



ASOCIACIÓN ESPACIAL DE PUNTOS DE ALTA REFLECTANCIA UTILIZANDO VISIÓN ESTÉREO

Tesis presentada por:

Ing. Víctor Hugo Flores Muñoz

Como requisito parcial para la obtención de grado de:

Maestría en Optomecatrónica

Asesora: Dra. Amalia Martínez García

Septiembre de 2010

León, Gto. México

RESUMEN

La visión estéreo es una herramienta muy útil en el escaneo de un objeto a 360° para evaluar su topografía o detectar la profundidad de solamente algunos puntos de interés lo cual puede requerir mucho tiempo de cómputo. En esta tesis se presenta un sistema de visión estéreo que corresponde a un sistema con ejes de visión convergentes en un punto en el espacio, para localizar espacialmente puntos de alta reflectancia, presentando la ventaja de no consumir mucho tiempo de cómputo. Adicionalmente la técnica mediante el uso de estos puntos de referencia proporciona información en primera aproximación de la topografía del objeto. Esta técnica puede ser utilizada para crear un sistema de coordenadas que dependan directamente del objeto y en combinación con la técnica de proyección de franjas, donde ya no se consideraría el plano de referencia, obtener la topografía de objetos y así crear una reconstrucción a 360° del objeto. El arreglo también puede ser utilizado para realizar un monitoreo del movimiento de los marcadores siendo un ejemplo de aplicación, el estudio dinámico de la marcha humana.

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada quiero agradecer a mi familia por su incondicional apoyo y comprensión que me brindaron durante la realización de mi postgrado. A mi mamá y papá que aún estando lejos no dejaron de hacerme sentir como en casa y mi hermano por prestarme una herramienta importante para la elaboración de este trabajo.

A mi asesora la Dra. Amalia Martínez le agradezco la paciencia y el apoyo que me dio durante la elaboración de este trabajo, porque gracias a ella se consiguieron los enlaces con las empresas y así dar a conocer el proyecto.

A los doctores Francisco Cuevas y Héctor Puga por la asesoría brindada al momento de revisar esta tesis.

Al Ing. Juan Rayas por aportar su conocimiento durante el desarrollo de este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para la realización de la maestría así como el brindado para la compra de equipo mediante el proyecto 48286-F Interferometría de moteado para contorno y análisis de deformaciones en 3D.

Al CIO por haberme aceptado y permitirme pertenecer a tan honorable institución de investigación.

A la Dirección de Formación Académica por el trato tan amable y el apoyo brindado para obtener este grado.

A Yanet por el amor, la comprensión y la paciencia que me brindo mientras se elaboró la tesis y a lo largo de la maestría, tu apoyo fue incondicional e indispensable para que terminara. Te Amo.

Y por último pero no menos importante, gracias a cada una de las nuevas personas que llegaron a mi vida y que considero mis amigos.

ÍNDICE

Capítulo 1 Introducción	1
Referencias	6
Capítulo 2 Visión Estéreo	8
2.1 Estereopsis	8
2.2 Sistemas de Visión Estéreo	12
2.2.1 Visión Estéreo Espacial	12
<i>2.2.1.1 Geometría con Ejes Ópticos Paralelos</i>	13
<i>2.2.1.2 Geometría con Ejes Ópticos Convergentes</i>	15
2.2.1.2.1 Coordenadas de Hering	16
2.2.1.2.2 Disparidad y Excentricidad	19
2.2.2 Visión Estéreo Temporal	21
<i>2.2.2.1 Vectores de Desplazamiento</i>	22
<i>2.2.2.2 Flujo Óptico</i>	24
2.2.3 Visión Estéreo Espacio-Tiempo	25
2.3 Métodos de Correlación de Imágenes	27
2.3.1 Método de Relación de Bloques	28
2.4 Solución Matemática Particular	30
2.4.1 Puntos de Alta Reflectancia y Correlación de Centroides	36
Referencias	37
Capítulo 3 Parte Experimental y Resultados	38
3.1 Arreglo Experimental	38
3.2 Algoritmo de Asociación de Marcadores	40
3.3 Experimentos y Resultados	44
3.3.1 Experimento 1	44

3.3.2 Experimento 2	46
3.3.3 Experimento 3	49
Capítulo 4 Conclusiones	55
4.1 Aplicaciones y Trabajo a Futuro	58
4.1.1 Visita a Diversas Instituciones	60
Referencias	63
Apéndice A: Plan de Negocios	64
Apéndice B: Código del Programa	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 2 Visión Estéreo

Figura 2.1 Diferentes tipos de disparidades: a) disparidad puntual horizontal, b) disparidad debida a la orientación, c) disparidad debida a la intensidad, d) disparidad debida al punto de iluminación, e) oclusión monocular.	9
Figura 2.2 Arreglo de sistema de visión estéreo con los ejes ópticos de las cámaras paralelos.	14
Figura 2.3 Esquema geométrico de la visión binocular: a) Ejes de visión con punto de fijación, b) Ejes de visión con punto de fijación y punto en el espacio.	16
Figura 2.4 Gráfica de vergencias constantes con versiones variantes (VMC) y versiones constantes con vergencias variables (Hipérbolas de Hillebrand), en la imagen se consideran los puntos nodales (cámaras) en -1 y 1. El espaciado entre líneas es de 2 grados.	19
Figura 2.5 Proyección bidimensional de un desplazamiento $v \cdot t$ de un punto P realizado entre las imágenes I_i e I_{i+1} .	23
Figura 2.6 Discontinuidad entre las imágenes debida a la oclusión.	26
Figura 2.7 Discontinuidad entre imágenes causada por objetos en movimiento dentro de la escena.	27
Figura 2.8 Par estéreo de una flor donde se puede ver la relación de bloques entre ambas imágenes.	28
Figura 2.9 Diagramas del sistema propuesto: a) Geometría para el punto de fijación, b) Geometría para un punto de interés p .	32

Figura 2.10 Triángulos formados entre la cámara l , el punto de fijación f y el punto de interés p .	33
Figura 2.11 Triangulación para obtener la profundidad del punto de interés respecto a la referencia.	35
Capítulo 3 Parte Experimental y Resultados	
Figura 3.1 Arreglo estéreo montado sobre un tripie en el laboratorio. Las componentes del arreglo son: 1) Cámaras FireWire, 2) Fuente de luz blanca de alta frecuencia, 3) Cables FireWire, 4) Montura para la fuente de luz.	39
Figura 3.2 Diagrama de flujo del algoritmo.	41
Figura 3.3 Arreglo utilizado con base giratoria para simular las perspectivas de 2 cámaras.	44
Figura 3.4 (a) Imagen de objeto con marcadores, (b) Mapa de puntos obtenidos una vez que se escaneo todo el objeto.	45
Figura 3.5 Marcadores colocados en una mano para hacer la identificación y seguimiento de trayectoria durante el movimiento de la mano.	47
Figura 3.6 Imagen del sistema en funcionamiento mientras se realiza la identificación de los marcadores.	48
Figura 3.7 Gráfica tridimensional de la posición espacial de cada uno de los marcadores, la coordenada $(0,0,0)$ corresponde al punto de fijación del sistema. Las unidades de la gráfica están en milímetros.	48
Figura 3.8 Bloques apilados con marcadores colocados sobre ellos para realizar su detección espacial. Las medidas entre cada uno de los marcadores han sido previamente obtenidas.	50
Figura 3.9 Gráficas de localización de marcadores: a) Plano x-z, b) Plano x-y, c) Gráfica tridimensional.	52

Figura 3.10 Error en la detección de profundidad de los marcadores. Las dimensiones están dadas en milímetros.	53
--	----

Capítulo 4 Conclusiones

Figura 4.1 Puntos de referencia sobre la pierna para caracterizar la marcha humana.	58
---	----

Figura 4.2 Reconstrucción hecha con escáner comercial.	59
--	----

Figura 4.3 Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas.	60
---	----

Figura 4.4 Instituto Mexicano del Seguro Social.	61
--	----

Figura 4.5 Continental Automative Guadalajara México.	62
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Profundidad detectada de cada uno de los marcadores a diferentes distancias del objeto respecto a las cámaras. Las unidades están en milímetros.	53
--	----

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La representación tridimensional de una escena es una de las aplicaciones que más ha crecido en los últimos tiempos cuando se habla de visión por computadora. Además de las aplicaciones de la digitalización en Ingeniería Inversa (copias o réplicas de modelos, ingeniería de producto, inspección dimensional, control de calidad, aplicaciones avanzadas de ingeniería) se pueden mencionar las Aplicaciones Médicas, Arte y Restauración, Comercio Electrónico, Aplicaciones Multimedia, Aplicaciones Ergonómicas Avanzadas, etc. De lo mencionado anteriormente se intuye la importancia de las técnicas de digitalización que son clasificadas en dos grandes grupos: sistemas con contacto (digitalizadores mecánicos) y sin contacto (digitalizadores láser y sistemas de visión óptica).

Entre los sistemas sin contacto en la digitalización de objetos está la técnica de proyección de franjas [1] con la finalidad de obtener su topografía. Este sistema ha sido desarrollado comercialmente en el caso de reconstrucción tridimensional [2] siendo una herramienta importante en el proceso de copiado y con aplicación en prototipado rápido [3].

Sin importar las diversas aplicaciones ya mencionadas, un sistema de visión por computadora es una herramienta bastante útil para la detección de la forma tridimensional del entorno o bien del objeto de nuestro interés habiéndose desarrollado diversas técnicas que pueden ser utilizadas para tales fines. Entre estas

técnicas de visión destacan la visión estéreo [4-7], escaneo por línea laser [8-10] y técnicas de luz estructurada [11].

Por medio de visión estéreo es posible localizar espacialmente puntos de interés señalados y además realizar un seguimiento de la trayectoria de dichos puntos. La visión estéreo es un sistema de visión basado en la forma en que los humanos y animales detectamos nuestro entorno y obtenemos la sensación de profundidad, solo que en nuestro caso funciona de maneras mucho más complejas aunque la idea básica es lo misma: captar dos imágenes desde diferentes perspectivas, correlacionarlas y obtener una imagen tridimensional de la escena, fenómeno al cual se le conoce como “Estereopsis” [4].

La técnica puede ser utilizada de forma espacial o temporal para realizar estudios estáticos [5] y dinámicos [6] del objeto de interés. Estas técnicas son pasivas o activas dependiendo de la interacción que tenga el sistema con la muestra. Por ejemplo, para el caso de visión estéreo espacial, se supone que el objeto está fijo en el sistema al momento de obtener las dos imágenes para obtener su topografía, lo que diríamos que es un comportamiento pasivo. Por otro lado la visión estéreo temporal depende de las variaciones en la escena de interés ya sean movimiento del objeto o variaciones en la iluminación entre una escena y otra. Existen técnicas adaptativas que dependiendo de la situación en la escena se aplica el tipo de visión estéreo adecuada, con el fin de mejorar los resultados cuando una de las dos técnicas queda limitada. Estas técnicas adaptativas son conocidas como estéreo espacio-tiempo [12-14].

Independientemente del método utilizado, todo sistema está atado a los posibles errores introducidos por una mala alineación del arreglo, por lo cual es importante conocer la geometría del sistema y tener fijas las referencias para evitar errores al momento de realizar la detección.

Otra clasificación de los sistemas de visión estéreo es respecto a la orientación de las cámaras, es decir, pueden implementarse con los ejes de las cámaras paralelos o convergentes entre sí.

En las técnicas de visión estéreo tradicionales la reconstrucción de la escena se lleva a cabo por medio de correlación de imágenes. Uno de los métodos más utilizados es el método de relación de bloques [15] el cual se basa en la comparación de ventanas entre las imágenes. Sin embargo esta técnica presenta problemas debido a que el tiempo de procesamiento puede ser muy tardado dependiendo del tamaño de la ventana y de la imagen, por lo que el método resulta impráctico para un análisis en tiempo real. Por tal motivo se hace la propuesta del uso de marcadores de alta reflectancia, ya que estos marcadores sirven como puntos fáciles de detectar por el sistema de cámaras de tal forma que al momento de procesarlas por el algoritmo implementado se detectan los centroides de los marcadores en ambas imágenes y la correlación se hace con las coordenadas de dichos centroides por lo tanto reduce enormemente el tiempo de ejecución del algoritmo. Los sistemas comerciales actuales utilizan marcadores de alta reflectancia, los cuales son utilizados como referencias para realizar un escaneo de la superficie del objeto [2].

En esta tesis se presenta la implementación de un sistema de visión estéreo en la detección de marcadores de alta reflectancia colocados sobre el objeto los cual son utilizados para el análisis del movimiento del mismo. El sistema de visión estéreo utilizado corresponde a un sistema con ejes de visión convergentes en un punto en el espacio, lo cual presenta la ventaja de eliminar el problema de la alineación y el uso de una referencia, ya que este punto de convergencia sirve como origen para la detección espacial. Para este análisis nos apoyamos en el uso de las coordenadas de Hering, las cuales una vez detectadas pueden ser transformadas en coordenadas cartesianas.

A partir de la bibliografía se propone un método matemático lo más simple posible para la detección espacial de los puntos. Se realiza luego la programación de un algoritmo para la localización de los puntos de acuerdo al método matemático. Finalmente el algoritmo es probado en el arreglo experimental propuesto.

Como trabajo a futuro se tiene la implementación de un sistema de escaneo donde diferentes sistemas de referencias queden conformados por ternas de los marcadores. La detección de estos marcadores en combinación con la técnica de proyección de franjas haría entonces posible la obtención de la topografía de un objeto sin la necesidad de un plano de referencia externo al objeto. Los métodos para obtener la topografía podrían ser por métodos de Fourier [16] o técnicas de corrimiento de fase [17], entre otros.

El trabajo de tesis está organizado de la siguiente forma:

Capítulo 2 Visión Estéreo. En este capítulo se explica la teoría relacionada a la visión estereo, sus conceptos básicos y las fórmulas matemáticas para obtener la profundidad dependiendo del arreglo.

Capítulo 3 Parte Experimental y Resultados. Aquí se describen los diferentes experimentos que se llevaron a cabo en el proyecto. Se enlista las diversas componentes del sistema de visión estereo y se describe paso a paso el funcionamiento del software desarrollado. Finalmente se hace un análisis de los resultados obtenidos.

Capítulo 4 Conclusiones. Se presentan las conclusiones generales del trabajo y aplicaciones del proyecto así como las visitas a las empresas para promover el proyecto.

Apéndice A. Plan de Negocios.

Apéndice B. Código de los programas y funciones utilizados para detectar la posición de los centroides.

