



Sistema de Percepción Activo basado en Óptica de Espejos para Exploración Submarina

Noel Cortés Pérez, Luz Abril Torres Méndez

CINVESTAV - Unidad Saltillo. noel.cortes@cinvestav.edu, latorres@cinvestav.mx

RESUMEN

En este trabajo se aborda la problemática de brindar capacidades de percepción activa a un robot submarino para realizar tareas de exploración.

Los sistemas de percepción activos están presentes en diferentes organismos animales incluso en las especies menos complejas como los insectos, siendo una valiosa herramienta para su supervivencia así como para el reconocimiento y exploración de su hábitat. Diversos sistemas de percepción activos han sido implementados con éxito en robots móviles terrestres mejorando su desempeño en tareas de navegación, sin embargo existen retos por resolver para integrar estos sistemas en plataformas acuáticas, relacionados con factores energéticos, capacidad de carga útil, así como factores ópticos propios del ambiente.

Por un lado, la percepción activa requiere de contar con un mecanismo móvil que permita obtener la mayor información visual de la periferia del vehículo; para ello se propone montar en el robot un mecanismo servo-controlado capaz de mover un arreglo de espejos, el cual debe contemplar las características del sistema de cámaras y las capacidades de carga del robot con el fin de reconfigurar el sistema de espejos y extraer la mayor cantidad de información visual útil para realizar tareas de navegación.

Se propone también la implementación de modelos matemáticos que corrijan o remuevan distorsiones geométricas y fotométricas causadas por la geometría de los espejos, así como por fenómenos ópticos inherentes del ambiente submarino, tales como el cambio de coloración, la distorsión de forma, la presencia de partículas suspendidas (nieve marina) y condiciones de iluminación dinámica.

Se presenta una descripción de los procesos involucrados en la etapa del diseño del sistema de percepción activo basado en óptica de espejos así como un estudio de los tipos de espejos, su geometría y propiedades ópticas en relación con el cambio de pose dado por la configuración articular del sistema (cinemática).

1. INTRODUCCIÓN

Inspirados en la forma en que algunos seres vivos reconocen y exploran su medio, los sistemas de visión artificiales se han introducido con éxito en diferentes aplicaciones de la robótica moderna como una valiosa herramienta de percepción del entorno. Basados en el principio de reflexión de las ondas electromagnéticas que inciden en un objeto en forma de luz, los sistemas de visión pueden describir y/o detectar las cualidades de un objeto o escena propias de su forma, color o tamaño. Además, mediante el mismo principio, estos sistemas pueden detectar incluso cualidades en frecuencias que escapan al rango visible del ser humano (tales como los espectros infrarrojo y ultravioleta).

El avance en las ciencias computacionales, de la electrónica y los métodos de manufactura en el último par de décadas, han permitido implementar tecnologías para el desarrollo de diversas configuraciones de sistemas de visión a un costo reducido y a menor escala. Esta situación da oportunidad al desarrollo una amplia variedad de plataformas robóticas móviles con sistemas de



visión artificial como principal herramienta para la percepción del medio, usando complejos algoritmos para realizar tareas como navegación, generación de mapas e identificación de objetos, por mencionar algunas.

Paradójicamente, los sistemas biológicos con cerebros realmente simples (como el caso de los insectos) pueden realizar de forma muy sencilla y efectiva actividades de navegación sin necesidad de aplicar procesamientos complejos ni un análisis tan detallado de la escena que perciben. Esto nos hace pensar que para resolver estas tareas no se precisa de gran poder de cómputo, sino un buen diseño en el sistema de sensores y una buena representación de la información que estos proveen al sistema.

Para extraer la mayor cantidad de información visual del medio, es necesario como entrada una imagen amplia del entorno en el que el sistema de visión está inmerso. Para dar una mayor robustez a los sistemas de sensores, científicos y tecnólogos han trabajado en sistemas que adapten los parámetros del sensor mediante procesamiento de señales o mecanismos robotizados, a manera de lograr modificar los rangos de trabajo (en términos de la magnitud de las señales) para obtener una configuración óptima al tomar una muestra. A estos sistemas se les ha nombrado sistemas de percepción activos.

