S/N, Col. Elias Calles, 21396 Mexicali, Baja California, Mexico

<sup>d</sup> Institute of Product and Process Innovation, Leuphana University of Lueneburg, Germany

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 14 April 2013

Received in revised form

1 August 2013

Accepted 12 August 2013

Available online 19 September 2013

#### Keywords:

Technical vision system

Dynamic Triangulation

Scene

Scanning step

Neural Network

### ABSTRACT

The problem of 3D TVS slow functioning caused by constant small scanning step becomes its solution in the presented research. It can be achieved by combined scanning step application for the fast search of  $n$  obstacles in unknown surroundings. Such a problem is of keynote importance in automatic robot navigation. To maintain a reasonable speed robots must detect dangerous obstacles as soon as possible, but all known scanners able to measure distances with sufficient accuracy are unable to do it in real time. So, the related technical task of the scanning with variable speed and precise digital mapping only for selected spatial sectors is under consideration. A wide range of simulations in MATLAB 7.12.0 of several variants of hypothetical scenes with variable  $n$  obstacles in each scene (including variation of shapes and sizes) and scanning with incremented angle value ( $0.6^\circ$  up to  $15^\circ$ ) is provided. The aim of such simulation was to detect which angular values of interval still permit getting the maximal information about obstacles without undesired time losses. Three of such local maximums were obtained in simulations and then rectified by application of neuronal network formalism (Levenberg–Marquardt Algorithm). The obtained results in its turn were applied to MET (Micro-Electro-mechanical Transmission) design for practical realization of variable combined step scanning on an experimental prototype of our previously known laser scanner.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

The task of 3D-coordinates spatial data acquisition is an important task for many practical applications, such as structural health and integrity monitoring, robot vision, micro-relief inspection, biometrics, shape recognition in security applications, physical monitoring of internal structures in complete darkness (mines, caves, underground pipelines), etc. Optical scanning, especially laser based scanning, is a very attractive approach to this solution due to its advantages over other recognized solutions. Laser scanning has direct information acquisition, relatively small quantity of data to be processed, high coherence of laser bandwidth to help noise filtering in optic channel, predictable accuracy with well-studied uncertainty distribution laws, ability to work in complete darkness (even works better this way), etc. But the most attractive advantage is fast growth in the last decade of optical sensors reliability and data stability. Nowadays,

there has been a clear trend for the contactless sensors based on optical technologies [1]. Contactless can quickly acquire a large number of points (about 10,000 points per second). However, laser sensors currently on the market do not have the accuracy of the classical dynamic contact sensors. In general, the accuracy provided by the manufacturer of these devices presents a factor of 10 compared to the contact sensors. For example, with the sensor METRIS LC50 used in [1], the expanded measurement uncertainty of a sphere with 15 mm diameter is in the order of  $50 \mu\text{m} + / - 3\sigma$ . Furthermore, this accuracy depends on different parameters such as materials properties, surface texture, product color, etc. Therefore, in order to use this technique in the context, it is necessary to have a good control of their metrological properties. In recent years various optical methodologies [2] have been implemented in tracking general-purpose systems. Although, optical tracking systems have been used in several contexts, its application to align 3D point clouds generated by full field techniques has been poorly evidenced in technical literature. Moreover, some commercial solutions have been proposed (naviSCAN<sup>3D</sup>, Leica T-Scan, MetraSCAN [2], and Vitus Smart 3D Laser Scanning [22]). Neither technical literature nor commercial

\* Corresponding author. Tel.: +52 6861687170.

E-mail address: [srgnk@mail.ru](mailto:srgnk@mail.ru) (O.Yu. Sergiyenko).

solutions fully provide scientific and technical evidences about performances, reliability and applicative fields of the optical tracking approaches. For example, industrial applications may involve the reconstruction of complex shapes by aligning several 3D views captured on the basis of a scanning strategy that should be settled during the measurement process [20]. In these cases, robustness and flexibility are the fundamental attributes of a multi-view methodology, but for example in robot navigation or any other dynamic application there is no way for its practical use. In [3] two-dimensional  $x$ - $y$  laser scanning was demonstrated using a computer controlled and rotating reflective cube. This particular application was the digitizing of transparent foils and they achieved milliradian resolutions. This concept may be easily adapted to other industrial vision applications such as scanning products on an assembly line or two-dimensional extensions of bar codes. The reflective cube method described in [3] is less expensive, simpler and more durable than other techniques such as use of planar mirrors mounted on galvanometer rotors, as shown in [3] in 1992. Due to the same reason now we will not explain the lack of galvanometer rotors, but will advance the simple/durable optic scanning method (more or less based on the same idea as in [3]) which is able to give still more open angle-of-view than those of any other known techniques, except the omnidirectional vision (fish-eye lens) [16]. However, fish-eye lens gives very curvy and distorted image, which needs a time consuming post-processing. Application depth map by an efficient epipolar plane analysis method [17,18] was analyzed in [19] for omnidirectional stereo vision [15]; meanwhile our solution is able to find and digitize objects in real time, without any post-processing. Why it is important?

For robot application in an environment where many obstacles exist [4], it needs to avoid obstacles and detect gateways in order to select a valid pathway to traverse in the shortest time possible. Avoiding obstacles according to their shape will demand a lot of environment knowledge, so this method will demand high computational power. The laser scanner developed in [4] does not provide 3D shape information of the detected obstacles because of the absence of enough computational power for 3D shape reconstruction. The avoidance strategy proposed in [4] is to avoid obstacles regardless of their shape; in other words, the height information of the obstacle and the width information of the gateway are key parameters for making a judgment. For a single image, it takes 0.2 s to detect the obstacles in front of the scanner. Therefore, as the scanner scans obstacles at 10 different bending angles, it takes 2 s to scan fully. Because the scanning speed is not fast enough to deal with moving objects, currently the developed laser scanner cannot work in a changing environment; in other words, the detected obstacles must be stationary. A good review of 3D model acquisition techniques can be found in [13,14]. The main features of the proposed 3D laser scanning system in this paper compared with other kinds of 3D sensing systems for mobile robots are as follows:

- compared with passive binocular or trinocular vision sensors, the proposed laser scanner can maintain more robust 3D sensing under illumination variations;

- compared with time-of-flight or phase shifting laser scanners, the proposed laser scanner has less power consumption, and is cheaper;

- compared with the multi-line pattern projector in a structured-lighting scanner, the proposed laser scanner has a more simple and robust mechanical construction, and reduced power consumption.

This paper addresses the design and implementation of an active 3D triangulation laser scanner. The contribution of this paper and the scientific field of the proposed system are in using a low-cost and simple method to construct a laser and wide-angle sensor system which is used for navigation of mobile robots in unknown environments [5]. The most crucial point in this case is time of scanning. In other words, the obstacle must be detected in

the shortest possible time interval, but precise coordinate measurements are not necessary for all obstacle shapes, but only for its edge nearest to the robot's desired safe trajectory (see [5,7,10]). It is evident that this is possible only under the condition that the laser can scan robot's field-of-view with variable speed. In this study, we concentrate on modeling several scenes with regular obstacles, establishing a simulation tool for the analysis to find the best angles (optimal angles) for combined-step scanning, and designing stepper-motors in laser positioning system, as well as development and demonstration of an automated micro-gearbox for such tasks.

This paper is organized as follows. In Section 2 the problem formulation of slow functioning of 3D TVS caused by constant small scanning step is presented. The solution by application of combined scanning step consisting of several specific values is introduced in Section 3. The simulation of variable scanning step and data post-processing techniques are presented in Section 4. Design of Micro-Electro-mechanical Transmission for steps combination performance is proposed in Section 5. Finally, conclusions and prospects for future work are reported in Section 6.