Referencias

- [1] Amalia Martínez, J. A. Rayas, H. J. Puga, K. Genovese, "Iterative estimation of the topography measurement by fringe projection method with divergent illumination by considering the pitch variation along the x and z directions", *Opt. and Lasers in Engineering*, vol. 48 (2010), pp. 877-881.
- [2] L. Gordon, "3D Scanning to Go", Z Corporation, Manual.
- [3] J. A. Alonso, "Sistemas de Prototipado Rápido", versión electrónica (2001), pp. 5-8.
<http://webs.uvigo.es/disenoidustrial/docs/protorapid.pdf>
- [4] P. Geibler, T. Dierig, H. A. Mallot, "Stereopsis", *Computer Vision and Applications* (Academic Press, USA, 2000), pp. 398-413.
- [5] K. Reinhard, K. Schlüns, A. Koschan, "Static Stereo Analysis", *Computer Vision* (Springer-Verlag, Singapore, 1998), pp. 129-176.
- [6] K. Reinhard, K. Schlüns, A. Koschan, "Dynamic Stereo Analysis", *Computer Vision* (Springer-Verlag, Singapore, 1998), pp. 177-226.
- [7] J. F. Cardenas-Garcia, H. Yao and S. Zheng, "3D reconstruction of objects using stereo imaging", *Opt. and Lasers in Engineering*, vol. 22 (1995), pp. 192-213.
- [8] X. Cheng, X. Yu Su, L. Rong Guo, "Automated measurement method for 360° profilometry of 3-D diffuse objects", *Applied Optics*, vol. 30 (1991), pp. 1274-1278.
- [9] H. Ohara, H. Konno, M. Sasaki, M. Suzuki, K. Murata, "Automated 360° profilometry of a three-dimensional diffuse object and its reconstruction by use of the shading model", *Applied Optics*, vol. 35 (1996), pp. 4476-4480.
- [10] J. A. Muñoz-Rodríguez, "Shape connection by pattern recognition and laser metrology," *Applied Optics*, vol. 47 (2008), pp. 3590-3608.

- [11] K. J. Gasvik, "Projected Fringes", Optical Metrology, (Wiley, Great Britain, 2003), pp. 180-188.
- [12] J. Davis, R. Ramamoorthi, S. Rusinkiewicz, "Spacetime stereo: a unifying framework for depth from triangulation", IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell (2005), vol. 27(2), pp. 1-7.
- [13] L. Zhang, B. Curless, S. Seitz, "Spacetime stereo: shape recovery for dynamic scenes", Proceedings of the computer vision and pattern recognition (2003), pp. 367-74.
- [14] L. Zhang, N. Snavely, B. Curless, S. M. Seitz, "Spacetime faces: high-resolution capture for modeling and animation", ACM Trans Graph (2004), vol. 23(3), pp. 548-58.
- [15] Joe Stam, "Stereo Imaging with CUDA", NVIDIA, 1998.
- [16] Mitsuo Takeda, Hideki Ina, and Seiji Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," J. Opt. Soc. Am., vol.72 (1982), pp. 156-160.
- [17] D. Malacara, M. Servín, Z. Malacara, "Phase Shifting Interferometry", Interferogram Analysis For Optical Testing (Marcel Decker, USA, 1998), pp. 247-278.

CAPÍTULO 2: VISIÓN ESTÉREO

La visión estéreo es una de las herramientas utilizadas en el análisis de escenas tridimensionales. El principio de esta técnica está basado en la naturaleza de la visión humana mediante la cual captamos la profundidad de lo que observamos. En este capítulo se dará una explicación de las técnicas de visión estéreo más utilizadas, comenzando con la descripción de lo que es el fenómeno de la Estereopsis [1], después se analizarán a detalle los sistemas de visión estéreo tanto espacial [2, 5] como temporal [3]. Se hará una breve comparación de ambos sistemas para distinguir los casos en que es más apropiada una técnica que la otra [6-8]. También en este capítulo se dará una breve descripción de las técnicas de correlación de imágenes [4]. Por último se explicará la solución matemática utilizada para la localización de los puntos.

2.1 Estereopsis

Se conoce como Estereopsis a la percepción de profundidad obtenida de la diferencia entre las imágenes captadas por el ojo izquierdo y derecho, dicha diferencia se conoce como “disparidad” [1].

Gran parte del trabajo realizado en la visión estéreo ha sido dedicado a la detección de diferencias obtenidas entre 2 cámaras colocadas en diferentes posiciones pero apuntando al mismo objeto, esto con el fin de que a partir de dichas diferencias, o

disparidades, se pueda realizar una reconstrucción tridimensional de la escena vista por ambas cámaras y mejor aún, que ésta pueda ser medida.

Existen diferentes tipos de disparidad que pueden ser captados por nuestro sistema, a continuación se mencionan algunos. En la figura 2.1 se muestran diferentes ejemplos visuales de las disparidades, las imágenes corresponden a las perspectivas vistas por las cámaras tanto izquierda como derecha.

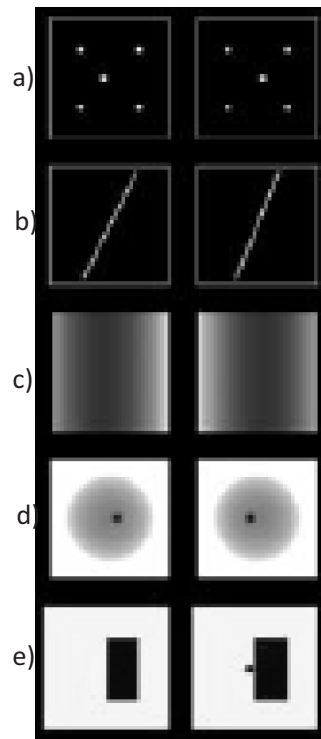


Figura 2.1 Diferentes tipos de disparidades: a) disparidad puntual horizontal, b) disparidad debida a la orientación, c) disparidad debida a la intensidad, d) disparidad debida al punto de iluminación, e) oclusión monocular.

La disparidad horizontal es el desplazamiento horizontal de los puntos de una imagen respecto a la otra al momento de ser comparadas, este desplazamiento puede ser medido como un ángulo o una distancia, en la figura 2.1 (a) se muestra un ejemplo de esta disparidad.

La disparidad vertical es análoga a la disparidad horizontal solo que en este caso el desplazamiento entre los puntos de la imagen es vertical.

La disparidad de orientación ocurre comúnmente cuando en la escena se tienen líneas o planos oblicuos respecto a las cámaras que captan la imagen, lo que da como resultado variaciones en las dimensiones del plano y en detalles del mismo, en la figura 2.1 (b) se puede observar dicha variación.

La disparidad de sombreado es resultado de las variaciones geométricas del objeto, como se muestra en la figura 2.1 (c) la cual corresponde a la vista de un segmento de un cilindro. Se observan las variaciones de sombreado dependiendo de la perspectiva de la cámara. Otro fenómeno similar pero un poco más complejo de analizar se da cuando la superficie del objeto dentro de la escena tiene una superficie reflectiva, en tal caso se manifiestan variaciones en la localización de los puntos de máxima reflexión dependiendo de la perspectiva como se puede ver en la figura 2.1 (d).

Por último tenemos la **oclusión monocular** el cual es un ejemplo de que las dos cámaras visualmente no captan la misma escena ya que un objeto se encuentra detrás

de otro. En la figura 2.1 (e) se muestra un ejemplo más claro en el cual un punto se encuentra detrás de un plano, pero dependiendo la perspectiva de visión este puede ser visto o no, aún así la información de profundidad puede ser obtenida.

Las diferencias ilustradas en las figuras 2.1 (a-c) son conocidas como “mapas de disparidad”. Una manera de formalizar matemáticamente los mapas de disparidad sería de la siguiente manera:

$$I_r(x, y) = I_l(x - \delta_1(x, y), y - \delta_2(x, y)), \quad (2.1)$$

donde:

I_r = Imagen de la cámara derecha

I_l = Imagen de la cámara izquierda

δ_1 = Disparidad horizontal

δ_2 = Disparidad vertical

El mapa de disparidad existe si el área de interés de la escena es visible para ambas cámaras y si el sombreado es Lambertiano es decir que la superficie es difusa, en pocas palabras que no existan discontinuidades en las profundidades [1].

2.2 Sistemas de Visión Estéreo

En esta sección del capítulo se revisarán los diferentes tipos de geometrías de los arreglos de visión estéreo así como una comparación entre las técnicas de visión estéreo espacial y temporal, cada una cuenta con características singulares que las hacen ideales para ciertas condiciones del ambiente en el que es captada la escena.

2.2.1 Visión Estéreo Espacial

La visión estéreo espacial se puede decir que es la visión estéreo tradicional, ya que básicamente hace un análisis estático de la escena. Esta técnica puede ser llamada pasiva porque la recuperación de la forma no requiere interacción con la escena tridimensional.

El análisis de la visión estéreo espacial parte de considerar que se tienen dos perspectivas de un objeto obtenidas desde puntos conocidos en el espacio y asume que el objeto no se mueve durante el intervalo en el cual las imágenes son adquiridas por el sistema, esto quiere decir que las imágenes sean adquiridas al mismo tiempo, a partir de esto, se continua con la búsqueda de correspondencias (correlación) entre ambas imágenes para obtener la forma de la escena capturada. Un ejemplo de aplicación de este sistema sería un par de cámaras montadas en un robot móvil las cuales servirían para detectar la profundidad de su entorno y evitar colisiones [2].

2.2.1.1 Geometría con Ejes Ópticos Paralelos

Partiendo de la idea de que se deben obtener dos perspectivas del mismo objeto, se presenta un arreglo en el cual se utilizan dos cámaras tomando la misma escena desde puntos distintos con lo cual se obtendrá la topografía por medio de triangulación utilizando las imágenes obtenidas por el sistema [5].

En la figura 2.2 se muestra un arreglo montado en el laboratorio de un sistema de visión estereo. En este caso es importante denotar el uso de 2 cámaras cuyos ejes ópticos se encuentran paralelos entre sí y son perpendiculares a la distancia DIO existente entre las cámaras y al plano de referencia del objeto. Las distancias d_1 y d_2 corresponden a las disparidades captadas por cada una de las cámaras respecto al eje óptico, el parámetro f corresponde a la distancia focal del sistema óptico de la cámara, en este caso del centro de la lente al plano de la imagen. La distancia DIO se refiere a la distancia entre las cámaras o también conocida como *Distancia Intraocular*, la letra D simboliza la distancia desde el plano de las cámaras hasta el plano de referencia, y por último la distancia z representa la topografía del objeto en cierto punto.

Una vez que las imágenes son obtenidas se utiliza un algoritmo de correlación con el cual se detectan los puntos conjugados de ambas imágenes, entonces ya que es conocida la disparidad entre ambos puntos y de igual forma se conocen los datos geométricos del arreglo se puede hacer la obtención de la topografía a partir de una triangulación.

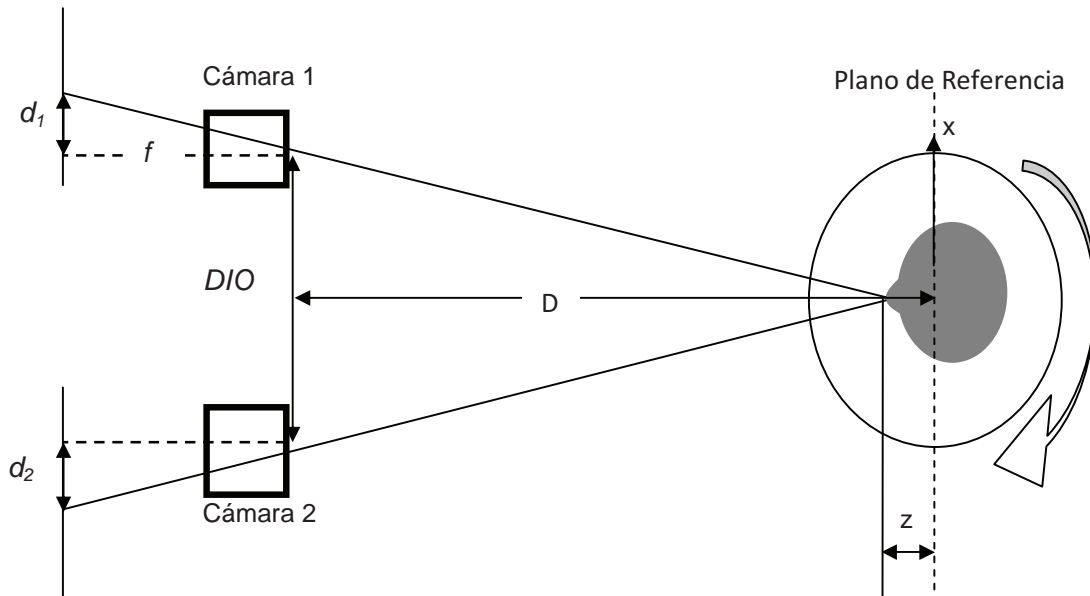


Figura 2.2 Arreglo de sistema de visión estéreo con los ejes ópticos de las cámaras paralelos.

Observando la figura 2.2 podemos obtener una relación de triángulos si tomamos los formados por el DIO y los ejes de las cámaras y este lo relacionamos con los formados por las disparidades d_1 y d_2 y la distancia focal de las cámaras. De esta manera obtenemos la siguiente relación:

$$\frac{f}{d_1-d_2} = \frac{D-z}{DIO} \quad (2.2)$$

Donde la diferencia dada por d_1-d_2 representa la disparidad entre puntos conjugados, de aquí podemos obtener que:

$$z = D - DIO \frac{f}{d_1-d_2} \quad (2.3)$$

A partir de esta relación se pueden establecer algunas condiciones para mejorar la sensibilidad del sistema. Por ejemplo, la disparidad es inversamente proporcional a la topografía del objeto, lo que se puede interpretar como que el sistema será más sensible a objetos cercanos debido a que la disparidad sería más notoria, caso contrario en objetos alejados donde la disparidad es más pequeña y por lo tanto la exactitud disminuiría. Por otra parte la distancia intraocular es directamente proporcional a la disparidad lo cual aumenta la sensibilidad del sistema, el problema al hacer esto es que se pueden perder áreas conjugables entre ambas imágenes. Por último, la profundidad del objeto es directamente proporcional a la distancia focal de las cámaras, por consecuencia para distancias grandes u objetos grandes se requieren distancias focales mayores.

2.2.1.2 Geometría con Ejes Ópticos Convergentes

La idea básica de la forma de estos arreglos es que los ejes ópticos de las cámaras convergen en algún punto en el espacio, al cual llamaremos “punto de fijación”. El uso de un sistema como este presenta una gran ventaja porque a partir de este punto de convergencia nosotros podemos elaborar un sistema de coordenadas que tengan como origen dicho punto.

Este sistema de visión está más basado en la visión humana ya que es así como funciona, nuestros ojos convergen a medida que queremos enfocar la profundidad de ciertas escenas. En la siguiente parte de esta sección se describirá un poco más a detalle del modelo matemático que se utiliza para caracterizar la localización espacial de los puntos de la escena por medio de esta geometría.

2.2.1.2.1 Coordenadas de Hering

Un esquema simplificado de un sistema estéreo con ejes convergentes se muestra en la figura 2.3 a) en la cual las cámaras izquierda y derecha están denotadas por las letras l y r respectivamente, el punto f corresponde al punto de fijación, es decir donde convergen los ejes de las cámaras. A partir de estos 3 puntos se crea una circunferencia cuyo radio es expresado en la ecuación 2.6. Los ángulos α_l y α_r son los ángulos acimutales de las cámaras, c es el punto de visión "cíclope" el cual se encuentra entre las dos cámaras, es decir, es el punto donde se encontraría la cámara que captaría la escena que contiene información de la profundidad. Por último θ y ϕ son los ángulos llamados "vergence" y "version" (vergencia y versión) respectivamente, cuyo uso será mencionado más adelante.

