

Métodos para obtener información 3D mediante visión artificial

Introducción a los principios básicos para la adquisición de información tridimensional, mediante métodos basados en el análisis de imágenes.

RAÚL SUÁREZ FEIJÓO
Instituto de Cibernética (UPC-CSIC)

La automatización avanzada requiere en muchos casos de la captación de información tridimensional (3D) de determinadas piezas o del entorno de trabajo en general. Fundamentalmente son tres los campos en los que esta información es de gran utilidad: en reconocimiento de piezas, en supervisión y verificación, y en reconocimiento del entorno a fin de evitar colisiones; dentro de cada uno de ellos puede enumerarse una larga lista de aplicaciones particulares.

El ser humano usa su sentido de la vista para captar información tridimensional, complementado en algunos casos por el tacto y el oído. Esta información es obtenida a partir de una elevada capacidad de razonamiento sobre los datos básicos que le proveen los sentidos; por ejemplo, la velocidad y precisión con que procesa las imágenes captadas por cada ojo es por el momento inalcanzable por cualquier computador.

Dejando de lado aquellos métodos que implican contacto con los objetos, los métodos desarrollados para la captación de información tridimensional en automatización hacen uso de principios físicos de la óptica y acústica, y son muy variados en cuanto a los enfoques utilizados. Una primera clasificación permite diferenciar dos grupos, según se basen o no en el análisis de imágenes.

Métodos no basados en imágenes

Este grupo incluye métodos activos, es decir, que necesitan de la aportación de energía al medio. Se pueden distinguir:

— Medición de distancias mediante el uso de ultrasonido. El principio básico reside en emitir ultra-

sonidos en dirección a la escena, normalmente del orden de 50 a 60 KHz, y la información sobre distancias se extrae del análisis de la reflexión de los mismos (eco).

— Medición de distancias puntuales mediante el uso de láser. Existen tres principios básicos en los que se basan los sistemas de medición de distancias a objetos mediante láser: triangulación, medición de fase y medición del tiempo-de-viaje (estos tres métodos fueron

detallados en el núm. 400 de «Revista Española de Electrónica»). En los tres casos se obtienen distancias a puntos concretos del objeto, y es común que sean utilizados conjuntamente con los métodos basados en imágenes.

Métodos basados en imágenes

Podría decirse que éstos son los métodos de visión tridimensional propiamente dichos, pues todos ellos requieren de la adquisición de

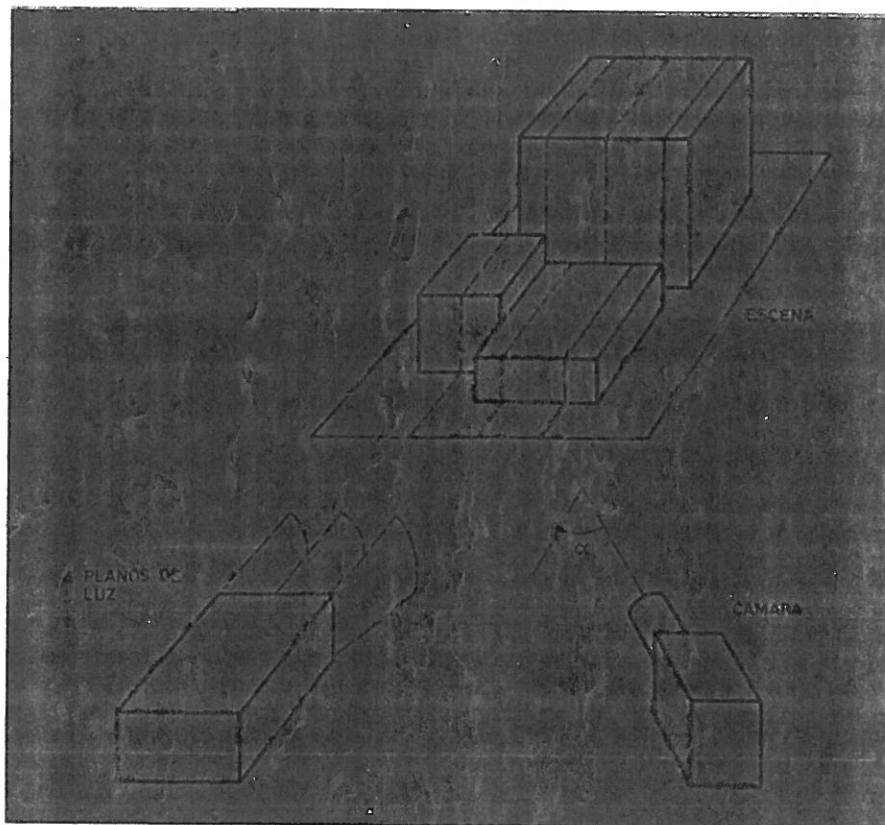


Figura 1. Uso de luz estructurada (planos de luz).

al menos una imagen completa. No obstante, la información es obtenida con metodologías diferentes en cada caso.

