

SISTEMAS TENSÉGRICOS: NUEVAS ALTERNATIVAS PARA LA ROBÓTICA **

*Rafael Esteban Vásquez**

*Julio César Correa****

Resumen: se realiza una introducción a los sistemas tenségricos. Se muestran algunas definiciones y la nomenclatura utilizada para los elementos de estas estructuras. Se describen las dos morfologías más utilizadas en el campo de la robótica y se describen algunas aplicaciones realizadas en el mundo: domos geodésicos, mástiles tenségricos para aplicaciones espaciales, robots tenségricos, sensores y actuadores. El grupo de Automática y Diseño (A+D), ha acumulado una experiencia importante con este tipo de sistemas; el grupo ha desarrollado proyectos, generado teorías y ha propuesto metodologías para el diseño y para el análisis de aplicaciones móviles basadas en sistemas tenségricos. El objetivo es introducir en Colombia este novedoso tema que plantea nuevas alternativas para la robótica.

Palabras clave: robótica, sistemas tenségricos, domótica.

Abstract: in this article an introduction to the tensegrity systems is shown. It is also stated some definitions and the notation used for the elements of this kind of structures. The two morphologies more frequently used in the field of robotics and some applications used around the world are described: geodesic domes, tensegrity masts for space applications, tensegrity robot, sensors and actuators. The Automatic and Design research group (A+D), has accumulated important experience with this kind of systems. The group has developed projects, generated theories and proposed methodologies for

* *Fecha de recepción: 5 de septiembre de 2005. Fecha de aceptación para publicación: 29 de noviembre de 2005. Este artículo se deriva de un trabajo con el mismo nombre presentado en el IEEE Colombian Workshop on Robotics and Automation. (CWRA), en agosto de 2005, organizado por el IEEE-Colombia y cuyas memorias fueron publicadas con el ISBN 958-695-182-0. Se publica con autorización del coordinador del comité evaluador del evento.*

** *Ingeniero mecánico, Especialista y Master en Automática, Universidad Pontificia Bolivariana. Profesor asistente, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. Correo electrónico: rafavasquez@upb.edu.co.*

*** *Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Master of Science en Ingeniería Mecánica, University of Florida. Profesor, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia. Correo electrónico: jccorrea@ufl.edu.*

the design and analysis of mobile applications based on tensegrity systems. The objective of these studies is to introduce this topic, which illustrates new alternatives for the robotics, in Colombia.

Key words: robotics, tensegrity systems, domotics.

1. INTRODUCCIÓN

En la mitad del siglo xx, el inventor Buckminster Fuller, el arquitecto Kenneth Snelson y el artista David Emerich realizaron los primeros trabajos con estructuras tenségricas. Plantearon una concepción estructural alternativa e innovadora frente a los rígidos sistemas constructivos y mecánicos tradicionales desarrollados en ingeniería, la cual proporcionaría las claves para entender, entre otros, el diseño morfológico de todos los organismos presentes en la naturaleza, incluido el cuerpo humano [Burkhardt, 2004], [Fuller, 1962], [Kenner, 1976], [Voloh, Vilnay, Belsky, 2003]. La investigación en el campo de estas estructuras concentra múltiples campos del conocimiento y es aquí donde radica su gran importancia, ya que es posible pensar en su aplicación en diferentes áreas.

El campo de las estructuras tenségricas se encuentra, actualmente, en una etapa incipiente de investigación y de desarrollo. Debido a ello promete ser una fuente de interesantes e increíbles posibilidades, que concretamente en el campo de la ingeniería y particularmente de la robótica, significarían proporcionar una fuente alternativa de diseño, para sistemas presentes en los robots tales como plataformas mecánicas no convencionales, sensores y actuadores, además de las posibles aplicaciones en bioingeniería [Skelton, Pinaud, Mingori, 2001], [Vásquez, 2004].

Actualmente, el grupo de investigación A+D se encuentra desarrollando proyectos que involucran trabajos finales de maestría y tesis de doctorado en el campo de los sistemas tenségricos. En principio, se busca resolver problemas referentes al desarrollo de teorías y de modelos que permitan tener herramientas para el desarrollo de aplicaciones de estos sistemas, en la construcción de robots y en aplicaciones a la bioingeniería.

Por otra parte, es necesario introducir algunas definiciones y nomenclatura antes de mencionar las posibilidades que estos sistemas pueden ofrecer a la robótica.

2. LAS ESTRUCTURAS TENSÉGRICAS

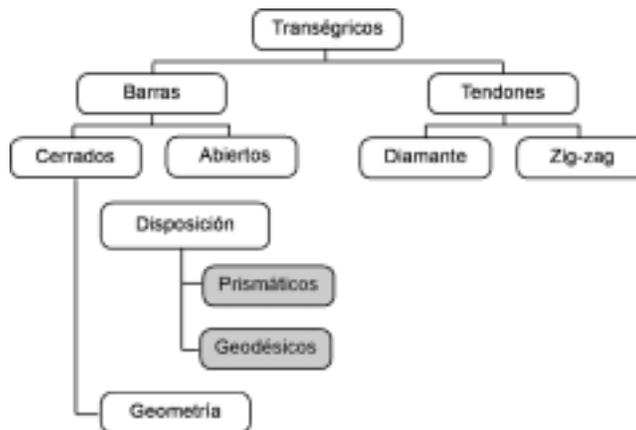
El término *tensegrity* proviene de la contracción de dos palabras en inglés: *tension* (tensión) e *integrity* (integridad), las cuales describen una relación estructural entre los miembros constituyentes de una armazón tridimensional, en el cual la tensión se encuentra integrada y es continua, contrario a la compresión, la cual es discontinua. Exis-

ten elementos elásticos llamados tendones (*ties*) y elementos rígidos, denominados barras (*struts*), interactuando entre sí [Correa, 2001].

Originalmente, el concepto de *tensegrity* fue introducido por el inventor Buckminster Fuller, quien lo interpreta como el “principio de relación estructural en el que la forma de la estructura se garantiza por la interacción entre una red continua de miembros sometida a tensión y un juego de miembros a compresión” [Fuller, 1962]. Este concepto, parte de otro fundamental, el de la sinergia, en el cual –según Fuller–, la manera en que los sistemas actúan en la naturaleza es más que una simple suma de la acción de sus componentes [Fuller, 1962].