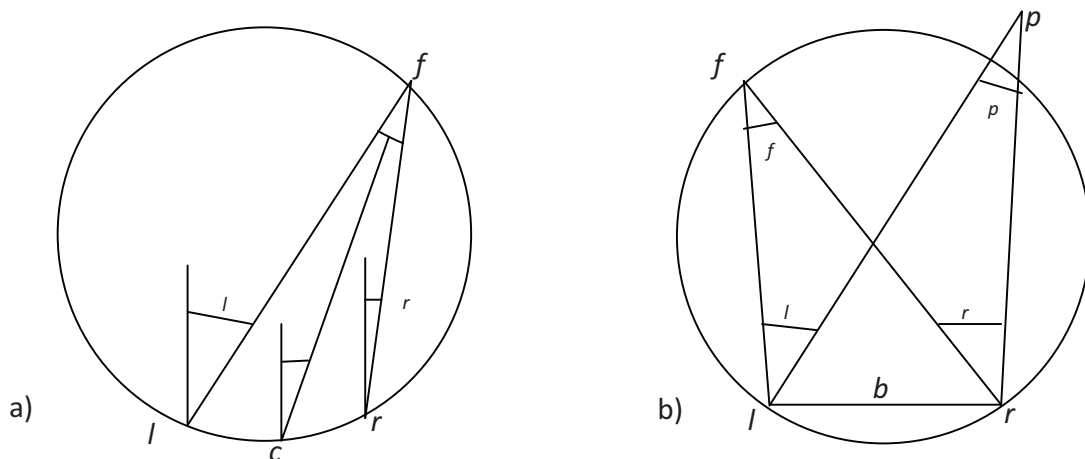


Figura 2.3 Esquema geométrico de la visión binocular: a) Ejes de visión con punto de fijación, b) Ejes de visión con punto de fijación y punto en el espacio.

Por otro lado tenemos en la figura 2.3 b) la geometría del sistema cuando se detecta un punto p dentro del rango de visión del sistema. Para este caso tanto el punto de fijación como el punto p tienen sus respectivas vergencias. También en la

figura se incluyen 2 ángulos que son α_l y α_r que corresponden al ángulo acimutal del punto p respecto al punto f .

Para ambos casos se considera que se tiene una distancia b entre las cámaras y que estas están localizadas espacialmente en $(-b/2, 0, 0)$ para l y $(b/2, 0, 0)$ para r , lo que nos dice que ambas cámaras se encuentran en un mismo plano epipolar en este caso (x, z) (o sea que están a la misma altura) y que se encuentran a la misma profundidad respecto al punto de fijación.

Los ángulos α_l y α_r están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \varphi_l - \varphi_r \quad (2.4)$$

$$\gamma = \frac{1}{2}(\varphi_l + \varphi_r) \quad (2.5)$$

Estas cantidades son conocidas como “Hering vergence” (α) y “Hering versión” (γ) y ambas son las llamadas coordenadas de Hering [1].

Si los ejes de las cámaras fueran paralelos α sería cero. Nunca se tendrán ángulos negativos mientras los ejes converjan en algún punto, por otra parte si $\alpha > 0$ se puede dibujar un círculo que pase por los puntos nodales de las cámaras y el punto de fijación, dicho círculo tendrá un radio

$$R = \frac{b}{2 \sin \alpha} \quad (2.6)$$

Y cuyo centro será

$$v = [0, 0, \frac{b}{2} \cot \alpha]^T \quad (2.7)$$

Este círculo es el llamado “Círculo de Vieth-Müller” o *VMC* por sus siglas en inglés.

Como se mencionó anteriormente, el punto cílope c corresponde al punto intermedio entre las dos cámaras l y r , y la dirección hacia donde observa este punto es la versión del sistema (γ) . Cabe destacar que la posición y el ángulo de visión del punto cílope están relacionados con la α del punto de fijación y viceversa. Si se hiciera una gráfica donde se evaluarán diferentes vergencias para versiones constantes se obtendrían las llamadas “Hipérbolas de Hillebrand” las cuales se muestran en la figura 2.4.

Por otro lado por trigonometría se puede hacer una conversión de coordenadas de Hering a coordenadas cartesianas (x, y, z) a partir de la siguiente ecuación:

$$H(\alpha, \gamma) = \frac{b}{2 \sin \alpha} \begin{bmatrix} \sin 2\gamma \\ 0 \\ \cos \alpha + \cos 2\gamma \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos \varphi_r \sin \varphi_l - \cos \varphi_l \sin \varphi_r \\ 0 \\ 2 \cos \varphi_r \cos \varphi_l \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

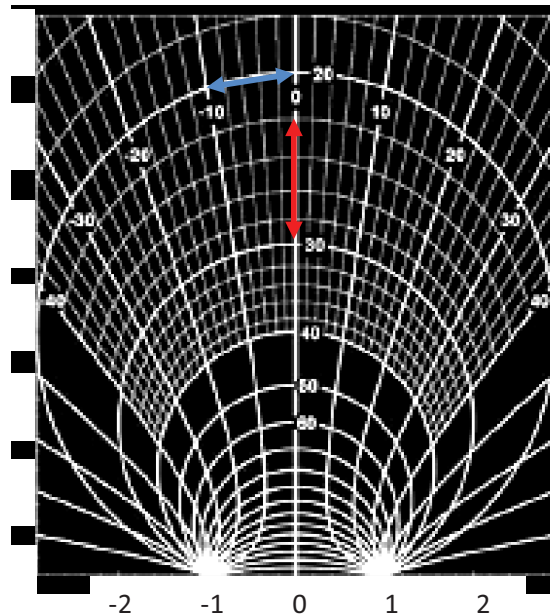


Figura 2.4 Gráfica de vergencias constantes con versiones variantes (VMC) y versiones constantes con vergencias variables (Hipérbolas de Hillebrand), en la imagen se consideran los puntos nodales (cámaras) en -1 y 1. El espaciado entre líneas es de 2 grados.

En la figura 2.4 se muestra un sistema de visión estéreo con ejes convergentes. La línea roja denota una variación en la vergencia del punto, dicho cambio se conoce como *disparidad angular*. Por otro lado la línea azul indica un cambio en la versión a lo cual llamaremos *excentricidad*, ambos términos serán analizados a detalle en la siguiente sección.

2.2.1.2.2 Disparidad y Excentricidad

Hasta el momento se han considerado los ejes de las cámaras y sus puntos de intersección. En esta sección se hablará un poco de la interacción del punto de fijación con un segundo punto p que se encuentre en el espacio, como se muestra en la figura

2.3 b). En la imagen se pueden apreciar los ángulos β_l y β_r que corresponden a la separación entre los ejes de visión del punto de fijación y los ejes al punto p . A partir de estos ángulos se puede obtener una disparidad angular por medio de su diferencia:

$$\delta = \beta_l - \beta_r \quad (2.9)$$

De la misma forma con estos ángulos se puede obtener una excentricidad promedio de la localización del punto p respecto al punto de fijación:

$$\eta = \frac{1}{2}(\beta_l + \beta_r) \quad (2.10)$$

Se puede observar a simple vista que las ecuaciones 2.9 y 2.10 tienen cierta analogía con las ecuaciones 2.4 y 2.5, esto es debido a que la disparidad depende directamente de la diferencia de las vergencias del punto a estudiar respecto al punto de fijación, de tal forma que:

$$\delta(p) = \alpha_f - \alpha_p \quad (2.11)$$

De manera análoga sucede con la versión de dicho punto

$$\eta(p) = \gamma_f - \gamma_p \quad (2.12)$$

Con estas relaciones obtenidas podemos obtener la posición del punto p en coordenadas de Hering dentro del sistema de visión respecto al punto de fijación. La ventaja aun mayor es que podemos transformar dichas coordenadas a coordenadas cartesianas por medio de la transformación mostrada en la ecuación 2.8 introduciendo como parámetros la vergencia sumada con la disparidad y la versión sumada con la excentricidad, $H(f^+(p), f^-(p))$, [1].

2.2.2 Visión Estéreo Temporal

El análisis de visión estereo temporal es un método dinámico el cual considera que los objetos de la escena tienen movimiento debido a cambios en la toma de una escena. Estos movimientos se pueden percibir por diferentes causas, por ejemplo si la cámara se mueve o si la iluminación de la escena cambia de una toma a otra, entonces tenemos un *movimiento relativo*, por otra parte si el sistema de visión se encuentra fijo pero los objetos de la escena se mueven estaremos hablando de *movimientos absolutos*. Puede haber casos en que se presenten ambos movimientos, situaciones en las cuales el objeto se encuentra en movimiento, se presentan variaciones de luz y el sistema de visión se mueve, pero no se analizaran casos tan complejos.

Cuando se realiza un análisis estereo temporal de una escena, el desplazamiento 3D queda proyectado en una imagen 2D, para obtener la información de un movimiento tridimensional desde una imagen es necesario recurrir a la obtención de “vectores de desplazamiento local”.

2.2.2.1 Vectores de Desplazamiento

Supongamos que tenemos una secuencia de imágenes $I_1, I_2, I_3...$ hasta I_i las cuales son capturadas con nuestra cámara con intervalo de constante de tiempo t entre ellas. El movimiento de un punto P en el espacio el cual sucedió en el intervalo entre I_i e I_{i+1} será detectado por el sistema a manera de un desplazamiento bidimensional en el plano imagen de la cámara, como se muestra en la figura 2.5.

La diferencia de posiciones entre los puntos proyectados en el plano imagen están dados por:

$$d_{xy}(t) = p_{i+1} - p_i = \delta t \cdot (\xi_{xy}(t), \Psi_{xy}(t)) \quad (2.13)$$

Donde d_{xy} es el desplazamiento bidimensional captado por la cámara, p_{i+1} y p_i son los 2 puntos proyectados en el plano imagen en los diferentes momentos de la toma de la imagen, f es la distancia focal de la lente de la cámara, δt es el intervalo de tiempo constante entre la toma de las imágenes y $\xi_{xy}(t), \Psi_{xy}(t)$ son las velocidades de la dirección x y la dirección y del desplazamiento del punto P. Para un caso específico podemos establecer entonces la ecuación 2.14 y para casos generales la ecuación 2.15.

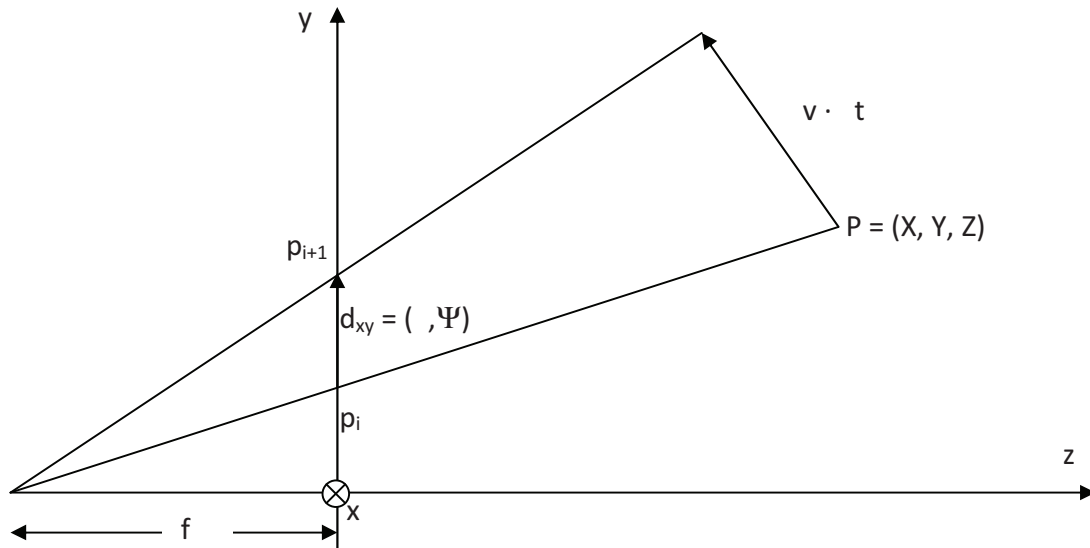


Figura 2.5 Proyección bidimensional de un desplazamiento $v \cdot t$ de un punto P realizado entre las imágenes I_i e I_{i+1} .

$$p_{i+1} = p_i + \delta t \cdot (\xi_{xy}(t), \Psi_{xy}(t)) = \left(x + \delta t \cdot (\xi_{xy}(t)), y + \delta t \cdot (\Psi_{xy}(t)) \right) \quad (2.14)$$

$$p_{i+1} = p_i + \delta t \cdot v(t), \quad (2.15)$$

donde $v(t) = (\xi_{xy}(t), \Psi_{xy}(t))$, [3].

2.2.2.2 Flujo Óptico

El flujo óptico es la razón de cambio de las intensidades de dos imágenes consecutivas dentro de una secuencia de imágenes. Si asumimos que estas variaciones son causadas en su totalidad por movimientos de objeto dentro de la escena, entonces el flujo óptico puede ser utilizado para obtener campos de desplazamiento locales, siempre y cuando el objeto tenga textura y no se tengan variaciones de iluminación, movimientos de las cámaras o variaciones de intensidad captadas por el sensor de la cámara. Al momento de realizar la correspondencia entre ambas imágenes obtenemos el campo de correspondencia y el campo de flujo óptico los cuales llamaremos como campo de desplazamientos aparentes y campo de velocidades aparentes respectivamente.

Supongamos que la intensidad de una imagen I_i en un punto $p(x,y)$ este dada por $I(x,y,t_i)$ para $i = 0,1,2,\dots$, donde $t_i = i \cdot t$ y t es el tiempo constante entre cada toma.

$$U_i(x, y) = (u_i(x, y), v_i(x, y)) \quad (2.16)$$

$$I(x + u_i(x, y), y + v_i(x, y), t_i + \delta t) = I(x, y, t_i) \quad (2.17)$$

Entonces la ecuación 2.16 es el flujo óptico de la imagen I_i a I_{i+1} que caracteriza el cambio de intensidad entre las imágenes y la ecuación 2.17 caracteriza el flujo óptico de I_i a I_{i+1} . En un caso ideal de correlación de imágenes para detectar el flujo óptico entre imágenes obtendríamos una relación igual a la que utilizamos para detectar los desplazamientos locales de tal forma que se cumple la ecuación 2.18.

$$\xi_{xy}(t) = u_i(x, y) \quad \text{y} \quad \Psi_{xy}(t) = v_i(x, y) \quad (2.18)$$

Por lo tanto el desplazamiento estaría dado por:

$$d_{xy}(t) = (u_i(x, y), v_i(x, y)) \quad (2.19)$$

Tal relación matemática es llamada “fidelidad del desplazamiento” del flujo óptico y puede ser utilizada como cálculo del error de la medición del flujo óptico [3].

