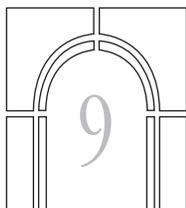


Cómo citar este artículo: Cárdenas Quiroga, E. A.; Morales Martín, L. Y.; Ussa Caycedo, A. (2015, julio-diciembre). La estereoscopia, métodos y aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento. Rev. Cient. Gen. José María Córdova 13(16), 201-219



La estereoscopia, métodos y aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento*

Recibido: 15 de marzo de 2015 • Aceptado: 30 de julio de 2015

Stereoscopy, methods and applications in multiple fields of knowledge

Stéréoscopie, des méthodes et des applications dans différents domaines de la connaissance

Estereoscopia, métodos e aplicaçoes em diferentes áreas do conhecimento

Elsa Adriana Cárdenas Quiroga^a

Luz Yolanda Morales Martín^b

Andrés Ussa Caycedo^c

* Artículo resultado del Proyecto de investigación “Corrección de las distorsiones paralácticas en las imágenes estereoscópicas”, código: ING-1186, del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

^a Profesora vinculada con el programa de ingeniería civil desde 1999 como docente de cátedra y desde el 2003 como docente de planta. Geóloga egresada de la Universidad de Caldas 1998. Especialista en Docencia Universitaria de la Universidad Militar Nueva Granada año 2004. Magíster en Gestión ambiental de la Pontificia Universidad Javeriana año 2008. Correo electrónico: elsa.cardenas@unimilitar.edu.co

^b Ingeniera Civil egresada de la Universidad Militar Nueva Granada (1988). Especialista en proyectos de desarrollo de la Escuela Superior de Administración Pública, ESAP, (2000). Magister en Educación de la Universidad de la Sabana (1998). Doctora en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad de Santiago de Chile (2011). Profesora investigadora de tiempo Completo del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Militar Nueva Granada desde 1994 a la fecha. Líder del Grupo de Investigación Ingeniería, Geomática y Educación (IGE). Correo electrónico: luz.morales@unimilitar.edu.co

^c Ingeniero Mecatrónico de la Universidad Militar Nueva Granada. Joven Investigador del grupo Ingeniería Geomática y Educación (IGE) año 2013. Correo electrónico: tmp.andres.caicedo@unimilitar.edu.co

Resumen. Se presenta una revisión teórica acerca del concepto de estereoscopia basado en un análisis detallado del proceso de evolución y del estado del arte. Asimismo, se explica el funcionamiento de la estereoscopia, sus fenómenos y principios y se describe el proceso de visión estereoscópica, los métodos de observación estereoscópica: visión convergente, visión paralela y sus técnicas, separación espectral, separación temporal y separación espacial; las herramientas o artefactos que permiten esta visión y algunas de las aplicaciones más utilizadas en los diferentes campos de las ciencias, como en la reconstrucción de terrenos y la telemedicina.

Palabras clave:disparidad, estereoscopia, estereovisión, fotogrametría, paralaje.

Abstract. This paper presents a theoretical review of the stereoscopy concept based on a detailed analysis of its evolution and state of art. It explains the stereoscopy's operation, its phenomena and principles, and describes the stereoscopic vision process, the stereoscopic observation methods: convergent vision and parallel vision, and their techniques: spectral separation, temporal separation and spatial separation; the tools and devices that enable that vision and some of the most used applications in multiple fields of science, e.g. terrain reconstruction and telemedicine.

Keywords:disparity, parallax, photogrammetry, stereoscopy, stereovision.

Résumé. Cet article présente une revue théorique sur le concept de la stéréoscopie basé sur une analyse détaillée du processus de l'évolution et de l'état de l'art. Explique comment la stéréoscopie, ses phénomènes et principes et décrit le processus de la vision stéréoscopique, méthodes jumelles: parallèle et convergente vision de la vision et des techniques, la séparation spectrale, la séparation temporelle et la séparation spatiale, des outils ou des dispositifs qui permettent cette vision et certaines des applications les plus utilisées dans les différents domaines de la science, de la terre et de la reconstruction et de la télémédecine.

Mots-clés:parallaxe, disparité, photogrammétrie, stéréoscopie, stéréovision.

Resumo. Este artigo apresenta uma revisão teórica do conceito de estereoscopia, baseado em uma análise detalhada do processo de evolução e do estado da arte. O trabalho explica o funcionamento da estereoscopia, seus fenômenos e princípios e descreve o processo de visão estereoscópica, os métodos de observação estereoscópica: visão convergente, visão paralela e suas técnicas, separação espectral, separação temporal, e separação espacial; os dispositivos que permitem esta visão e algumas aplicações mais utilizadas nos diferentes campos das ciências, como na reconstrução de superfícies terrestres e no campo da telemedicina.

Palavras-chave:disparidade, estereoscopia, estereoscópica, fotogrametría, paralaxe.

Introducción

La visión estereoscópica es un proceso inherente a los seres humanos, consistente en obtener una vista tridimensional de objetos percibidos mediante visión binocular. El cerebro humano interpreta la realidad a partir de las imágenes que le proporcionan los dos ojos, las cuales presentan diferencias entre sí, ocasionadas por su separación; la disparidad o paralaje entre dichas imágenes es utilizada por el cerebro para percibir la profundidad. Este proceso se logra no solo de manera natural sino mediante el empleo de algunos mecanismos o procedimientos que involucran el uso de instrumentos o equipos, como los sistemas de visión paralela, visión cruzada, anáglifos, polarización, obturación, cascos de realidad virtual y monitor lenticular. Los fundamentos de la visión estereoscópica durante el siglo XIX se le atribuyen al físico Charles Wheatstone; el desarrollo de

la fotografía durante ese siglo conduce a la aparición de las primeras cámaras y visores estereoscópicos (Martín, Suárez, Rubio y Gallego, 2013). Este tipo de visión ha sido utilizada en gran cantidad de áreas y aplicaciones. La estereoscopia, como también se le conoce al proceso, ayuda a capturar e identificar características y rasgos que no se logran por medios tradicionales, en lo cual radica su importancia (Saiz, 2010). Algunas de las principales aplicaciones relacionadas se dan en campos como la visión de máquina (Wang, Zhang y Quan, 2009), entretenimiento (Beraldin *et al.*, 2005), navegación (Miyazawa y Aoki, 2008), procesamiento y análisis de imágenes (Gupta, Naidu, Srinivasan y Krishna, 2011), telecirugía y simuladores de vuelo, entre otras.

En este artículo se hará referencia a la explicación del fenómeno de la visión estereoscópica, los diferentes métodos de observación estereoscópica y algunas de las más importantes aplicaciones en diferentes campos.

Proceso de estereoscopia

A fin de explicar de una manera clara el proceso de la estereoscopia es preciso establecer un marco teórico que permita contextualizar los aspectos psico-físicos, en los cuales se basa la estereovisión. Dentro de estos aspectos se pueden mencionar la fisiología de los ojos, además de la disparidad binocular.

Con el objetivo de conceptualizar el funcionamiento, fenómenos y cualidades de la visión estereoscópica, se procede a hacer una introducción. A continuación se abordarán temas de estereoscopia como disparidad binocular, geometría epipolar, entre otros.