Los métodos basados en imágenes pueden dividirse en tres grupos de la siguiente manera:

Métodos de luz estructurada:

- Uso de planos luminosos
- Uso de iluminación reticular
- Uso de contornos topográficos de Moiré

Métodos pasivos:

- Análisis de texturas
- Análisis de contornos
- Determinación de distancias por enfoque

Métodos basados en varias imágenes:

- Estereovisión
- Estereoscopia fotométrica
- Análisis de imágenes dinámicas.

En las secciones siguientes se tratan cada uno de estos grupos, describiéndose los principios básicos de los métodos en ellos incluidos.

Puede parecer en primera instancia que algunos métodos son mucho más potentes que otros, pero esto en realidad muchas veces depende de la aplicación particular. La des-

tes de luz de características particulares, lo que permite realzar las propiedades volumétricas de los objetos en la imagen. Como contrapartida, el hecho de tener que controlar la iluminación hace que estos métodos no sean de aplicabilidad general en ambientes exteriores. En el caso de escenas interiores bajo condiciones de luz natural, los métodos pueden ser válidos usando como iluminación controlada una fuente láser de intensidad suficiente para que se destaque, independientemente de las condiciones de luz ambiental.

— Uso de planos luminosos

En este método la escena se ilumina con una serie de planos luminosos verticales y la captación de información se realiza mediante una cámara enfocada en una dirección que forma un cierto ángulo α con los planos de luz (fig. 1). Las zonas iluminadas resultan ser líneas cuyas direcciones en la imagen permiten identificar la orientación del plano iluminado, sus desplazamientos respecto a una línea base indican la altura a la que se encuentra el plano iluminado, y una discontinuidad en estas líneas indica una discon-

posición de la cámara, o inversamente, que zonas visibles desde la cámara no sean factibles de ser iluminadas. Este problema, ilustrado en la figura 2, es típico de todo procedimiento que lleve implícito algún tipo de triangulación.

El análisis de la imagen no es complicado para un solo plano de luz; sin embargo cuando se trabaja con varios planos la complejidad aumenta notablemente, especialmente si existen discontinuidades que obligan a identificar qué trozos de líneas se corresponden mutuamente. Una manera de simplificar esta identificación es haciendo que las líneas se diferencien en el color, o que sean de trazos de diferente longitud. Otra alternativa es proyectar un plano por vez tomando una imagen en cada caso. Se tiene así la ventaja de poder usar un emisor que genere un solo plano de luz e ir desplazándolo para cada toma de imagen, pero entonces el proceso posterior involucra trabajar sobre varias imágenes. En cualquier caso la complejidad computacional en el tratamiento de la imagen disminuye cuando los planos de luz son paralelos y equidistantes.

— Uso de iluminación reticular

En este método la escena es iluminada a través de una rejilla rectangular con luz de suficiente intensidad como para que la trama iluminada en la escena tenga un buen contraste. El método se aplica a cuerpos poliédricos, determinándose los planos de sus caras, para luego por intersección de éstos determinar sus aristas. La cámara, como en el método anterior, debe estar enfocada en una dirección que forme un ángulo α con la normal a la rejilla de iluminación. La imagen de la escena iluminada por la trama de luz es transformada al dominio frecuencial mediante la transformada rápida de Fourier en 2-D. Las áreas planas de la escena iluminada por la trama rectangular se corresponden con funciones «delta de Dirac» (δ) armónicamente distribuidas en el dominio frecuencial. Filtrando en el dominio frecuencial se rescatan los picos que representan a estas funciones, y realizando luego la transformada inversa de cada función delta así obtenida se reconstruye cada plano de la escena. Un procesamiento posterior de esta información permite deducir la estructura de los objetos en función de los planos cono-

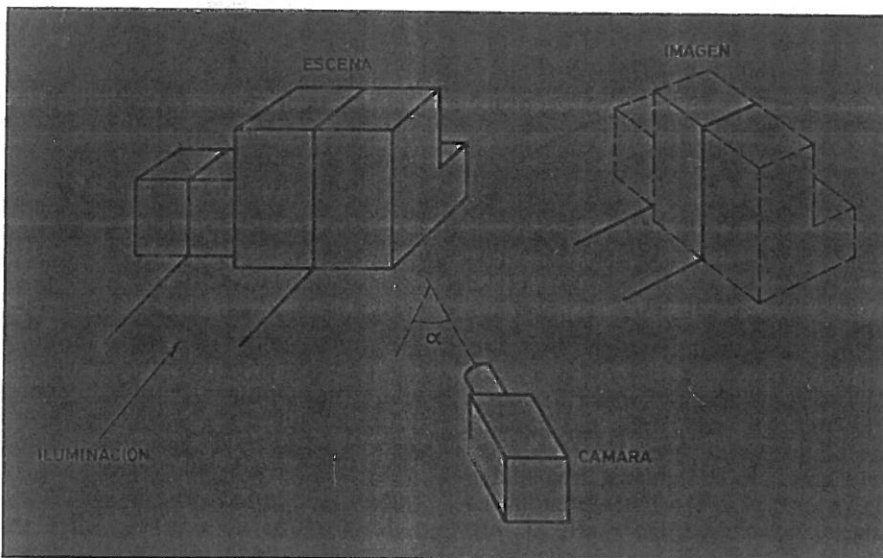


Figura 2. Problema de oclusiones en el uso de planos de luz.

cripción de los nueve métodos mencionados da, independientemente de su potencialidad, una visión de los alcances del tema y de los diversos enfoques llevados a cabo.