## 2. Problem formulation

According to our previous research [5–12], the TVS allows us an insight into spatial coordinates measurements, with sufficient accuracy in the field of view; it also has the ability to detect obstacles inside any given scene during navigation of the autonomous robot. It can make a digital map of the obstacles within the field of view in high resolution. The current TVS uses constant scanning pitch which is not optimally efficient for robot navigation. The goal of a reliable navigation in exploration of unknown scenes is the scanning variable (combined) scanning step, which will minimize scanning time, with guaranteed detection of critical obstacles within the field of view. It must detect any obstacle as soon as possible, but having a high resolution only of the most critical obstacles (dangerous for the robot safety). It is intended that the simulations performed in the present work must answer this question by our simulation results. Based on these results, we can provide a tentative construction of electromechanical transmission. Its application can optimize the TVS function by the minimum time criterion under the condition of maintaining the maximal resolution on the nearest edge of scanned objects.

For a better understanding of the problem we have to present here the basic principle of Dynamic Triangulation and corresponding laser scanning system forming jointly with passive aperture the completed 3D Technical Vision System (TVS), firstly introduced in our previous publications [5–12], and which is the object of further development and complication in the present paper. TVS works on Dynamic Triangulation theory in order to obtain 3D coordinates of objects or obstacles on mobile robot vision; as shown in Fig. 1 [7], a laser beam is projected by a mechanism transmitter (which will be called Positioning Laser (PL)) onto the obstacle surface, reflecting back the laser beam into a revolving sensor inside, which will be called Scanning Aperture (SA) [21].

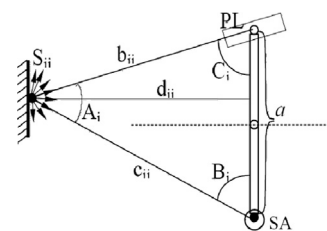


Fig. 1. Dynamic Triangulation [7].

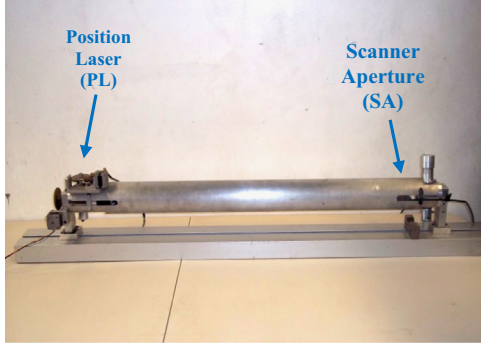


Fig. 2. Side view prototype.

Velocity has been optimized in comparison to [7,10], where the scanner velocity is lower.

The system has Positioning Laser (PL) and Scanning Aperture (SA), and the method is Dynamic Triangulation due to the fact that the Positioning Laser has the ability to rotate and redirect the laser beam by 180° theoretically and (SA) rotates 360° at a constant speed, meaning that the TVS has two dynamic angles [10]; with this system it is possible to obtain any point in front of the mobile robot as seen in Fig. 2. PL and SA are communicated for a hollow shaft; PL has a mechanism to control the laser.

In order to calculate any coordinate in Cartesian plane, sine laws on Dynamic Triangulation was used and the obtained results are the following equations [9]:

$$x_{ij} = a \frac{\sin B_{ij} \sin C_{ij} \cos \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \quad (1)$$

$$y_{ij} = a \left( \frac{1}{2} \frac{\sin B_{ij} \cos C_{ij}}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right), \quad \text{for } B_{ij} \leq 90^\circ \quad (2)$$

$$y_{ij} = -a \left( \frac{1}{2} + \frac{\sin B_{ij} \cos C_{ij}}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right), \quad \text{for } B_{ij} \geq 90^\circ \quad (3)$$

$$z_{ij} = a \frac{\sin B_{ij} \sin C_{ij} \sin \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \quad (4)$$

### 3. Problem solution

For the above stated problem a good solution can be the application of Micro-Electromechanical Transmission combined with scanning step and the Laser Ray Positioning System of TVS on the example of robot navigation task. The multicriteria verification of such hypothesis is the main goal of the present research; the problems mentioned in Section 2 can be solved with a MET (Micro-Electromechanical Transmission). This is the most feasible of possible ways in resolution constraints improvement in electromechanical 3D optoelectronic scanners [13]. In our opinion, not all sectors of full field-of-view are of the same importance for detailed analysis. Some of them can be ignored under the simple criterion that robot cannot traverse there. So, it yields the conclusion that these sectors can be scanned roughly in minor time without loss of information for uninterrupted navigation. At the same time those sectors where the edges of the obstacles are located are critically important for the robot as those paths must be scanned with more attention. Our proposition is based on the hypothesis that variation of fixed scanning angle does not give the same losses of information; in other words certain angles exist which permit increasing the

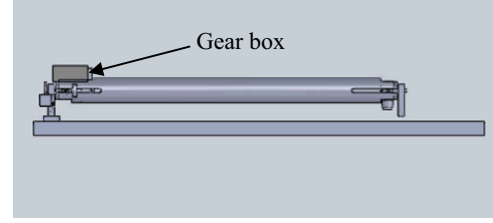


Fig. 3. TVS with the gear box proposal.

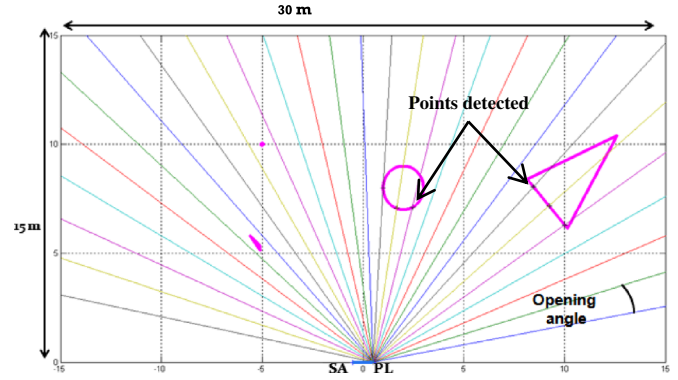


Fig. 4. Scene.

scanning velocity (bigger step) but still permitting the same quantity of information about obstacles inside the defined field-of-view. With certain assumptions we decide that the quality of information about obstacles can be reflected by the number of detected 3D points on the obstacle surface. Therefore, simulating the scanning process with different values of fixed scanning step, varying the step value with constant small increments, we can get full information about the relation between resolution and time of scanning. Such a simulation for a statistically representative set on several variants of scenes with variable number, density, size and shape of obstacles was made and firstly introduced in [21] Initial simulation was on an ideal transmission with 31 experiments; those data could not give enough information to design MET; next simulation was 101 experiments to find optimal scanning angles. The TVS uses MET with the purpose of combining different scanning angles to find obstacles during scanning in unknown environments in the fastest possible way and making digital maps of obstacles surface which are inside of field-of-view without losses of resolution and scanning time. Fig. 3 shows the proposed MET (gear box).

In Section 6 discusses the gear box of Fig. 3, based on the recommendation for best gear ratio derived from the results of simulation presented in that section.

#### 3.1. Simulation of variable scanning step

In Fig. 4 we can see the frame which further will be called the scene, and shows the opening angle (angle between two consecutive positions of laser ray during one scanning step). Detected points are the locations where laser ray is reflected to scanning aperture (intersection point of simulated laser ray line with the figure of obstacle), and some figures within the scene are simulations of the possible obstacle shapes and locations (triangles and circles). Assumptions for TVS field-of-view in this simulation: beginning at 10 deg and finish at 170 deg. In Fig. 4 we have PL and SA to relate prototype (see Fig. 2) with the present scene. Linear sizes of scene were simulated: 30 m width and 15 m depth.