Diversos sistemas mecatrónicos han sido implementados para lograr una configuración eficiente en el sistema de sensores. Inspirados en la forma en que los animales ven alrededor de si mismos al girar su cabeza, se ha probado diferentes configuraciones de mecanismos servo-actuados para variar el ángulo de orientación del sistema de visión respecto al marco no inercial del robot [1]. El modificar la orientación de las cámaras permite obtener información del entorno aunque en diferentes intervalos de tiempo, dándole así capacidades de un elemento activo y obteniendo algunas de las ventajas que ofrece tener un sistema de visión periférica.

Por otro lado, en el caso particular de los vehículos submarinos (tema central de esta investigación), se presentan diferentes problemáticas tecnológicas y científicas para la integración de cámaras y mecanismos para operación bajo el agua. Entre las principales problemáticas tecnológicas resaltan la necesidad de mecanismos eficientes para el aislamiento eléctrico de los componentes del sistema de visión, la capacidad limitada de carga del vehículo submarino y el alto costo del equipo desarrollado en el mercado para dicha aplicación. Aunado a esto, los vehículos submarinos tienen problemáticas inherentes de operación como dinámicas no lineales fuertemente acopladas, dificultad para la localización espacial debido a la naturaleza "ruidosa" de los sensores inerciales embarcados y la imposibilidad de utilizar un sistema de posicionamiento global (GPS) en grandes profundidades, así como problemas de visión características del medio.

El añadir una estructura servo-controlada de dimensiones discretas no representa un gran cambio para las propiedades hidrodinámicas del vehículo dado que las velocidades de desplazamiento para exploración suelen ser lentas. Tampoco representa un exceso para las capacidades de carga útil si se consideran en el diseño materiales con la densidad adecuada para operar en un rango de profundidad conveniente.

Los sistemas basados en óptica de espejos pueden proveer al sistema de la capacidad de un elemento activo y permiten ampliar el/los ángulo(s) de visión de la(s) cámara(s) de acuerdo a la geometría de los espejos, sin modificar en absoluto la configuración original de cámaras en una plataforma [2], [3]. Esto es debido a que la variación del ángulo de visión y perspectiva puede hacerse mediante la configuración adecuada de los espejos respecto al ángulo de visión de las cámaras. Este trabajo de investigación aborda la problemática de añadir un sistema basado en óptica de espejos para controlar el grado de visión del robot submarino sin modificar sustancialmente el diseño de la plataforma existente.

2. TEORÍA

Conocemos como espejo a cualquier superficie pulida en la cual la luz se refleja al incidir sobre dicha superficie cumpliendo las leyes de reflexión.



En 1678 el físico Holandés Christian Huygens escribió el tratado llamado “*Traite de la Lumiere*” sobre la teoría de ondas de luz, en donde formuló las bases de las leyes de reflexión y refracción que establecen:

- Cuando la luz se refleja desde una superficie suave ocurre una reflexión especular, donde rayos paralelos son reflejados en la misma dirección.
- Cuando la luz se refleja de una superficie rugosa ocurre una reflexión difusa, donde rayos paralelos son reflejados en una variedad de direcciones.

El ejemplo más sencillo es el espejo plano, donde un haz de rayos de luz paralelos puede cambiar de dirección completamente en conjunto y continuar siendo un haz de rayos paralelos, pudiendo producir así una imagen virtual de un objeto con el mismo tamaño y forma que el real.

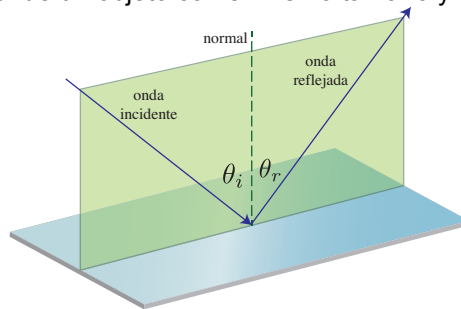


Figura1: Plano de reflexión en una superficie especular.

Para determinar el campo de visión de un sistema catadióptrico, partiendo del hecho de que la cámara tiene una resolución finita, se puede hacer el análisis de cada uno de los pixeles que componen la matriz de sensores de la cámara a manera de determinar la línea de visión de estos por medio de la superficie especular en un análisis inverso, es decir: se tiene información del vector de luz reflejado y el punto de incidencia al seguir la línea de visión de cada uno de los sensores de la cámara, sin embargo, no se tiene idea de el vector del vector de luz que incide en ese punto.