Métodos de luz estructurada

En estos métodos la escena es iluminada especialmente usando fuen-

tinuidad en las superficies visualizadas. Un mayor ángulo α permite una mayor precisión en la medida, pero al mismo tiempo incrementa el riesgo de oclusiones debido a la geometría de las piezas, es decir, que algunas partes visibles desde la fuente de luz, y por tanto iluminadas, no sean visibles desde la

cidos. El método requiere elevada capacidad de cómputo, lo que implica lentitud en su ejecución.

Otro método basado en la Transformada de Fourier parte de una fotografía de la escena tomada con una cámara en movimiento. El desplazamiento en la imagen de cada punto iluminado es inversamente proporcional a la distancia a que

se encuentra. Un análisis en el dominio frecuencial como el descrito anteriormente permite reconstruir tridimensionalmente los objetos. El método no es práctico por cuanto requiere un proceso fotográfico intermedio.

— Contornos topográficos de Moiré
Se utiliza el efecto óptico de Moiré

ré para obtener información tridimensional de una escena, a partir de la obtención de contornos topográficos (líneas de igual profundidad). El método no proporciona distancias en valor absoluto a los objetos, sino relativas a las variaciones de profundidad en la escena.

El sistema básico se ilustra en la figura 3a. La escena se ilumina a través de una rejilla con ranuras equidistantes, y la imagen es tomada por la cámara a través de una segunda rejilla idéntica a la anterior y desplazada respecto a ella una distancia d . El efecto producido se ilustra en la figura 3a y las líneas topográficas resultantes en la figura 3b. Se obtiene así un patrón de líneas de nivel de la escena que indican variación de profundidad entre línea y línea pero sin signo, es decir, no dan información sobre si la variación es positiva o negativa. Para determinar el signo es preciso hacer otro análisis de este tipo, realizando esta vez un pequeño desplazamiento de los objetos o de la distancia d a la segunda rejilla. El estudio conjunto de los resultados permite obtener la información de las variaciones de profundidad incluido el signo.

Sobre la base de este principio óptico se han realizado algunos sistemas en los que la rejilla de observación desaparece para ser simulada mediante un sistema de muestreo de la imagen. La complejidad en la determinación de la forma 3D de los objetos a partir del mapa topográfico es elevada, no obstante se han llegado a montar sistemas capaces de funcionar en tiempo real.

Métodos pasivos

Se incluyen en el grupo de métodos pasivos aquellos que requieren una única imagen y no necesitan iluminación especial alguna en su principio básico de funcionamiento.

— Análisis de texturas

La textura de una superficie es la repetición sobre la misma de un cierto patrón básico. Conocido ese patrón, el análisis de las variaciones del mismo sobre el plano de la imagen permiten deducir información sobre la orientación de las superficies de un objeto.

La deformación del elemento básico de textura en la imagen es indicativo de la orientación de la superficie analizada. Se han propuesto varias medidas de estas deformaciones, la más difundida de