2.2.3 Visión Estéreo Espacio-Tiempo

Hasta el momento ya se vieron los métodos de visión estéreo espacial y temporal, en ambos casos pueden existir errores de correlación por lo cual en algunas situaciones la visión estéreo espacial se puede ver limitada o viceversa. En esta sección se hablará un poco de la relación entre los errores en los dominios espaciales y temporales. Es importante señalar que esta parte es únicamente una comparación entre ambos dominios de la visión estéreo, donde una técnica se ve limitada con la otra.

En la visión estéreo espacial, las regiones de un objeto que tienen textura uniforme y constante (por ejemplo objetos blancos y lisos) crean dificultades debido a que al momento de realizar la correlación entre imágenes la información presenta ambigüedades por que las superficies tomadas por ambas cámaras lucen iguales aún

cuando se aumenta la ventana de correlación. De manera similar en visión estereo temporal una escena con iluminación constante no proporciona nueva información sobre la topografía del objeto. La visión estereo espacial funciona mejor con objetos de mayor frecuencia espacial y la temporal se desempeña mejor en escenas con iluminación variante a alta frecuencia.

En visión estereo espacial puede existir el inconveniente que un obstáculo se encontrará entre las cámaras y el objeto, lo que crearía imágenes no correlacionables entre las cámaras debido a las perspectivas que cada una captaría, como se muestra en la figura 2.6.

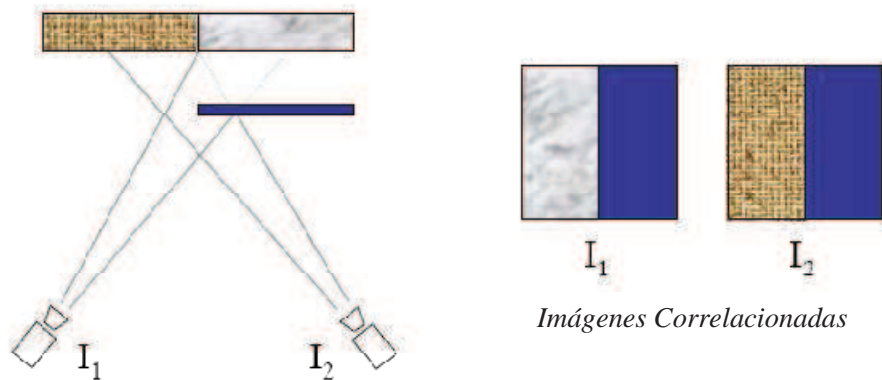


Figura 2.6 Discontinuidad entre las imágenes debida a la oclusión.

De manera análoga en el dominio temporal, objetos en movimiento entre la cámara y el objeto crearan discontinuidades entre las imágenes captadas a diferentes tiempos como se muestra en la figura 2.7 [6].

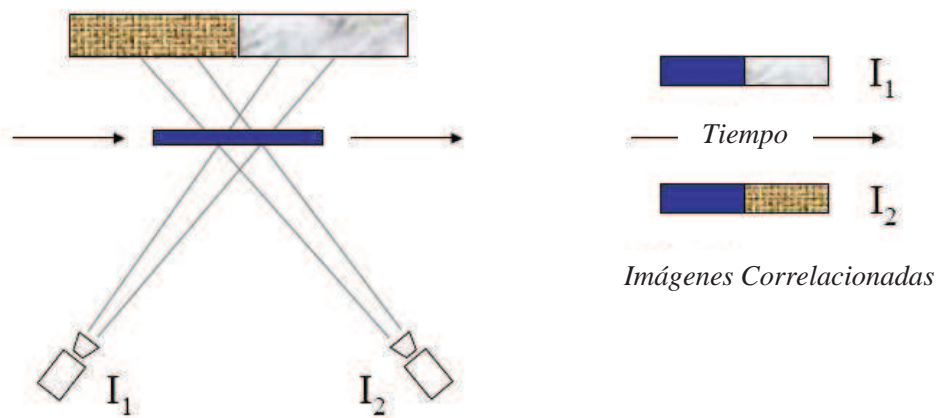


Figura 2.7 Discontinuidad entre imágenes causada por objetos en movimiento dentro de la escena.

2.3 Métodos de Correlación de Imágenes

Uno de los procesos más importantes de la recuperación topográfica utilizando visión estereo es la correlación del par de imágenes estereo, esto es porque a partir de esta correlación se obtiene la disparidad de los puntos entre ambas imágenes y con esto por medio de los métodos mostrados en 2.2 se puede obtener la información de la topografía de la escena.

Para la correlación de las imágenes de un par estereo se supone que la correspondencia de los pixeles debe estar basada en la similitud de sus intensidades, sin embargo esta correspondencia puede darse en muchos puntos de una imagen dada. Partiendo de este problema es que se utilizan vecindarios de pixeles dentro de ambas imágenes los cuales son llamados bloques, estos bloques son comparados entre sí por medio de la medición de su similitud. La aplicación de estos métodos puede

darse en todos los pixeles de la imagen o bien solo para regiones de interés como los bordes de una imagen [2].

2.3.1 Método de Relación de Bloques

Los algoritmos de relación de bloques son utilizados para detectar las disparidades entre las imágenes del par estéreo. Como se muestra en la figura 2.8 se tienen dos imágenes de una flor desde perspectivas diferentes, se toma un bloque de la imagen de la izquierda y es trasladado horizontalmente por toda la imagen de la derecha. El objetivo es encontrar la mejor correspondencia entre el bloque de la izquierda y el bloque de la derecha. El número de pixeles que el bloque deba ser trasladado es el valor de la disparidad.

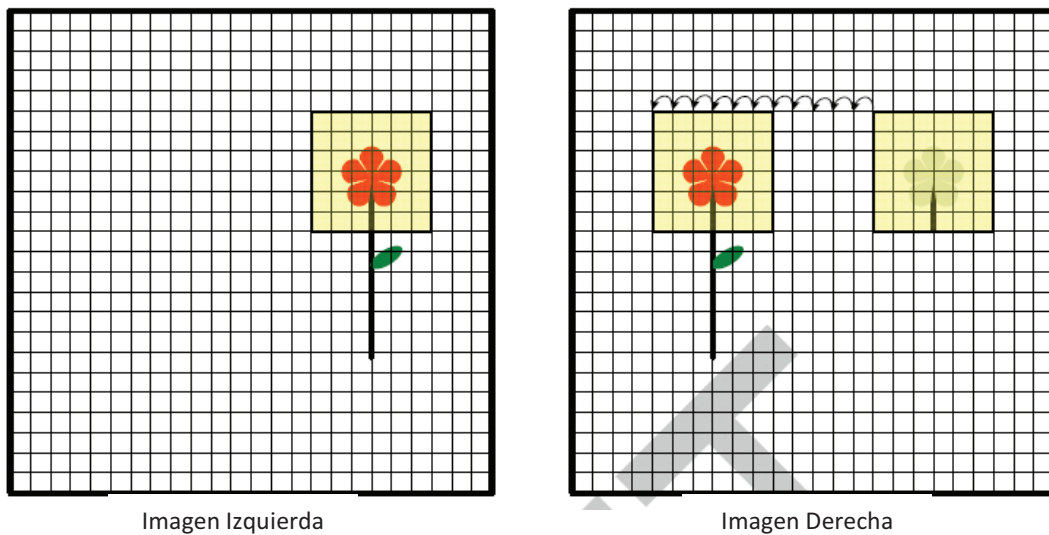


Figura 2.8 Par estéreo de una flor donde se puede ver la relación de bloques entre ambas imágenes.

Se pueden utilizar métodos para determinar la mejor correspondencia entre bloques, pero en nuestro caso utilizamos el método de RMS (Root Mean Square). En este caso la posición que proporcione el menor error RMS será la mejor correspondencia y se tomará esa disparidad de dicha posición, la ecuación utilizada en el algoritmo es:

$$RMS(x, y, d) = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (I_l(x + i, y + j) - I_r(x - d + i, y + j))^2 \quad (2.20)$$

Donde m y n son el tamaño de la ventana a utilizar, I_l e I_r son las intensidades de las imágenes del par estereo y d es la disparidad, en este caso asumimos que ambas cámaras se encuentran a la misma altura, por lo tanto no existe disparidad vertical.

Un parámetro bastante crítico para este tipo de algoritmos es el tamaño de bloque que se vaya a utilizar ya que hay que hacer un balance en el tamaño del mismo. Si el bloque es muy pequeño puede haber ambigüedades en la medición, pero sí es muy grande se tendría mejor información y mejores resultados de correspondencia, pero sería sumamente costoso computacionalmente.

Existe diversidad de formas de implementar el ajuste del tamaño de la ventana, ya sea por métodos iterativos, o bien tomando tamaños moderados de ventanas aunque haya pérdida de información, de una o de otra forma, elaborar un sistema de recuperación de topografía en tiempo real utilizando relación de bloques sería poco práctico por dichos inconvenientes [4].

En el presente trabajo se utilizó una comparación de Mínima Distancia Euclidiana donde se realiza una comparación de cercanía entre las coordenadas de los centroides de los marcadores de ambas imágenes. Si las cámaras se encuentran alineadas epipolarmente la diferencia en y será igual al cero. La fórmula matemática utilizada es:

$$MDE = \sqrt{(x_l - x_r)^2 + (y_l - y_r)^2} \quad (2.21)$$

2.4 Solución Matemática Particular

En la sección anterior se trató sobre las coordenadas de Hering y como éstas se pueden utilizar para detectar la posición de puntos de interés de una escena por medio de una transformación a coordenadas cartesianas. Sin embargo el problema no reside en hacer el cálculo de la excentricidad y disparidad angular, sino en la detección de las coordenadas de Hering de los puntos de interés. A continuación se describe la solución matemática utilizada para la detección de dichos puntos.

Supongamos un arreglo estereoscópico como el que se muestra en la figura 2.9 a) donde los ejes ópticos de ambas cámaras son convergentes en un punto f y son epipolares, para este caso los ángulos φ_l y φ_r son iguales, entre las cámaras existe una distancia b . La línea d es perpendicular a la línea b y corresponde a la distancia entre las cámaras y el punto de fijación. Por medio de las ecuaciones 2.4 y 2.5 podemos obtener la vergencia y la versión del punto de fijación y con la ecuación 2.5 el radio del VMC.

Una vez realizados los cálculos mencionados podemos notar que la versión del punto de fijación es cero debido a que los ángulos de visión de las cámaras son iguales. Para obtener los ángulos a los cuales se encuentran las cámaras se hace un cálculo de triangulación donde si suponemos que ambos ejes convergen en el punto f entonces:

$$\varphi_l, \varphi_r = \tan^{-1} \frac{b}{2d} \quad (2.22)$$

Una vez que conocemos todos los datos geométricos del arreglo podemos pasar a la deducción de la vergencia y versión del punto de interés p mostrado en la figura 2.9 b).

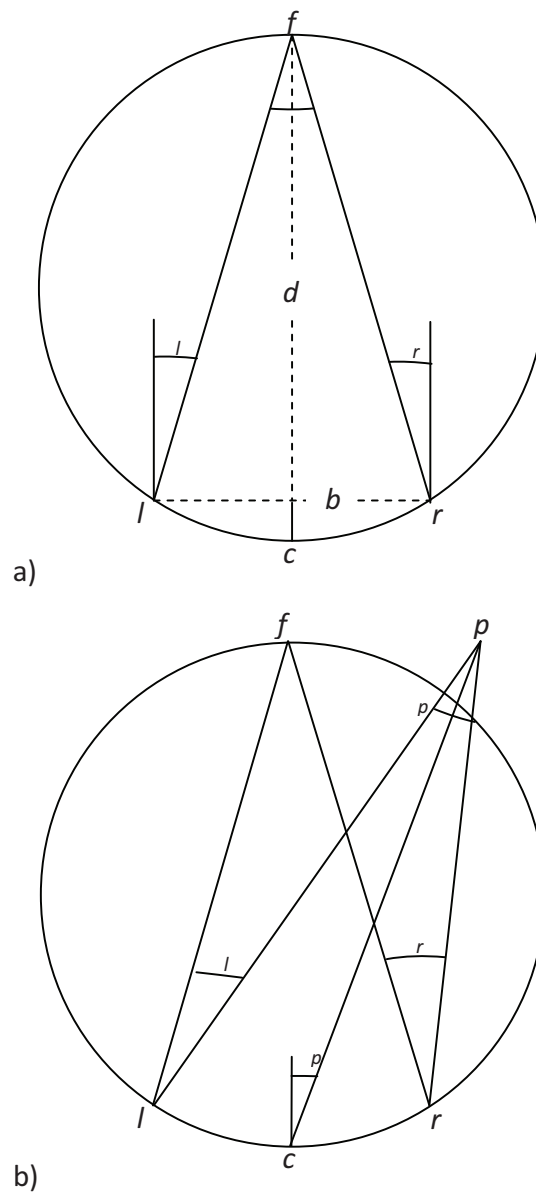


Figura 2.9 Diagramas del sistema propuesto: a) Geometría para el punto de fijación, b) Geometría para un punto de interés p .

Si formamos un triángulo como el mostrado en la figura 2.10 podremos obtener el ángulo β_l . El punto f representa el punto de fijación y el punto p es el punto de interés, x_l denota la posición del punto p proyectada sobre la perpendicular al eje

óptico de la cámara l , el ángulo β_l es correspondiente por ángulos opuestos en ambos lados de la cámara, la distancia f_o es la distancia focal de la cámara, la distancia x_l' es la distancia equivalente a x_l en el sensor de la cámara. En pocas palabras tenemos una relación de triángulos. Para la obtención del ángulo β_l podemos hacer las siguientes relaciones [1]:

$$\tan \beta_l = \frac{x_l}{lf} = \frac{x_l'}{f_o} \quad (2.23)$$

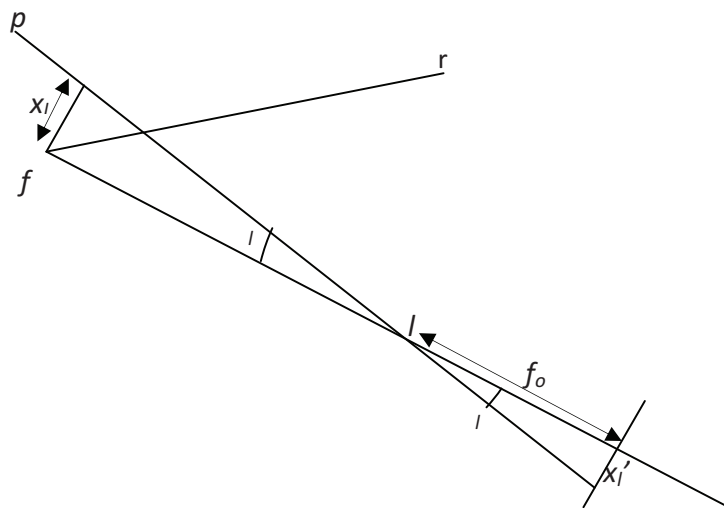


Figura 2.10 Triángulos formados entre la cámara l , el punto de fijación f y el punto de interés p .