Generalidades de la visión estereoscópica

Visión estereoscópica o estereoscopia, como también se le conoce, es un proceso que se realiza de manera natural cuando un observador mira simultáneamente dos imágenes de un mismo objeto, que han sido captadas desde dos posiciones distintas. Cada ojo ve una imagen y el resultado de ese proceso es la percepción de la profundidad o tercera dimensión.

El ojo humano funciona de manera análoga a una cámara fotográfica, así por ejemplo, la córnea se comporta como un filtro, el iris es el regulador de la intensidad de la luz, el cristalino actúa como lente y la retina se asimila a la película en la cual se forma la imagen. El conjunto de actividades realizadas por cada parte del ojo es lo que permite la formación de la imagen y el proceso de estereovisión se produce cuando el cerebro fusiona en una sola, la imagen recibida por cada ojo.

La percepción de la tercera dimensión se puede lograr involucrando las sombras, el tamaño relativo de los objetos o mediante la perspectiva. No obstante lo anterior, solo la convergencia relativa de los ejes ópticos, cuando se miran objetos a distancias variables, es lo que genera la apreciación de la profundidad a la que se observan dichos objetos.

En el proceso de observación de un objeto, el ojo humano realiza movimientos conocidos como acomodación y convergencia, los cuales se producen de manera simultánea para garantizar la comodidad en la observación. La intersección de la convergencia de los ejes ópticos genera un

ángulo denominado paraláctico cuyo valor depende directamente de la distancia entre el observador y el objeto. En la figura 1 se indica la manera en la que se interceptan los ejes ópticos formando el ángulo paraláctico β , el valor del ángulo se hace mayor entre menor sea la distancia entre el observador y el objeto (Bicas, 2004).

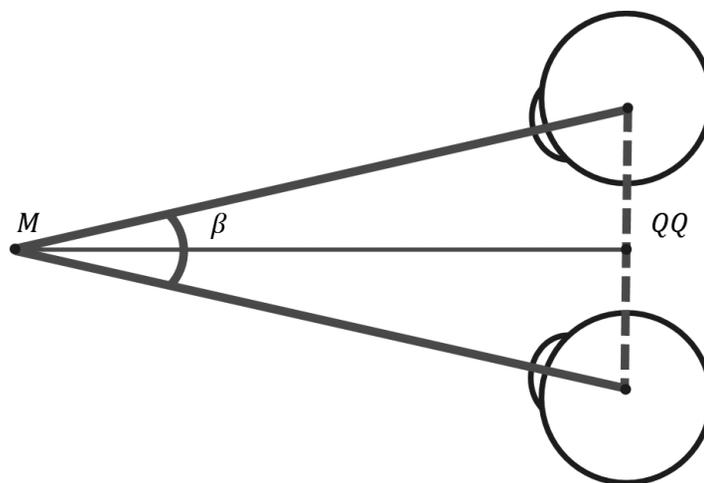


Figura 1. Intersección de ejes ópticos y el ángulo paraláctico β .
Fuente: elaboración propia a partir de Bicas (2004).

El humano es capaz de percibir el relieve de los objetos debido a dos fenómenos, el conocimiento *a priori* de una escena (tamaño de objetos, texturas, sombras, líneas arquitectónicas, etc.) y la diferencia entre las imágenes captadas por ambos ojos. Este es un proceso psicofisiológico en el que interviene el ojo y cerebro (Howard y Rogers, 2012). Los dos ojos, al estar situados en posiciones diferentes, recogen cada uno en sus retinas una imagen ligeramente distinta de la realidad que tienen delante, lo cual se conoce como disparidad binocular. El cerebro toma información de cada ojo y las une en una imagen, interpretando las pequeñas diferencias entre cada vista para calcular la distancia a la que se encuentran los objetos mediante la técnica del paralaje, generando el efecto de profundidad. Esto produce una visión tridimensional, con la cual se logra ver exactamente dónde está el entorno en relación al cuerpo.

La geometría epipolar establece las relaciones geométricas que existen entre puntos espaciales en una escena y sus respectivas proyecciones en las retinas de los ojos, generando así fronteras entre los puntos de la imagen. Un epipolo se define como “la imagen en una cámara de la proyección central de la otra cámara” (Cyganek y Siebert, 2011). La percepción de relieve se realiza en planos de vista (planos epipolares), que tienen como eje la distancia interpupilar, la cual se presenta entre 55 mm y 75 mm (Howard y Rogers, 1995).

La paralaje vertical, que es la diferencia de latitud entre las rectas paralelas al eje epipolar, se debe anular para poder percibir con nitidez la imagen, de no ser así se percibirá una imagen doble. En función de la distancia interpupilar, el hombre está en la capacidad de alcanzar radios comprendidos entre 500 y 1500 metros (López-Cuervo y Estévez, 1980).

El efecto tridimensional también se puede generar artificialmente. La visión estereoscópica artificial se da cuando se observan dos fotografías de la misma escena, pero tomadas desde puntos diferentes, siendo posible obtener una impresión tridimensional de lo que se observa. Para esto se deben cumplir dos condiciones: que cada ojo observe la imagen que le corresponde y que las imágenes estén sobre las paralelas a la base estereoscópica, evitando la paralaje vertical.

Métodos de visión estereoscópica

La observación en relieve se puede realizar por medio de dos procedimientos: líneas de visión convergente y líneas de visión paralela (López-Cuervo y Estévez, 1980), los cuales se explican a continuación:

Líneas de visión convergente

En primer lugar se encuentra la observación con líneas de visión convergente. Este es el más natural y cómodo para las personas, puesto que se realiza el mecanismo de acomodación y convergencia a la misma distancia. El funcionamiento básico consiste en la observación de cada foto con un solo ojo, es decir visión independiente. Los métodos más usados para este tipo de observación son los anáglifos, la polarización activa y pasiva, entre otros.

El método con líneas de visión convergente se puede lograr de múltiples técnicas, mediante separación espectral, separación temporal, separación espacial o separación mixta. La separación espectral consiste en la utilización del filtro por anáglifo o el principio de polarización. La visión estereoscópica por anáglifos muestra las dos imágenes de un par asignando colores complementarios (Iizuka, 2008). Estos colores complementarios comúnmente son rojo y azul. El usuario usa gafas con filtros de color rojo y azul, de tal manera que un ojo observe solo la imagen azul y el otro la imagen roja, de esta forma separando cada imagen. Tal técnica tiene como ventajas su simplicidad y bajo costo, además es frecuentemente utilizado en libros con ilustraciones 3D. No obstante, unas de las desventajas que presenta es la pérdida de resolución, rivalidad de colores, no poder ser usadas con imágenes a color y en ocasiones es incómodo para el usuario. Su aplicación puede ser una buena alternativa en tareas de análisis y control que no exigen rigurosidad.

La visión estereoscópica por polarización requiere de dos componentes: pantalla polarizante y gafas polarizadas. El monitor debe proyectar las imágenes a una frecuencia de 120 Hz, y en función de ésta intercalar la polarización ortogonal, mostrando una imagen diferente en cada intervalo. Las gafas, por su parte, son pasivas y deben tener los cristales polarizados, uno en dirección horizontal y el otro vertical. De igual forma, permiten observar varios monitores simultáneamente y no incomodan en visión monoscópica. Dicho método se destaca por permitir la visualización de imágenes a color y superponer vectores. Por otro lado, su principal deficiencia es la reducción del brillo en un 75%.

