

## **6. CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO**

---

Existen diferentes problemáticas que inciden directamente en los resultados que se pueden esperar de la visión artificial como elemento sensor de un sistema en lazo cerrado de control. Entre las principales causas que frenan su empleo en aplicaciones industriales, se pueden mencionar la gran cantidad de datos que se han de tratar por cada imagen y la carga computacional que ello supone si se pretende utilizar estos sistemas en tiempo real.

La presente Tesis ha abordado parte de esta problemática estudiando, analizando y proponiendo un sistema detector de bordes de

objetos en imágenes que puede ser implantado en hardware, con lo cual, se disminuye drásticamente la cantidad de datos a considerar en cada imagen así como el tiempo requerido para procesarla. Ello facilita el empleo de estos sistemas de visión artificial dentro de sistemas de control en tiempo real. Se presentan sin embargo, algunas limitaciones para su aplicación y así se ha resaltado a lo largo de la presente memoria y que son necesarias considerar.

A continuación se exponen las conclusiones más importantes obtenidas durante el desarrollo de la presente Tesis. Se han subdividido en cuatro apartados. Primero el que se refiere a la captura de la información, en segundo lugar el referido al algoritmo, en tercer lugar las recomendaciones sobre el hardware propuesto, y por último se esbozan algunas de las líneas de trabajo que deja abierta esta tesis.

## **6.1 En Cuanto al Algoritmo Detector de Bordes**

- ⊕ Se ha diseñado y desarrollado un algoritmo simple detector de bordes que y emplea solo la segunda derivada del gaussiano para generar la segunda derivada de la imagen y así detectar los bordes.

La importancia de este algoritmo consiste en la simplicidad de su metodología, lo que permite su fácil implantación hardware. Cuando la rapidez de la respuesta es importante, y no importan los detalles demasiado finos, este filtro presenta una clara solución al problema de la detección de bordes en tiempo real.

- ⊕ Se ha encontrado que para calcular la segunda derivada de una imagen digitalizada por convolución con la segunda derivada del

gausiano, no se debe emplear valores de desviación típica menores que 0.8. De hacerlo, el resultado se desplaza hacia valores negativos conforme disminuye la desviación, dificultando el funcionamiento de los algoritmos de detección de paso por cero. A esta característica se le denomina "alcance del filtro"

⊕ Asimismo, se ha definido una relación para determinar el tamaño mínimo del kernel cuando se calcula la segunda derivada de una imagen digitalizada por convolución con la segunda derivada del gausiano. A esta relación se ha llamado "tamaño del filtro".

⊕ Se ha diseñado un algoritmo para encontrar los pasos por cero en la segunda derivada de una imagen. Dado que emplea una matriz de búsqueda de  $2 \times 2$ , destaca por su simplicidad. Esto permite su implantación directa en arquitecturas hardware empleando lógica digital simple. El poder hacer la búsqueda de pasos por cero empleando el algoritmo propuesto simplifica enormemente el hardware y el costo computacional del sistema. La ventaja radica en que puede ser sustituido un DSP con su electrónica asociada por un simple dispositivo de lógica programable.

⊕ Se han propuesto dos criterios válidos para la elección de umbrales que permitan discriminar ciertos bordes no deseados para determinada aplicación.

El primer criterio, propuesto para aplicaciones en donde no sea necesario obtener detalles finos, está basado en relaciones de la segunda derivada y la desviación. Esta estimación muestra buenos resultados para este tipo de aplicaciones. La solución es muy económica dado que detecta y localiza los bordes empleando una sola operación de convolución.

- ⊕ Para aplicaciones donde los detalles finos son relevantes, se ha propuesto un segundo criterio basado en una ecuación heurística que determina el umbral partiendo de la primera derivada del gaussiano. Esta ecuación es obtenida a partir del valor máximo esperado de la primera derivada de la imagen. Su importancia radica en el carácter "off line" de su funcionamiento dado que no emplea datos de la imagen sino que le basta con los datos de la primera derivada del gaussiano empleado.
  
- ⊕ Se ha presentado un método para estimar la segunda derivada a partir de la convolución sucesiva con la primera derivada del gaussiano. Hay que tener en cuenta, que el grado de filtrado de la convolución directa con la segunda derivada del gaussiano tiene un nivel de filtrado mayor que el que se obtiene con la estimación. Sin embargo, la estimación propuesta para la segunda derivada muestra un comportamiento muy bueno. En el Apéndice D se muestra, a manera de ejemplo comparativo, las diferencias obtenidas siguiendo los dos métodos, y empleando la misma desviación.
  