Mediante las relaciones mostradas en la figura 2.10 el cálculo puede realizarse por dos caminos, ya sea obteniendo la distancia x_l desde el plano imagen haciendo una conversión de pixeles a unidades métricas o bien obtener su x_l' midiendo el sensor de la cámara para crear una equivalencia pixel-milímetros y hacer la conversión de unidades. Para ambos casos se pueden conocer los parámetros y a partir de ahí

obtener el ángulo β_l . En la figura 2.10, r denota la posición de la cámara derecha la cual evita ambigüedades en la posición de p , que en el caso del uso de una sola cámara denotada como l , no habría posibilidad de diferenciar los diferentes puntos que se encuentran en su línea de visión, es decir se resuelve el problema que da la perspectiva cuando los demás puntos son oclucionados por el que se encuentra enfrente de ellos.

De manera análoga se puede realizar el cálculo de β_r :

$$\tan \beta_r = \frac{x_r}{l_f} = \frac{x_r'}{f_o} \quad (2.24)$$

Una vez que obtuvimos los ángulos podemos calcular la disparidad angular y la excentricidad del punto de interés utilizando las ecuaciones 2.9 y 2.10. Con estos datos podemos realizar un despeje de las ecuaciones 2.11 y 2.12 y así obtener la vergencia y la versión del punto de interés. Si la vergencia es menor que la vergencia del punto de fijación significa que el punto se encuentra a una profundidad mayor que el punto de fijación, por otro lado el signo de la versión indica la excentricidad de dicho punto respecto a la referencia. Con estos datos podemos hacer la transformación a coordenadas cartesianas expresado en la ecuación 2.8, de tal forma que:

$$x_p = R \sin 2\gamma_p \quad (2.25)$$

$$z_p = R(\cos \alpha_p + \cos 2\gamma_p) \quad (2.26)$$

Una aproximación más simple de obtener la profundidad del punto p , la cual hemos llamado z_p , respecto a la referencia puede ser obtenida mediante una triangulación una vez que se tiene la distancia x como se muestra en la figura 2.11. Esta triangulación aplica únicamente cuando el punto de interés se encuentra cerca, o en el plano del punto de fijación f .

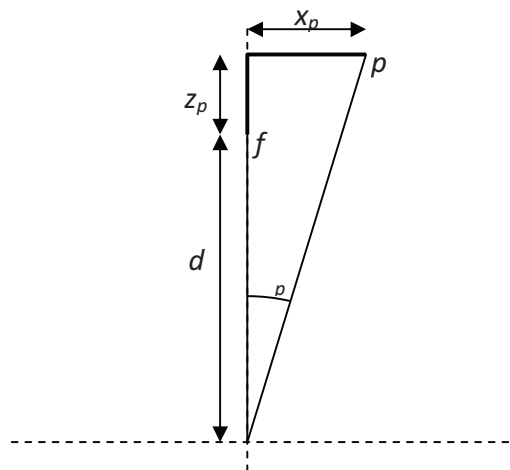


Figura 2.11 Triangulación para obtener la profundidad del punto de interés respecto a la referencia.

Por trigonometría podemos obtener la profundidad z_p del punto p tomando en cuenta que una profundidad positiva es hacia atrás de la referencia y una profundidad negativa es hacia delante del punto de fijación, si se desea cambiar el sentido solo hay que cambiar el signo de la resta en la ecuación 2.28.

$$\frac{x_p}{d+z_p} = \tan \gamma_p \quad (2.27)$$

Donde despejamos la distancia z_p y obtenemos:

$$z_p = \frac{x_p}{\tan \gamma_p} - d \quad (2.28)$$

2.4.1 Puntos de Alta Reflectancia y Correlación de Centroides

Técnicamente estos puntos son etiquetas retroreflectivas, o sea que reflejan una cantidad importante de luz hacia la misma dirección de donde están siendo iluminadas. Estas etiquetas juegan un papel muy importante debido a que permiten realizar el seguimiento de trayectorias de un único punto de interés. En la sección 2.3.1 se habló del método de relación de bloques en el cual se hace una comparación entre las imágenes utilizando una ventana que se desplaza a través de ellas hasta encontrar el vecindario que presente menor error en la correlación. Sin embargo, este método es bastante tardado para propósitos de procesamiento en tiempo real como el que deseamos hacer. Por tal motivo el uso de los puntos de alta reflectancia nos ayudan a mejorar la velocidad del algoritmo ya que para procesar las imágenes únicamente es necesario identificar los círculos, detectar sus centroides y comparar los vectores de coordenadas de dichos centroides de cada par de imágenes lo cual reduce enormemente el número de comparaciones realizadas.

Una vez detectado espacialmente el centroide de cada uno de los puntos se puede comenzar a hacer una comparación entre la posición inicial del mismo y la posición en la siguiente toma de imágenes realizando una nueva correlación de imágenes, pero esta vez de manera temporal.

Referencias

- [1] P. Geibler, T. Dierig, H. A. Mallot, "Stereopsis", Computer Vision and Applications (Academic Press, USA, 2000), pp. 398-413.
- [2] K. Reinhard, K. Schlüns, A. Koschan, "Static Stereo Analysis", Computer Vision (Springer-Verlag, Singapore, 1998), pp. 129-176.
- [3] K. Reinhard, K. Schlüns, A. Koschan, "Dynamic Stereo Analysis", Computer Vision (Springer-Verlag, Singapore, 1998), pp. 177-226.
- [4] Joe Stam, "Stereo Imaging with CUDA", NVIDIA, 1998.
- [5] J. F. Cardenas-Garcia, H. Yao and S. Zheng, "3D reconstruction of objects using stereo imaging", Opt. and Lasers in Engineering, vol 22 (1995), p. 192-213.
- [6] J. Davis, R. Ramamoorthi, S. Rusinkiewicz, "Spacetime stereo: a unifying framework for depth from triangulation", IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell (2005), vol. 27(2), pp. 1-7.
- [7] L. Zhang, B. Curless, S. Seitz, "Spacetime stereo: shape recovery for dynamic scenes", Proceedings of the computer vision and pattern recognition (2003), pp. 367-374.
- [8] L. Zhang, N. Snavely, B. Curless, S. M. Seitz, "Spacetime faces: high-resolution capture for modeling and animation", ACM Trans Graph (2004), vol. 23(3), pp. 548-558.

CAPÍTULO 3: PARTE EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

En este capítulo se presenta el trabajo experimental así como los resultados obtenidos. En la primera sección del capítulo se hará una descripción técnica del arreglo utilizado y el funcionamiento de éste. En la segunda parte del capítulo daremos una explicación del funcionamiento del algoritmo de asociación de puntos. Por último se presentaran los resultados obtenidos y las áreas de oportunidad que incentivan para mejorar el sistema.

3.1 Arreglo Experimental

El arreglo experimental se muestra en la figura 3.1 y consta de los siguientes elementos:

- 2 cámaras CCD Firewire marca Unibrain, modelo Fire-i con resolución de 640 x 480 px a 30 cuadros por segundo y 8 bits de profundidad.
- Tripie.
- 2 cables firewire.
- Lámpara de luz blanca de alta frecuencia (85 kHz).
- 2 lentes con distancia focal de 8 mm.
- Monturas mecánicas.
- Computadora personal.

- MatLab como software de adquisición y procesamiento de imágenes.

Para la alineación de las cámaras se colocó un punto de referencia alineado con el punto medio entre las cámaras de tal forma que en ambas imágenes de las cámaras este punto este posicionado en el centro. Ambas cámaras fueron alineadas con ayuda de un nivel para evitar inclinaciones entre ambas, una vez hecho esto se tomaron las medidas de la geometría del arreglo tales como la distancia del plano de las cámaras y el punto de fijación, o sea la distancia d , y la medición de línea base b es decir la separación de las cámaras.

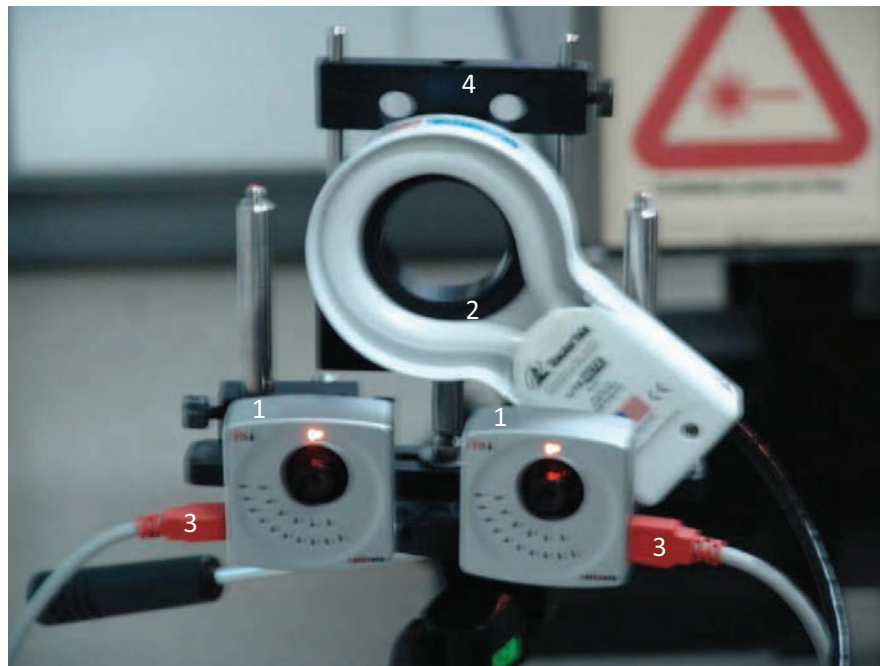


Figura 3.1 Arreglo estéreo montado sobre un tripie en el laboratorio. Las componentes del arreglo son: 1) Cámaras FireWire, 2) Fuente de luz blanca de alta frecuencia, 3) Cables FireWire, 4) Montura para la fuente de luz.

Para la configuración del software los datos geométricos se introducen en el algoritmo diseñado donde el programa se encarga del cálculo de los ángulos de visión de las cámaras, de la vergencia y de la versión del punto de fijación así como de la localización espacial de los marcadores.

3.2 Algoritmo de Asociación de Marcadores

En esta sección se explica el funcionamiento del algoritmo programado para la identificación de los marcadores y de su localización espacial respecto al sistema, para ello se utiliza el diagrama de flujo mostrado en la figura 3.2. El algoritmo fue programado en su totalidad en Matlab utilizando los toolbox de procesamiento digital de imágenes y exportando las funciones cíclicas en lenguaje C (en Matlab se pueden implementar lenguajes de programación tales como C, C++ y Fortran por medio de los “mex files”) para agilizar el tiempo de procesado.

Paso 1. Introducción de valores de la geometría del sistema: En la primera parte del programa, el usuario debe introducir las variables de distancia entre las cámaras y la distancia del plano de las cámaras al punto de fijación. La medición de las distancias fue llevada mediante el uso de un flexómetro. Hay que tener en cuenta que el punto de referencia y el eje central del sistema deben estar alineados de tal forma que ambas cámaras apunten al mismo marcador en la misma coordenada, así se garantiza que el sistema está alineado y que sea convergente.

Paso 2. Cálculo de ángulos de visión φ_l, φ_r de las cámaras: El ángulo es calculado por medio de la ecuación 2.22. También se calculan los ángulos de vergencia y versión del punto de fijación.

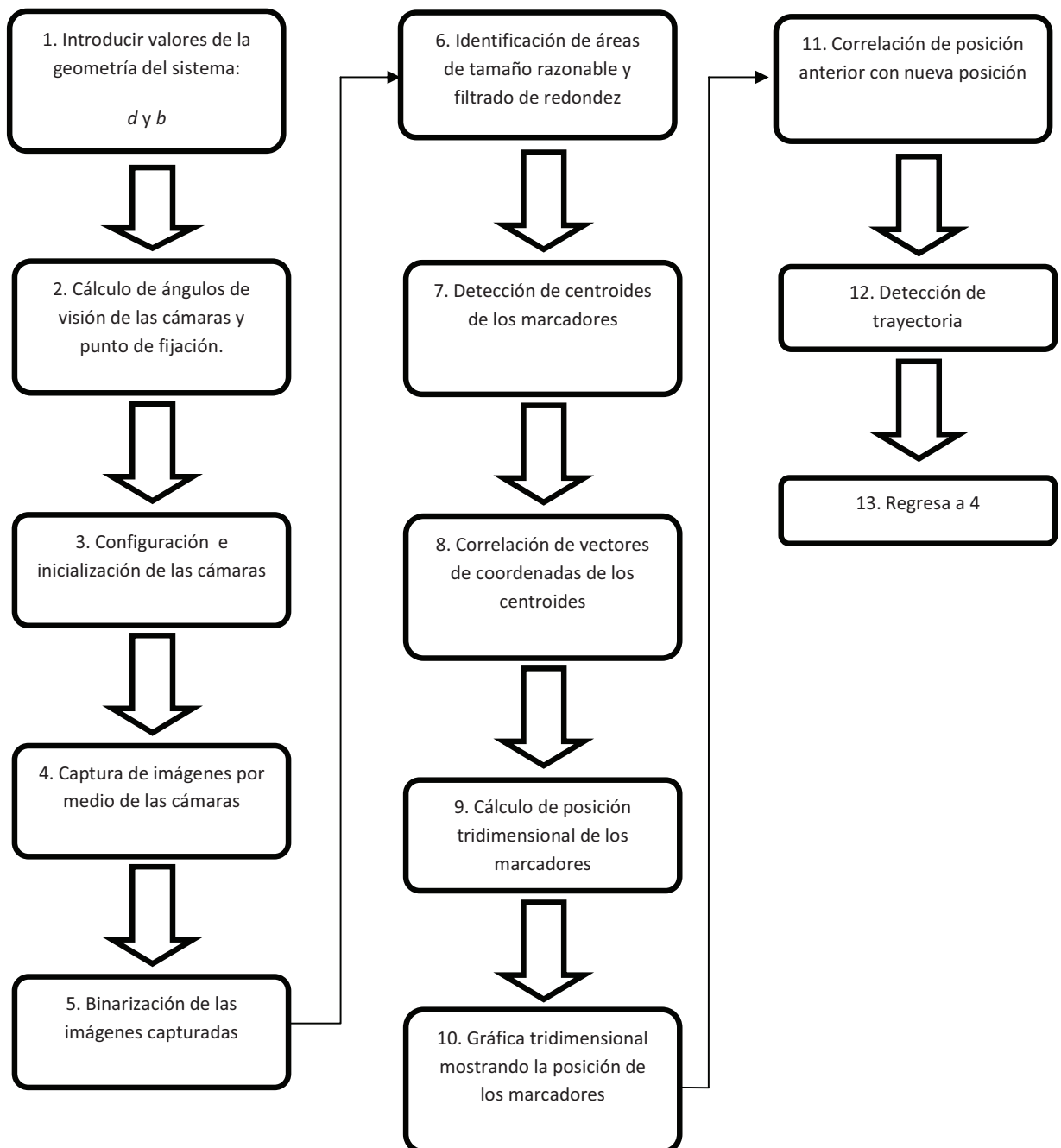


Figura 3.2 Diagrama de flujo del algoritmo.