Las estructuras tenségricas pueden ser descritas de diferentes maneras, según los elementos que las conforman; pueden ser clasificadas en primera instancia, según la configuración de las barras o según la configuración de los tendones. A su vez, dentro de cada uno de estos modelos aparecen diversas formas según las cuales pueden ser clasificadas. En la Figura 1 se muestra un esquema simplificado de una propuesta de clasificación realizada por el grupo A+D [Vásquez, 2004], que contempla los dos tipos de estructuras que se han empezado a estudiar en el campo de la robótica.

Figura 1. Clasificación simplificada de las estructuras tenségricas

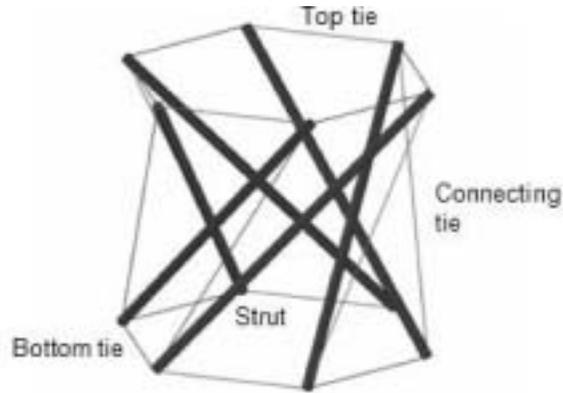


Fuente: [Vásquez, 2004].

Los tenségricos prismáticos deben su nombre a que se generan a partir de una figura prismática. Poseen dos lados paralelos constituidos como bases poligonales que se encuentran giradas una respecto a la otra. A esta forma se le llama truncamiento (torsión) del prisma y, por esta razón, también se conocen como *Twist* (Figura 2).

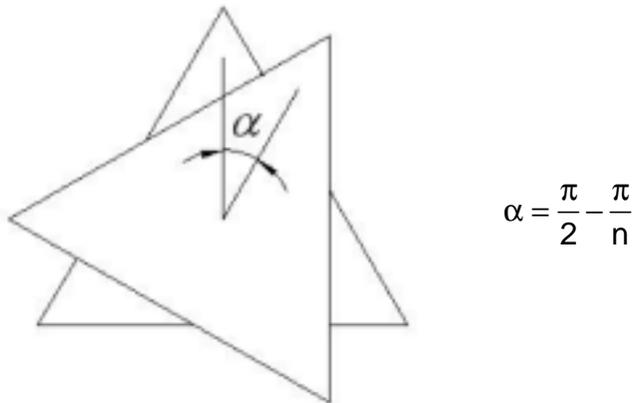
El número de lados del polígono formado depende exactamente del número de barras que conforman el tenségrico. Vásquez [2004] demuestra, mediante coordenadas cilíndricas, que el ángulo que hay entre las bases rotadas depende únicamente del número de barras (Figura 3).

Figura 2. Componentes de una estructura tensébrica prismática de seis barras



Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 3. Ángulo de rotación de las bases de una estructura prismática (n es el número de barras)



Fuente: presentación propia de los autores.

La estructura formada por tres barras y nueve tendones (base triangular) se considera la unidad básica de los tensébricos prismáticos, dado que es el mínimo número de elementos que se deben usar para obtener este tipo de morfología. En teoría se podrían seguir agregando n barras para obtener n lados; sin embargo, existe una limitación física, en cuanto al número de elementos, que depende directamente del tamaño de los elementos por usar en la construcción.

Mediante el uso de unidades básicas se pueden crear redes tensébricas que conforman un tipo de estructuras más complejas, las cuales, en principio se han usado en arquitectura y también en las teorías que tratan de asociar la estructura celular de los seres vivos con los sistemas tensébricos, [Volkh, Vilnay, Belsky, 2000].

Los tenségricos esféricos –también llamados geodésicos– tienen una forma que busca ser lo más cercana a una esfera y, por lo tanto, entre más elementos posea más perfecta será su esfericidad. Las barras están dispuestas de tal modo que forman planos que se intersecan en el centro geométrico del sólido (se forman ecuadores) y se encuentran simétricamente ubicados. La manera más básica de formar un plano es con dos líneas rectas, por eso la configuración más simple de este tipo de tenségrico es donde cada par de barras forman un plano (Figura 4). Las estructuras esféricas son asociadas, generalmente, con los sólidos platónicos y con variaciones de estos, los cuales son elementos conocidos en la geometría espacial. Si en la estructura mostrada en la Figura 4 se juntara cada par de barras, entonces se obtendría un octaedro y es precisamente esta similitud con los sólidos lo que ha hecho interesante la aplicación de estos sistemas, en un principio, en la arquitectura.

Figura 4. Estructura tenségrica geodésica de seis barras



Fuente: presentación propia de los autores.

A diferencia de los tenségricos prismáticos, la morfología de los geodésicos no puede ser generada con la simple adición de barras, sino que se tienen patrones de formación más complejos (tres, seis, doce, treinta..., n barras), lo cual limita su análisis, ya que la teoría desarrollada, hasta hoy, no permite generar patrones que puedan ser usados para resolver problemas, como el análisis estático o el análisis de desplazamiento para un sistema con n barras, [Correa, 2001].

Finalmente, los tenségricos compuestos responden al principio de agrupamiento o mallas (*grids*); en este caso los sistemas se agrupan en módulos (T-Prismáticos o T-Geodésicos) y son concebidos bajo el criterio de la sinergia [Fuller, 1962].

3. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS TENSÉGRICOS

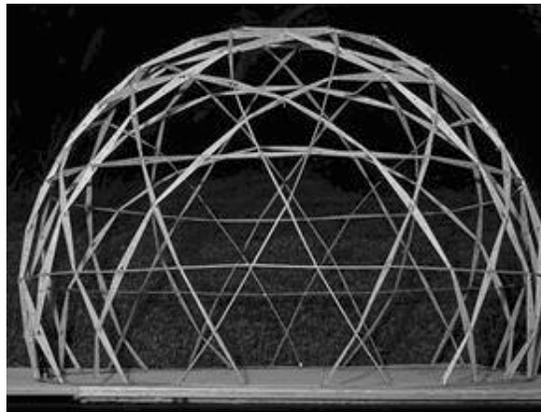
Las estructuras tenségricas han sido aplicadas en arquitectura e ingeniería, con mayor desarrollo en la primera, debido principalmente al incipiente estado de desarrollo de modelos matemático-físicos, los

cuales permitan analizar las estructuras complejas –desde el punto de vista geométrico y mecánico– y controlar su movilidad. Las aplicaciones arquitectónicas estructurales incluyen puentes, domos geodésicos, mástiles, carpas, mesas y antenas entre otros [Fuller, 1962], [Kenner, 1976], [Skelton, Pinaud, Mingori, 2001], [Knight, 2000], [Sultan, 1999], [Sultan, Skelton, 2004], [Tibert, 2002].