For simulated laser ray, which unfortunately due to MATLAB'S nature must have discretization for finite time of calculations, the

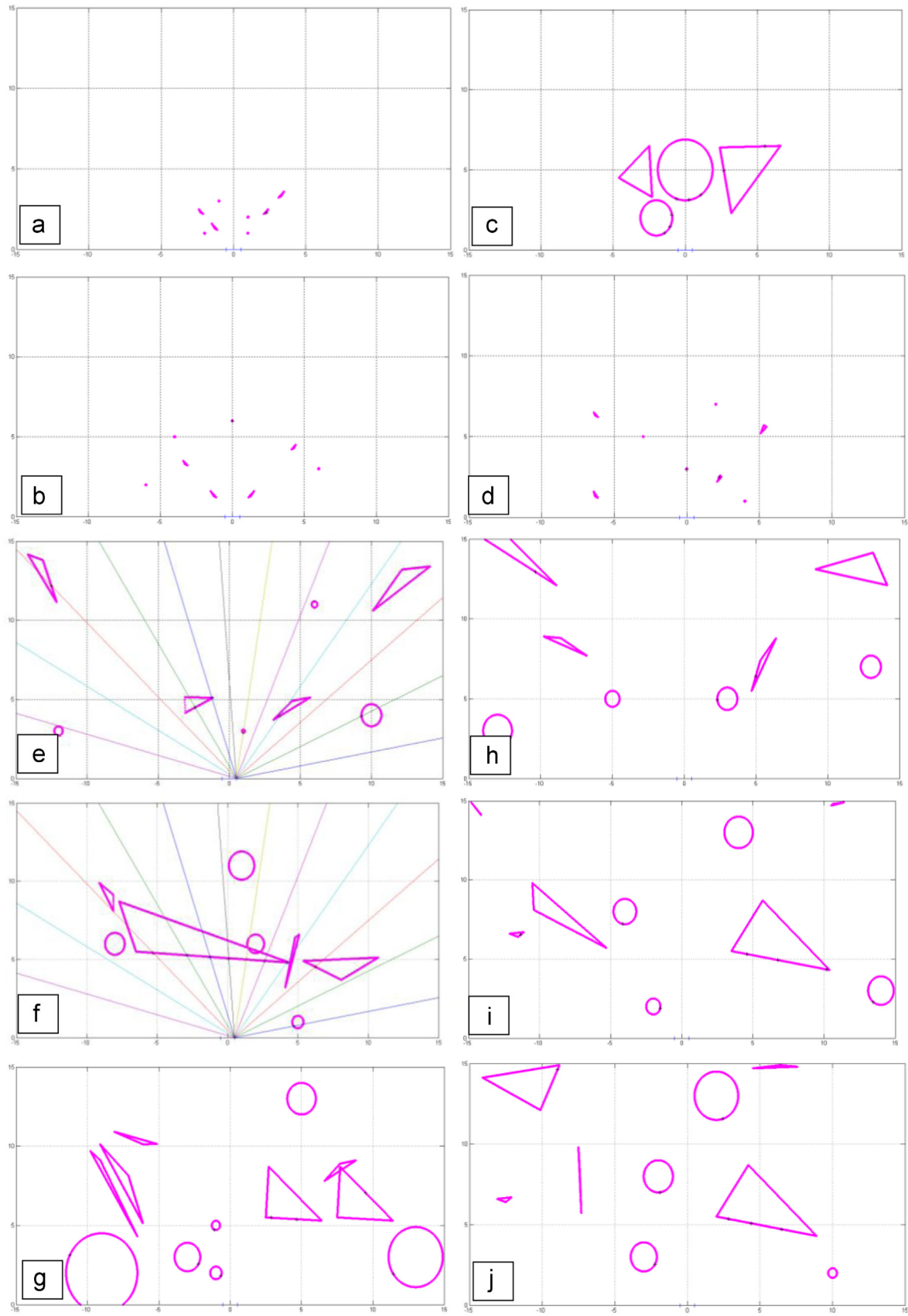


Fig. 5. Frames from simulation on MATLAB.

following model based on Euler's identity was used:

$$Ae^{i\theta} = A \cos \theta + iA \sin \theta \tag{5}$$

where  $\theta$  is instant value of the opening angle, and  $A$  is the simulated length of laser ray (discretized with a radial resolution each 0.002 m up to 10 m).

For simulated obstacles the following equations were used in order to draw a triangle (with consequence: from the shortest side to the second shortest and finally the longest last side):

$$Y_{r1} = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)}(x - x_1) + y_1 \tag{6}$$

$$Y_{r2} = \frac{(y_2 - y_3)}{(x_2 - x_3)}(x_2 - x_1) + y_2 \tag{7}$$

$$Y_{r3} = \frac{(y_1 - y_3)}{(x_1 - x_3)}(x_3 - x_1) + y_3 \tag{8}$$

where  $Y_{r1}$ ,  $Y_{r2}$ , and  $Y_{r3}$ , are equations of the lines of triangle, and  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $y_1$ ,  $y_2$ , and  $y_3$  are Cartesian coordinates of the triangle vertexes.

For simulated circles arbitrary ratios ( $r$ ) and center ( $C$ ), and discretization of the circle ( $DC$ ) in grades (three times less than

discretization of laser ray) were used, using the equations

$$\Delta\alpha = \frac{(DC\pi)}{180^\circ} \tag{9}$$

where  $\alpha$  are increments of  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\alpha$  is the increment in the discretization circle obstacle and

$$\text{circle}_n = C + re^{i\alpha} \tag{10}$$

where  $\text{circle}_n$  is the obstacle drawn for  $n$  circles.

### 3.2. Simulation parameters

Basing on the mathematical formalism introduced above, 101 different scenes were simulated, with the following parameters:

- opening angle (0.6 deg to 15 deg with  $\Delta\theta = 0.1455^\circ$  for each step);
- number of obstacles (1–13);
- obstacle position (random);
- obstacle dimensions (random)

In Fig. 5 we can see some scenes that were used in simulation; each scene was scanned with 100 different opening angles and