Paso 3. Configuración e inicialización de las cámaras: El sistema detecta las cámaras conectadas y comienza a recibir información de ellas. Es importante mencionar que con el modelo de cámaras utilizado fue necesario dar un tiempo antes de comenzar el procesamiento de tal forma que las cámaras hagan un autoajuste de saturación.

Paso 4. Captura de imágenes por medio de las cámaras: La captura de las imágenes por desgracia no puede ser simultánea debido a la naturaleza secuencial del lenguaje, sin embargo el lapso entre la toma de una y otra es despreciable debido a que es muy rápido del orden de 2 ms , a menos que el objeto se mueva muy rápido y varíe su posición entre las capturas.

Paso 5. Binarización de las imágenes capturadas: Para poder identificar los centroides de los marcadores las imágenes deben ser binarizadas para procesarlas, para ello se desarrollo un programa de C ejecutable en Matlab para ahorrar tiempo en este proceso por que el umbral debe ser el valor más alto de escala de gris que tenga la imagen, el cual no siempre es 255.

Paso 6. Identificación de áreas de tamaño razonable y filtrado de redondez: Las imágenes binarizadas son primero filtradas verificando el área de los círculos captados, esto con el fin de evitar el ruido en la imagen, después se hace un segundo filtrado acorde a la redondez de los círculos para evitar reflexiones no deseadas por parte de la superficie de la muestra.

Paso 7. Detección de centroides de marcadores: Después del filtraje se realiza el cálculo de los centroides de cada uno de los círculos en ambas imágenes.

Paso 8. Correlación de vectores de coordenadas de los centroides: Se utiliza una comparación 1 a 1 de las coordenadas de los centroides utilizando el método Mínima Distancia Euclidiana dado en la ecuación 2.21.

Paso 9. Cálculo de posición tridimensional de los marcadores: Por medio del método mencionado en la sección 2.4. Se realiza el cálculo de la posición tridimensional de los centroides correlacionados.

Paso 10. Se grafica tridimensionalmente la posición de los marcadores.

Paso 11. Correlación de posición anterior con nueva posición: Se toman la imagen recién procesada y la anterior para hacer una correlación entre ambas utilizando nuevamente la técnica de RMS.

Paso 12. Detección de trayectoria: Una vez identificados los puntos se detectan los vectores de desplazamiento de aquellos puntos que aún sigan visibles para el sistema.

Paso 13. Regresa a 4: Se reinicia el ciclo a partir de la adquisición de las imágenes.

3.3 Experimentos y Resultados

3.3.1 Experimento 1

En esta primera fase se realizan experimentos aplicando la técnica de visión estéreo y mediante el uso de marcadores de alta reflectancia sobre el objeto de prueba, con la finalidad de obtener su topografía en una primera aproximación. El proceso consistió en realizar el escaneo a 360° de los marcadores colocados en una pieza arqueológica.

La muestra fue colocada sobre una base rotatoria frente a una cámara como se muestra en la figura 3.3. El objeto utilizado se puede ver en la figura 3.4 a). La distancia entre el centro de rotación de la base y la cámara fue de 58.7 cm .

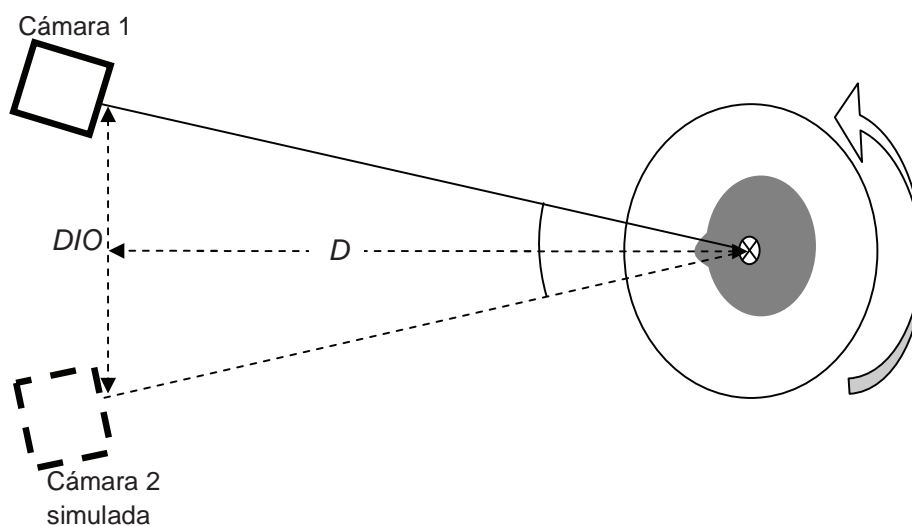


Figura 3.3 Arreglo utilizado con base giratoria para simular las perspectivas de 2 cámaras.

Se captaron secuencialmente diferentes imágenes de la muestra rotando la base en intervalos de 4 grados. Una vez tomadas las diferentes perspectivas del objeto de prueba se tomaron pares de imágenes con una diferencia de 8 grados entre ambas, de esta forma se simularon las 2 tomas necesaria para realizar la correlación estéreo entre las imágenes. Gracias a este arreglo se pudieron obtener los ángulos de vergencia y versión de manera directa conociendo el ángulo de giro de la base, de la misma forma gracias a esta rotación fue posible realizar un escaneo a 360° por medio de rotación de coordenadas debido a que se conoce el ángulo de rotación de la muestra.

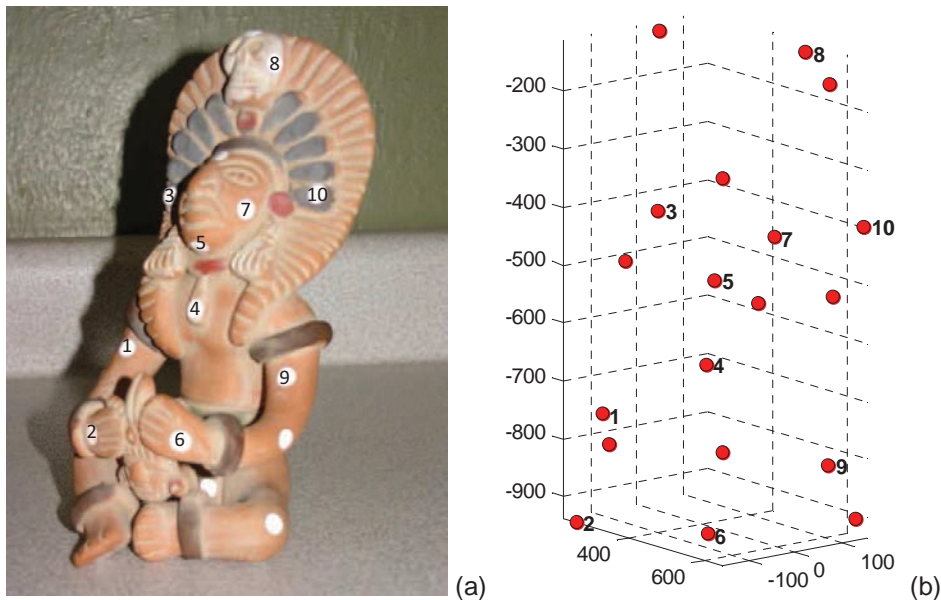


Figura 3.4 (a) Imagen de objeto con marcadores, (b) Mapa de puntos obtenidos una vez que se escaneo todo el objeto.

El resultado del escaneo del objeto se muestra en la figura 3.4 b), los puntos no numerados corresponden a otras vistas del objeto que son visibles en otras perspectivas.

Esta metodología resulta muy práctica para un escaneo a 360° ya que es muy fácil realizar el mapeo de los centroides debido a que se conoce el ángulo de giro, sin embargo este método no es implementable para un estudio en tiempo real debido a que se debe realizar el giro para simular la visión estéreo.

3.3.2 Experimento 2

En un segundo experimento, se implementó el sistema mostrado en la figura 3.1 donde se tienen ahora dos cámaras para la observación simultánea de dos imágenes del objeto con diferente perspectiva. Las pruebas realizadas son de tipo cualitativo para probar la respuesta del sistema y del algoritmo implementado respecto a movimiento del objeto, correlación de puntos y limitantes del tiempo de procesamiento de las imágenes debido a que la prueba ya fue realizada en tiempo real.

Para las pruebas de seguimiento e identificación de los marcadores utilizamos la mano de un voluntario que se colocó frente al sistema para la identificación de las etiquetas, tal como se muestra en las figuras 3.5 y 3.6. Para este ensayo las cámaras fueron colocadas a una distancia base de 90 mm entre ellas y a una distancia de 620 mm entre el plano de las cámaras y el punto de fijación, conocida como distancia d .

Una vez medidos los parámetros geométricos del arreglo fueron introducidos en el programa descrito en la figura 3.2 para que fueran procesados y obtener los ángulos de visión de las cámaras y la localización del punto de fijación. Para el procesamiento de las imágenes se utilizó la parte correspondiente en el algoritmo descrito en la figura 3.2. El objetivo principal fue poder obtener una interpretación del movimiento utilizando el sistema.

El resultado de la digitalización de los marcadores colocados en la mano se muestra en la figura 3.7 donde se puede apreciar las líneas principales de la mano. Este es un caso particular en el cual los puntos del objeto de prueba están cercanos o en el plano que contiene al punto de fijación. En general este no es el caso. El resultado presentado corresponde a un resultado cualitativo.



Figura 3.5 Marcadores colocados en una mano para hacer la identificación y seguimiento de trayectoria durante el movimiento de la mano.



Figura 3.6 Imagen del sistema en funcionamiento mientras se realiza la identificación de los marcadores.

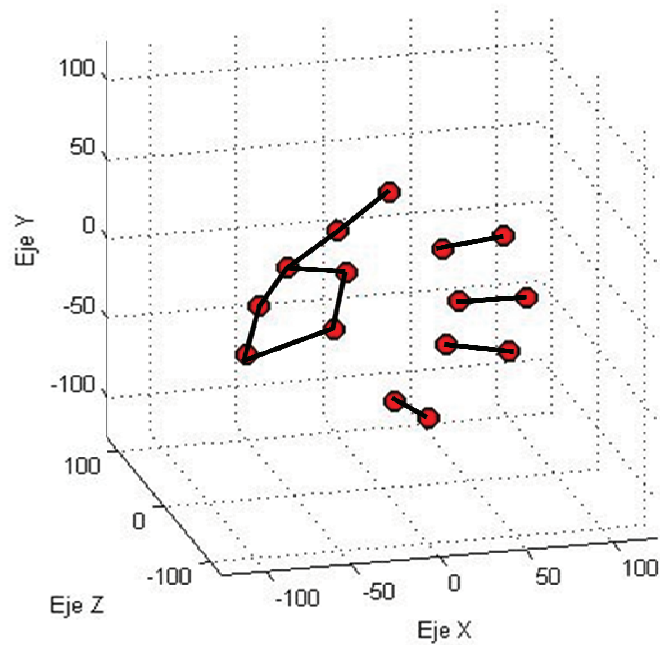


Figura 3.7 Gráfica tridimensional de la posición espacial de cada uno de los marcadores, la coordenada $(0,0,0)$ corresponde al punto de fijación del sistema. Las unidades de la gráfica están en milímetros.

Aunque es posible detectar los movimientos de todos los dedos se observaron en ocasiones, ambigüedades cuando la mano se colocaba en ciertas posiciones debido a que existía en esas posiciones, una correlación errónea entre los centroides de los marcadores debido a que en algunas perspectivas de ambas cámaras coincidía que algunos puntos no se correlacionaban apropiadamente dando como resultado posiciones incorrectas.

De esta prueba preliminar se realiza una depuración del programa para optimizar el tiempo de procesamiento de las imágenes, se hicieron mejoras para evitar el uso de ciclos pesados y si estos fueran necesarios entonces implementarlos en un lenguaje de programación más rápido.

3.3.3 Experimento 3

En este experimento se conoce las dimensiones de un sistema de bloques utilizado como objeto de prueba. Éste es mostrado en la figura 3.8. En este caso es posible comparar las posiciones de los marcadores con las obtenidas previamente dado que se conoce las dimensiones de los bloques de prueba. Es posible en este experimento determinar la exactitud de la medición en la ubicación de la posición de los marcadores así como determinar el rango del área de trabajo.

El sistema de visión estéreo utilizado es mostrado en la figura 3.1. Las dimensiones de los puntos donde se colocaron los marcadores fueron medidas con un vernier calibrado de tal forma que se conociera su posición espacial. En la figura 3.7 se pueden observar los bloques utilizados y la numeración asignada a cada uno de ellos.

En la imagen se pueden apreciar los números asignados a cada uno de los marcadores. Los marcadores 2 y 4 se encuentran en el mismo plano de profundidad pero en diferentes planos de altitud y excentricidad, esto con el fin de crear una especie de plano de referencia para la colocación de la muestra al realizar las mediciones. El marcador 3 se encuentra delante de 2 y 4 por lo tanto se espera que su profundidad sea positiva. Por último el marcador 1 se encuentra detrás del plano formado por 2 y 4 por lo que se espera que su profundidad sea menor a dicho plano.



Figura 3.8 Bloques apilados con marcadores colocados sobre ellos para realizar su detección espacial. Las medidas entre cada uno de los marcadores han sido previamente obtenidas.

Los parámetros asociados al sistema óptico son: la distancia entre las cámaras fue de $b = 93 \text{ mm}$, la distancia entre el plano de las cámaras y el punto de fijación fue

de 740 mm . Nuevamente los datos fueron introducidos en el software para el cálculo de la geometría del sistema.

Respecto al objeto de prueba si se considera que el plano de los marcadores 2 y 4 es la referencia, o sea que su profundidad es cero, las profundidades de los marcadores 1 y 3 son las siguientes: el marcador 1 se encuentra a -25.42 mm del plano referencia, por lo tanto se encuentra detrás de él, mientras que el marcador 3 se encuentra a 29.4 mm del plano de referencia del objeto, por lo que se espera que este delante de él.

Se realizaron 6 mediciones del objeto a diferentes profundidades a partir del plano de las cámaras, la primera se realizó a 740 mm que es la distancia al punto de fijación, por lo tanto las coordenadas de los marcadores deben estar en las coordenadas de profundidad ya mencionadas. Las siguientes mediciones fueron a 730 , 710 , 690 , 670 y 640 mm . Estas mediciones fueron realizadas con el fin de determinar que tanto error se introducía conforme varía la localización espacial del objeto.

Las gráficas obtenidas después de la digitalización se muestran en la figura 3.9 (a-c). El caso corresponde a una ubicación del objeto con respecto al plano de las cámaras de 740 mm . La gráfica 3.9 a) corresponde a una vista superior del objeto donde claramente se puede observar el eje de profundidad z y el eje lateral x . En la figura 3.9 b) se muestra una vista frontal del objeto donde se pueden localizar los puntos en el plano x - y . Por último en la figura 3.9 c) se muestra el objeto en una vista tridimensional donde el eje de profundidad es el eje vertical.