En el método de separación temporal se alternan las imágenes izquierda y derecha a una frecuencia comprendida entre 80 y 160 Hz, siendo común usar 120 Hz, ya que se necesita por lo menos 60 Hz en cada ojo para evitar el parpadeo. El efecto tridimensional se consigue usando unas gafas activas (requieren baterías) de cristal líquido, que obturan el paso de la luz de manera sincronizada con la imagen que se está observando. La sincronización depende del controlador

situado en las gafas, el cual las enlaza con el monitor. Este tipo de gafas permite la visualización estéreo en pantallas de cualquier resolución, tamaño y número de colores. El principal problema se presenta con la aparición de residuos de imagen en un ojo al que no le correspondía, o la presencia de parpadeo, inconvenientes que se atribuyen a la desincronización o baterías descargadas.

En tercer lugar se encuentra la separación espacial, donde se dirige cada ojo a una pantalla diferente o a una pantalla dividida en dos, de tal manera que cada uno reciba su correspondiente imagen. Para lograrlo se acude a la utilización de un estereoscopio situado al frente de la pantalla(s), lo cual permite que se puedan utilizar monitores habituales a 60 Hz y adaptadores gráficos estándar. Es posible realizar superposición vectorial adecuada para tareas de control. Las limitaciones tienen que ver con que solo permite un usuario a la vez, su utilización no es cómoda y el campo de visión en sentido horizontal es reducido.

También es posible encontrar técnicas que incorporen varios de los métodos ya mencionados, pero es evidente en las aplicaciones actuales de visión tridimensional que los principios de separación temporal y espectral, en la versión de polarización, son los más utilizados.

Líneas de visión paralelas

El segundo procedimiento es por observación con líneas de visión paralelas, en donde se realiza la acomodación a 25 cm, mientras se convergen los ojos al infinito, es más extenuante, por lo que se implementan unas lentes positivas entre las imágenes y el observador, lo cual facilita que se realice la convergencia y acomodación a igual distancia, haciendo el procedimiento más conveniente.

Los autoestereogramas son una de las formas para representar objetos tridimensionales a través del uso de líneas de visión paralelas. Aquí se sitúa una pantalla virtual entre el observador y el objeto, y la imagen del estereograma se construye por medio de puntos en aquella pantalla virtual (Tsuda, Yue y Nishita, 2008). El observador efectúa la estereopsis al observar pares de puntos en la imagen con el ojo izquierdo y derecho, dicha relación es la que permite construir la imagen tridimensional. La aplicación de esta técnica se observa en entretenimiento y esteganografía.

Aplicaciones de la estereovisión

Dada la importancia y el impacto que ha tenido el conocimiento de la estereovisión, en la actualidad se han desarrollado varias aplicaciones basadas en los diferentes métodos involucrados. A continuación se presentan algunas de las más destacadas en el campo de la reconstrucción tridimensional de escenas, la telemedicina y otros.

Reconstrucción tridimensional de terrenos

La reconstrucción tridimensional de terrenos ha tenido avances significativos en los últimos años debido a la importancia que se ha generado por adquirir modelos 3D de escenas, a partir de imágenes capturadas por cámaras. Los avances en visión computacional han permitido que este procedimiento sea cada vez más flexible y preciso, a pesar de que sea un proceso complejo e intrincado. A partir de allí se ha generado gran cantidad de enfoques y propuestas de reconstrucción

tridimensional donde se busca garantizar la calidad, disminuir la complejidad de uso y lograr reducción en los precios de los equipos. A continuación se exponen investigaciones en este campo que ilustran la variedad de propuestas, su análisis y, por consiguiente, la importancia que el tema tiene en la actualidad.

Aportes importantes e innovadores en la creación de sistemas de reconstrucción 3D se dieron al inicio del siglo XXI, cuando varias propuestas comenzaron a emerger. Principalmente se basaban en la creación de un ambiente virtual a partir de varias imágenes adquiridas de una escena. Tales imágenes podían no estar uniformemente distribuidas e incluso no tener la misma calidad, pero se usaban para complementar espacios no conocidos previamente; el principal objetivo era crear mapas 3D interactivos, que incluso tuvieran los formatos apropiados para ser expuestos a través de internet.

Radoui y Roman (2000) diseñaron varios módulos teniendo como algoritmo principal la interpolación de Shepard, con una aplicación previa de procesos de sub-muestreo y re-muestreo de los datos de entrada. La reconstrucción del terreno se realizó al relacionar la altitud de cada punto procesado, con puntos de la superficie de las respectivas imágenes en 2D, siguiendo su dirección normal. En conclusión, se determinó que el terreno puede ser creado automáticamente si se implementa la interfaz apropiada y se requerían más pruebas del algoritmo para lograr una robustez alta.

En el año 2003 se publicó un artículo (Tang, Wu, Tsui y Liu, 2003) que exponía un algoritmo que integraba de manera más apropiada datos visibles y desconocidos para la realización de la reconstrucción. Su principal característica era la aplicación de una etapa de optimización en donde se minimizaban los errores de proyección de retorno de cada imagen, y se adicionaban diferentes pesos a los puntos para distinguir entre visibles y ocluidos. Así, se iniciaba el proceso de reconstrucción uniendo las estructuras parciales existentes para obtener un modelo 3D inicial. Después se aplicaba la optimización ya mencionada, lo que permitía proyectar todos los puntos característicos del espacio hacia todas las imágenes, dependiendo de las matrices calculadas, sin importar si eran visibles o no. El algoritmo fue comprobado con datos simulados y secuencias de imágenes reales, mostrando una alta efectividad y precisión.

Telle y Ramdani (2003) propusieron un método de reconstrucción que se caracterizó por el uso de análisis de intervalos. En primer lugar, se implementó un modelo proyectivo para la calibración de la cámara basado en el modelo estenopeico estándar. Posteriormente se utilizó un modelo estereoscópico para realizar la adquisición y reconstrucción. De esta manera se definió que la calibración y reconstrucción involucraban sistemas lineales, que podían ser resueltos a través de la teoría de análisis de intervalos. La línea del proceso se puede observar en la figura 2. Al aplicar el método se pudo evaluar la precisión de los datos en ambos tipos de sistemas, teniendo como única suposición que su incertidumbre delimitada; metodología que podría complementar otras propuestas en este campo para permitir una parametrización de las condiciones y fijar formas de validar la precisión.

Otros enfoques fueron propuestos en este propósito, como un modelo volumétrico activo, por Liu, Yao, Chen y Gao (2005); el modelo se basaba en principios físicos en donde, bajo la influencia de “fuerzas externas” artificiales, se encogía un campo hacia una escena real formada a partir de múltiples imágenes calibradas, prescindiendo de voxels que no pertenecían a la escena.

Las tres fuerzas consistían en una restricción de superficie lisa, una de silueta y otra de consistencia de color. Basado en la composición de dichas fuerzas se lograba identificar agujeros y eliminar voxels externos al modelo 3D. Se realizaron pruebas con dieciocho tomas de objetos específicos, donde se mostraron las capacidades que tenía el algoritmo de construir el modelo 3D del objeto e ignorar objetos no pertenecientes a este.