- ⊕ Con respecto a su implantación hardware, se ha comentado la importancia del orden en que se conectan los bloques funcionales. Se ha demostrado que algunas configuraciones introducen componentes en frecuencia que no existían en la imagen y que son muy difíciles de eliminar.
  
- ⊕ Se ha propuesto una configuración, llamada Configuración Final, cuyos resultados muestran un comportamiento muy bueno tanto al variar la desviación como las tonalidades de grises. Dado que los coeficientes, que son empleados en el cálculo de las

convoluciones, son cargados al DSP "off line", la misma configuración bien podría emplearse en la aplicación de cualquier otro filtro digital en dos dimensiones.

## **6.2 En Cuanto al Hardware**

- ⊕ El diseño del hardware se ha basado en el empleo de DSPs y SIMD para simplificar el cálculo de las operaciones de convolución. Se ha previsto que los coeficientes de las derivadas del gaussiano sean calculadas y ajustadas "off line" y almacenadas en una tabla de acceso aleatorio indicada por los valores de desviación que se desee emplear en el procesamiento. Estos valores una vez convertidos a enteros son fácilmente transferibles a los DSPs que calculan continuamente la convolución. Estos coeficientes pueden cambiarse "on line".
  
- ⊕ El trabajo permite concluir que se puede trabajar con imágenes en modo entrelazado, y hacerlo en tiempo real sin perder información.
  
- ⊕ El hardware diseñado ha sido configurado para procesar en tiempo real una imagen completa. Se han aplicado técnicas de paralelización de información allí donde el sistema lo ha permitido. Sin embargo, si en algún caso se necesita un mayor tiempo de posprocesamiento se puede reducir la parte de la imagen tratada, y asignar el tiempo, sustraído al cálculo de bordes, al posprocesamiento. Un tamaño de imagen muy aceptado es el de 512x512 pixels.

- ⊕ Para evitar hardware adicional, se hace necesario trabajar con la imagen en modo no entrelazado y poder así configurar más fácilmente la "pipeline". Sin embargo, esto produce una pérdida de información al perder definición digitalizando la escena. Si se cuenta con cámaras no convencionales que permitan alta definición en modo no entrelazado es posible reducir notablemente el hardware asociado.

### **6.3 En Cuanto a la Captura de la Información**

- ⊕ La Captura de información está determinada por la calidad de los sensores y la velocidad con que éstos son capaces de captarla. Uno de los problemas que no se ha abordado en este trabajo es el del "aliasing", y que se ve destacado en el ejemplo presentado en las Figuras D.9 y D.10 del Apéndice D. Si los objetos se mueven demasiado rápido, la información capturada queda completamente alterada. Se ha trabajado con cámaras convencionales, pero se abre un campo de estudio para evaluar el comportamiento de los algoritmos con cámaras no estándares.
- ⊕ Para aplicaciones de control en tiempo real el problema se complica bastante. Tal y como se ha mostrado en un ejemplo (evaluar la posición de una bola en el espacio), es necesario controlar las condiciones de luz y color de la escena. El fondo debe ser lo más uniforme posible y de reflexión mínima. Además, el objeto de interés debe mantener el máximo contraste con este fondo de imagen.

El punto anterior no siempre es posible efectuarlo, éste sería el caso del brazo flexible del robot. Para ello sería necesario pintar el robot del mismo color que tenga el fondo de la imagen, a excepción de la punta del brazo o de otra parte de interés. Los colores deben ser siempre del tipo mate para evitar reflejos.

- ⊕ El tipo de luz empleada debe ser del tipo difusa y su temperatura de color debe favorecer el contraste entre el fondo de imagen y la región de interés. Esto se hará para evitar al máximo el efecto de las sombras, que para los algoritmos de detección de bordes significan un borde más.

Es muy importante que la frecuencia de emisión de luz sea relativamente grande para facilitar la toma de imágenes uniformes. El cuidado que se tenga en este detalle puede ser determinante para algunas aplicaciones. Existen métodos numéricos de carácter "off line" que se emplean para compensar el defecto producido por el parpadeo de las fuentes de luz convencionales. Sin embargo, es preferible contar con fuentes luminosas de alta frecuencia de emisión para disminuir el tiempo de preprocesado de la imagen.