De acuerdo con el desarrollo de aplicaciones móviles ingenieriles la configuración característica de las estructuras tenségricas y sus excelentes propiedades de resiliencia [Sultan, Corless, Skelton, 2001], en términos de capacidad de absorber energía de deformación y mínimo uso de materiales, han permitido diseñar y construir estructuras desplegables, de bajo peso, para aplicaciones espaciales móviles como antenas, paneles solares y brazos extensibles (mástiles) [Tibert, 2002]. Actualmente, en ingeniería civil se exploran posibilidades de desarrollo de superestructuras de bajo peso. Otros proyectos incluyen futuras aplicaciones en robótica y biomecánica como manipuladores y prótesis [Vásquez, 2004].

El domo geodésico (Figura 5) inventado por Fuller constituye, tal vez, el primer ejemplo de aplicación eficaz de las estructuras tenségricas, que aprovecha sus cualidades ingenieriles (estructuras de bajo peso y buena resistencia). Este tipo de construcciones consiste, generalmente, en gigantes estructuras en forma de domos planetarios empleados con éxito en grandes obras civiles y arquitectónicas, como estadios y centros de convenciones.

Figura 5. Domo tenségrico, John Warren [1982]



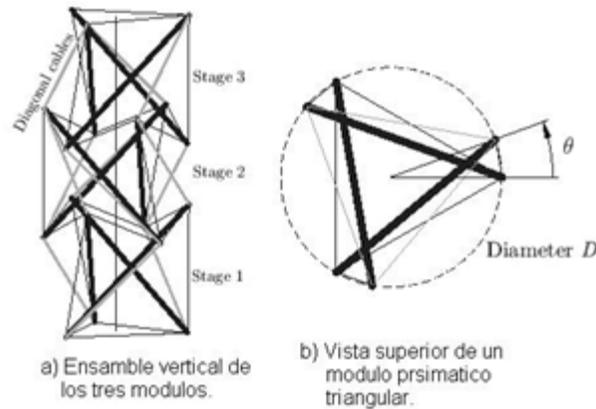
Fuente: Buckminster Fuller Institute

Por otra parte, Kenneth Snelson introdujo el diseño de mástiles tenségricos en su patente *Continuous Tension, Discontinuous Compression Structures*, de 1965. En ésta se describe la construcción de estructuras tenségricas altamente complejas a partir de módulos simples.

La estructura de la Figura 6 corresponde a un mástil que posee tres barras por etapa. El mástil se crea mediante el ensamble de prismas triangulares uno encima del otro. La dirección de rotación de los pris-

mas varía de tal modo que cada segundo prisma es rotado en sentido horario y cada otro en sentido antihorario. Los módulos se fusionan en un mástil mediante la sustitución de sus tendones individuales de base por los de la armazón.

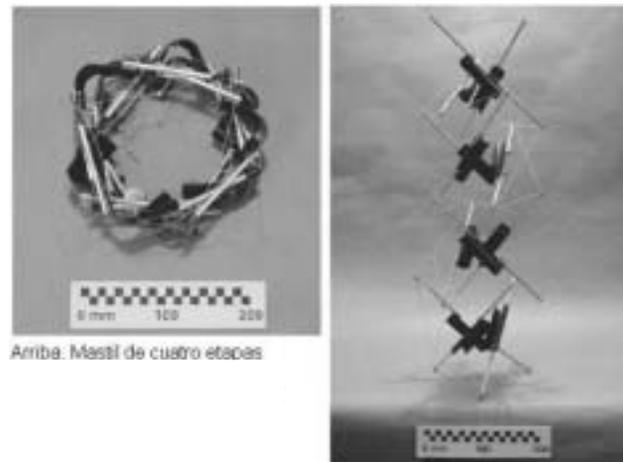
Figura 6. Mástil compuesto por tres módulos tenségricos, desarrollado por Kenneth Snelson.



Fuente: [Tibert, 2002].

Una característica importante de las estructuras tenségricas de Snelson es que se requiere ajustar la longitud de uno de los elementos constituyentes para esforzar previamente o pre-tensionar la estructura. Esta propiedad es clave para la implementación práctica de estructuras tenségricas [Sultan, Corless, Skelton, 2001]. Tibert [2002] propone mástiles desplegados basados en el modelo de Snelson. Los mástiles son multietapas y utilizan sistemas de barras tipo *bi-stable*, que pueden plegarse (Figura 7).

Figura 7. Modelo de mástil desplegable de cinco etapas. a) mástil de cuatro etapas plegado. b) mástiles completamente desplegados.



Fuente: [Tibert, 2002].

Igualmente, Tibert ha desarrollado estudios de diseño de barras y cables, así como de toda la estructura y ha propuesto el diseño de antenas espaciales desplegadas basadas en el concepto de *tensegrity*. La idea inicial de esta aplicación surge del proyecto *Space Technology Research Vehicles* (STRV), como parte del programa *Defense Evaluation and Research Agency* (DERA) bajo la dirección de Sergio Pellegrino, director del Laboratorio de estructuras desplegadas de la Universidad de Cambridge, cuyo objetivo consiste en el desarrollo de satélites de bajo costo, para investigaciones civiles, industriales académicas y de soporte para actividades militares [Tibert, Pellegrino, 2000].

Ahora bien, el hombre ha buscado la forma de hacer funcionar los robots de manera que puedan emular el comportamiento, tanto físico como de pensamiento, de elementos encontrados en la naturaleza. Los robots de inspiración biológica desarrollados actualmente son, con frecuencia, demasiado rígidos en su morfología y en sus controladores; en contraste, los organismos biológicos exhiben un amplio rango de robustez y adaptabilidad en este sentido. Los robots son frecuentemente restringidos mediante imposiciones cinemáticas y dinámicas, desde un punto de vista eminentemente de ingeniería, y los materiales disponibles limitan la incorporación física de las máquinas a una construcción rígida.

Existen propuestas interesantes, como la del proyecto para el estudio de manipuladores tipo VGT o manipuladores con armazón de geometría variable basados en prismas *tensegrity*, inicialmente pensados para aplicaciones eminentemente estructurales [Oppenheim, Williams, 1999].

Actualmente, en el laboratorio de Inteligencia Artificial del Massachusetts Institute of Technology existen dos proyectos titulados *Developmental Programs for Tensegrity Robots* y *Developmental Nervous Systems for Tensegrity Robots*. Ambos proyectos, estrechamente relacionados entre sí, tienen que ver con el desarrollo de robots de inspiración biológica basados en sistemas tenségricos, los cuales necesitan sistemas avanzados de control que permitan operar los robots.