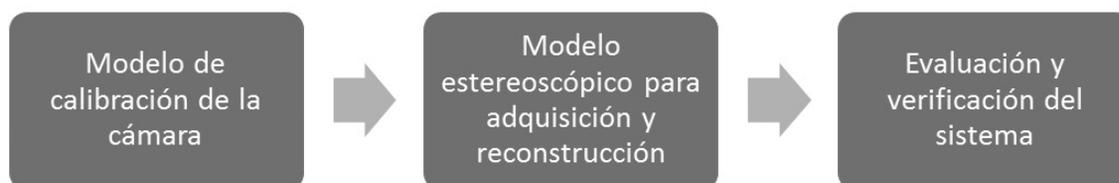


Figura 2. Proceso de reconstrucción tridimensional por análisis de intervalos.
Fuente: elaboración propia a partir de Telle y Ramdani (2003).

La integración de información manual y automática para la generación de terrenos se observa en proyectos como el de Shao, Li y Cheng (2003), en donde se muestra una estrategia topológica de reconstrucción 3D semi automática de edificios y vías desde un estero par aéreo. Era una tarea que se realizaba a través de operadores humanos, ahora se buscaba realizar a través de una combinación de procesos en donde se mezclan diferentes niveles de geometrías junto con diferentes niveles de abstracción topológica, en donde los vértices, superficies y cuerpos se definen explícitamente por el operador. Para esto se definieron cuatro niveles en el proceso.

El primer nivel contiene vértices con la más sencilla extensión espacial y sus tipos se describen por sus atributos. El segundo nivel contiene líneas de juntas, las cuales se construyen de segmentos de línea conectados por puntos 3D. El tercer nivel contiene las superficies de los edificios mostrando la relación con sus vecinos, que pueden ser edificios o vías. El cuarto nivel consiste en los edificios o vías en su totalidad. Se desarrolló un prototipo del software del modelador 3D basado en el método presentado y se utilizaron como material de prueba imágenes aéreas a escala 1:8000. Así, seleccionando puntos de interés, se pudo realizar satisfactoriamente la reconstrucción de un modelo de ciudad 3D semi automáticamente.

La anterior es una muestra de la tendencia a automatizar los procesos de interpretación de imágenes y reconstrucción de objetos, de tal forma que se puedan mejorar la calidad y confiabilidad de los resultados y favorecer a los operadores de dichas herramientas haciéndolas más útiles y fáciles de manejar.

Mckinley, Mcwaters y Jain (2001) muestran los primeros pasos en el uso de solo un estéreo par desconociendo parámetros intrínsecos o extrínsecos de la escena o puntos especificados previos al procesamiento. En el proyecto se debe asegurar que los ejes ópticos de las dos imágenes se interceptan y que sus ejes *Y* son paralelos. Para mejorar el emparejamiento de puntos, y por consiguiente, la precisión del sistema, se realizó una interpolación de un dieciseisavo sobre el arreglo de píxeles de las imágenes. Y finalmente, se realiza una verificación para comprobar que los puntos calculados de la escena son confiables. A fin de realizar la reconstrucción final del modelo se necesita por lo menos un punto coordinado del ambiente o las dimensiones reales de un objeto de la escena.

Posterior a los primeros enfoques existentes ya mostrados, se comenzaron a diseñar métodos que hicieran más robustos los sistemas de reconstrucción que existían. Así se encuentran investigaciones (Zhang y Xiao, 2008; Duan, Meng y Wang, 2008) que tienen como principal objetivo incluir en el proceso imágenes no calibradas y la posibilidad de presentar vistas muy apartadas entre sí. A su vez, tenían como principal característica varios algoritmos de procesamiento de imágenes, como la extracción de puntos característicos, la auto-calibración o puntos clave de escala invariante. El resultado principal que se presentaba era el mejoramiento de la estimación de la matriz final, aportando a una correcta y precisa reconstrucción tridimensional.

La tendencia a la alta robustez y precisión de los sistemas de reconstrucción llevaron a su aplicación en ambientes reales y problemas específicos que incluyen, entre otros, la reconstrucción tridimensional de terrenos. A continuación se describirán unas de las aplicaciones más destacadas en este campo.

Un artículo científico realizado por Ming y Xianlin (2007) muestra una muy interesante aplicación de la estereovisión en el campo de la reconstrucción de terrenos. Allí se expone el problema del aterrizaje autónomo de un vehículo en la superficie de la luna, para que tal procedimiento se realice de manera exitosa se deben seleccionar puntos de aterrizaje apropiados. Se propone un método de reconstrucción en 3D por medio de estereovisión usando una cámara de carga acoplada o CCD (por sus siglas en inglés), montada en la parte inferior del vehículo. El sensor permitiría adquirir suficiente información de textura de la superficie de la luna haciendo posible el uso de estereovisión.

Con el objetivo de generar el terreno tridimensional, se diseñaron una serie de algoritmos que se organizaron en cuatro pasos. En primer lugar, la selección y emparejamiento de puntos característicos. Seguidamente, la estimación de rotación y traslación relativa entre diferentes posiciones. Tercero, la rectificación del estereo par y la obtención de la imagen dispar. Y por último, la reconstrucción 3D del terreno y la generación del mapa de elevación digital del punto de aterrizaje. Se utilizaron técnicas como la transformada de escala invariante (selección de características), el método de rectificación sin calibración de cámara (rectificación del estereo par) y el método Locus (construcción del mapa de elevación).

Todo el sistema se simuló en un software libre de generación de terreno 3D llamado Geomorph V0.31, el cual dispone de un terreno digital de la luna con sus rasgos morfológicos característicos. A pesar de que el resultado final de la reconstrucción ha perdido algunos detalles, puede representar la forma del terreno de manera muy exacta, brindando la información suficiente para hallar un punto de aterrizaje adecuado para el vehículo. Los resultados obtenidos de la simulación muestran que el método puede usarse efectivamente en la reconstrucción 3D de terreno lunar real (figura 3). Por lo tanto, esta tecnología puede encaminarse al desarrollo de futuras misiones a la luna debido a que proporciona mayores medidas de seguridad y altas probabilidades de un alunizaje exitoso.

Una aplicación interesante se puede observar en (Brandou *et al.*, 2007), donde se diseñó un método de adquisición de imágenes para reconstrucción tridimensionales de escenas submarinas, de tal manera que se pueda complementar análisis de muestras y medidas fisicoquímicas, gracias a sus medidas cuantitativas en 3D. Se utilizó un sistema de estereovisión para capturar diferentes tomas de un objeto, a intervalos fijos de acuerdo a una trayectoria predefinida. El sistema estaba

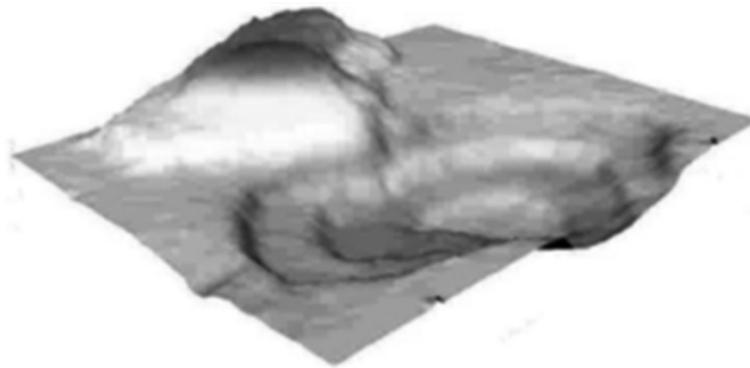


Figura 3. Reconstrucción del terreno lunar.
Fuente: Ming y Xianlin (2007).

anexado al manipulador de un robot submarino, el cual era pre programado con la trayectoria a recorrer y la vez ofrecía una imagen en vivo del escenario. Es un aspecto muy importante del sistema debido a que consiste en generar y seguir la trayectoria para conocer las posiciones exactas de la cámara en todo el transcurso del recorrido, y posteriormente lograr un modelo 3D preciso de la escena.