- ⊕ Se ha comprobado la conveniencia de trabajar con cámaras en blanco y negro en lugar de cámaras en color. Al principio de la investigación se hicieron pruebas separando los colores básicos rojo, verde y azul para lograr máximo contraste pero los mejores resultados se obtuvieron con cámaras en blanco y negro.

Sin embargo, es evidente que si se cuenta con imágenes en color, la cantidad de información de la escena es mayor. Esto no siempre es una ventaja cuando se debe eliminar información, que sin ser ruido, no sirve para una aplicación en particular. El costo

computacional empleado en seleccionar la información es muy grande.

#### **6.4 Líneas de Trabajo**

Se han encontrado numerosos problemas que darán origen a futuros trabajos de investigación. El más importante, para aplicaciones de control automático en donde se manejan escenas dinámicas, es el problema del "aliasing". Mientras no se disponga de sistemas de captura y procesamiento de imágenes suficientemente rápidos, no se podrá dar una solución clara al problema.

- ⊕ La construcción del hardware queda para un trabajo futuro. Sin embargo, las etapas de digitalización, Memorias Buffer, y conexión con el "host" a través de un transputer T800 ya han sido construidas, quedando la implantación del DSP (Apéndice D, Ilustración D-5). Esta etapa no ha sido concluida porque durante el desarrollo del trabajo se cambió de dispositivo electrónico. Sin embargo, queda completamente configurado el bloque encargado de calcular las convoluciones.
  
- ⊕ Para aplicaciones en donde se requiere conocer con mayor precisión la localización de los bordes, se ha logrado configurar un sistema que mejora substancialmente los que se están empleando actualmente en la industria en aplicaciones de control de calidad. Este campo da pie a futuros Trabajos de investigación.



- ⊕ Queda también pendiente de estudio la topología más adecuada para interconectar la captura de bordes con el sistema encargado de realizar el "tracking" de los mismos.
  
- ⊕ El sistema propuesto encuentra los bordes en tiempo real en una escena bidimensional. La interconexión con otro análogo permitiría procesar imágenes en tres dimensiones. Este campo queda pendiente para trabajos futuros.

## **7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---

Las referencias bibliográficas empleadas durante el desarrollo del presente trabajo son las que se detallan a continuación. Esta bibliografía técnica se presenta en orden cronológico.

- ◆ Leipnik, Roy (1960), "The Extended Entropy Uncertainty Principle", Information and Control 3, CA, pp. 18-25.
  
- ◆ Marr, David. (1976), "Early Processing of Visual Information", Memo, The Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Technology Square, Cambridge, Tech.

Rep. Mass. 02139, pp. 483-517.

- ◆ Abdou and Pratt (1979), "Quantitative Design and evaluation of Enhancement/Thresholding Edge detectors", Proceedings of The IEEE, Vol. 77, N° 5, pp. 753-763.
- ◆ Marr and Hildreth (1980), "Theory of edge detection," Proceeding of the Royal Society of London, Serie B, Volumen 207, pp. 187-217.
- ◆ Rosenfeld and Kak, (1982), "Digital Picture Processing", ed., Academic Press, Inc., California.
- ◆ David Marr (1982) - póstumo, "La Vision - A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information", ed., W.H. Freeman and Company, New York.
- ◆ Ramakant Nevatia, (1982), "Machine Perception", ed., Prentice-Hall, New Jersey.
- ◆ Haralick, Robert (1982), "Zero Crossing of Second Directional Derivative Edge Operator", Departments of Electrical Engineering and Computer Science, Virginia Polytechnic Institute and State University, SPIE Vol. 336 Robot Vision, pp. 91-99.
- ◆ Haralick, Robert (1984), "Digital Step Edges from Zero Crossing of Second Directional Derivatives", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Correspondence, Vol. PAMI-6, N° 1, pp. 58-68.

- ◆ George Canavos (1986), "Probabilidad y Estadística - Aplicaciones y Métodos", ed, Mc Graw Hill, México.
- ◆ Yuille and Poggio (1986), "Scaling Theorems for Zero Crossing", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, N° 1, pp. 15-25.
- ◆ Torre V. and Poggio T. (1986) , "On Edge Detector", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, N° 2, pp. 147-163.
- ◆ Gennert (1986), "Detecting Half-Edges and Vertices in Images", Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Technology Square, Cambridge, Tech. Rep. Mass. 02139, pp. 552-557.
- ◆ John Canny (1986), "A Computational Approach to Edge Detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-8, N° 6, pp. 679-698.
- ◆ Sheng-Jyh and Thomas Binford (1987), "Local Step Edge estimation: A New Algorithm, Statistical Model and Performance Evaluation", Robotics Laboratory, Computer Science Department, Stanford University, Stanford, Tech.. Rep. CA 94305.
- ◆ Conrad, Huang, and Munson (1987), "The Effect of Median Filtering on Edge Estimation and detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, N° 2, pp. 181-194.