El grupo de investigación en Automática y Diseño (A+D) y el grupo de investigación en Biónica de la Universidad Pontificia Bolivariana han comenzado la primera fase de un proyecto que consiste en el estudio de las posibilidades que ofrecen los sistemas tenségricos, para el desarrollo de manipuladores robóticos. La idea es buscar, basados en la experiencia acumulada con estos sistemas, la morfología adecuada para la construcción física de un manipulador espacial [Vásquez, 2004], teniendo como punto de partida trabajos previos de Correa [2001] y Marshall [2003]. (Figura 8).

Diversos trabajos previos se han ocupado del análisis estático de estructuras tenségricas prismáticas sometidas a cargas y a momentos externos. La investigación muestra el análisis estático y cómo se posiciona la estructura cuando le son aplicadas cargas externas. La

derivación del modelo matemático para las posiciones de equilibrio se basa en el principio del trabajo virtual junto a conceptos relacionados con la teoría de líneas [Correa, 2001], [Correa, Duffy, Crane, equilibrium equations, 2002], [Correa, Duffy, Crane, numerical examples, 2002], [Correa, Duffy, Crane, Prestressed, 2002].

Figura 8. Plataforma paralela basada en sistemas tenségricos.



Fuente: [Marshall, 2003].

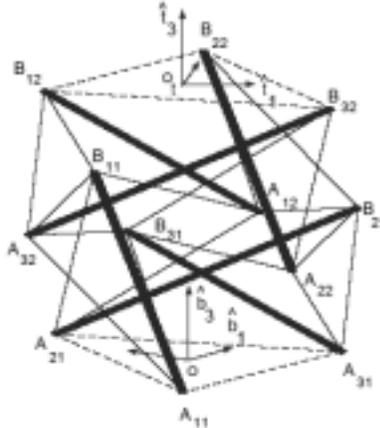
La dificultad del uso en robótica de estos sistemas, radica en la ausencia de sólidas teorías y metodologías que han de ser desarrolladas, en principio, para poder obtener aplicaciones robustas y confiables. Dentro de las posibilidades de aplicación se encuentra, asimismo, el desarrollo de sensores y de actuadores inteligentes. El desarrollo creciente de las tecnologías de micro-fabricación, permite pensar en sistemas tenségricos para el desarrollo de sensores y de actuadores.

Los sistemas tenségricos están empezando a ser usados como herramientas de medición, particularmente en un campo denominado de sensores inteligentes. Éstos están caracterizados por la capacidad que tienen de adaptarse y ajustarse fácilmente, ante condiciones cambiantes de la aplicación, además de poder hacer procesamientos en campo que puedan ser transmitidas a controladores que se encuentren a distancias considerables [Sultan, Skelton, 2004].

Los sensores inteligentes deben estar desarrollados con la capacidad para hacer mediciones redundantes y altamente repetibles. Sultan y Skelton [2004] hacen una propuesta para el desarrollo de un sensor de fuerza y de torque, el cual puede estimar seis cantidades físicas diferentes. Proponen hacer uso de las propiedades intrínsecas de las estructuras tenségricas para el desarrollo de un sensor inteligente de fuerza y de torque en el espacio tridimensional (Figura 9).

Esto se convierte en una herramienta interesante en el campo de la robótica, ya que las cantidades físicas que se miden con el sensor propuesto son de interés particular en el área de la manipulación. Además de medir las variables necesarias, para tener un control adecuado de un manipulador, la forma en que éste interactúa con el medio en el cual desempeña alguna labor específica es de vital importancia.

Figura 9. Tenségrico geodésico que conforma el sensor de fuerza y torque



Fuente: [Sultan, Skelton, 2004].

Este tipo de sensores brindaría una alternativa de medición diferente a las celdas de carga, elementos para la medición de fuerza y torque, los cuales usan principios de funcionamiento completamente diferentes al propuesto. Es aquí donde los nuevos materiales y las bondades encontradas recientemente en la fibra óptica juegan un papel importante a la hora de desarrollar un sensor comercial para aplicaciones en robótica basado en sistemas tenségricos, ya que el desempeño y la calidad de la medición dependerán ampliamente de la robustez proporcionada por una manufactura adecuada y de alta calidad.

Las estructuras tenségricas simétricas, como las estructuras geodésicas (Figura 4), poseen una propiedad llamada efecto memoria de forma (*shape memory effect*). Este efecto consiste en que la relación de energía potencial entre dos configuraciones de equilibrio y el sistema tenségrico puede variar considerablemente, cuando la longitud original de los elementos elásticos es cambiada [Defossez, 2003]. Las estructuras tenségricas geodésicas simétricas tienen valores diferentes de energía potencial para cada configuración de equilibrio, por lo tanto las barras adquieren una configuración particular y la estructura tiene una forma determinada.

Dada la diferencia de energías y la diferencia de formas, el sistema pasa de un estado de equilibrio a otro cuando cargas externas son aplicadas y al ser retiradas la estructura tiene la capacidad de recobrar la forma del primer estado de equilibrio que se tenía antes de cambiar las condiciones de carga [Defossez, 2003]. Esto muestra el efecto de memoria para los sistemas tenségricos mencionados.

Los actuadores basados en efecto de memoria están siendo estudiados últimamente, ya que ofrecen ventajas en términos de su eficiencia para producir movimiento, gracias al almacenamiento de energía. De esta manera, los sistemas tenségricos se convierten en una opción interesante para el desarrollo de nuevos actuadores.

4. TRABAJOS FUTUROS Y CONCLUSIONES

Los sistemas tenségricos ofrecen una oportunidad interesante para el desarrollo de robots por parte del Grupo A+D, ya que dentro de sus líneas de investigación de teoría de mecanismos, diseño mecánico y mecatrónica, es de interés poder desarrollar nuevas propuestas para el diseño de manipuladores espaciales, que aprovechen las ventajas de los sistemas tenségricos que se han mencionado. El diseño de elementos, el análisis y la obtención de modelos, el control y la manufactura, son elementos claves para el buen desempeño de una aplicación real en robótica; de hecho, son variables acopladas que no pueden separarse, por lo tanto, en robótica para la búsqueda de aplicaciones de sistemas tenségricos es necesario proponer soluciones desde las diferentes disciplinas mencionadas.