El proceso iniciaba con la extracción de características de las imágenes estéreo para obtener una representación inicial al relacionar aquellas escenas. A continuación se realizaba una triangulación básica de puntos que, con base en el paso anterior, lograba obtener una estimación de la estructura tridimensional. Como último paso se implementó una técnica de estimación de profundidad densa para adquirir una reconstrucción 3D de alto realismo.

De acuerdo a los resultados se determinó que la precisión del sistema es proporcional a la cantidad de imágenes que se obtengan, es por eso que el curso de la investigación se encaminó a desarrollar el método usando un gran grupo de imágenes. Este proyecto da una solución real a la necesidad de diferentes industrias de tener una visión real y detallada de escenas submarinas, dando lugar a posibilidades que antes eran imposibles. Así, proyectos científicos de biología marina, exploración o arqueología subacuática cuentan con una herramienta tecnológica con todas las exigencias para un buen desempeño y funcionamiento.

Otro ejemplo importante en donde se observan las cualidades de la fotogrametría es un proyecto de reconstrucción de posturas de jugadores en un campo de fútbol (Malerczyk, 2007). La técnica no requiere *hardware* especializado, solo utiliza las imágenes transmitidas por televisión. La escena del juego se recrea no solo permitiendo reproducir el momento en cámara lenta, sino que también permite visualizar el acto desde posiciones arbitrarias escogidas por el usuario.

El algoritmo consiste en la reconstrucción 3D de movimientos humanos a partir de secuencias de cámara en dos dimensiones. Además, no está limitado a escenas de eventos deportivos, sino que puede ser usado también en el modelamiento de la postura y movimiento de objetos deformables basados en cadenas cinemáticas. El principio básico del algoritmo consiste en la comparación de siluetas reales y artificiales del cuerpo humano. Este tipo de tecnología se aplicó ampliamente en la transmisión televisiva de fútbol en vivo, especialmente durante la copa mundial de fútbol del 2006,

ya que permitía recrear escenas (figura 4) que en primer lugar no eran evidentes, y además daba una solución al televidente a situaciones polémicas que habían quedado en duda.



Figura 4. Reconstrucción del terreno lunar.
Fuente: Malerczyk (2007).

En proyectos de patrimonio cultural comúnmente se requiere la reconstrucción tridimensional de objetos y escenas reales, El-Hakim, Beraldin, Picard y Godin (2004) diseñaron una propuesta que integra múltiples tecnologías, entre interactivas y automáticas, en donde se usa modelamiento basado en imágenes para el modelamiento de figuras básicas y elementos estructurales y escáner láser para detalles muy finos y superficies esculpidas.

El proceso consiste inicialmente en la creación de formas básicas y detalles de gran tamaño, como columnas, bloques, ventanas y arcos. Lo anterior se realiza a través de fotogrametría avanzada con varios procesos automáticos, método que resulta adecuado para las características de arquitecturas clásicas. Después, se utilizan escáneres láser para obtener detalles geométricos de alta calidad, tales como esculturas y superficies con formas irregulares, posteriormente se integra la información con el paso anterior. Finalmente se utilizan panoramas de imágenes aéreas para completar el entorno y paisaje a fin de presentar el monumento en su forma natural.

La propuesta se puso a prueba exitosamente con siete monumentos individuales a partir de imágenes digitales y otros monumentos a partir de las regiones escaneadas. La investigación continúa concentrándose en mejorar el nivel de automatización del sistema y en crear un proceso para definir qué nivel de detalle requiere cada componente del modelo para lograr un nivel óptimo de detalle sin el uso en exceso de recursos. El proyecto debe su importancia a facilitar los procesos de preservación de patrimonio cultural de una manera eficiente y de alta calidad.

Telemedicina

Los excelentes avances e investigaciones realizadas en el campo de la fotogrametría han llevado a su utilización en otros campos de la ciencia en donde se notó que se podría dar un aporte impor-

tante a problemas específicos. Lo anterior sucedió en el campo de la salud, más específicamente en el campo de la telemedicina e imágenes médicas. Estos sectores están necesitando de procesos automáticos de adquisición de imágenes y análisis del entorno de alta calidad y de manera segura, demandas que la fotogrametría está en la capacidad de solventar. A continuación se expondrán ejemplos que demuestran el importante aporte que se está haciendo en el campo de la salud, resaltando en primer lugar la contribución al procesamiento y análisis de imágenes y posteriormente a la asistencia de procedimientos quirúrgicos.

En un estudio realizado en el año 2002, Patias (2002) resalta la importancia que la fotogrametría podría tener al aplicarse en el campo de las imágenes médicas. Esta es indispensable en los diagnósticos y tratamientos clínicos, debido a que es una importante fuente de información anatómica y funcional. Las modalidades actuales de captura de imágenes proveen grandes cantidades de información, si se hace automáticamente, lo cual requiere que algoritmos sofisticados tengan que ser usados para identificar, entender y aprovechar los datos; y cuando no es así, en muchos casos se pueden obtener resultados erróneos o poco confiables. Es en este aspecto en donde la fotogrametría podría brindar una ventaja, ya que cuenta con herramientas con la capacidad de producir, procesar y clasificar grandes cantidades de datos 3D de alta resolución de una manera geoméricamente consistente, robusta y precisa.

En el documento se hace referencia a los actuales retos en las imágenes médicas en donde la fotogrametría podría dar un aporte. En primer lugar se encuentra la fusión de imágenes de múltiples sensores. El principal problema en este tema consiste en el hecho de seleccionar el método de procesamiento más apropiado para cierto caso específico, pues en la mayoría de situaciones no es posible. De esta manera se entiende que la única manera de obtener información con la mejor calidad posible consistiría en la combinación de sensibilidad y especificidad de diferentes sensores. Claramente, el problema involucra un gran rango de problemas técnicos a resolver. El mayor defecto de las técnicas no fotogramétricas, desarrolladas actualmente, es su incapacidad de tener en cuenta la verdadera geometría de la imagen.

Los avances en fotogrametría han mostrado una precisión de 1 mm en reconstrucciones del cuerpo en 3D y de 0.1 mm en reconstrucciones faciales. Por lo tanto, este conocimiento y técnicas deberían ser transferidos y aplicados a imágenes médicas para mejorar la calidad de la información. De la misma manera se ha demostrado las ventajas del estado actual de la fotogrametría en dificultades con emparejamiento de secuencias de imágenes, segmentación de imágenes y captura y análisis de movimiento. Es así como se pueden identificar los aportes que la fotogrametría puede hacer a la medicina con soluciones de última tecnología, siendo la mayor contribución el rigor y la precisión en modelamiento geométrico.