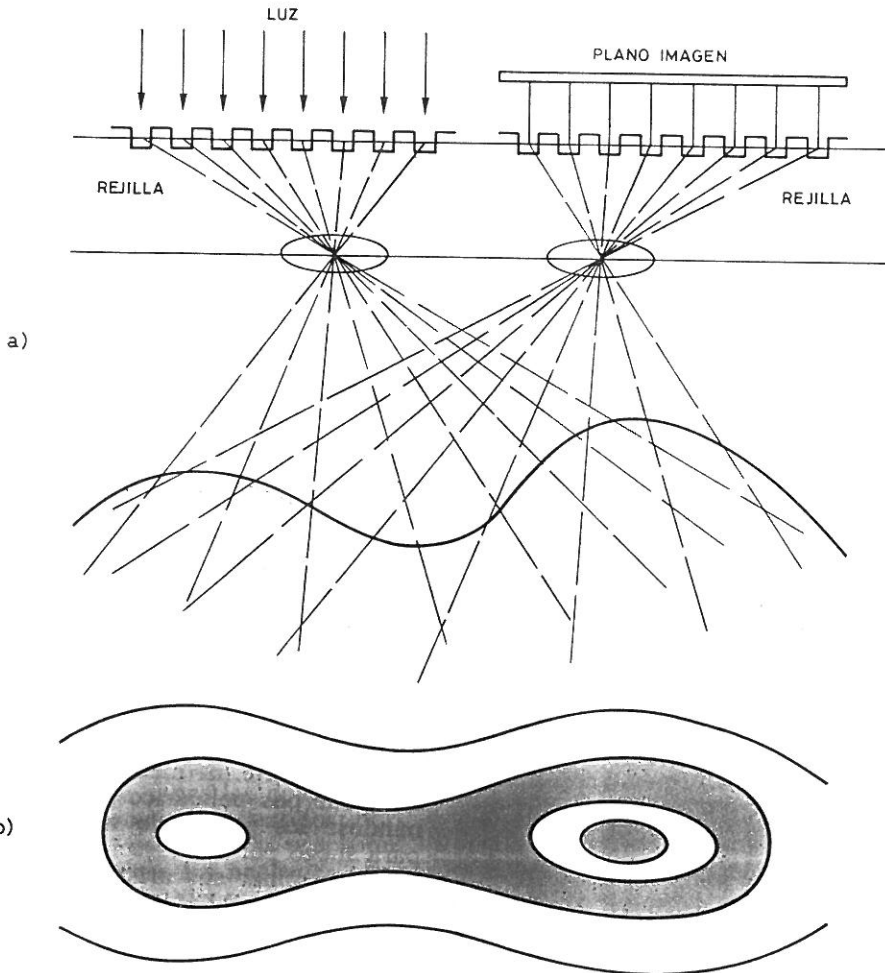


Figura 3. a) Sistema para producir el efecto óptico de Moiré, b) Contornos topográficos de Moiré.

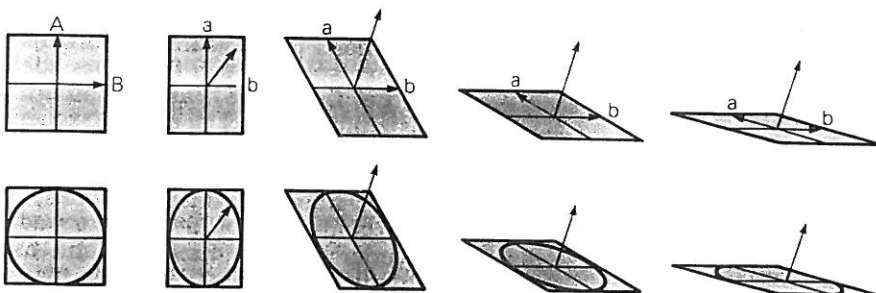


Figura 4. Deformación de un elemento básico de textura al variar la orientación de la superficie.

las cuales es asociar a cada elemento básico de textura dos vectores perpendiculares \vec{A} y \vec{B} y usar como medida de distorsión,

$$d = \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{|\vec{a}|^2 + |\vec{b}|^2}$$

siendo \vec{a} y \vec{b} las proyecciones de \vec{A} y \vec{B} sobre el plano de la imagen (ver figura 4). La distorsión de un elemento básico de textura en la imagen depende de la dirección normal al plano de la imagen y de la dirección normal a la superficie del objeto. La relación entre la deformación d y el ángulo w entre ambas normales es

$$d = \frac{\cos w}{1 + \cos^2 w}$$

De esta forma se puede conocer el ángulo entre la dirección de observación y la superficie observada, eliminando uno de sus grados de libertad. Cuando la superficie es continua, su normal también lo es y el patrón de textura se repite muchas veces sobre ella, es posible determinar la orientación de cada punto de la superficie mediante un proceso iterativo de propagación de restricciones. Este proceso hace uso de las condiciones de contorno de objeto (normal perpendicular a la dirección de observación) y de la deformación d en cada elemento básico de textura detectado.

Este procedimiento es válido siempre y cuando se asegure que la dirección de captación de información es normal a la superficie sobre la que se proyecta la imagen,

como sucede en proyección esférica. De no ser así, debe conocerse la posición del foco respecto al plano de la imagen, para entonces llevar a cabo una transformación geométrica que realice la corrección adecuada.

Existen otros métodos de análisis de texturas para aplicación en ambientes naturales basados en la transformada de Fourier. En general, son de gran complejidad y poseen serias limitaciones.

— Análisis de contornos

La topología 3-D de un objeto puede deducirse del análisis de los contornos visibles en una imagen del mismo. Los primeros desarrollos de este tipo fueron realizados para trabajar con objetos poliédricos, y posteriormente extendidos a entornos con superficies curvas.

SUPERFICIES VISIBLES		
3	2	1
OCCLUSIONES		

Figura 6. Intersecciones posibles para el caso de cuerpos triédricos.

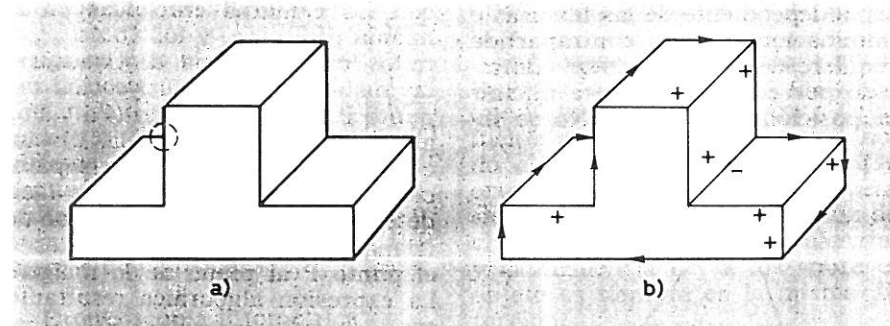


Figura 5. a) Cruce de líneas que no representa una arista del objeto. b) Etiquetado final de los segmentos.