Los sistemas tenségricos son un tema de actualidad, dentro del campo de la robótica, ya que son diversos los grupos e institutos que en todo el mundo trabajan en el desarrollo de teorías y metodologías para obtener aplicaciones confiables en ingeniería. Con base en estudios y experimentos propios, el grupo de Automática y Diseño A+D y el grupo de Biónica de la Universidad Pontificia Bolivariana han descubierto posibles configuraciones geométricas, patrones de armado nuevos y han desarrollado propuestas de aplicación. Con la investigación del desarrollo de aplicaciones tecnológicas basadas en sistemas tenségricos se ha descubierto que estos tienen cabida en muchas de las ramas de la ciencia y la técnica, desde la biología celular hasta la ingeniería aeroespacial.

Las principales ventajas sobre las máquinas convencionales que se obtienen al diseñar sistemas mecánicos basados en tenségricos se derivan, principalmente, de la excelente relación integrada entre las variables de estabilidad estructural, flexibilidad, bajo peso y generación de movimientos complejos. Las principales desventajas y limitaciones de las estructuras tenségricas, en comparación con los sistemas estructurales convencionales, son su menor rigidez y su compleja configuración morfológica; sin embargo, la falta de rigidez se compensa con una excelente estabilidad estructural.

El rápido desarrollo de nuevos materiales y su amplia oferta, en conjunto con la posibilidad de diseñar materiales con características específicas para aplicaciones concretas, constituye una enorme fuente de soporte para el desarrollo de tecnología basada en tenségricos. Los mayores obstáculos asociados al proceso de diseño de un sistema tenségrico se derivan, empero, de la mayor complejidad inherente a sus modelos de análisis y el alto costo y largo tiempo asociados al desarrollo y a la implementación de nuevas tecnologías.

Antes de poder generar dispositivos basados en sistemas tenségricos que puedan ser utilizados confiablemente, es necesario resolver una gran cantidad de problemas teóricos muy complejos asociados con el comportamiento de este tipo de estructuras, así como encontrar materiales adecuados para su fabricación.

REFERENCIAS

- Burkhardt, R.W. *A Practical Guide to Tensegrity Design*. Cambridge: MIT Press, 2004.
- Correa, J. C. *Static Analysis of Tensegrity Structures*, M.S. thesis, Mech. Eng. University of Florida. Gainesville, 2001.
- Correa, J.C., Duffy, J., Crane, C. "Static Analysis of Tensegrity Structures, Part I. Equilibrium Equations". En: *Proceedings of the ASME Mechanisms Conference*, Montreal, 2002.
- _____. "Static Analysis of Tensegrity Structures, Part II. Numerical Examples". En: *Proceedings of the ASME Mechanisms Conference*, Montreal, 2002.
- _____. "Static Analysis of Prestressed Tensegrity Structures". *Proceedings of the ASME Mechanisms Conference*, Montreal, 2002.
- Defossez, M. "Shape Memory Effect in Tensegrity Structures". En: *Mechanics: Research and Communications* 30, 2003, 311-316.
- Fuller, R. B. "Tensile-Integrity Structures". U.S. Patent 3,063,521. 1962.
- Kenner, H. *Geodesic Math and How to Use It*. Berkeley: University of California Press, 1976.
- Knight, B.F. *Deployable Antenna Kinematics using Tensegrity Structure Design*. Ph.D. thesis, University of Florida, 2000.
- Marshall, M. *Analysis of Tensegrity-Based Parallel Platform Devices*. M.S. thesis, Mech. Eng. University of Florida, 2003.
- Oppenheim, I., Williams, W. *Mechanics of Tensegrity Prisms*. s.d.: CMU Press, 1999.
- Skelton, R., Pinaud, J.P., Mingori, D.L. "Dynamics of the Shell Class of Tensegrity Structures". En: *Journal of the Franklin Institute* s.d., 2001.
- Sultan, C. *Modeling, Design, and Control of Tensegrity Structures with Applications*. PhD thesis, Purdue University, 1999.
- Sultan, C., Corless, M., Skelton, R. "The Prestressability Problem of Tensegrity Structures: some Analytical Solutions". En: *International Journal of Solids and Structures*, 38, 2001.
- Sultan, C., Skelton, R. "A Force and Torque Tensegrity Sensor". En: *Sensors and Actuators*, A112, 2004, 220-231.
- Tibert, A.G. *Deployable Tensegrity Structures for Space Applications*. PhD. thesis. Royal Institute of Technology. Department of Mechanics. Stockholm, 2002.
- _____, Pellegrino, S. *Review of Form-Finding Methods for Tensegrity Structures*. Stockholm: R.I.O.T Press, 2000.
- Vásquez, R.E. *Sistemas tenségricos*. Medellín: Escuela de Ingeniería UPB, 2004.
- Volokh, K.Y., Vilnay, O., Belsky, M. "Tensegrity Architecture Explains Linear Stiffening and Predicts Softening of Living Cells". En: *Journal of Biomechanics*, 33, 2000.

SISTEMA DE VISIÓN POR COMPUTADORA PARA LA MEDICIÓN DE DISTANCIA E INCLINACIÓN DE OBSTÁCULOS PARA ROBOTS MÓVILES*

*Nestor Andrés González Vargas***

Resumen: este artículo muestra el proceso de implementación de un sistema de visión por computadora para robots móviles, el cual se fundamenta en una aproximación geométrica que evalúa la distancia y la inclinación de obstáculos planos. El sistema está compuesto principalmente por una cámara CCD, una tarjeta de adquisición de imágenes y un arreglo de diodos láser que proyecta dos puntos de luz hacia el obstáculo.

Palabras claves: arreglo láser, medición de distancia, procesamiento de imágenes.

Abstract: this article shows the implementation process of a computer vision system for mobile robots, which is based on a geometrical approximation of distance measurement and obstacle inclination. The system is mainly composed for a CCD camera, an image acquisition card, and a laser array, which projects two spot lights on to the obstacle.

Key words: laser array, distance measurement, image processing.