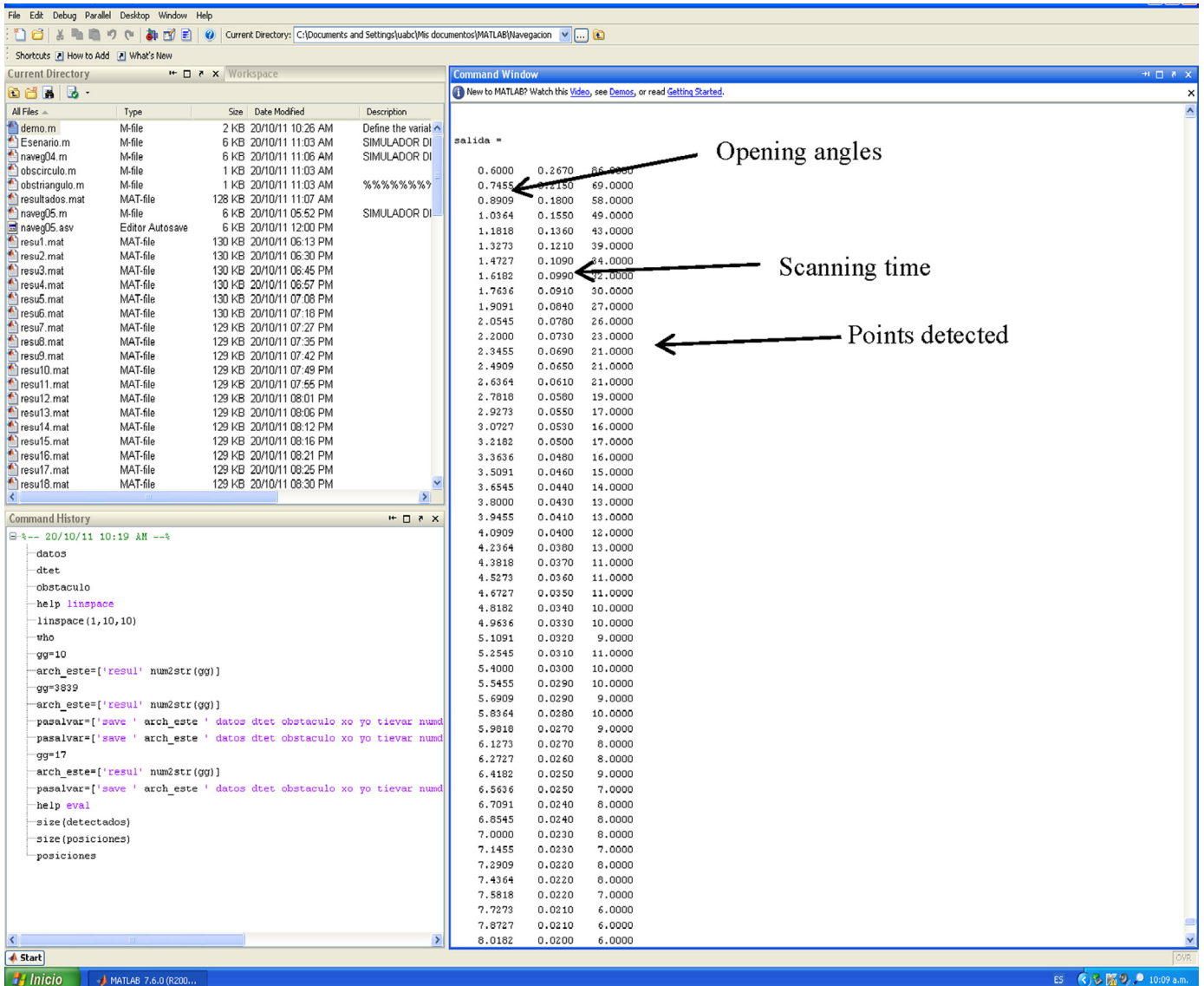


Fig. 6. Frame from simulation out in MATLAB.

varying parameters, thus yielding 10,100 frames to be analyzed; the notes were as follows:

- smaller obstacles and near positioned ones were difficult to detect, needing opening angle around 0.6 to 0.7455, and more points were detected in obstacle contour in a larger time.
- Fig. 5f has a triangle with a wall behavior; in this phenomenon all the angles take more time vs. other frames.
- Fig. 5g uses 12 obstacles; scanning time was long for most of the angles.
- Fig. 5b with 8 obstacles and opening angles 15° and 14.8545° detected one obstacle in a small time.
- If the obstacles are bigger and close together, scanning time is longer for most of the angles.
- High resolution is easier with circles than triangles. This means in practice that sharp-edged obstacles are more dangerous for robots than the smooth ones. But the presented simulation permits us to search for a simple numerical condition to classify the real scene by the number of smooth/sharp obstacles inside. This is one of the most useful advantages of our scanning method.

#### 4. Propose for optimal angles search

A frame of the obstacle search simulation is provided in Fig. 6; the instant value of scanning step angle (see 1st column of the table in Fig. 6) is varied with increment of  $\Delta\theta=0.1455^\circ$  according to conditions of Section 4.1. For each value of scanning step the following were recorded: (1) the full time necessary for complete scanning of the defined frame (scene—see 2nd column of the table in Fig. 6) and (2) the number of points detected on arbitrarily located obstacle surfaces during one complete cycle of scene scanning (see 3rd column of the table in Fig. 6). Simulation brings statistical information from two different computational experiments with 30 and 101 different step values. The frame from MATLAB in Fig. 6 (first column is opening angle, second column is scanning time and third column is detected points) shows the results of the second one. The first simulation from 30 experiments presented in [21] (see Fig. 7) shows a graph of detected points vs. opening angle. It gives us the generalized behavior of three angles which have local maximums of information about obstacles (detected points) with constantly increasing scanning speed, but this information is not enough to make a final statistically backgrounded decision for design of MET. Hence we provide a second experiment on extended set of data in order to improve statistically significant representative samples for rigorous and safer MET design.

However, the results presented in [21] and in Fig. 7 help us to get a first view of the quantity and tentative values of such step angles for preliminary transmission design.

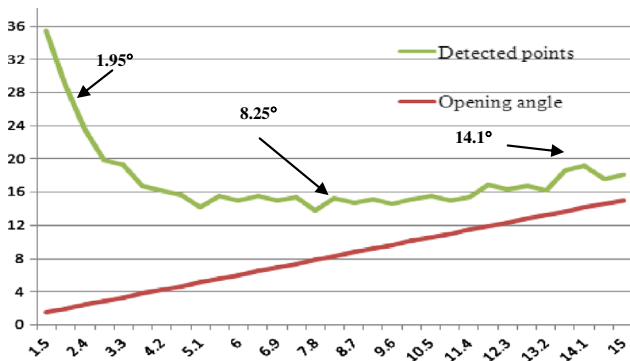


Fig. 7. Detected points vs. opening angles [21].

In the second simulation data were enough to apply some statistical methods (simulation graphic shows detected point vs. opening angles) for comparison having 30 experiments and 101 experiment (Figs. 7 and 8, respectively) and comparison between differences and made decisions. Fig. 8 shows the updated values of optimized scanning angles; with smaller angular increment of scanning step during simulation the number of simulated obstacles in scene increases from 5–9 (Fig. 7) up to 1–13 (Fig. 8) and laser length was 15 m (Fig. 7) up to 25–30 m (Fig. 8); the simulated obstacles have fixed positions in Fig. 7 vs. floated position of obstacles in simulation results of Fig. 8.

We analyzed every scene using a parameter Z that is called advance (the joint quantity of all detected points on surfaces of all

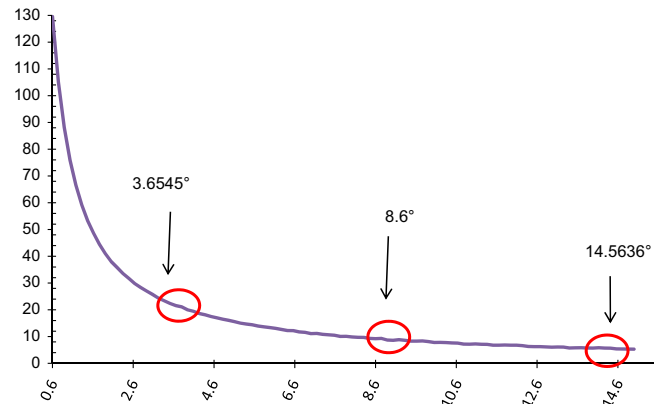


Fig. 8. Detected points vs. opening angles from 101 simulation scenes.

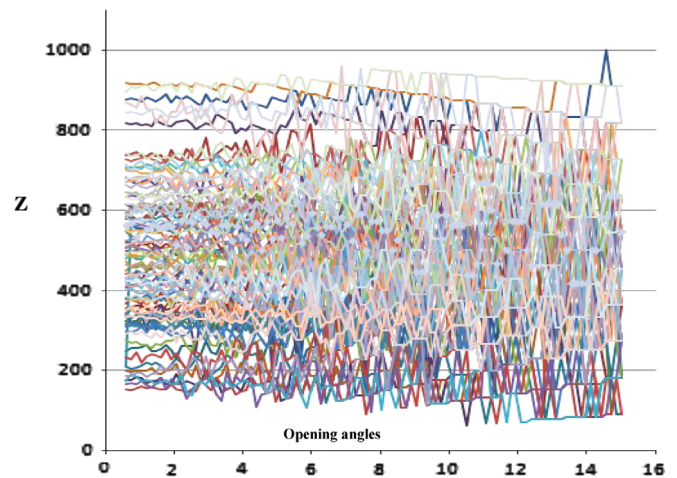


Fig. 9. Z vs. opening angles.

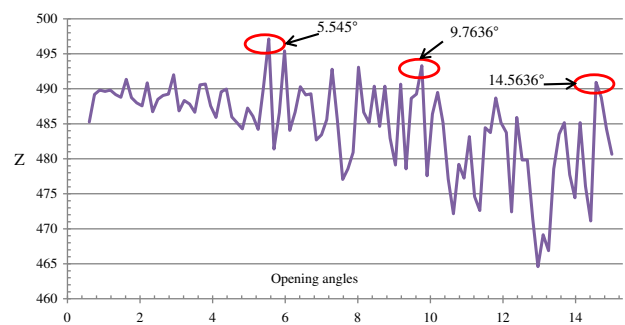


Fig. 10. Z vs. opening angles.

obstacles inside the scene) was and calculated as

$$Z \equiv P/t \tag{11}$$

where  $P$  is the number of points detected on obstacles and  $t$  is the scanning time in seconds.