Una aplicación más específica de la estereoscopia se observa en la cirugía asistida por computador (CAS, por sus siglas en inglés), en donde uno de los principales desafíos consiste en determinar la morfología intraoperatoria y el movimiento de tejidos blandos. Términos que son de suma importancia para mejorar las capacidades de navegación de los cirujanos al permitirles observar más allá de la información expuesta y darles un mejor control de los instrumentos de robótica asistida.

El ejemplo se observa en la laparoscopia, que es una cirugía de intrusión mínima (MIS, por sus siglas en inglés) realizada en cavidades del abdomen o pelvis, donde se necesitan mejoras en la

capacidad de visualización. En este tipo de procedimientos se tiene como factor primordial una adquisición rápida, precisa y robusta de la anatomía; en ese sentido han surgido propuestas muy atractivas relacionadas con reconstrucción 3D de la superficie de tejido blando usando el mismo endoscopio. Sin embargo, dicha reconstrucción posee múltiples dificultades específicas como el ambiente dinámico y deformable y la importante necesidad de que las técnicas tengan alta precisión y robustez, para garantizar la seguridad de los pacientes.

Maier-Hein *et al* (2013) hace un descripción de métodos de reconstrucción 3D intraoperatoria que están recibiendo especial atención en la actualidad. En primer lugar se encuentra la estereoscopia, el cual se ha mostrado como una técnica factible para este tipo de procedimientos, puede ser usada para obtener la geometría de la superficie del tejido a partir del estereo par y sin requerir luz o hardware adicional. La estereoscopia ya está en uso en las salas de operación, por ejemplo con el sistema de cirugía da Vinci (Leven *et al.*, 2005). Los principales desafíos que se encuentran son la complejidad de las imágenes laparoscópicas y la robustez ante el ambiente; es importante considerar que la mayoría de intervenciones de esta clase se está realizando con lentes monoculares.

El siguiente método se relaciona con técnicas monoculares, que reciben su importancia por no implicar una modificación a laparoscopios comunes. Se encuentran dos tipos de técnicas principales: figura a partir del movimiento y figura a partir de la sombra. El primero se asemeja a la estereoscopia pero con mayor dificultad, ya que intenta recrear profundidad a partir de dos imágenes adquiridas en instantes diferentes, dando lugar a que el escenario cambie. Una versión más moderna de la misma solución a lo anterior al usar una plantilla tridimensional generada con una primera exploración y la reconstrucción de la forma en una segunda. El segundo tipo consiste en recrear el entorno a partir de la relación entre la intensidad de los píxeles y la normal de la superficie, a partir de una sola imagen, lo que la hace aplicable a la laparoscopia, ya que la fuente de luz es fija con respecto a la cámara. Ambos tienen la ventaja de poder ser usados con prácticamente cualquier laparoscopio, pero pueden fallar al enfrentarse a situaciones de sangrado, humo u oclusiones.

Se describe también la técnica de localización simultánea y mapeo (SLAM, por sus siglas en inglés), la cual estima secuencialmente y en tiempo real la estructura 3D y la posición de la cámara. Las imágenes se procesan individualmente para actualizar el estado del sistema, en cada paso se calcula una nueva postura de la cámara y se registra una nueva parte del entorno. Dicho método puede ser usado para obtener información en tiempo real de la posición de la cámara y construir simultáneamente el modelo tridimensional del tejido mientras el cirujano manipula el endoscopio. SLAM es aún una tecnología en maduración, con varios desafíos que enfrentar como sistemas de posicionamiento más confiables y mejoramiento del proceso de emparejamiento de las imágenes, el cual afecta directamente la robustez y precisión de la reconstrucción.

Haciendo una comparación, los métodos pasivos de modelamiento tienen la ventaja de no exigir modificación a los equipos de laparoscopia actuales, ya que son procedimientos ejecutados en software. Hecho que lleva requerir un procesamiento intensivo y, por lo tanto, una exigencia computacional. Por otro lado, los métodos activos pueden obtener mapas de profundidad densos a una alta frecuencia, pero requieren de luz adicional y modificación y adaptación de los equipos utilizados.

Las técnicas de reconstrucción 3D intraoperatorias en tiempo real cumplen un papel importante en los sistemas quirúrgicos avanzados y debido a la constante necesidad de mejoramiento de la navegación en los MIS y la alta precisión al controlar instrumentos quirúrgicos para mejorar la calidad del tejido manipulado es claro que los avances tecnológicos y de telemedicina seguirán brindando soluciones para obtener una laparoscopia asistida por computador de alta calidad y confiabilidad.

En los procedimientos que consisten en telepresencia es primordial lograr una tarea específica tal y como sucedería si se estuviera presente en el lugar. Con este propósito, se ha puesto como exigencia que tales sistemas logren simular o igualar la sensación que experimentan los usuarios, mientras que se mantiene la alta capacidad de realizar el procedimiento. En Lee y Kim(2008) se expone un sistema háptico de retroalimentación junto con imágenes estereoscópicas para el control de un robot móvil. El sistema háptico se computaba a partir de la información adquirida por un sonar añadido al robot y se entregaba al usuario a través de una sonda háptica. Los pares estereoscópicos se obtenían a partir de una cámara estéreo montada en el frente del robot.

Se diseñaron pruebas para medir y evaluar la experiencia de los usuarios con el sistema. La prueba consistía en llevar un robot móvil real a lo largo de un entorno teniendo el máximo cuidado, evitando las colisiones en lo posible. Se evaluaron el número de colisiones y el tiempo en completar el recorrido, junto con una encuesta que medía la experiencia con respecto al realismo y la personificación. El experimento demostró que la retroalimentación háptica mejoraba significativamente las tareas de operación y presencia y que las imágenes estereoscópicas también mejoraron la percepción del entorno; sin embargo, esto solo sucedía cuando no se habilitaba el sistema háptico. Dichas conclusiones dan paso al desarrollo de sistemas hápticos de telepresencia más avanzados, que podrían contribuir de gran manera a industrias como la de videojuegos, operaciones de exploración y rescate remota y telecirugía.

Otras aplicaciones

En el año 2012 se publicó un artículo (Zappa, Mazzolenia y Hai, 2012) referente a un sistema de reconocimiento facial 3D basado en estereoscopia, en el que se presentó un innovador algoritmo en el cual se adquieren dos imágenes de un sujeto, que luego se analizan por separado por un modelo activo de apariencia el cual extrae de estas 58 puntos homólogos (figura 5). El enfoque propuesto consiste en la triangulación de los puntos extraídos del estéreo par, teniendo como ventaja que es un método enteramente tridimensional que se realiza en lo que demora la captura de una foto, diferenciándose de otros métodos que toman más tiempo.