Considerando un modelo de cámara “*Pinhole*”, con un punto de convergencia en el origen, podemos definir la superficie especular en el marco de referencia de la cámara (en el origen), como una función de curva cualquiera.

Sea entonces $f(x, y, z,) \in \mathbb{R}^3$ una función que define a la curva de la superficie especular y $p_i = f(x_i, y_i, z_i,)$ el punto de análisis i -ésimo de incidencia de luz sobre la superficie especular. Se tiene para dicho punto que el vector de máxima variación de la superficie en dirección de las componentes del sistema referencial de la cámara está dado por el vector gradiente, correspondiente con el campo vectorial de todas las normales a la superficie dado por:

$$n_i = \nabla f(x, y, z,) = \left[\frac{\partial f(\cdot)}{\partial x}, \frac{\partial f(\cdot)}{\partial y}, \frac{\partial f(\cdot)}{\partial z} \right]^T \quad 1$$

El vector de luz reflejada v_i que va del punto de incidencia p_i al origen del sistema de coordenadas de la cámara está dado por:

$$v_i = T(\alpha, \beta, \gamma, dx, dy, dz)p_i \quad 2$$

Donde $T(\alpha, \beta, \gamma, dx, dy, dz)$ es la matriz de transformación dada la configuración del espejo en función de los ángulos de rotación α, β, γ y desplazamiento d_x, d_y, d_z

El ángulo θ_r que forma el vector de reflexión v_i respecto a la normal n_i lo podemos calcular a partir de la relación del producto interno entre estos vectores, tenemos así:

$$\begin{aligned} v_i \cdot n_i &= |v_i| |n_i| \cos \theta_r \\ \cos \theta_r &= \frac{v_i \cdot n_i}{|v_i| |n_i|} \end{aligned} \quad 3$$



$$\theta_r = \theta_i = \arcsin \left(\frac{v_i \cdot n_i}{|v_i| |n_i|} \right) \quad 4$$

Sea u_i el vector de luz incidente. El plano donde viven los vectores v_i , u_i y n_i puede ser definido por un vector normal a_i a dicho plano, para obtener este vector normal al plano de los vectores de reflexión y de luz incidente, está dado por el producto cruz, a manera que

$$a_i = \begin{bmatrix} (v_y n_z - v_z n_y) \\ (v_z n_x - v_x n_z) \\ (v_x n_y - v_y n_x) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3 \quad 5$$

Dado que u_i y v_i son equi-angulares al vector n_i y además comparten el plano, comparten también la misma proyección sobre el vector normal n_i y solo difieren en la dirección del componente ortogonal a n_i en el plano. La proyección de v_i en n_i esta proyección está dada por:

$$\text{Proy}_{u_i(n_i)} = \text{Proy}_{v_i(n_i)} = \frac{v_i \cdot n_i}{|n_i|} \quad 6$$

Sea \bar{v}_i el componente ortogonal al vector n_i a manera que

$$\bar{v}_i = v_i - \text{Proy}_{v_i(n_i)} \quad 7$$

Considerando a u_i y v_i de la misma magnitud, es fácil ver que

$$u_i = \text{Proy}_{v_i(n_i)} - \bar{v}_i \quad 8$$

La unión de todos los vectores u_i forman el campo de visión del sistema catadióptrico.

3. DISEÑO DEL SISTEMA

Analizando el caso en dos dimensiones, se ve el efecto de variación del campo de visión al colocar el espejo un poco cargado hacia la izquierda del campo de visión original de la cámara. se ve como se obtiene una perspectiva en dirección contraria a la de la cámara pero con algunas oclusiones de la misma cámara.