In Fig. 9 we can see “Z” for each scene of all simulations. This cannot be analyzed easily; this is the reason for using a statistical method to analyze all scenes by one graphic.

In Fig. 10 we can find the next optimal angles for maximum and minimum methods; this graph used the “Z” parameter and the hypothesis “Find three optimum aperture angles based on the data obtained from 101 scenes using the method connection means and the detected points vs. time”, and the optimum angles are shown in Fig. 10. All obtained information for analyzed graphics is structured in Table 1.

In Table 1, the first row was analyzed with 30 simulations of [21], and in 2–5 the second simulation with 101 frames was used; the information was analyzed basing on different criteria of estimation.

Therefore, from the above considerations and the point of view of scanning velocity optimization we can conclude the following: for all possible values of scanning step there are three values of angle where the scanning velocity grows continuously but the quantity of information about obstacle changes with discrete level. Such angles are angles around 1.8–4° (blue rows of Table 2), 8.2–8.7° and 14–14.6° (green row of Table 2). Such a situation is very convenient for us in this particular task. Practically, it means the following.

The biggest angle (around 14°) permits us to scan the scene the fastest possible way. This is the biggest angle at which according to all provided 10,100 simulations no simulated obstacle was missed. At angles of bigger value already some obstacles were not detected. The next selected angle of 8.6° is appropriated for fastest rough scanning and Table 2 shows analyzed data. Angle around 8.6° seems to be the best candidates for optimal scanning; 8.6° gives 4.42 times faster than 1.9091° but still 1.72 times worse than 14.5636°. But at the same time it is still 2.32 times faster than 3.65454°, but slower 1.11 times that 9.7636°; see Table 2 for comparing angles. So, the scanning with such values of step must be conditionally optimal under constrains “velocity vs. resolution” (see details in Table 2).

The last extreme experimentally obtained value of step angle around 1.8–4° provides the slowest scanning; practically it is applicable only for precise coordinate measurement on the edge of obstacle under highest interest for collision prevention in the

However, such a variation of optimal angles value caused by manual data analyses is not acceptable for final MET design. So, the next step is to apply the special mathematical formalism to rectify these angle values. The proper tool in this case in our opinion is the use of digital rectifying analyzers, nonlinear gradient methods for example.

### 5. Levenberg–Marquardt method

According to the experience of our previous application of this kind of scanner in static biometric monitoring, the use of neuronal network mathematics can be useful for rectifying experimentally obtained data. According to [12] it is not necessary to apply the wide variety of existing methods, because in [12] it is clearly shown that the most proper tool in this case is the Levenberg–Marquardt Algorithm. The primary application of the Levenberg–Marquardt Algorithm (LMA) is in the least squares curve fitting problem: given a set of “ $m$ ” empirical datum pairs of independent and dependent variables,  $(x_i, y_i)$ , optimize the parameters  $\beta$  of the model curve  $f(x, \beta)$  so that the sum of the squares of the deviations becomes minimal [12,22]:

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^m [y_i - f(x_i, \beta)]^2 \tag{12}$$

Like other numeric minimization algorithms, the Levenberg–Marquardt is an iterative procedure. To start a minimization, we provide an initial guess for the parameter vector,  $\beta$ . In each iteration step, the parameter vector,  $\beta$ , is replaced by a new estimate,  $\beta + \delta$ . To determine  $\delta$ , the functions  $f(x_i, \beta + \delta)$  are approximated by their linearization:

$$f(x_i, \beta + \delta) \approx f(x_i, \beta) + J_i \delta \tag{13}$$

where

$$J_i = \frac{\partial f(x_i, \beta)}{\partial \beta} \tag{14}$$

is the gradient (row-vector in this case) of “ $f$ ” with respect to  $\beta$ . At its minimum, the sum of squares,  $S(\beta)$ , the gradient of  $S$  with respect to  $\delta$  will be zero. The above first-order approximation of  $f(x_i, \beta + \delta)$  gives

$$S(\beta + \delta) \approx \sum_{i=1}^m [y_i - f(x_i, \beta) - J_i \delta]^2 \tag{15}$$

**Table 1**  
Obtained angles comparison.

Review	Opening angle 1 (deg)	Opening angle 2 (deg)	Opening angle 3 (deg)
1 30 (1.5° to 15°, $\Delta\theta=0.45^\circ$ ), Fig. 7 [21]	1.95	8.25	14.1
2 101 (0.6° to 15°, $\Delta\theta=0.1455^\circ$ ), detected points vs. opening angles, (Fig. 8)	3.6545	8.6	14.5636
3 101(0.6° to 15°, $\Delta\theta=0.1455^\circ$ ), Z vs. opening angles (Fig. 10)	5.5455	9.7636	14.5636
4 101 (0.6° to 15°, $\Delta\theta=0.1455^\circ$ ), analysis according to the largest angle, and shorter time to scan	–	–	14.5636
5 101 (0.6° to 15°, $\Delta\theta=0.1455^\circ$ ), Analysis according to the highest number of points detected	0.6	–	–

task of robot trajectory planning.

**Table 2**  
Comparison with scanning step angle of 8.6°.

Opening angles (deg)	Detected points	Scanning time (s)	Resolution	Conclusions comparing with 8.6°
1.9091	41	0.084	High	8.6° detecting 32 points less than 1.9091° but was 4.42 times faster
3.6545	21	0.044	High	8.6° detecting 12 points less than 3.65451° but was 2.32 times faster
5.5455	14	0.029	Medium	8.6° detecting 5 points less than 5.5455° but was 1.53 times faster
9.7636	8	0.017	Low	8.6° detecting 1 point more than 9.7636° but was 1.11 times more slow
14.5636	5	0.019	Low	8.6° detecting 4 points more than 14.5636° but was 1.72 times more slow

or in vector notation

$$S(\beta + \delta) \approx \|\mathbf{y} - \mathbf{f}(\beta) - \mathbf{J}\delta\|_2 \quad (16)$$

Taking the derivative and setting the result to zero gives

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J})\delta = \mathbf{J}^T [\mathbf{y} - \mathbf{f}(\beta)] \quad (17)$$

where  $\mathbf{J}$  is the Jacobian matrix [12,23] whose  $i$ th row equals  $J_i$ , and where  $\mathbf{f}$  and  $\mathbf{y}$  are vectors with  $i$ th component  $f(x_i, \beta)$  and  $y_i$ , respectively. This is a set of linear equations which can be solved for  $\delta$ .

Marquardt's contribution [12,24] is to replace this equation by a "damped version"

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I})\delta = \mathbf{J}^T [\mathbf{y} - \mathbf{f}(\beta)] \quad (18)$$

where  $\mathbf{I}$  is the identity matrix, giving us the increment,  $\delta$ , to the estimated parameter vector,  $\beta$ . The (non-negative) damping factor,  $\lambda$ , is adjusted at each iteration. If reduction of  $S$  is rapid, a smaller value can be used, bringing the algorithm closer to the Gauss–Newton algorithm, whereas if iteration gives insufficient reduction in the residual,  $\lambda$  can be increased, giving a step closer to the gradient descent direction. Note that the gradient of  $S$  with respect to  $\beta$  is  $-\mathbf{J}^T [\mathbf{y} - \mathbf{f}(\beta)]$ . Therefore, for large values of  $\lambda$ , the step will be taken approximately in the direction of the gradient. If either the length of the calculated step,  $\delta$ , or the reduction of sum of squares from the latest parameter vector,  $\beta + \delta$ , falls below predefined limits, iteration stops and the last parameter vector,  $\beta$ , is considered to be the solution. Levenberg's algorithm has the disadvantage that if the value of damping factor,  $\lambda$ , is large, inverting  $\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}$  is not used at all.