La creación del modelo es realizado de manera estadística, en las imágenes de entrenamiento el usuario selecciona puntos faciales característicos, creando una nube de puntos interrelacionados. Los datos de entrenamiento permiten identificar parámetros generales importantes en términos de geometría y textura, el modelo resultante es una representación de la variación más significativa entre las imágenes. La base de datos se conformó a partir de 27 personas, las cuales representaron 27 pares de imágenes. Para analizar el funcionamiento del sistema se adquirieron nuevos estéreo pares de cada sujeto y se le aplicó el algoritmo a cada uno. En todos los casos considerados el sistema indicó como el más similar a la persona correcta, es decir, que el proceso no

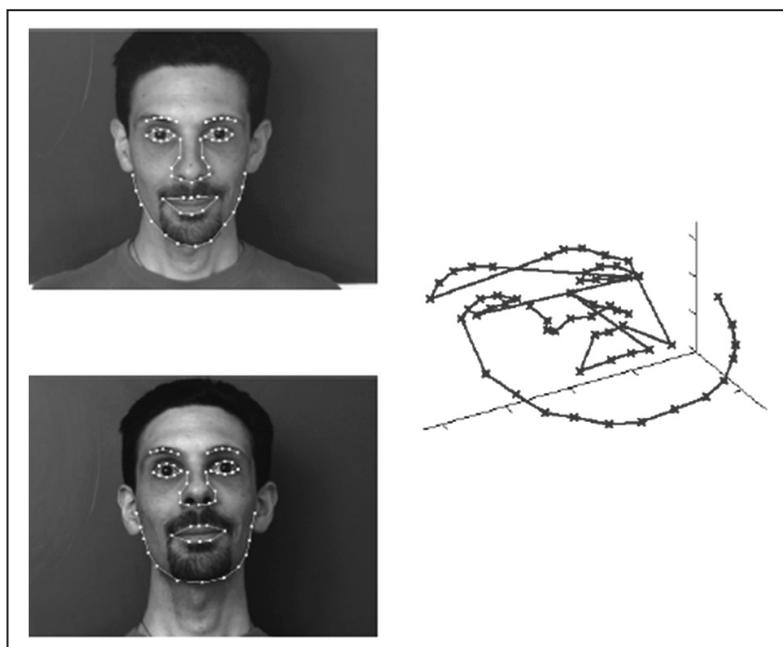


Figura 5. Caracterización del rostro.
Fuente: Zappa, Mazzolenia y Hai (2012).

mostró ningún problema en identificar qué persona de la base de datos correspondía a la imagen ingresada. Sin embargo, en una aplicación real no siempre se va a tener a la persona en cuestión en la base de datos.

Es por eso que se buscó un criterio para discriminar si la persona en la base de datos es efectivamente la que se busca, o si por el contrario no se encuentra allí. Así, se aplicó un umbral al parámetro de minimización usado como factor diferenciador en el algoritmo, lo cual garantizó que siempre se encontrara por lo menos un sujeto por debajo del umbral.

Los resultados son prometedores debido a que las pruebas mostraron una tasa de falso rechazo igual a cero y una tasa aceptable de rechazo del 3%. Se consideran como trabajos futuros extender la base de datos para mejorar la base estadística y definir más valores de umbral para fijar una zona de incertidumbre. Este tipo de aplicaciones está teniendo gran importancia por la necesidad constante de mejorar los sistemas de seguridad, ya que si se logra obtener un sistema confiable y eficaz de reconocimiento facial, se podría llegar a identificar con gran exactitud identidades específicas entre una gran multitud. Una habilidad que daría ventaja a los sistemas de seguridad sobre la delincuencia.

Otro campo en donde se ha aplicado en gran medida la fotogrametría es en la robótica y la visión de máquina. El hecho de darle capacidades de visión a robots autónomos ha sido de gran interés desde la necesidad de darle capacidades humanas; los sistemas estereoscópicos brindan características de profundidad y percepción que serían muy útiles en sistemas robóticos. Paulraj *et al.* (2008) realizaron un interesante estudio en donde se creó un procedimiento mediante el

cual se podía determinar la orientación de robots móviles utilizando un par de cámaras, que se utilizaron para capturar imágenes del entorno en diferentes configuraciones de orientación; posteriormente se emplearon cuatro redes neuronales sencillas para asociar las imágenes adquiridas con la imagen actual del robot.

Las dos primeras redes calculaba la orientación a partir de las imágenes separadas de ambas cámaras, respectivamente. La tercera red calculaba la orientación de acuerdo a información de ambas cámaras y la última red utilizaba la combinación de las imágenes anteriores para hacer su predicción. Las pruebas mostraron caso de éxito de entre 79 y 83 %, demostrando que el sistema puede cumplir a cabalidad con su objetivo. Trabajos futuros proponían mejorar el rendimiento de las redes neuronales para mejorar la precisión en el cálculo de la orientación. Este tipo de algoritmos son de gran utilidad para la industria robótica, debido a que da un sentido de actualización del estado de un sistema y es de fácil implementación en cualquier dispositivo que soporte la instalación de un sistema estereoscópico.

Un resumen general de otras aplicaciones de la visión estereoscópica se presenta en la tabla 1, elaborada a partir de Martín, Suárez, Rubio y Gallego(2013), quienes las ubicaron en diferentes campos, como: la representación de información gráfica compleja, la telepresencia, la realidad virtual y el entrenamiento de la percepción espacial, especificando algunas materias, procesos y aplicaciones.

Tabla 1. Aplicación de la Visión Estereoscópica

Campo	Materia	Proceso	Aplicación
Representación de información gráfica compleja	Geología	La Fotogeología estudia los sucesos geológicos a través de fotografías aéreas estereoscópicas	Identificación de rasgos geológicos en el terreno, imperceptibles en fotografía bidimensional.
	Química	Visualización de moléculas complejas mediante técnicas estereoscópicas	En procesos didácticos
	Medicina	Herramienta didáctica y asistencial en cirugía	Interpretación de imágenes estereoscópicas para el diagnóstico: radiografías, ecografías, tomografía (TAC) y resonancia magnética nuclear (RMN).
Telepresencia	Facilita el trabajo en entornos hostiles, peligrosos o simplemente difíciles	Robots teledirigidos, dotados de cámaras estereoscópicas	Desactivación de explosivos Exploración espacial Exploración submarina Intervenciones quirúrgicas
Entrenamiento de la percepción espacial	Entrenar la capacidad del alumno de representar en su imaginación una realidad tridimensional a partir de su representación plana y viceversa	Estereoscopios Anáglifos	Fotointerpretación Estudios de relieve Localización de proyectos de infraestructura

Campo	Materia	Proceso	Aplicación
Realidad virtual	Creación de imágenes tridimensionales mediante el uso de software en computador	Técnicas estereoscópicas.	Diseño en ingeniería, arquitectura e industria - Uso de simuladores, vuelo, juegos, manejo de herramientas y vehículos (vuelo, conducción, navegación, etc.) - Herramienta de conocimiento y divulgación del patrimonio histórico artístico - Didáctica de un sinnúmero de materias, desde la medicina hasta el arte.

Fuente: elaboración propia a partir de Martín, Suárez, Rubio y Gallego (2013).

Conclusiones

Al exponer los casos más destacados y variados de las aplicaciones existentes actualmente, se demostró la importancia que tiene al dar soluciones eficientes y robustas a problemáticas propias de las diferentes áreas del conocimiento y de la industria.