El análisis de los contornos del objeto (aristas visibles), que dividen la imagen en un conjunto de polígonos, se realiza examinando los puntos de unión de los mismos, que no necesariamente corresponden siempre a un vértice del objeto, como se muestra en la figura 5a.

Cada segmento convergente a un punto de este tipo puede ser una arista cóncava del objeto, una arista convexa del objeto, o una arista que oculta otra superficie. Según

se suponga de uno u otro caso, cada segmento es etiquetado respectivamente con los símbolos $+$, $-$, o \rightarrow (con el sentido de la flecha dejando el objeto a la derecha y la superficie semiocultada a la izquierda). Con este conjunto de etiquetas se puede hacer un diccionario de casos posibles, tal como se muestra en la figura 6 para objetos triédricos (no más de tres aristas convergen a un vértice).

Usando este diccionario se lleva a cabo un proceso de etiquetado de los segmentos que llegan a cada punto de intersección (figura 5b). El proceso incluye un estudio de compatibilidades basado en que las etiquetas que se atribuyen a un segmento según ambos extremos deben ser iguales.

Según el tipo de objetos considerados, para algunas vistas puede darse el caso de que se llegue a un etiquetado final compatible sin garantías de que éste sea físicamente correcto, existiendo ambigüedades como la mostrada en la figura 7. Estas ambigüedades deben ser eliminadas con algún análisis comple-

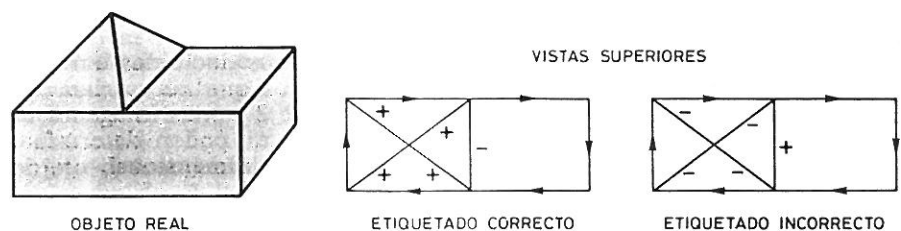
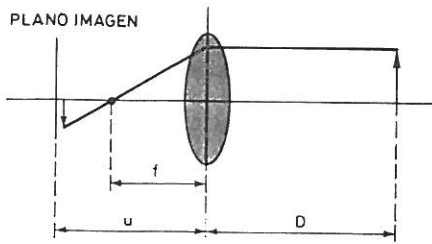
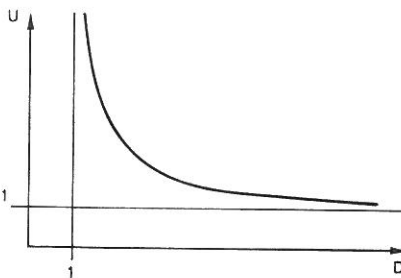


Figura 7. Ejemplo de un objeto que puede generar etiquetados erróneos.



a)



PARA $f=1$, $U = \frac{D}{D-1} \Rightarrow$ PARA $D \rightarrow \infty$ $\frac{dU}{dD} \rightarrow 0$

b)

Figura 8. a) Ilustración de las distancias a controlar para el correcto enfoque de una lente, b) Distancia de enfoque en función de la distancia al objeto.

mentario, como por ejemplo la variación de los niveles de gris a ambos lados de los segmentos o un análisis de texturas.

— Determinación de distancias por enfoque

El conocimiento de la distancia focal f y de la distancia del plano imagen al plano focal u , permite deducir la distancia del plano focal al objeto de la escena (D) cuando éste está correctamente enfocado. La figura 8a ilustra la situación, siendo la relación algebraica entre estas distancias,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{D}$$

de donde

$$D = \frac{fu}{u - f}$$

Este método consiste entonces en enfocar el objeto y calcular la distancia D hasta el mismo a partir de la distancia de enfoque u resultante.

Un mayor diámetro de la lente (grandes aperturas de diafragma) hace disminuir la profundidad de enfoque (profundidad de campo), ello permite una mayor precisión en el enfoque y por tanto en la determinación de la distancia. La precisión en la medida es inversamente

proporcional a la distancia, tal como se ilustra en la figura 8b.

La dificultad del método estriba en la determinación automática de la distancia de enfoque. Para ello es necesario una medida que indique la calidad del enfoque, y en función de ella ir corrigiendo u . Se han propuesto varias funciones indicativas de la calidad del enfoque, por ejemplo:

Entropía = $-\sum P_{i,j} \ln P_{i,j}$

Varianza = $\frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})^2$ con $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum x_i$

Suma diferencia de módulos = $\sum_{i=2}^N |x_i - x_{i-1}|$

siendo x_i la intensidad de cada píxel. Para cada ventana de N puntos de la imagen se mueve la lente (distancia de enfoque u) hasta que estas funciones alcancen un máximo, el cual se produce cuando el enfoque es correcto.