Marquardt provided the insight that we can scale each component of the gradient according to the curvature so that there is larger movement along the directions where the gradient is smaller. This avoids slow convergence in the direction of small gradient. Therefore, Marquardt [12,24] replaced the identity matrix,  $\mathbf{I}$ , with the diagonal of  $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$ , resulting in the Levenberg–Marquardt algorithm

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \text{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{J}))\delta = \mathbf{J}^T [\mathbf{y} - \mathbf{f}(\beta)] \quad (19)$$

### 5.1. Applications LMA on system results

All information from the simulation was concentrated in a  $[3 \times 10,100]$  matrix; the data was used for preparing a Neural Network (NN) with the LMA, using the following percentages: the training was 50/100, validation 25/100 (these are used to measure network generalization), and testing 25/100 (when generalization stops improving). NN regression algorithm is effective for next angle prediction; it can verify which predicted values adjust to real values with 2% error (see Fig. 11). The network is adjusted according to the error; this smart software tool already trained is capable of acquiring the constants of the scene components; based on the training it will decide which angle is the best for the next scanning.

When NNs were trained we introduced the information from Table 3 and its predicted angles: The angles predicted by NN (underlined in yellow) can be used in the intelligent control for PL speed change applying proposed design of MET, to aim scanning unknown scenes when the control system knows primarily according to real scene scans the tentative locations of obstacles, and choose the optimal angle from NN training results to get the maximum resolution scans only in small sectors of interest inside all frames of scenes. The proposed MET will be explained below.

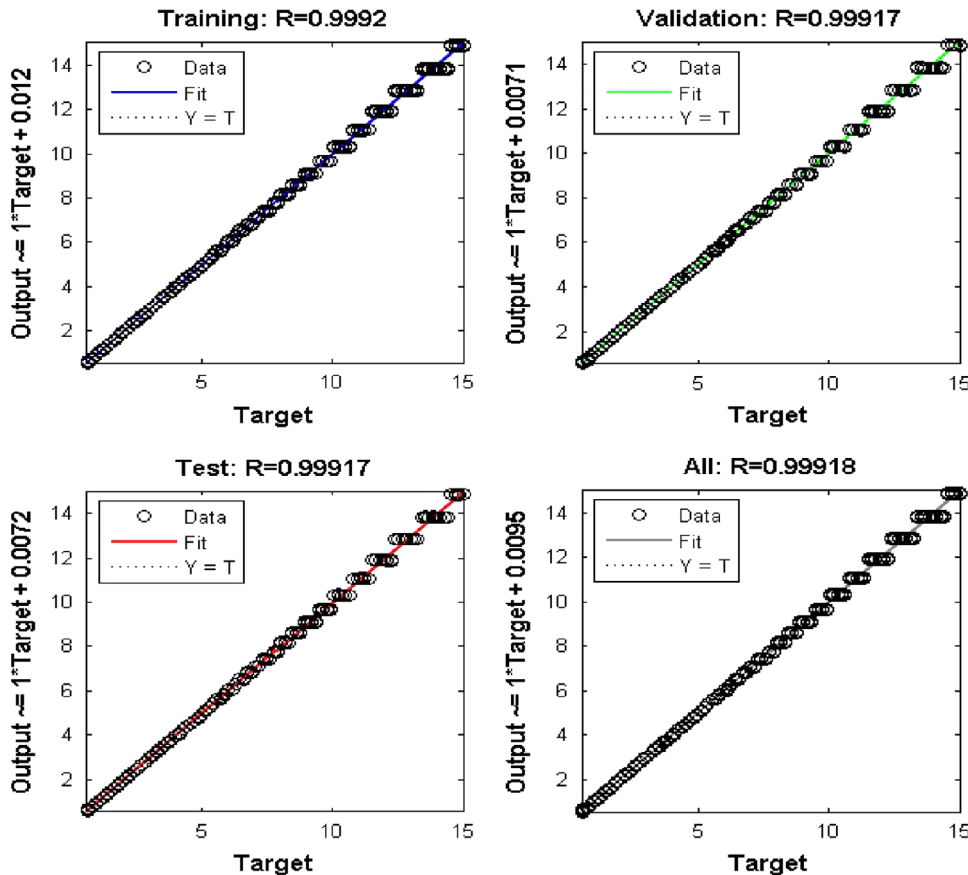


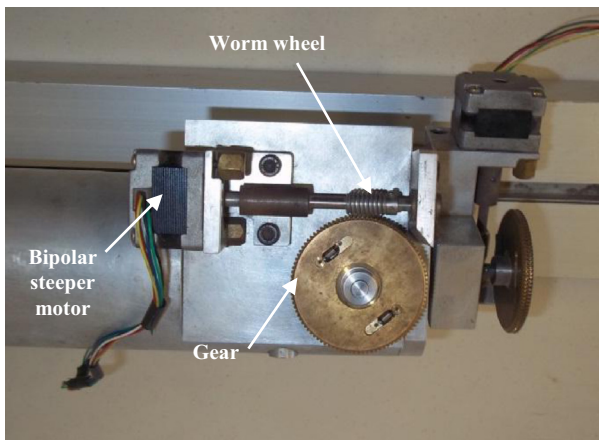
Fig. 11. Training regressions.

### 6. Micro-Electro-mechanical Transmission (MET)

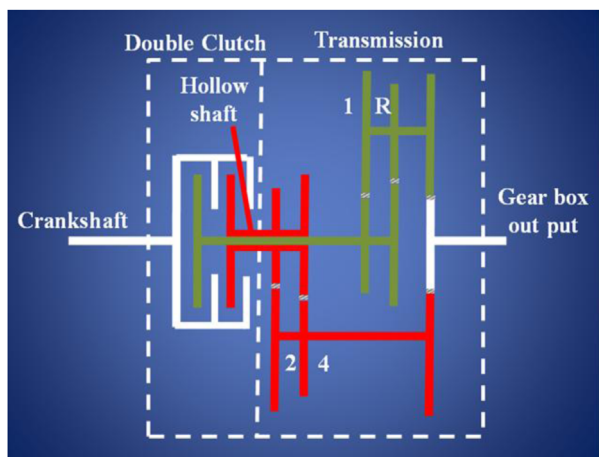
The proposed MET is aimed to change adequately and in the shortest possible time the value of scanning step angle according to recommendations of Section 4.2. Actually system [10,21] has an anti-backlash gear 48 pitch 0.104 face with 20° pressure angle, 96 teeth, P.D 2.0000, gears 303 stainless steel, 2024-T4 Aluminum, and hubs 303 stainless steel; the worm wheel has 48 pitch 20° pressure angle and right hand double thread, and is it made of

**Table 3**  
Information to predict and results.

Variables	1	2	3	4
Number of obstacles	24	25	26	27
Scanning time	0.02	0.02	0.02	0.02
Number of points detected	18	19	20	22
Number of scene	106	106	106	106
<b>Predicted data</b>	<b>8.2269°</b>	<b>8.2101°</b>	<b>8.1851°</b>	<b>8.1046°</b>



**Fig. 12.** Laser positioning system of TVS [21].



**Fig. 13.** DCT proposed [21].

bronze ASTM B21 alloy 464 material; the gear and worm wheel were manufactured by PIC DESIGN. In Fig. 5 we can see a top view of the system and a 12 VDC bipolar stepper motor with step angle 1.8°, holding torque 2100 g cm, and 200 steps per revolution that is manufactured by JRP [10,21]. The current design of laser positioning system of TVS is presented in Fig. 12.

In [21] an ideal electro-mechanical system with variable opening angle as a Dual Clutch Transmission (DCT) was proposed. Since it allows obtaining torque transfer from one clutch to another without interrupting traction, thanks to the controlled slippage of the clutches, for a primary clutch odd relationships and a secondary clutch peer relation, an electric drive can save energy [25–28]. These parameters are applicable to vehicles, but the same idea can be applied to PL [21].