* *Fecha de recepción: 5 de septiembre de 2005. Fecha de aceptación para publicación: 29 de noviembre de 2005. Este artículo se deriva de un trabajo con el mismo nombre presentado en el IEEE Colombian Workshop on Robotics and Automation. (CWRA) en agosto de 2005, organizado por el IEEE-Colombia y cuyas memorias fueron publicadas con el ISBN 958-695-182-0. Se publica con autorización del coordinador del comité evaluador del evento. El trabajo contó con la financiación parcial del Instituto de Tecnologías de la Información de la Universidad Tomas Bata en la República Checa. La implementación del sistema de visión por computador fue realizada por el autor en los laboratorios de la Universidad Tomas Bata y el robot móvil Skywalker con el cual se realizaron las pruebas fue construido en el laboratorio de Mecatrónica de la Universidad Autónoma de Occidente en Cali, Colombia.*

** *Estudiante de ingeniería mecatrónica, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia. Correo electrónico: gonzaleznestor@gmail.com.*

1. INTRODUCCIÓN

En muchas aplicaciones de la robótica móvil se requieren sistemas de visión para explorar el área alrededor del robot. Mediante tareas como la detección de obstáculos, el reconocimiento de formas y la estimación de distancias, se puede mejorar el control y la navegación. Uno de los sistemas de visión más populares para robots móviles es aquel que incluye arreglos láser, debido a su aplicabilidad y flexibilidad, ya que puede adoptar una gran variedad de formas. Estos sistemas están compuestos, generalmente, por diodos láser, cámaras de video CCD y tarjetas electrónicas que se encargan de adquirir las señales de video provenientes de las cámaras. Para la implementación de este sistema de visión, se trabajó con una aproximación geométrica [Kvasnica, 2003], la cual es ideal para ambientes estructurados. Dentro de las operaciones de procesamiento digital que se implementaron están las de segmentación y morfología matemática de imágenes.

2. APROXIMACIÓN GEOMÉTRICA DEL SISTEMA

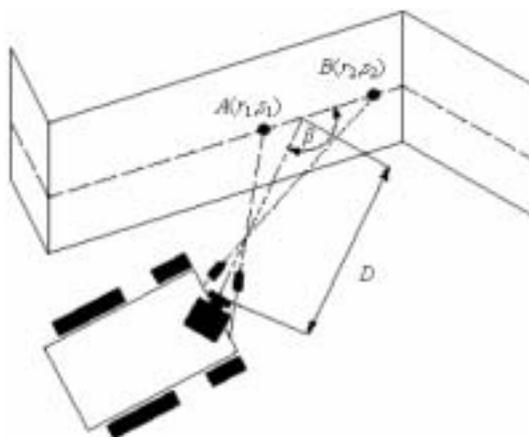
El sistema de visión se basa en una aproximación geométrica [Kvasnica, 2003] de medición de rangos de distancia e inclinaciones (*Range-incline tracer*), con la cual se busca calcular la distancia D y la inclinación β a la cual se encuentra un obstáculo plano con respecto a un robot móvil (Figuras 1 y 2).

En la Figura 2 se debe tener en cuenta que:

- El punto de origen del sistema de referencia x , y es la intersección de los dos rayos de luz 4.
- El eje óptico 5 de la cámara 3 pasa a través del punto de origen del sistema de referencia.
- El eje y del sistema de referencia es paralelo al eje óptico 5 de la cámara 3 y su orientación positiva va dirigida hacia la cámara 3.
- Las coordenadas r_1 , s_1 pertenecen al punto de luz A, el cual es emitido por el diodo láser 1 y proyectado sobre el obstáculo 6. Mediante la ecuación (1) se determina el valor de la coordenada s_1 .
- Las coordenadas r_2 , s_2 pertenecen al punto de luz B, el cual es emitido por el diodo láser 2 y proyectado sobre el obstáculo 6. Mediante la ecuación (2) se determina el valor de la coordenada s_2 .
- En este arreglo láser cada rayo de luz 4 que se emite, crea un ángulo $\alpha/2$ con respecto al eje óptico 5 de la cámara.

En la Figura 2 se observa que h es la distancia entre la cámara 3 y el punto de intersección de los rayos de luz 4. También se observa que Δh es la distancia entre el punto de intersección de los rayos de luz 4 y la intersección del eje óptico 5 de la cámara 3 con el obstáculo 6. Mediante la ecuación (3) se calcula Δh . De la Figura 2 también se deduce el valor de las variables D y β ; en donde D es la distancia entre la cámara 3 y el obstáculo 6 y β es la inclinación del obstáculo 6 con

Figura 1. Arreglo láser para la medición de rangos de distancia e inclinación de obstáculos (*Range-incline tracer*).



Fuente: presentación propia del autor.

respecto al eje óptico 5 de la cámara 3. Con las ecuaciones (4) y (5) se determina el valor de las variables D y β .

$$s_1 = \frac{r_1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \quad (1)$$

$$s_2 = \frac{r_2}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \quad (2)$$

$$\Delta h = -\frac{s_1 - s_2}{r_2 - r_1} r_1 + s_1 \quad (3)$$

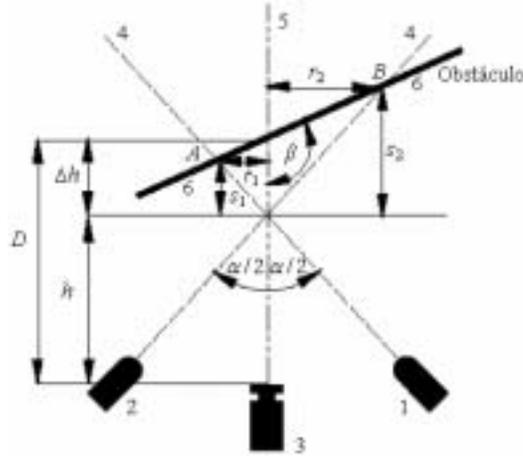
$$D = h \pm \Delta h \quad (4)$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{r_2 - r_1}{s_1 - s_2} \quad (5)$$

En resumen, lo que se quería calcular, principalmente, con la aproximación geométrica son los valores de las variables D , β del sistema de visión; sin embargo, para realizar dicho cálculo se debe encontrar, ante todo, las coordenadas r_1 , r_2 de los puntos de luz A , B . Se implementó un programa de procesamiento digital de imágenes, con el cual se encontraban las coordenadas r_1 , r_2 y se calculaban todas las variables del sistema.

Con las imágenes que fueron capturadas con la cámara CCD, se realizaron operaciones de procesamiento digital de segmentación y morfología binaria [González, Woods, Eddins, 2004], las cuales facilitaron el cálculo de las coordenadas r_1 , r_2 de los puntos de luz láser.

Figura 2. Aproximación geométrica para la medición de rangos de distancia e inclinación de obstáculos (*Range-incline tracer*).



Fuente: presentación propia del autor.