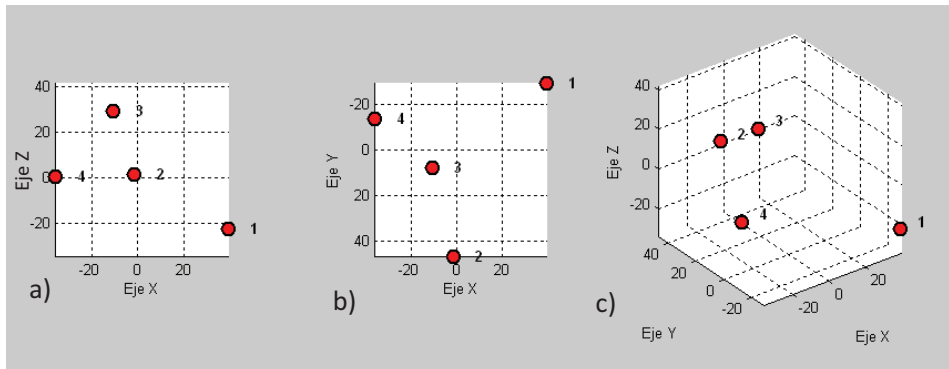


Figura 3.9 Gráficas de localización de marcadores: a) Plano x-z, b) Plano x-y, c) Gráfica tridimensional.

En la tabla 3.1 se muestran los resultados correspondientes a las diferentes profundidades medidas en cada uno de los marcadores a diferentes posiciones del objeto. Se puede apreciar que a mayor distancia respecto al plano de referencia que contiene el punto de fijación de las cámaras, las dimensiones detectadas van variando drásticamente, por lo tanto podemos concluir que para objetos de grandes dimensiones de profundidad puede haber un error significativo al momento de detectar su topografía porque algunos puntos estarían muy alejados del plano del punto de fijación. Debido a que en los marcadores 2 y 4 no se detectaron mayores problemas, los puntos críticos a estudiar son el marcador 1 y 3 los cuales en las primeras 2 mediciones presentan un error mínimo, pero conforme se va alejando va aumentando. Con el movimiento de la muestra simulamos a un objeto de grandes dimensiones y el error que presentaría. Esto puede ser visible en las figura 3.10 donde se muestran las gráficas de error de la medición de ambos marcadores.

Distancia D	Marcador 1	Marcador 2	Marcador 3	Marcador 4
740	-22.39	1.52	29.28	0.70
730	-14.54	10.38	40	9.32
710	1.25	30.65	63.29	30.69
690	16.94	50.54	87.50	49.89
670	32.52	70.24	111.25	70.04
640	57.13	100.83	148.77	100.23

Tabla 3.1 Profundidad detectada de cada uno de los marcadores a diferentes distancias del objeto respecto a las cámaras. Las unidades están en milímetros.

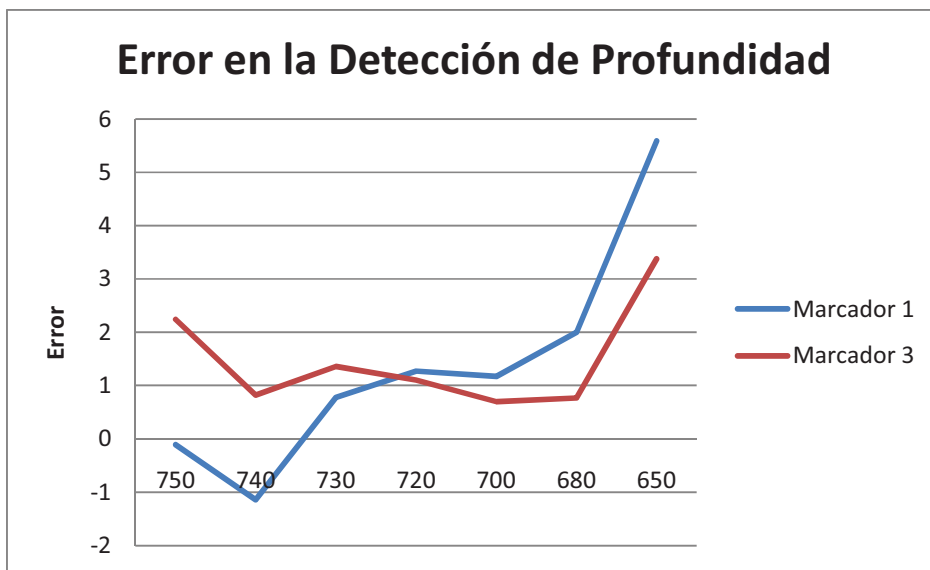


Figura 3.10 Error en la detección de profundidad de los marcadores. Las dimensiones están dadas en milímetros.

Estos resultados del incremento del error en las dimensiones, que se obtiene debido a lo alejado que están los puntos del plano del punto de fijación, nos lleva a

considerar la implementación de un sistema iterativo para el cálculo de la profundidad de los puntos o bien proponer otro sistema. De igual manera se puede corregir el error corrigiendo la alineación de las cámaras y la detección de la geometría del sistema. Aún así se obtiene un umbral de trabajo de alrededor de ± 3 cm con respecto al punto de fijación.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES

La técnica revisada en esta tesis corresponde a la de visión estéreo en la detección y seguimiento de puntos correspondientes a marcadores de alta reflectancia. También con esta técnica se obtuvieron resultados correspondientes a la topografía que corresponde a un muestreo de valores de z , es decir los resultados muestran una topografía en primera aproximación. Este último resultado fue adicional al trabajo realizado, dado que el objetivo principal de la tesis es el análisis de la factibilidad de seguimiento e identificación de marcadores para implementarlo en un sistema de proyección de franjas y encontrar la topografía sin la necesidad de considerar un plano de referencia. El alcance de la presente tesis fue la implementación de un sistema de visión estéreo para el seguimiento de marcadores colocados en un objeto de prueba en tiempo real.

El desarrollo de la tesis comprendió lo siguiente:

- Se revisaron los conceptos básicos de la visión estéreo que corresponde a los tipos de arreglos correspondientes al de ejes paralelos y ejes convergentes. Se realizó una comparación entre los tipos de visión estéreo tanto temporal como espacial. Se hizo la revisión teórica correspondiente a la obtención de la profundidad la cual fue aplicada para obtener el valor de z de algunos puntos de interés.
- Se realizó una comparación teórica entre la visión estéreo espacial y la visión estéreo temporal para poder establecer los límites de cada una de las técnicas.

- El procedimiento en la detección de puntos comprendió dos partes. La primera parte consiste en el diseño experimental correspondiente a un sistema de visión estéreo que comprende la integración de partes ópticas, mecánicas y hardware. La segunda parte corresponde a la programación de un algoritmo (software del sistema óptico) que haga posible mediante la correlación de imágenes establecer una relación de profundidad de los marcadores. Esto hace posible una visualización 3D burda del objeto, pero que sería suficiente en el seguimiento de trayectoria para el estudio de la marcha humana, por ejemplo.
- Se realizó el escaneo a 360° de los marcadores colocados en una pieza arqueológica lo que llevó a concluir que es posible implementar el sistema estéreo utilizando una sola cámara y así obtener características del objeto a su alrededor. La desventaja es que la técnica así implementada no es posible aplicarla en tiempo real.
- Se obtuvieron resultados cualitativos en el experimento del seguimiento del movimiento de una mano. En este caso el sistema óptico comprende dos cámaras. Se colocaron marcadores de alta reflectancia en el objeto de prueba y mediante el sistema estéreo se detectaron espacialmente los centroides de éstos. Es decir es posible hacer con la técnica implementada un monitoreo de la trayectoria de cada uno de los puntos en algún objeto de prueba.
- Utilizando el mismo arreglo mencionado en el punto anterior se utiliza un objeto de prueba correspondiente un conjunto de bloques cuyas medidas

fueron obtenidas previamente mediante un vernier. En este caso se conoce la profundidad de los marcadores colocados en los diferentes bloques. Mediante la técnica de visión estéreo se obtiene una medición de la posición de los marcadores y se compara con las obtenidas mediante el vernier. Se obtuvo un error máximo correspondiente a puntos más lejanos del plano de referencia en el cual está contenido el punto de fijación. El error máximo obtenido fue de 6 mm a una distancia de 10 cm del plano del punto de fijación. El área de trabajo correspondiente a esta distancia contiene error aceptable, para mejorar este error se concluyó que es necesaria la implementación de un sistema iterativo de detección de coordenadas para mejorar los resultados obtenidos en la etapa 3 y evitar de esa forma los errores detectados al momento de medir la profundidad.

- La optimización de la técnica presentada implica mejorar la velocidad de ejecución del programa. En nuestro caso, el cálculo de la posición de los puntos permite una secuencia de 15 imágenes por segundo. El programa fue depurado y las funciones más pesadas fueron programadas en lenguaje C (tomando en cuenta que el lenguaje de Matlab es sumamente lento para ciclos), aún así sería preferible hacer la programación total en lenguaje C para mejorar los tiempos de ejecución.
- En la mejora de la técnica también hay que considerar la calidad de las cámaras para poder realizar un mejor binarizado ya que las utilizadas en el arreglo introducen ruido o brillos no deseados lo que da como resultado detección de puntos inexistentes.

4.1 Aplicaciones y Trabajo a Futuro

El estudio del uso de marcadores de alta reflectancia y la identificación de su localización permite visualizar diversas aplicaciones, entre ellas:

Un estudio de la trayectoria de los marcadores puede ser utilizado para realizar un análisis de la marcha humana. Como se muestra en la figura 4.1 los marcadores (puntos rojos en este caso) pueden ser colocados de manera estratégica sobre la pierna y hacer un análisis comparativo entre sujetos para identificar alguna problemática en el proceso de marcha humana. Este estudio puede ser aplicado a pacientes que hayan sido sometidos a una cirugía de rodilla. Mediante un estudio previo y posterior a la cirugía poder determinar la mejora del paciente.

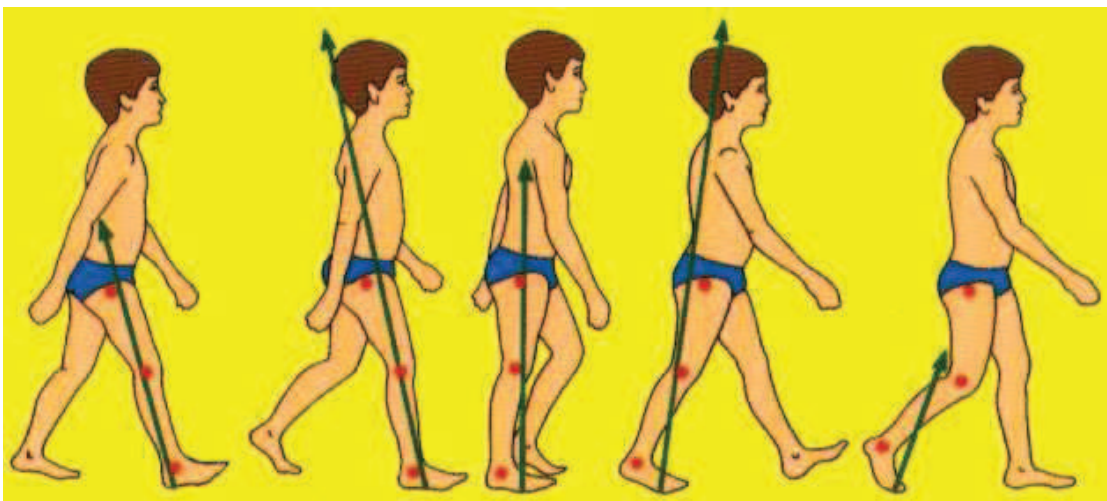


Figura 4.1 Puntos de referencia sobre la pierna para caracterizar la marcha humana.

Otra aplicación es que se puede utilizar conjuntos de 3 puntos espaciales de la figura para formar planos virtuales. Éstos planos virtuales corresponderían a planos de referencia en las secciones correspondientes para obtener topografías seccionales y posteriormente hacer una unión de la información y obtener así información de la topografía en su totalidad (a 360 grados). La topografía podría obtenerse por métodos como escaneo laser o bien proyección de franjas. Como se muestra en la figura 3.7 a) se le colocan los marcadores al objeto para que posteriormente se elabore un mapa tridimensional de centroides (figura 3.8 b)) y tomar estos puntos para crear los planos de referencia y de esa forma interpolar la topografía entre los puntos.

En la figura 4.2 se muestra una reconstrucción tridimensional realizada mediante un escáner comercial *Z scanner* el cual utiliza un escaneo con líneas laser. La aportación planteada es el uso de la técnica de proyección de franjas utilizando los planos de referencia simulados tomando ternas de la posición de los marcadores detectados con visión estéreo. Se planea obtener una mejor calidad de reconstrucción con la técnica de proyección de franjas que la que se obtiene con el escáner comercial.



Figura 4.2 Reconstrucción hecha con escáner comercial.

4.1.1 Visitas a Diversas Instituciones

Se realizaron visitas a diferentes instituciones entre ellas una empresa, un hospital y un centro de investigación para generar un interés en una colaboración y también detectar algunas problemáticas que pudiera ser resuelta con el sistema implementado. Las instituciones visitadas son:

CIATEC [1]. En este centro de investigación (figura 4.3) se visitaron las áreas de metrología, pruebas físicas, diseño y biomecánica. En este centro se encontraron dos posibles aplicaciones para el proyecto. La primera en el laboratorio de biomecánica donde se propuso hacer un estudio comparativo entre su sistema de análisis de marcha humana y postura con respecto al implementado en el presente trabajo. La segunda en el área de diseño, donde se requiere hacer una mejora al sistema actual de escaneo de patrones de zapatos debido a que el sistema actual requiere mucha preparación de la muestra antes de ser escaneada que en el caso nuestro sistema de escaneo a 360° no lo necesitaría.



Figura 4.3 Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas.

INSTITUTO MEXICANO DEL SEGURO SOCIAL [2]. En el Instituto Mexicano del Seguro Social (figura 4.4) se planteo la propuesta de realizar un estudio estadístico sobre la marcha humana en pacientes postoperatorios de la rodilla respecto a pacientes que no han sido sometidos a ella. Actualmente el estudio que realiza el IMSS es hecho por medio de radiografías las cuales son tomadas con el paciente recostado, lo cual permite hacer una evaluación de curación y dirección pero sin tomar en cuenta el esfuerzo aplicado sobre la rodilla cuando el paciente está de pie o movimiento. Nuestra técnica puede ser utilizada como una alternativa para cubrir esa área de estudio que no es cubierta con la técnica utilizada actualmente.



Figura 4.4 Instituto Mexicano del Seguro Social.

CONTINENTAL AUTOMOTIVE GUADALAJARA MEXICO, S. A. DE C. V. [3]. Es una compañía (figura 4.5) dedicada a la fabricación de componentes de tractocamiones y manifestaron sus problemáticas en el área de metrología debido a que sus mediciones de componentes de tableros lo realizan aún de manera manual con el uso de vernier y flexómetro. Las problemáticas expresadas por la compañía se mencionan a continuación:

La problemática de la etapa a) se centra en la falta de un sistema de medición de la aplicación de dispensado de materiales sobre los circuitos impresos. Sin este sistema no es posible determinar una falla en este dispensado, que hace crítico el desempeño de los productos. Un defecto puede ocasionar fallas de campo en condiciones extremas de temperatura o fatiga por vibración.