- ◆ Vishvjit S. Nalwa (1987), "Edge-Detector Resolution Improvement by Image Interpolation", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, N° 3, pp. 446-451.
- ◆ Chen, Huertas, and Medioni (1987), "Fast Convolution with Laplacian-of-Gaussian Mask", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, N° 4, pp. 584-590.
- ◆ Fu, Gonzalez, and Lee (1988), "Robotics - Control, Sensing, Vision, and Intelligence", ed. Mc Graw Hill, New York.
- ◆ Fredrik Bergholm (1987), "Edge Focusing", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, N° 6, pp. 726-741.
- ◆ Hutson, Shephrd, and Brice, (1989), "Colour Television", ed., Butler and Tanner Ltd, London.
- ◆ Clark, James (1989), "Authenticating Edges Produced by Zero-Crossing Algorithms", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-11, N° 1, pp. 43-57.
- ◆ Chen and Medioni (1989), "Detection, Localization, and estimation of Edges", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Correspondence, Vol. PAMI-11, N° 2, pp. 191-198.
- ◆ Yi Lu and Ramesh Jain (1989), "Behavior of Edges in Scale Space", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Correspondence, Vol. PAMI-11, N° 4, pp. 337-356.

- ◆ Van Den Enden, (1989), "Discrete-Time Signal Processing", ed., Prentice-Hall, UK.
- ◆ Comité Consultivo Internacional de Radiocomunicaciones - CCIR (1989) ,"Sistemas de Televisión Utilizados en el Mundo", ed. Unión Internacional de Telecomunicaciones ,UIT-CCIR.
- ◆ Jae S. Lim (1990), ed., "Two-Dimensional Signal And Image Processing", New Jersey, Prentice-Hall.
- ◆ Rae-Hong Park and Woo Young Choi (1990), "Comments on A Tree-Module Strategy for Edge Detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Correspondence, Vol. PAMI-11, N° 4, pp. 337-356.
- ◆ Deriche, Raich (1990), "Fast Algorithms for Low-Level Vision", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Correspondence, Vol. PAMI-12, N° 1, pp. 78-87.
- ◆ Pavlidis, Theo (1990), "Integrating Region Growing and Edge Detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Correspondence, Vol. PAMI-12, N° 3, pp. 225-233.
- ◆ Lee, David (1990), "Coping with Discontinuities in Computer Vision: Their Detection, Classification, and Measurement", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Correspondence, Vol. PAMI-12, N° 4, pp. 321-343.
- ◆ Perona and Malik (1990) "Scale-Space and Edge Detection Using

Anisotropic Diffusion", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Correspondence, Vol. PAMI-12, N° 7, pp. 629-639.

- ◆ Tagare and Figueiredo (1990), "On the Localization Performance Measure and Optimal Edge Detection", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Correspondence, Vol. PAMI-12, N° 12, pp. 1186-1190.
- ◆ Kakarala and Hero (1990), "On Achieve Accuracy in Edge Localization", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Correspondence, Vol. PAMI-14, N° 7, pp. 777-781.
- ◆ Danielsson (1990), "Generalized and Separable Sobel Operators", Copyright Academic Press Inc., in "Machine Vision For Tree Dimensional Scenes", Ed Herbert Freeman.
- ◆ Kasturi (1990), "Image Analysis Applications", ed. Trivedi, Tennessee.
- ◆ Embree and Kimble (1991), "C Language Algorithms for Digital Signal Processing", second edition., ed., Prentice-Hall, New Jersey.
- ◆ William K. Pratt, (1991), "Digital Image Processing", S.E.,ed., Wiley.Interscience Publication, California.
- ◆ Viles E., (1994), "Diseño de Algoritmos de Detección de Bordes y Seguimiento de Objetos para Aplicaciones de Visión en Tiempo Real". Tesis Doctoral, Escuela Superior de Ingenieros de San Sebastián, Universidad de Navarra.