En la revisión a las aplicaciones médicas y de telemedicina que tiene la estereovisión, se destaca la importancia que poseen al mejorar procedimientos quirúrgicos y procesos de adquisición y procesamiento de imágenes, cumpliendo con exigentes niveles de precisión y detalle. Se anticipa que dichas soluciones ayudarán a una mayor precisión y calidad de los resultados, traducándose en mejoramiento de la confiabilidad y robustez de los procesos, y por consiguiente, la calidad y garantía de vida de las personas. Finalmente se espera que una fusión de conocimiento multidisciplinar y una transferencia de tecnología, entre la fotogrametría y la medicina, sean beneficiosas para todas las partes implicadas.

También se desarrolló la descripción de algunos campos en los que está incursionando la fotogrametría, en donde se busca tener una adquisición y análisis de imágenes de exigente precisión y calidad, y donde dicha ciencia puede tener importantes aportes contribuyendo a los avances científicos de la humanidad, que están en constante cambio y reinvención, y en donde la fotogrametría seguirá solucionando problemas de alta complejidad de una manera eficiente y confiable.

La reconstrucción tridimensional de terrenos recibe especial atención por la gran participación que la fotogrametría y estereoscopia han tenido. Se analizó el proceso que siguieron los métodos de reconstrucción hasta el estado actual, comentado los desafíos que existían y cómo fueron solventados. Se observa que estas técnicas están alcanzando un nivel de confiabilidad y precisión suficientes para ser aprovechados en su totalidad y usarse masivamente.

Referencias

- Beraldin, J., Picard, M., El-Hakim, S. F., Godin, G., Valzano, V. & Bandiera, A. (2005, January). Combining 3D technologies for cultural heritage interpretation and entertainment. *SPIE, Proc.*, 5665, 108-118.
- Bicas, H. (2004). Fisiologia da visão binocular. *Arquivos Brasileiros de Oftalmologia. Arq. Bras. Oftalmol.*, 67(1), 172-180.
- Brandou, V., Allais, A., Perrier, M., Malis, E., Rives, P., Sarrazin, J. & Sarradin, P. (2007, June). 3D reconstruction of natural underwater scenes using the stereovision system iris. *OCEANS, IEEE*, 1-6.
- Cyganek, B. & Siebert, P. (2011). *An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms*. John Wiley & Sons.
- Duan, C., Meng, X. & Wang, L. (2008, September). 3D reconstruction from uncalibrated images taken from widely separated views. *Cybernetics and Intelligent Systems, 2008 IEEE Conference on*, 58-62.
- El-Hakim, S., Beraldin, J., Picard, M. & Godin, G. (2004). Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 24(3), 21-29.
- Gupta, A., Naidu, S., Srinivasan, T. & Gopala Krishna, B. (2011). A GPU based image matching approach for DEM generation using stereo imagery. Engineering (NUiCONE). *Nirma University International Conference on*, 1, 5, 8-10.
- Howard, I. & Rogers, B. (1995). Binocular Vision and Stereopsis. *Oxford psychology series: Oxford University Press*, 150-170.
- Howard, I. & Rogers, B. (2012). Perceiving in Depth, Volume 2: Stereoscopic Vision. *Issue 29 of Oxford Psychology Series, Oxford University Press*, 1-20.
- Iizuka, K. (2008). *Engineering Optics*. Volume 10. Springer, 475-478.
- Lee, S. & Kim, G. (2008). Effects of haptic feedback, stereoscopy, and image resolution on performance and presence in remote navigation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 66(6), 701-717.
- Leven, J., Burschka, D., Kumar, R., Zhang, G., Blumenkranz, S., Dai, X. & Taylor, R. (2005). DaVinci canvas: a telerobotic surgical system with integrated, robot-assisted, laparoscopic ultrasound capability. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI* (pp. 811-818). Springer Berlin: Heidelberg.
- Liu, X., Yao, H., Chen, X. & Gao, W. (2005, September). An active volumetric model for 3d reconstruction. In *Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on, Vol. 2*, II-101.
- López-Cuervo, S. y Estévez (1980). *Fotogrametría*. 114-175.
- Maier-Hein, L., Mountney, P., Bartoli, A., Elhawary, H., Elson, D., Groch, A. & Stoyanov, D. (2013). Optical techniques for 3D surface reconstruction in computer-assisted laparoscopic surgery. *Medical image analysis*, 17(8), 974-996.
- Malerczyk, C. (2007, May). 3d-reconstruction of soccer scenes. *3DTV Conference*, 1-4.
- Martín, S., Suárez, J., Rubio, R. y Gallego, R. (2013). *Aplicación de los sistemas de visión estereoscópica en las enseñanzas técnicas*. Oviedo: Universidad de Oviedo, Escuela de Ingenieros Técnicos Industriales de Gijón, Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación.
- Mckinley, T., McWaters, M. & Jain, V. (2001). 3D reconstruction from a stereo pair without the knowledge of intrinsic or extrinsic parameters. In *Digital and Computational Video, Proceedings. Second International Workshop on*, 148-155.
- Ming, J. & Xianlin, H. (2007). A Lunar Terrain Reconstruction Method Using Long Base-line Stereo Vision. *Control Conference, CCC 2007*. Chinese, 488-492.
- Miyazawa, K. & Aoki, T. (2008). A robot-based 3D body scanning system using passive stereo vision. *Image Processing, ICIP 2008. 15th IEEE International Conference on*, 305-308.
- Patias, P. (2002). Medical imaging challenges photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56(5), 295-310.
- Paulraj, M., Ahmad, R., Hema, C., Hashim, F. & Yusoff, S. (2008) Active stereo vision based system for estimation of mobile robot orientation using affine moment invariants. *Electronic Design, 2008. ICED 2008. International Conference on*, 1, 7, 1-3.
- Radoui, D. & Roman, A. (2000). 3D Terrain Reconstruction using scattered Data sets. *STUDIA UNIV. BABES-BOLYAI, INFORMATICA, XLV*, 2.
- Saiz, M. (2010). *Reconstrucción tridimensional mediante visión estéreo y técnicas de optimización*. Madrid: Universidad Pontificia de Comillas.
- Shao, Z., Li, D. & Cheng, Q. (2003, July). A topological 3D reconstruction of complicated buildings and crossroads. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International, Vol. 1*, 56-58.
- Tang, L., Wu, C., Tsui, H. T. & Liu, S. (2003). Algorithm for 3D reconstruction with both visible and missing data. *Electronics Letters*, 39(23), 1640-1642.

27. Telle, B., Aldon, M. & Ramdani, N. (2003, September). Camera calibration and 3d reconstruction using interval analysis. In *Image Analysis and Processing, Proceedings. 12th International Conference on*, 374-379.
28. Tsuda, Y., Yue, Y. & Nishita, T. (2008). Construction of Autostereograms Taking into Account Object Colors and Its Applications for Steganography. *Cyberworlds, International Conference on*, 16,23, 22-24.
29. Wang, Z., Zhang, F. & Quan, Y. (2009). On-Machine 3D Reconstruction Using Monocular Stereo Vision System. *Information Science and Engineering (ISISE). Second International Symposium on*, 392-395.
30. Zappa, E., Mazzoleni, P. & Hai, Y. (2010). Stereoscopia based 3D face recognition system. *Procedia Computer Science*, 1, 2521-2528.
31. Zhang, Y. & Xiao, Y. (2008, October). A practical method of 3D reconstruction based on uncalibrated image sequence. In *Signal Processing, 2008. ICSP 2008. 9th International Conference on*, 1368-1371.