La problemática de la etapa b) se encuentra en la dificultad de los ingenieros y técnicos para reconstruir o extraer el modelo en 3d de una pieza, de la cual se requiere modificar o replicar, ya que no se cuenta con dibujos técnicos. Esto implica que se dedique mucho tiempo en la reconstrucción de dichas piezas en SW de diseño, con altas probabilidades de falla.



Figura 4.5 Continental Automative Guadalajara México.

Referencias

- [1] CIATEC A.C.
Omega 201
Fraccionamiento Industrial Delta
León, Gto., México, C.P. 37545
Tel 01 (477) 7 10 00 11, ext. 1509
<http://www.ciatec.mx>
- [2] Instituto Mexicano del Seguro Social, Delegación Guanajuato.
López Mateos S/N
Colonia Paraísos, León Gto., México. ZC-37320.
Fax: 0152 (477) 7174800
<http://www.imss.mx>
- [3] Continental Automotive Guadalajara México, S. A. de C. V.
Camino a la Tijera No. 3
45640, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México.
A company of the Continental Corporation
Phone: +52 33 38 18 20 00 ext. 2951
<http://www.continental-corporation.com>

PLAN DE NEGOCIOS

Descripción del proyecto

El proyecto consiste en la fabricación de un sistema de escaneo y localización espacial de puntos de alta reflectancia que funciona basado en la visión estéreo. Este sistema permite la elaboración de un estudio espacial y dinámico de los movimientos hechos por los puntos de interés los cuales son colocados sobre la muestra.

Visión

Ser una compañía sólida en la venta de sistemas de monitoreo y estudio del cuerpo humano.

Misión

Brindar al cliente productos nacionales de alta calidad y cubrir sus necesidades de servicio postventa.

Mercado

El mercado potencial que se desea atacar con este proyecto son las instituciones de salud las cuales necesitan sistemas de monitoreo de la marcha humana en pacientes que han sufrido de una operación en una rodilla lo cual altera su forma de caminar.

Beneficios

El sistema es mexicano, por lo tanto la asesoría, el mantenimiento y las actualizaciones que se realicen al sistema están al alcance de los clientes debido a que el mercado que se desea abordar es el mercado nacional.

Precio

El precio tentativo para la venta de este sistema es de \$200,000 para instituciones de salud y para particulares.

Competencia

En el mercado actual una de las compañías que se dedica a la venta de escáneres en 3D es Z Corporation quienes dan a la venta su modelo de scanner Uni Scan a un precio de \$28900 usd. El cual incluye el software de reconstrucción y edición, sin embargo este escáner es más utilizado para realizar recuperación de la topografía de los objetos, sin embargo utiliza la misma tecnología de los puntos de alta reflectancia. Este sistema no es utilizado para aplicaciones de análisis dinámico.

Posicionamiento del producto

Actualmente en México no todos hospitales del sector público cuentan con sistemas de detección y análisis de la marcha humana, los estudios actuales para el acomodo de los huesos de la pierna se realiza por medio de radiografías, lo que lleva a pensar que existe una gran área de oportunidad para la comercialización de este escáner.

Mercado

Clientes potenciales

Actualmente en México existen alrededor de 3500 hospitales tanto del sector público como del privado, de los cuales 1200 son hospitales del sector público y alrededor de un 70% tiene las posibilidades económicas de adquirir un equipo de este costo

Precio y canales de venta

El costo de cada uno de los sistemas es de \$200000 debido al costo de las cámaras, monturas, computadora y software a utilizar para su funcionamiento.

Los canales de venta sería vía demostrativa en algunas clínicas y promoción vía electrónica por medio de página web.

Modelo de Negocio

La manufactura del sistema correría a cargo de subcontrato para piezas específicas de las monturas. Se creará un acuerdo mayorista con una empresa dedicada a la venta de equipos de cómputo. Se adquirirá equipo óptico con empresas especializadas a la distribución de dichos componentes de tal forma que el sistema de fabricación sea basado únicamente en ensamblado y configuración del equipo de tal forma que no sea necesaria tanta mano de obra.

Análisis Financiero

Análisis Financiero del plan de negocios						
Año	0	1	2	3	4	5
Ventas en unidades	0	12	20	30	40	50
<i>Crecimiento</i>			67%	50%	33%	25%
Average Selling Price	0	\$200,000.00	\$200,000.00	\$200,000.00	\$200,000.00	\$200,000.00
<i>ASP Delta</i>			0%	0%	0%	0%
Remuneración (Ventas)	\$0	\$2,400,000.00	\$4,000,000.00	\$6,000,000.00	\$8,000,000.00	\$10,000,000.00
Remuneración (servicios)		\$240,000.00	\$400,000.00	\$600,000.00	\$800,000.00	\$1,000,000.00
Remuneración Total		\$2,640,000.00	\$4,400,000.00	\$6,600,000.00	\$8,800,000.00	\$11,000,000.00
<i>Crecimiento</i>			67%	50%	33%	25%
Gastos						
Costo Por Unidad (Material+Mano de obra)		\$70,000.00	\$73,500.00	\$77,175.00	\$81,033.75	\$85,085.44
Costo Total de Bienes Vendidos (COGS)	\$0	\$840,000.00	\$1,470,000.00	\$2,315,250.00	\$3,241,350.00	\$4,254,271.88
Costos Generales, Ventas y Administrativos (SG&A)		\$360,000.00	\$396,000.00	\$435,600.00	\$479,160.00	\$527,076.00
Gastos Directos Totales	\$0	\$1,200,000.00	\$1,866,000.00	\$2,750,850.00	\$3,720,510.00	\$4,781,347.88
Costo de Arranque	\$500,000.00					
Ganancias (EBITDA)	\$0	\$1,440,000.00	\$2,534,000.00	\$3,849,150.00	\$5,079,490.00	\$6,218,652.13
<i>% de Remuneración</i>		55%	58%	58%	58%	57%

- Se planea iniciar la compañía con un presupuesto de \$500000 para el registro de patente del producto o de propiedad intelectual dependiendo el caso, pagos correspondientes al registro del negocio, compra de material para la elaboración de demos para realizar las demostraciones, la renta de un lugar de trabajo, comprar equipos de computo, la contratación de un ayudante y la inversión en publicidad tales como el diseño de paginas web, asistencias a congresos, etc.
- Se espera que las ventas en el primer año sean de una unidad por mes con incremento gradual de alrededor 10 unidades más cada año.
- Por los primeros años se planea mantener el mismo precio salvo que la inflación sea mayor a la estimada (1%).
- El costo de producción por unidad abarca el precio de cada uno de los componentes para el ensamblaje, mano de obra y envío.
- Los gastos generales y administrativos abarcan la renta del lugar de trabajo así como el pago de servicios del mismo. Sueldos a ayudante(s) y gastos en consumibles.
- Se estima que las ganancias anuales sean mayores al 50% por año y permitiendo así recuperar la inversión en el primer año.

Factores de Riesgo

- Posible rechazo por parte de los clientes potenciales debido a que es un sistema mexicano.
- Fallas de los primeros lotes fabricados
- Falta de publicidad al sistema para que este sea dado a conocer.
- Falta de poder adquisitivo por parte de la institución interesada.

Planes de Acción

- Convencer a los clientes de los beneficios de comprar productos fabricados en México presenta más ventajas que adquirir productos en el extranjero.
- Poner un riguroso control de calidad en las primeras unidades.
- Asistir a conferencias y dar demostraciones del producto y breves exposiciones de sus beneficios, de igual forma asistirá a las clínicas mostrando el producto y sus beneficios.
- Brindar planes de financiamiento a las instituciones para que puedan adquirir el producto.

Conclusiones

El producto tiene muchas posibilidades de colocarse en el mercado debido a que es innovador, cubre un área de oportunidad sin atender por parte de las clínicas de salud y además que el mercado es muy amplio debido a la gran cantidad de hospitales públicos y privados existentes en el país.

CÓDIGO DEL PROGRAMA

Programa principal

```

try
    stop(video_1);
    delete(video_1);
    stop(video_2);
    delete(video_2);
end
clc
clear all
close all
%%
ad='winvideo';
f=imqhwinfo(ad,1);
fmt=f.SupportedFormats;
fmt=fmt';
fmt=fmt{1};
video_1=videoinput(ad,1,fmt);
start(video_1);
preview(video_1)
m=1;
lvl=.8;
video_2=videoinput(ad,2,fmt);
start(video_2);
preview(video_2);
pause(7)
while m<100
    tic
    izq=getsnapshot(video_1);
    der=getsnapshot(video_2);
    [h w]=size(izq);
    try
        izq_bw=bwmx(izq);
        izq_cen=cen_red(izq_bw);
        der_bw=bwmx(der);
        der_cen=cen_red(der_bw);
        [x y z]=pos3d(izq_cen,der_cen,h,w)
        aft=cat(3,x,y,z);
        dt=toc;
        [dx dy dz]=flux(bef,aft);
        bef=aft;
    end
    flushdata(video_1);
    flushdata(video_2);
    pause(0.1)
end

```

Funciones

```

function bw=bwmx(img)

img=double(img);
um=double(max(img(:)));
mex bina.cpp
bw=bina(img,um);
bw = imfill(bw,'holes');
bw=bwareaopen(bw,120);

#include <matrix.h>
#include <mex.h>

// programa de binarizacion

void mexFunction(int nlhs, mxArray *plhs[], int nrhs, const mxArray
*prhs[])
{

//declare variables
mxArray *img_in_m, *um_in_m, *bw_out_m;
const mwSize *dims;
double *img, *um, *bw;
int w, h, numdims;
int i,j;

//associate inputs
img_in_m = mxDuplicateArray(prhs[0]);
um_in_m = mxDuplicateArray(prhs[1]);

//figure out dimensions
dims = mxGetDimensions(prhs[0]);
numdims = mxGetNumberOfDimensions(prhs[0]);
h = (int)dims[0]; w = (int)dims[1];

//associate outputs
bw_out_m = plhs[0] = mxCreateDoubleMatrix(h,w,mxREAL);

//associate pointers
img = mxGetPr(img_in_m);
um = mxGetPr(um_in_m);
bw = mxGetPr(bw_out_m);

//do something
for(i=0;i<w;i++)
{
    for(j=0;j<h;j++)
    {
        if(img[i*h+j]<(um[0]))

```

```

        bw[i*h+j]=0;
    else
        bw[i*h+j]=1;
    }
}

return;
}

function centroid=cen_red(bw)

bw=imfill(bw,'holes');
bw = bwareaopen(bw,120);
[Areas_img, Matriz_etq] = bwboundaries(bw,'noholes');
stats = regionprops(Matriz_etq,'Area','Centroid');
umbral_redondez = 0.5;
i=1;
for k = 1:length(Areas_img)
    marco = Areas_img{k};
    %Cálculo del perímetro
    delta_sq = diff(marco).^2;
    perimetro = sum(sqrt(sum(delta_sq,2)));
    area = stats(k).Area;
    %Calculo de redondez
    redondez = 4*pi*area/perimetro^2;
    if redondez > umbral_redondez
        cen = stats(k).Centroid;
        centroid(i,1)=cen(1);
        centroid(i,2)=cen(2);
        str=num2str(i);
        i=i+1;
    end
end

function [x y z]=pos3d(izq_cen,der_cen,h,w)

% Datos del sistema
pxm=6.15/15;
b=93; %distancia entre camaras en mm
d=740; %distancia de las camaras al plano del punto f
ql=atand(b/(2*d)); %direccion de vista cam izq
qr=-atand(b/(2*d)); %direccion de vista cam der
af=ql-qr; %vergenca punto fijacion f
gf=(ql+qr)/2; %version angulo ojo de ciclope
R=b/(2*sind(af)); %radio del circulo VMC
dcf=sqrt((b/2)^2+d^2);
xc=w/2; % centro de la escena
k=size(izq_cen);
l=size(der_cen);
for i=1:1:k(1)
    mini=500;
    for j=1:1:l(1)
        rms=sqrt((izq_cen(i,1)-der_cen(j,1))^2+(izq_cen(i,2)-
der_cen(j,2))^2);

```



```

        if rms<mini
            par=j;
            mini=rms;
        end
    end
    xl(i)=(izq_cen(i,1)-xc)*pxm;
    xr(i)=(der_cen(par,1)-xc)*pxm; % coordenadas en milímetros
    yp(i)=(izq_cen(i,2)+der_cen(par,2))/2;
end
y=(h/2-yp).*pxm; % coordenadas en milímetros
bl=atand(xl/DCF); % calculo de betas
br=atand(xr/DCF);
delta=bl-br; %disparidad angular
eta=(bl+br)/2; %excentricidad
alfa=af-delta;
gamma=gf-eta;
R_p=b./(2*sind(alfa)); %Radio respecto al punto
x=R_p.*sind(2*gamma); %Coordenadas cartesianas Hering
% z=R_p.*(cos(alfa)+cos(2*gamma));
z=d-x./tand(gamma);
v=size(z);
subplot(1,3,1),
plot3(x,-y,-z,'LineStyle','none','Marker','o',...
    'MarkerEdgeColor','k','LineWidth',2,...
    'MarkerFaceColor','r','MarkerSize',10); grid on;
hold on
for i=1:v(2)
    cad=num2str(i);
    text(x(i)+10,-y(i),-z(i),cad,'color','k','fontweight','bold');
end
hold off
axis vis3d;
daspect([1 1 1]);
view(0,0);
xlabel('Eje X');
ylabel('Eje Y');
zlabel('Eje Z');
subplot(1,3,2),
plot3(x,-y,-z,'LineStyle','none','Marker','o',...
    'MarkerEdgeColor','k','LineWidth',2,...
    'MarkerFaceColor','r','MarkerSize',10); grid on;
hold on
for i=1:v(2)
    cad=num2str(i);
    text(x(i)+10,-y(i),-z(i),cad,'color','k','fontweight','bold');
end
hold off
axis vis3d;
daspect([1 1 1]);
view(0,-90);
xlabel('Eje X');
ylabel('Eje Y');

```

```

xlabel('Eje Z');
subplot(1,3,3),
plot3(x,-y,-z,'LineStyle','none','Marker','o',...
      'MarkerEdgeColor','k','LineWidth',2,...
      'MarkerFaceColor','r','MarkerSize',10); grid on;
hold on
for i=1:v(2)
    cad=num2str(i);
    text(x(i)+10,-y(i),-z(i),cad,'color','k','fontweight','bold');
    hold on
end
hold off
axis vis3d;
daspect([1 1 1]);
xlabel('Eje X');
ylabel('Eje Y');
zlabel('Eje Z');

function [dx dy dz]=flux(bef,aft)

[h w p]=size(bef);
[w p q]=size(aft);
for i=1:h
    mini=110;
    for j=1:w
        rms=sqrt((bef(i,1,1)-aft(j,1,1))^2+(bef(i,1,2)-
aft(j,1,2))^2+...
                (bef(i,1,3)-aft(j,1,3))^2);
        if rms<mini
            par=j;
            mini=rms;
        end
    end
    dx(i)=aft(par,1,1)-bef(i,1,1);
    dy(i)=aft(par,1,2)-bef(i,1,2);
    dz(i)=aft(par,1,3)-bef(i,1,3);
end
end

```