However, as the present advanced research shows in a difference to [21] that optimal scanning angles are not so fixed, and varies a little according to required criterion, but the DCT permits due to its design only fixed transmission ratio, so we must to apply another principle than recommended in [21].

Comparing to our first micro-electromechanical design [21] we did observe that the design needs especially three fixed scan angles for three different transmissions ratios supposedly to be that angles simulation bring us, that was not the case. For the proposed DCT introduced in Fig. 13 [21], the available space for piece together from micro-transmission in TVS is around 0.115 m width and 0.03 m high; this space is not enough for the proposed design; maintenance of this kind of proposed transmission needs lubricant to decrease friction; DCT needs to vary velocity in three rigorously fixed speed changes and reverse; see Fig. 13.

Analyzing Continuously Variable Transmission (CVT) vs. DCT (refer Table 4), for TVS application CVT is a better option; such a transmission design is better in optimized time; it has minor energy use, low maintenance, less weight, and it avoids jumps during shift. For reduced friction CVT is better than DCT; the DCT design for actual TVS will be explained below.

The CVT uses two slots or pulleys that fit their axial widths simultaneously in opposite directions to change the transmission ratio of band that runs through the slots. To change the transmission ratio of the width to be opened and close a pulley the other so that the effective way ratios generate the desired ratio also has an infinity of possible relations, continuously varying between two limits. This design has been used for more than a century and was used in the first automobiles; other functional applications are snow blowers and lawn mowers [29]. This long experience of use in different applications with significantly distinct conditions of use shows us that CVT in practice has another advantage: it is strongly reliable and has low dependence on surrounding constrains. This is a good property for novel design with unknown practical restrictions. In Table 4 we analyze conditions and parameters for CVT vs. DCT.

Based on our data, previous design in research [21], and all information presented in Section 4, we can decide the next step. CVT has various sub-designs. We need to choose a proper principle of CVT operation mostly matched to our case conditions, for example twin cone mesh type CVT. Usually CVT cone mesh type design [29] works with chain links and pulleys, and the principle of CVT is the kind of two cones with the same dimensions,

**Table 4**  
Comparison CVT vs. DCT.

	Optimize time	Using energy	Mechanical maintenance	Weight	Jumps during shifts.	Friction
CVT	More	Less	Less	Less	Lees	Influence of contact-zone between chain links on the torque capacity and dynamic performance [30]
DCT	Less	More	More	More	More	To avoid friction in this type of transmission it needs hydraulic pressure [28]

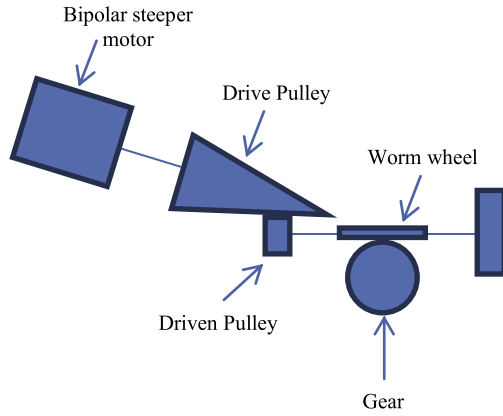


Fig. 14. MET proposed.

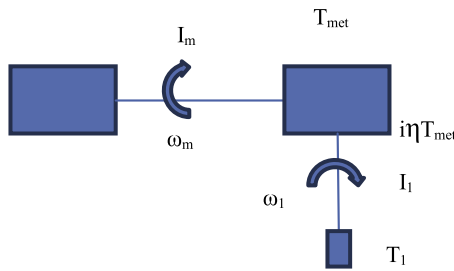


Fig. 15. Simplified model of MET proposed.

conversely placed each other. The proposed principle has infinity of possible relations, between two limits. For an economical solution we propose the design without one cone and clutch. The design will put on novel MET type “Cone mesh CVT”; this design uses one cone (which is called Drive Pulley) and one shaft (which is called Driven Pulley); for reference see Fig. 14.

Fig. 14 introduces MET components and Fig. 13 shows a simplified model of proposed MET.

From Fig. 15 we can obtain the dynamic equations of MET as follows [31]:

$$I_m \omega_m + B_m \omega_m = T_m \quad (20)$$

$$I_1 \omega_1 + B_1 \omega_1 = i \eta T_{met} - T_1 \quad (21)$$

where  $I_m$  is the equivalent rotary inertia of motor,  $I_1$  is the equivalent rotary inertia of the active pulley of MET,  $\omega_m$  is the angular velocity of motor,  $\omega_1$  is the angular velocity of the active pulley of MET,  $B_m$ ,  $B_1$ , represent the equivalent damping coefficient of each axis respectively;  $i$  is the speed ratio of MET and  $\eta$  is the transmission efficiency.  $T_m$  is the output torque of motor;  $T_1$  is the output torque of laser ray drive (equivalent torque of all units sum of laser positioning system).

$$T_1 = F_1 r = r \left[ G + \left( m + \frac{\sum I_2}{r_2} + \frac{I_f^2 \eta}{r^2} \right) \right] \quad (22)$$

In this equation,  $r$  is the radius of laser ray drive;  $G$  is the weight of all units sum of MET;  $I_f$  is the rotary inertia of laser ray drive; and  $m$  is the mass of rotary parts [31].

According to our design presented in Figs. 2 and 12, and recommendations finally derived in Section 4.2, the MET must provide the scanning step angle value changes as soon as possible, and as evident from Eqs. (20) and (21) not too many options are there to provide it. The majority of parameters in Eqs. (20) and (21) are physical constants; even  $\omega_m$  is a constant in our proposal because of the simplest and reliable design of TVS, and so, only  $\omega_1$  is the unique candidate under consideration for variable control function programming. In our opinion, this is another small

advantage of our proposition: the simplest controls always are more robust. In fact, we propose to program the changes by a system processor of the position of active pulley (see Fig. 12) to satisfy the condition that the number value of ratio of controlled  $\omega_1$  and constant  $\omega_m$  will deal exactly with values of one angle of  $3.65^\circ$ ,  $8.6^\circ$  and  $14.6^\circ$ , as necessary at the moment to provide scan.

Additionally is important to note that practically received fuzzy edges of intervals of these three angles ( $1.8\text{--}4^\circ$ ,  $8.2\text{--}8.7^\circ$  and  $14\text{--}14.6^\circ$ ) in the simplest way can be processed only by offered CVT due to its nature of continuous value of its gear ratio.

## 7. Conclusions

The present article offers the original solution able to increase the velocity of the obstacle detection and digital mapping in application to mobile robot navigation. It is possible to provide by implementation of the combined variable scanning step. During the computational experiment in the present research are obtained and rectified for application requirements the values of three particular angles which permit among others the minimal losses of information about scanned objects. Such application permit accelerate the process of automatic search of the obstacles within the scene under interest, with posterior precise measurements only those edges of obstacles which are the most close to the desired future trajectory of the robot. Such approach releases the possibility to “sectorize” the robot’s operating space in practice. The multivariable simulation of scenes in MATLAB warranties the high reliability of such empirically optimized scanning angles and the enhanced resolution of fast scanning.

The distribution and variation of these three angles due to possible versatility of the scene views is still the goal for future research.

During the simulation also are obtained the important practical recommendations about the natural constrains of dynamic scanning resolution which can be useful on the next stage of the algorithm design for robot navigation.

Comparing two kinds of micro transmission design, dual transmission clutch and the conic one, in a difference to our previous solution in [21], it is clear shown by several simulation results that conic transmission in a most quantity of practical constrains is in a better way matching to our practical application requirements.

In the scope of mentioned above, the future work must to consider the wide range simulations in MATLAB of the optimal combination of three detected angle values in the meaning to reach the desired point of scene in the shortest time but precisely in this point, with the smallest possible error of laser ray positioning.