3. ADQUISICIÓN DE LAS IMÁGENES

La adquisición de imágenes, se realizó con una tarjeta electrónica comercial de adquisición y procesamiento de imágenes DT3155, de la compañía Data Translation [Data Translation, 2000]. La tarjeta electrónica adquiere imágenes monocromáticas, es de alto rendimiento, es programable, almacena en tiempo real la información digital de la imagen en su sistema de memoria y también transfiere la información de la imagen al computador a través del bus de expansión PCI. A continuación se describen los parámetros de configuración de la tarjeta DT3155:

- Formato de video: debido a que el sistema de visión se implementó en la República Checa, se trabajó con el formato estándar PAL a una frecuencia de 50 hz.
- Tamaño de la región de interés: un *frame* es una porción del área de video activa que se digitaliza [Data Translation, 2000]. La cima del *frame* es la primera línea de video relativa al área de video activa; Ésta se fijó en cero para la tarjeta DT3155. El lado izquierdo del *frame* es el primer *píxel* de video relativo al área de video activa; éste se fijó en cero para la tarjeta DT3155.
- El ancho del *frame* es el número de *píxeles* por línea de video; éste se fijó en setecientos sesenta y ocho para una frecuencia de 50 hz. La altura del *frame* es el número de líneas por campo; ésta se fijó en quinientas setenta y seis para una frecuencia de 50 hz.
- Escala de la imagen: el factor de escala preconfigurado tiene un valor de uno, lo que significa que las imágenes no se pueden aumentar de tamaño con la tarjeta DT3155.

4. PROGRAMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

Después de configurar adecuadamente la tarjeta de adquisición de imágenes se procedió a programarla haciendo uso del lenguaje *Microsoft Visual C++ 6.0*. Se desarrolló un programa denominado *Distance Measuring 1.0*, que sirve para capturar, digitalizar y almacenar las imágenes en un computador. En la Figura 4 se puede apreciar la ventana principal del programa, desde donde se puede activar o desactivar tanto la tarjeta como el robot.

Con el fin de verificar el correcto funcionamiento del programa de adquisición de imágenes, se realizaron pruebas con los diferentes componentes del sistema de visión como el robot móvil, el arreglo láser, la cámara de video y la tarjeta electrónica DT3155 (Figura 3). El objetivo de estas pruebas era poder digitalizar imágenes que incluyeran los dos puntos de luz láser *A*, *B* que son proyectados sobre un obstáculo, ya que ese era el primer paso para calcular las coordenadas r_1 , r_2 de los puntos de luz (Figura 4).

Durante las pruebas se observó que al adquirir las imágenes del obstáculo de color blanco, los *frames* se oscurecían como consecuencia de la iluminación del lugar con luz ambiente. Todos los *frames* también presentaban ruido del tipo sal y pimienta, haciéndose necesario procesarlos digitalmente para mejorarlos (Figura 4).

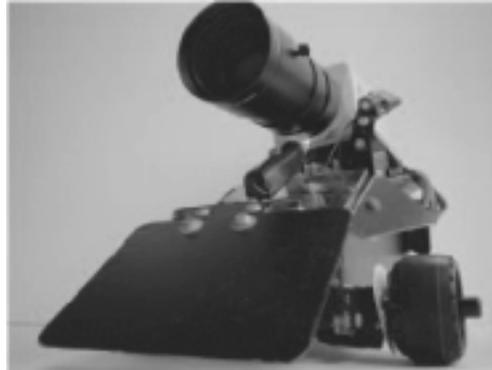
Después de almacenar el *frame* de los puntos de luz láser *A*, *B* en la memoria del computador, el siguiente paso consistió en la implementación del programa de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI), el cual, finalmente, entregaría las coordenadas r_1 , r_2 de los puntos de luz.

5. PROCESAMIENTO DIGITAL DE LAS IMÁGENES

Mediante el empleo de la herramienta *Image Processing* de *Matlab* versión 6.5 [González, Woods, Eddins, 2004], se programaron las siguientes operaciones, con las cuales se mejoraron y se procesaron los *frames*:

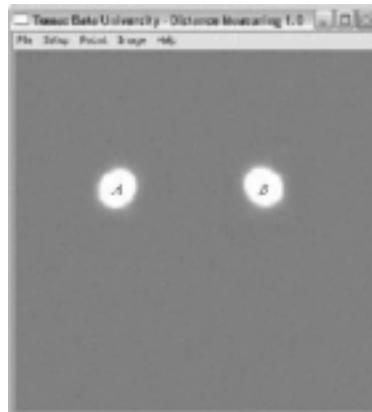
- Segmentación: esta operación fue crucial para determinar las coordenadas r_1 , r_2 porque en ella se separaron las áreas ovaladas de color blanco del resto del *frame*. Es importante aclarar que las áreas ovaladas de la Figura 4 representan los dos puntos de luz láser *A*, *B*. Teniendo en cuenta que el *frame* de la Figura 4 es de 8 bits (doscientos cincuenta y seis niveles de grises); para separar las áreas ovaladas se realizó una segmentación que entregó el *frame* segmentado por regiones (Figura 5). Gracias a esta operación también se eliminó el ruido de sal y pimienta del *frame*, porque al terminar la segmentación quedó el fondo (obstáculo) de color negro.
- Morfología matemática: con esta operación se detectaron los contornos de las áreas realizando simplemente una dilatación y una erosión del *frame*. Las operaciones fueron controladas por un elemento de estructura circular plano (*disk*) de radio 1.

Figura 3. Cámara de video ubicada sobre el robot móvil *Skywalker*



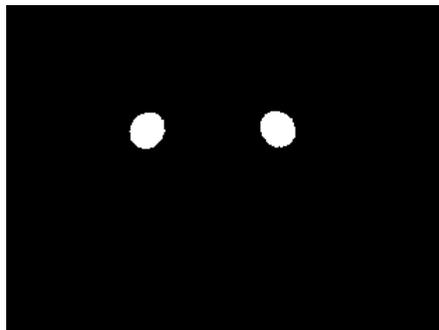
Fuente: presentación propia del autor.

Figura 4. Ventana principal del programa de adquisición de imágenes *Distance Measuring 1.0*.



Fuente: presentación propia del autor.

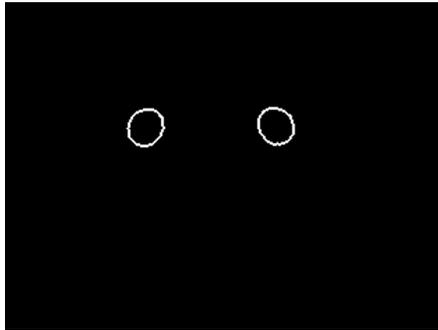
Figura 5. Segmentación del *frame* por regiones.



Fuente: presentación propia del autor.