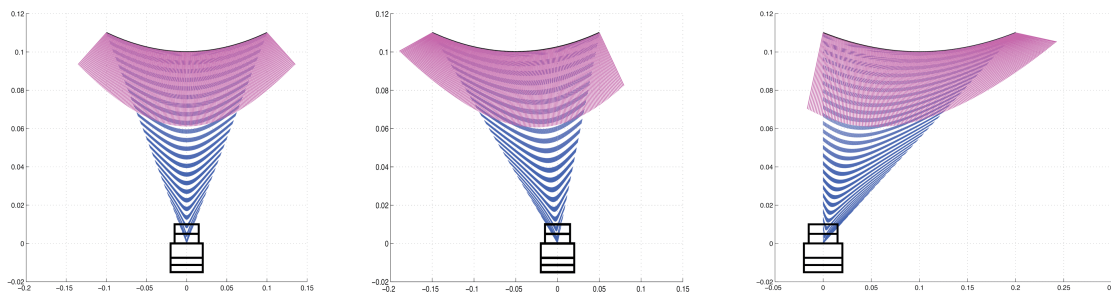


Figura 2: Simulación de la variación del ángulo de visión dada una geometría parabólica especular (MATLAB). Las líneas azules son las líneas directas de visión de la cámara, las líneas rosas son las líneas de visión por el reflejo de los espejos.



Como se puede ver en la figura 3, parte del ambiente acuático periférico es refractado en la superficie de uno de los espejos, permitiendo así al sistema obtener información sobre el entorno cumpliendo así uno de los objetivos principales. Sin embargo, también se puede ver que el sistema sufre de deformaciones ópticas debido a la geometría de la superficie reflejante, además de oclusión de la fuente luminosa por el cuerpo del robot y altos puntos de brillo en la superficie especular en el peor de los casos

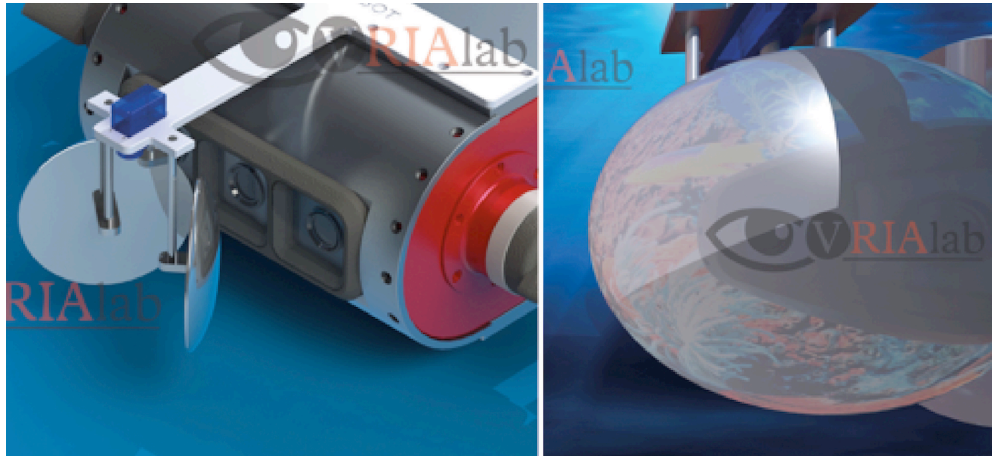


Figura3: Dibujo conceptual de la plataforma MEXIBOT con un sistema de espejos reconfigurable.

Actualmente, se desarrolla la metodología para la interpretación visual de las imágenes obtenidas a través de un espejo de geometría irregular, así como el diseño de una plataforma para pruebas en tierra.

4. CONCLUSIONES

Un sistema catadióptrico puede aumentar el ángulo de visión de una cámara considerablemente. Al añadir un sistema de espejos, se ganan las ventajas de un sistema de percepción activo sin modificar sustancialmente el diseño de la plataforma robótica. Añadir un sistema discreto de espejos, incrementa el peso de la plataforma en menor medida que añadir un sistema de cámaras para trabajo en profundidades. Conociendo la función geométrica del espejo y su configuración frente a la cámara, es posible determinar una correspondencia en líneas de visión, un efecto similar a tener una cámara en diferente posición.

BIBLIOGRAFÍA (ARIAL, bold, 10 pt. justificado a la izquierda)

1. X. Tao, H. Cho, and F. Janabi-Sharifi, "Active optical system for variable view imaging of micro objects with emphasis on kinematic analysis," *Appl. Opt.*, vol. 47, no. 22, pp. 4121–4132, Aug 2008.
2. S. Nayar, "Catadioptric omnidirectional camera," *Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings*, pp. 482–488, Jun 1997.
3. X. Tao and H. Cho, "Design of variable view imaging system for active observation of micro object," *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1785–1789, October 2007.