## Acknowledgments

This work was supported by the Graduate and Research Coordination of UABC, Project Program Code 2422. The authors gratefully acknowledge the grant devoted to this research.

## References

- [1] Isheil A, Gonnet J-P, Joannic D, Fontaine J-F. Systematic error correction of a 3D laser scanning measurement device. *Opt Lasers Eng* 2011;49(1):16–24.
- [2] Sandro Barone, Paoli Alessandro, Razionale Armando Viviano. Shape measurement by a multi-view methodology based on the remote tracking of a 3D optical scanner. *Opt Lasers Eng* 2012;50(3):380–90.
- [3] MacFarlane DL, Kim WY, Nilvi JS, Nuth T, Tan V. Novel two-dimensional laser scanning technique. *Opt Lasers Eng* 1992;17(1):1–8.
- [4] Fu Guoqiang, Menciassi Arianna, Paolo Dario. Development of a low-cost active 3D triangulation laser scanner for indoor navigation of miniature mobile robots. *Robotics Autonomous Syst* 2012;60(10):1317–26.

- [5] Sergiyenko OYu. Optoelectronic system for mobile robot navigation. *Optoelectron, Instrum Data Process* 2010;46(5):414–28 (Springer/Allerton Press).
- [6] Lopez MRivas, Sergiyenko Oleg, Tyrsa Vera. Computer vision. In: Zhihui Xiong, editor. *Machine vision: approaches and limitations*. Vienna, Austria. ISBN: 978-953-7619-21-3. p. 395–428 ([chapter 22]).
- [7] Basaca Luis C, Rodríguez Julio C, Sergiyenko Oleg, Tyrsa Vera V, et al. 3D laser scanning vision system for autonomous robot navigation. In: *Proceedings of IEEE international symposium on industrial electronics (ISIE-2010)*. Bari, Italy; July 4–7, 2010. p. 1773–79. ISBN 978-1-4244-6391-6/10.
- [8] Oleg Sergiyenko, et al. Precise optical scanning for practical multiapplications. In: *Proceedings of IEEE 34th annual IEEE conference IECON'08*, Florida, USA; 2008, p. 1656–61.
- [9] Rodríguez JC, Sergiyenko OY, Tyrsa VV, Basaca LC, Hipólito JIN. Continuous monitoring of rehabilitation in patients with scoliosis using automatic laser scanning. In: *Proceedings of Pan American Health Care Exchanges – PAHCE2011 Conference*, Rio de Janeiro, Brazil; 2011. p. 410–4. ISBN: 978-1-61284-918-8.
- [10] Basaca, C, Rodríguez J, Yu Sergiyenko O, Tyrsa VV, Hernandez W, Hipólito JIN, et al. Resolution improvement of dynamic triangulation method for 3D vision system in robot navigation task. In: *Proceedings of the IECON 2010–36th annual conference on IEEE industrial electronics* 10.1109/IECON.2010.5675082; 2010. p. 2886–91.
- [11] Rivas Moisés, Sergiyenko Oleg, Aguirre Mario, Devia Luis, Tyrsa Vera, Rendón Ismael. Spatial data acquisition by laser scanning for robot or SHM task. *IEEE-IES Proceedings International Symposium on Industrial Electronics (ISIE-2008)*. Cambridge, United Kingdom; 30 of June–2 of July, 2008. pp. 1458–63.
- [12] Rodríguez-Quinonez Julio C, Sergiyenko Oleg, Gonzalez-Navarro Fernando, Basaca-Preciado Luis, Tyrsa Vera. Surface recognition improvement in 3D medical laser scanner using Levenberg–Marquardt method. *Signal Process* 2013;93(2):378–86 (Elsevier).
- [13] Sergiyenko Oleg, Tyrsa Vira, Carlos Luis, Preciado Basaca, Rodríguez Quinonez Julio Cesar, Hernandez Wilmar, Nieto Hipolito Juan Ivan, Starostenko Oleg. Optoelectronic devices and properties. In: Sergiyenko Oleg, editor. *Electromechanical 3D optoelectronic scanners: resolution constraints and possible ways of its improvement*. Vienna, Austria. ISBN: 978-953-307-204-3. p. 660 ([chapter XX]).
- [14] Xiong Zhihui, Chen Wang, Zhang Maojun. Computer vision. In: Zhihui Xiong, editor. *Catadioptric omni-directional stereo vision and its applications in moving objects detection*. INTECH; 2008; p. 493–518 [chapter26]. ISBN: 978-953-7619-21-3/493–518.
- [15] Christiano Couto Gava1, Raquel Frizzera Vassallo, Flavio Roberti, Ricardo Carelli. Catadioptric omni-directional stereo vision and its applications in moving objects detection, 2008. [chapter5]. ISBN: 978-953-7619-21-3/71–98.
- [16] Basu Anup, Licardie Sergio. Modeling fish-eye lenses—Intelligent robots and systems'93, IROS'93. In: *Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ international conference*, vol. 3, IEEE; 1993.
- [17] Zhu Z. Environment modeling for visual navigation. Tsinghua University; 1997 (Ph.D. Dissertation, A revised version with title “ Full view spatio-temporal visual navigation-imaging, modeling and representation of real scenes” will be published by China Higher Education Press, 2001).
- [18] Zhu Z, Xu G, Lin X. Panoramic EPI generation and analysis of video from moving platform with vibration. In: *Proceedings of the IEEE CVPR*; 1999. p. 531–537.
- [19] Zhu Zhigang. Omnidirectional stereo vision. In: Anup Basu, Sergio Licardie. *Proceedings of the workshop on Omnidirectional Vision, Modeling fish-eye lense. Intelligent Robots and Systems, IROS'93*. Budapest, Hungary; 2001.
- [20] Lerch T, MacGillivray M, Domina T. 3D laser scanning: a model of multi-disciplinary research. *J Text Apparel Technol Manage* 1533-0915 2007;5 (4):1–21.
- [21] García-Cruz XM, Sergiyenko O.Yu, Hernández-Balbuena D, Rivas López M, Basaca Luis C, Julio Rodríguez, et al. Optimization of laser TVS for robot navigation using combined scanning with variable step. In: *Proceedings of ROC&C'2011, Acapulco, Guerrero, Mexico*, 6 p. CP-34, PON 57.
- [22] Abba A, Caponio F, Geraci A, Ripamonti G. Non-linear least-squares in fpga devices for digital spectroscopy. In: *Proceedings of the nuclear science symposium conference record (NSS/MIC)*, Orlando; 2009. pp. 563–68.
- [23] Wilamowski BM, Yu H. Improved computation for Levenberg–Marquardt training. *IEEE Trans Neural Networks* 2010;21(6):930–7.
- [24] Marquardt D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM J Appl Math* 1963;11(2):431–41.
- [25] Kulkarni Manish, Shim Taehyun, Zhang Yi. Shift dynamics and control of dual-clutch transmissions. *Mech Mach Theory* 2007;42(2):168–82.
- [26] Chien Huai-Ching, Tseng Ching-Huan. An automatic transmission for bicycles: a simulation. *Int J Ind Ergon* 2004;33(2):123–32.
- [27] Galvagno E, Velardocchia M, Vigliani A. Dynamic and kinematic model of a dual clutch transmission. *Mech Mach Theory* 2011;46(6):794–805.
- [28] Kulkarni M, Shim T, Zhang Y. Shift dynamics and control of dual-clutch transmissions. *Mech Mach Theory* 2007;42:168–82.
- [29] Norton Robert L. Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines. McGraw-Hill Higher Education; 2004.
- [30] Srivastava Nilabh, Haque Imtiaz. Clearance and friction-induced dynamics of chain CVT drives. *Multibody Syst Dyn* 2008;19.3:255–80.
- [31] Meilan Zhou, Jiabin Wen, Xudong Wang, Yongqin Zhou. Modeling and performance simulation of transmission system for car equipped with metal pushingV-belt type CVT. In: *Proceedings of the vehicle power and propulsion conference, VPCC'08, IEEE*; 2008.