En la Figura 6 se puede apreciar el contorno de las áreas ovaladas, que se obtuvo al restar el *frame* erosionado del dilatado. Con la operación de morfología matemática también se encontraron los centroides de las áreas ovaladas, los cuales corresponden a las coordenadas r_1 , r_2 de los puntos de luz A , B (Figura 7).

Figura 6. Contorno de los puntos de luz láser A , B



Fuente: presentación propia del autor.

Al obtener las coordenadas se presentó un nuevo reto, porque en lugar de calcular sus valores en unidades métricas, se obtuvo su ubicación en una matriz de píxeles (mapa de *bits*). Para solucionar dicho problema, se realizaron mediciones de campo con los puntos de luz láser proyectados sobre el obstáculo y se determinó el equivalente entre píxeles y centímetros. Dicha equivalencia fue fundamental para conocer la distancia entre las coordenadas y el eje óptico 5 de la cámara de video (Figuras 2 y 7).

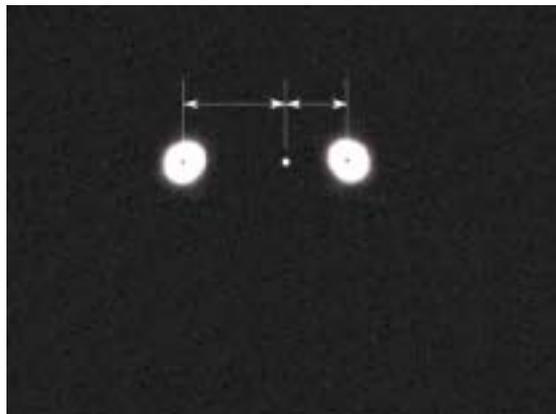
A partir de ello se concluyó que en el momento de capturar las imágenes no era recomendable variar el grado de acercamiento, porque de hacerlo se debería recalibrar el sistema y así se encontraría nuevamente la equivalencia entre píxeles y centímetros.

Por último se remplazaron los valores de las coordenadas que estaban en centímetros, en las ecuaciones (1)-(5), para obtener finalmente la distancia D y la inclinación β a la cual se encontraba el obstáculo plano con respecto al robot móvil.

6. PRUEBAS DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

Se realizaron pruebas con *frames* de puntos de luz láser de color rojo, proyectados sobre un obstáculo estático plano (cartulina de color blanco). Los puntos eran emitidos por módulos *láser* que generaban rayos de luz con una longitud de onda de 670 nm. Los módulos operaban a 3 Vdc, con una potencia de 0,005 W y tenían una distancia de trabajo de 50 m a la luz del día.

El objetivo de las pruebas consistió en determinar si la variación de la iluminación del entorno afectaba el cálculo de las coordenadas r_1 , r_2 . Por tal motivo se adquirieron imágenes usando como fuente de iluminación la luz ambiente y luego se realizó la adquisición utilizando la luz proveniente de una bombilla incandescente de 100 W.

Figura 7. Coordenadas r_1 , r_2 de los puntos de luz láser A , B .

Fuente: presentación propia del autor.

Con las pruebas se determinó que los dos tipos de fuentes de luz no afectaban la operación del sistema de visión, porque al segmentar el *frame*, se compensaba la variación de iluminación y, además, se eliminaba el ruido; esto resulta muy importante para el caso de los robots móviles que operan bajo estas condiciones de iluminación en casas o edificios.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se ha descrito el proceso de implementación de un sistema de visión por computadora modular basado en un modelo geométrico para la medición de distancia e inclinación de obstáculos planos. Para el cálculo de las variables D , β del sistema se ha propuesto la utilización de algoritmos de procesamiento digital de imágenes que sólo requieren de operaciones de segmentación y morfología matemática. Una ventaja adicional que presenta el sistema de visión es el uso eficiente de la memoria del computador, porque no se necesita una descripción geométrica completa del obstáculo para detectarlo y graficarlo, sino que por el contrario, sólo basta con almacenar en la memoria la distancia a la cual se encuentra y su inclinación.

Las pruebas realizadas demuestran que el sistema de visión trabaja satisfactoriamente y que es muy apropiado para ambientes estructurados; sin embargo, este sistema se podría mejorar aún más si se le agregara la información proveniente de otro tipo de sensores. Por tal motivo el trabajo futuro se va a concentrar en la implementación de una fusión sensorial aplicada al control y la navegación de una silla de ruedas en los hogares de personas discapacitadas.

REFERENCIAS

- Canny, J. "A Computational Approach for Edge Detection". En: *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8 (6), 1986, 679-698.
- Data Translation. DT3155 User's Manual*. Marlboro: Data Translation, 2000.
- Faugeras, O. *Three Dimensional Computer Vision, a Geometric Viewpoint*. Cambridge, 1993.
- Fu, K. S., González, R. C., Lee, C. S. G. *Robótica, control, detección visión e inteligencia*, Madrid: Mc Graw-Hill, 1998.
- González, J. *Visión por computador*. s.d.: Paraninfo, 1999.
- González, R. C., Woods, R. E., Eddins, S. L. *Digital Image Processing Using MATLAB*. New Jersey: Pearson, 2004.
- Hanselman, D., Littlefield, B. R. *Mastering MATLAB 6*. New Jersey: Pearson Education, 2001.
- Hartley, R. Zisserman, A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge, 2000.
- Jarvis, R. A. "A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision,". EN: *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 5 (2), 1983, 122-139.
- Kim, D., Kim, J., Chung, M. J. "An Eye-Gaze Tracking System for People with Motor Disabilities,". En: *Proc. 7th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Evry Cedex, France, 2001.
- Kvasnica, M. "Head Joystick and Interactive Positioning for the Wheelchair,". En: *Proc. 1st International Conference on Smart Homes and Health Telematics*, Paris, 2003.
- Kvasnica, M. "Six-DOF Sensory System for Interactive Positioning and Motion Control in Rehabilitation Robotics,". En: *Proc. 8th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Daejeon, Korea, 2003.
- Russ, J. C. *The Image Processing Handbook*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- Tsai, R. "A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using off-the-shelf TV Cameras and Lenses". EN: *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3 (4), 1987, 323-344.
- Vincent, L. "Morphological Grayscale Reconstruction in Image Analysis: Applications and Efficient Algorithms". En: *IEEE Trans. on Image Processing*, 2(2), 1993, 176-201.
- Zitová, B., Kautsky, J., Peters, G., Flusser, J. "Robust Detection of Significant Points". En: *Multiframe Images, Pattern Recognition Letters*, 20, 1999, 199-206.