Este método tiene la ventaja de ser independiente de las texturas e iluminaciones; como contrapartida requiere de un servomotor controlado por computador para ajustar la posición de la lente. No se in-

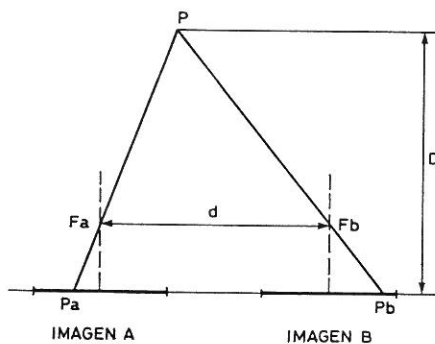


Figura 9. Captación de dos imágenes para estereovisión.

cluye en los métodos basados en varias imágenes por cuanto se considera que el proceso consiste en ajustar correctamente el enfoque de una única imagen.

Métodos basados en varias imágenes

Los métodos incluidos en este grupo son los que necesariamente requieren de 2 o más imágenes de la escena para poder determinar información tridimensional.

— Estereovisión

La estereovisión es uno de los procedimientos de extracción de información tridimensional de una

escena más estudiados y sobre la que hay gran cantidad de trabajos. Tal vez un atractivo especial se deba al hecho de que es el procedimiento que usa el ser humano, que con sus dos ojos separados aproximadamente 6.5 cm puede determinar distancias mediante estereovisión en un rango entre 0.2 y 15 m aproximadamente.

Para aplicar este método en un sistema de visión artificial se requiere un mínimo de dos cámaras que capturen la escena desde dos posiciones ligeramente diferentes. El principio en el que se basa, es la determinación de la distancia a un punto específico mediante un proceso de triangulación, usando para ello la posición de tal punto en cada una de las imágenes obtenidas por sendas cámaras. Como ejemplo véase el sistema ilustrado en la figura 9, en el que las dos imágenes A y B son captadas sobre el mismo plano, con las cámaras enfocadas en la misma dirección, y los focos separados una distancia d . Conocidas las distancias de la proyección del punto P en cada imagen (P_a y P_b) al centro de las mismas, las distancias focales F_a y F_b , y la separación entre las cámaras d , es fácil determinar mediante un proceso de triangulación la distancia D desde el punto P al plano de la imagen. La expresión algebraica resultante es:

$$D = \frac{d \cdot F_a \cdot F_b}{P_a \cdot F_b + P_b \cdot F_a}$$

La dificultad del método no radica en la geometría del proceso de triangulación, sino en la identificación de los puntos homólogos en ambas imágenes que corresponden al mismo punto de la escena. Las soluciones a este problema de identificación son numerosas y variadas, destacándose la correspondencia por áreas y la correspondencia por contornos.

La correspondencia por áreas se basa en la asociación de áreas de similares características en ambas imágenes. Para ello se toma una ventana de una imagen y se busca la ventana correspondiente en la otra mediante la optimización de una función de correlación entre los niveles de gris de ambas ventanas. La selección del tamaño de las ventanas es crítica, por cuanto un tamaño muy pequeño puede llevar a falsas coincidencias, y una ventana excesivamente grande hace

perder precisión en la medida. Cuando se conoce la dirección en la que están alineadas las cámaras, que es fácil en la práctica, la correlación entre ventanas se simplifica al tener que realizarse sólo en esa dirección.

En la correspondencia por contornos se procede como primer paso a la detección de contornos en ambas imágenes, para luego buscar su correspondencia. Conocida la dirección de alineación de las cámaras, sólo se analizan aquellos contornos con componentes normales a ella, pues son los que tienen mayor información en cuanto al desplazamiento relativo de las imágenes. Tras un análisis local de este tipo, se realiza un análisis global de consistencia de las relaciones establecidas, que les da veracidad o ayuda a descartarlas.

Los dos enfoques descritos suelen ser complementarios por cuanto cada uno de ellos funciona mejor justamente en los tipos de imágenes en que el otro lo hace peor. Resta decir que un aumento en la distancia d que separa las cámaras aumenta el rango de medida del sistema, pero puede incrementar también de manera notable la dificultad para encontrar los puntos homólogos debido a posibles problemas de oclusiones.

— Estereoscopía fotométrica

Este método se basa en la determinación de la orientación de superficies a partir de varias imágenes, tomadas con una única cámara fija, de una escena iluminada con diferentes fuentes de luz en cada caso. Inicialmente pensado para objetos con superficies de reflexión difusa, el método ha sido también aplicado a superficies especulares.

Para llevarlo a cabo es básico el concepto de «mapas de reflectan-

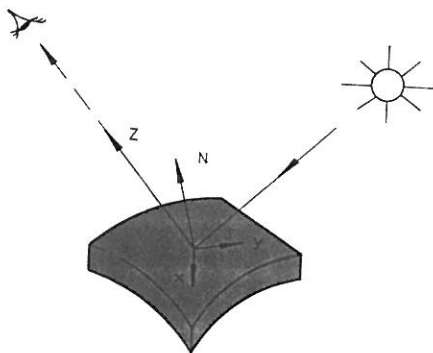


Figura 10. Sistema de coordenadas para representar una superficie en estereoscopía fotométrica.

cia», que representan la relación entre la intensidad de la luz reflejada y la orientación de una superficie, para una fuente de luz determinada.

Supóngase la superficie visible de un objeto como $z = f(x, y)$, siendo la dirección del eje z coincidente con la dirección de observación (figura 10). En este caso las pendientes de la superficie según x e y serán:

$$p = \frac{\delta f}{\delta x} \quad y$$

$$q = \frac{\delta f}{\delta y}$$

Estos valores de p y q son indicativos de la orientación de la superficie, por lo que en el espacio que definen, llamado «espacio gradiente», cada punto representa una orientación particular de la superficie.

Supóngase el objeto relativamente pequeño respecto a la distancia que lo separa de la cámara y de la fuente de iluminación. De este modo el sistema puede considerarse ortográfico, es decir, se considera siempre coincidente la dirección de observación y el eje de la cámara, y la incidencia de la luz sobre el objeto es siempre en la misma dirección.

La reflectancia de un elemento en la dirección de observación es función de la orientación de la superficie (p y q) y de la dirección en que es iluminado (ps y qs).

Si bajo estas consideraciones una superficie conocida es iluminada con una determinada fuente de luz i , a cada orientación de la superficie (p, q) se le asocia un valor de reflectancia según la intensidad recibida en la dirección de observación. Se obtiene así una función $R_i(p, q)$ denominada «mapa de reflectancia» para la fuente de iluminación i . Repitiendo el proceso para otra fuente de alimentación j y la misma superficie conocida se obtiene otro mapa $R_j(p, q)$. La figura 11 muestra dos mapas de reflectancia de una superficie obtenidos con fuentes de luz de diferente ubicación.

Colocando ahora en la escena un objeto desconocido, se toman dos imágenes de él iluminado con las fuentes i y j respectivamente, obteniéndose intensidades $E_i(x, y)$ y $E_j(x, y)$.

Usando los dos mapas de reflec-

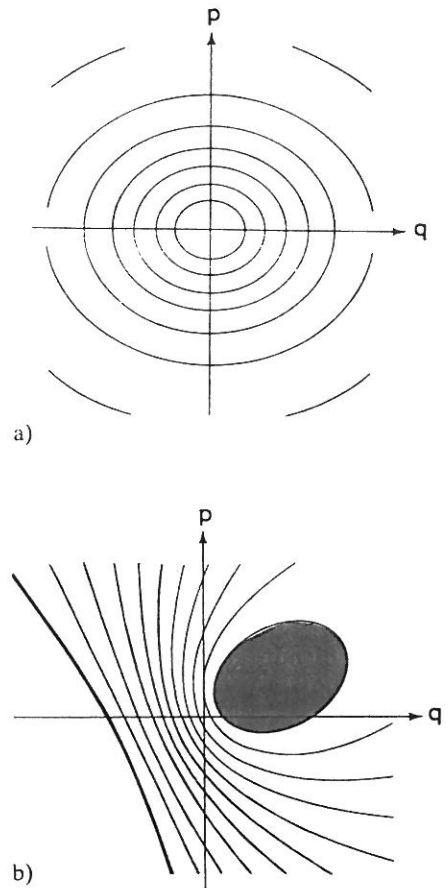


Figura 11. Mapas de reflectancia: a) Dirección de iluminación coincidente con dirección de observación, b) Dirección de iluminación formando un ángulo de 30 grados con la dirección de observación.

tancia previamente calculados se tiene

$$E_i(x, y) = R_i(p, q)$$

$$E_j(x, y) = R_j(p, q)$$

que forman un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, p y q , cuya resolución da la orientación de la superficie. Puede darse el caso de que las ecuaciones no sean independientes y por tanto no exista una única solución; en tal situación el proceso debe repetirse con una tercera fuente de iluminación que elimine la ambigüedad.

— Imágenes dinámicas

Imágenes dinámicas se consideran aquellas suministradas por una única cámara cuando existe movimiento relativo entre ésta y la escena.

Como caso general pueden utilizarse para determinar información tridimensional procedimientos aná-

(termina en la página 57)

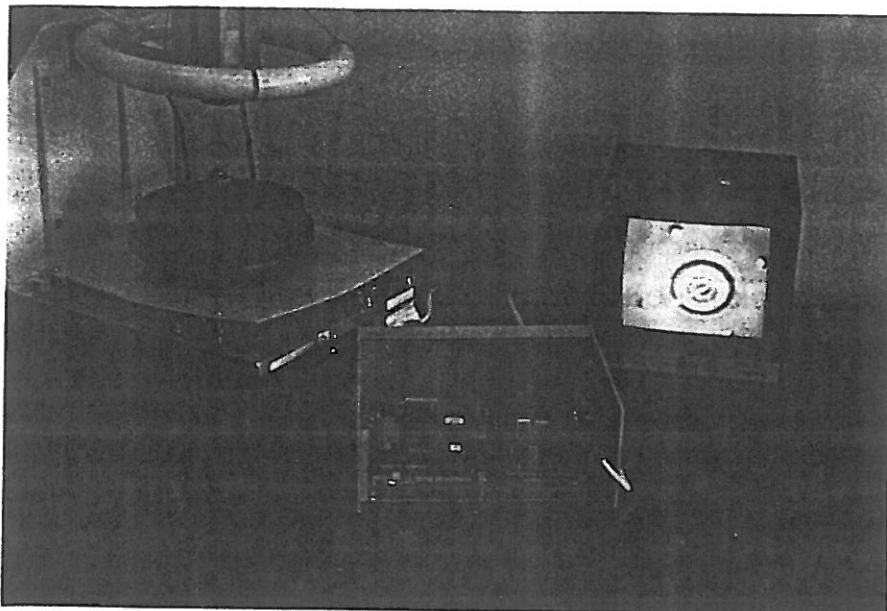


Figura 5. Fotografía del equipo diseñado, en funcionamiento.

cionales de tiempo de captura 20 milisegundos.

Conclusión

Mediante el tratamiento de imá-

genes por medios hardware-firmware se consigue unos resultados óptimos. Durante los próximos años, muchas de las soluciones de control de calidad y de guiado de robots

utilizarán diversas arquitecturas de tratamiento hardware, por ser el único sistema que permite alcanzar unas velocidades de tratamiento en Tiempo-Real del mismo orden que las velocidades de captura de imágenes. □

Bibliografía

1. «Nuevos componentes para Visión Artificial», G. Aranguren, E. Azaceta, I. Hernáez. Revista Española de Electrónica, núm. 407, páginas 60-62. Octubre 1988.
2. «TMS320C25 User's Guide». Texas Instruments, 1987.
3. «Aplus Supreme User Guide». Altera Corporation, 1988.
4. «Board Power Chases Mystique, Expense from Image Processing», Milt Leonard. Electronic Design, págs. 93-102, 17 septiembre 1987.
5. «Interfacing to the IBM Personal Computer», Lewis C. Eggebrecht. Werbern Associates, 1983.
6. «Robot Vision», Berthold K. P. Horn. The MIT Press & McGraw-Hill Book Company, 1986.

(viene de la página 47)

logos a los de estereovisión, por cuanto una cámara móvil puede desplazarse y proveer en dos instantes diferentes de tiempo dos imágenes como las obtenidas mediante cámaras fijas en estereovisión.

Otro método aplicado al caso de objetos con caras planas y ortogonales, reside en establecer una hipótesis del modelo tridimensional de la escena a partir de la primera imagen suministrada por una cámara móvil. Partiendo de este modelo se predice cuál será su próxima imagen, es decir, se crea una imagen sintética del modelo, que es comparada con la segunda imagen real. En esta comparación se establece una señal error, que al ser minimizada imagen tras imagen, permite ir haciendo un ajuste del modelo. El método, aunque interesante, es computacionalmente costoso, especialmente si el objeto tiene muchas caras visibles. Como ventaja cabe destacar la facilidad de tratamiento de partes ocultas, que pueden ser predichas a partir del modelo; como desventajas se tiene que la precisión disminuye con la distancia y que en la compa-

ración de la imagen sintética con la real se puede cometer el fallo de elegir un mínimo local en la optimización de la función error.

Otros métodos más complejos y aún no completamente desarrollados permiten extraer información tridimensional suponiendo conocida la velocidad de desplazamiento de puntos determinados del objeto. Aun bajo esta suposición la geometría utilizada es compleja y el costo computacional muy elevado.

Conclusiones

Se han descrito y clasificado en tres grupos los diferentes métodos de obtención de información tridimensional de objetos de una escena.

Si bien algunos de ellos se presentan como intrínsecamente más complejos, la conveniencia de aplicar uno u otro debe ser analizada en cada caso particular, pues depende en gran medida del problema específico y de las condiciones de trabajo.

Las investigaciones y desarrollos en esta área son numerosos, con lo que continuamente aparecen nuevas técnicas o perfeccionamientos de las existentes. Un factor de importancia en ello es el notable avan-

ce logrado en la capacidad y velocidad de las computadoras.

Las aplicaciones son numerosas y ampliamente difundidas, siendo por el momento las principales restricciones en su realización las siguientes: el coste del sistema de visión tridimensional necesario para un caso específico suele ser alto, el tiempo necesario para extraer información 3D es normalmente demasiado elevado para aplicaciones en-línea, y finalmente limitaciones de índole técnica que acotan la precisión de la información tridimensional obtenida. □

Bibliografía

- Ballard D. y Brown C.: «Computer Vision», ed. Prentice Hall, 1982.
- Marr D.: «Vision», ed. W. H. Freeman and Company, 1982.
- Amat J., Basañes L. y Torras C.: Sistemas de visión tridimensionales en los robots industriales, «Mundo Electrónico», núm. 183, 1983.
- Jarvis R.: A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 5, número 2, 1983.
- Ikeuchi K.: Shape from regular patterns (An example of constraint propagation in vision), «Proc. of the 5th Int. Conf. on Pattern Recognition», pp. 1032-1039, Florida 1980.