

## ESTRATEGIA DE SENSADO Y CONTROL PARA APLICACIONES EN ROBÓTICA MÓVIL MEDIANTE UN SISTEMA DE VISIÓN OMNIDIRECCIONAL

Flavio Roberti<sup>1</sup>, Raquel Frizera Vassallo<sup>2</sup>, Ricardo Carelli<sup>1</sup>, Teodiano Freire Bastos Filho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Automática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan  
Av. San Martín (Oeste) 1109, 5400, San Juan – Argentina.*

<sup>2</sup>*Dpto. de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo  
Av. Fernando Ferrari 514, Vitória – E.S. – Brasil.*

E-mails: [froberti@inaut.unsj.edu.ar](mailto:froberti@inaut.unsj.edu.ar), [raquel@ele.ufes.br](mailto:raquel@ele.ufes.br),  
[rcarelli@inaut.unsj.edu.ar](mailto:rcarelli@inaut.unsj.edu.ar), [teodiano@ele.ufes.br](mailto:teodiano@ele.ufes.br)

**Resumen** Este trabajo presenta una estrategia de sensado visual para aplicaciones de robótica móvil, utilizando un sistema de visión omnidireccional catadióptrico. Mediante esta estrategia es posible obtener la información de posición y orientación de los robots en el marco de referencia del sistema de visión procesando las imágenes panorámicas obtenidas a partir de la rectificación de las imágenes omnidireccionales adquiridas por el sistema de visión. Se presentan también los resultados obtenidos en el proceso de validación de la estrategia propuesta y un algoritmo de control de formación para robots móviles basado en la información de postura de los robots obtenida mediante el sistema de visión catadióptrico.

**Palabras clave:** Visión omnidireccional, rectificación de imágenes omnidireccionales, robótica coordinada.

### 1. INTRODUCCIÓN

Gran cantidad de aplicaciones en robótica usan la visión como sensor principal, ya que a través de esta es posible obtener grandes cantidades de información del medio ambiente realizando mediciones sin interferencia, o mejor aún, sin contacto físico.

Sin embargo, algunas aplicaciones como vigilancia, tele operación, videoconferencia, navegación, reconstrucción de entornos entre otras, se verían favorecidas con la expansión del campo visual de la cámara, lo que permitiría capturar más información del medio ambiente. Esto puede ser conseguido a través de sistemas omnidireccionales, los cuales permiten la captura de imágenes con 360° de campo visual horizontal. Estas imágenes pueden ser obtenidas usando una única cámara que rota respecto de su propio eje, o usando un conjunto de cámaras orientadas en diferentes direcciones o a través de los sistemas catadióptricos (Yagi, 1999).

Los sistemas catadióptricos están formados por la

unión de una cámara y un espejo convexo, tal como se muestra en la Figura 1(a). La imagen capturada por la cámara presenta una distorsión debido a la reflexión en el espejo, pero permite visualizar toda la región alrededor de la cámara.

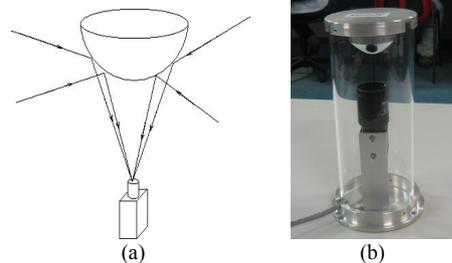


Figura 1. Sistema de visión. (a) Ejemplo de un sistema catadióptrico. (b) Sistema de visión omnidireccional catadióptrico utilizado.

Actualmente, muchos sistemas de visión omnidireccional han sido utilizados en robótica móvil debido a la ventaja que representa tener un gran campo de visión. Además de facilitar la visualización de todo el entorno alrededor del robot,

las imágenes omnidireccionales son de gran utilidad en la reconstrucción de entornos, navegación, cálculo de flujo óptico y evasión de obstáculos (Gaspar, 2003), (Matsumoto et al., 2003), (Vassallo et al., 2002), (Vassallo et al., 2005).

Asimismo, las imágenes omnidireccionales también representan una buena opción de sensado para aplicaciones de robótica móvil cooperativa. Si en un grupo de robots, por lo menos uno de ellos posee un sistema de visión omnidireccional a bordo, este adquiere la habilidad de localizar a los demás robots del grupo, obteniendo sus respectivas posturas representadas en su propio sistema de referencia. Esta es la idea abordada en el presente trabajo, en el cual se propone una estrategia de sensado para aplicaciones de robótica móvil cooperativa utilizando solamente visión omnidireccional. Sobre cada robot del grupo se coloca un cilindro con tres sectores coloridos de  $120^\circ$  cada uno. La visualización de estos sectores coloridos y el tamaño de sus áreas son utilizados para la estimación de la postura de cada robot.

La estrategia propuesta permite estimar tanto la posición como la orientación de cada robot del grupo con relación al robot que posee el sistema de visión a bordo, llamado robot líder. Estas informaciones serán utilizadas para el cálculo de las acciones de control necesarias para que el conjunto de robots se desplace coordinadamente por el espacio de trabajo.

Una de las ventajas de esta propuesta es que permite la localización de todo el grupo de robots a través de una sola imagen y que el grupo puede estar constituido por robots de la misma altura, sin la necesidad de tener un líder más alto a los fines de permitir una completa visualización del resto de los robots del grupo.

Este trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se presenta el sistema de visión omnidireccional utilizado y en la Sección 3 se describe el preprocesamiento de las imágenes mediante su rectificación para la obtención de las imágenes panorámicas. En la Sección 4 se describe la estrategia propuesta para la estimación de la postura de los robots observados. Algunas experiencias realizadas para validar el método propuesto se muestran en la Sección 5. En la Sección 6 se propone un algoritmo de control de formación para robots móviles basado en la información obtenida mediante la estrategia de sensado presentada, y finalmente, en la Sección 7 se presentan las conclusiones del trabajo.

## 2. SISTEMA DE VISIÓN OMNIDIRECCIONAL

Un sistema de visión omnidireccional catadióptrico está formado por una cámara de video convencional y un espejo convexo para lograr un campo de visión de  $360^\circ$  con una sola imagen. Además, estos sistemas generalmente resultan ser de tamaños adecuados para aplicaciones de robótica móvil.

Existen diversas formas geométricas que podrían utilizarse en los espejos de sistemas de visión catadióptricos, pero son aquellos que poseen centro único de proyección los que permiten obtener imágenes panorámicas sin distorsión a partir de las imágenes omnidireccionales (Baker and Nayar, 1998).

En el presente trabajo se utilizó un sistema de visión catadióptrico integrado por un espejo hiperbólico y una cámara CCD color convencional de proyección de perspectiva, cuyo eje óptico se encuentra alineado con el eje del espejo. Debido a que los espejos hiperbólicos poseen centro único de proyección, este sistema de visión permite la reconstrucción de imágenes panorámicas sin distorsión, además de la buena distribución de resolución que presentan los espejos hiperbólicos con respecto a otras geometrías posibles. En la Figura 1(b) se muestra el sistema de visión omnidireccional catadióptrico utilizado.

## 3. RECTIFICACIÓN DE LA IMAGEN OMNIDIRECCIONAL

Un sistema de visión omnidireccional mapea el ambiente existente a su alrededor en una imagen en coordenadas polares. Es usual que, dependiendo de la aplicación, sea necesario transformar la imagen omnidireccional en coordenadas polares en otra imagen, a través de un re-mapeo de los píxeles. Este proceso se denomina rectificación de la imagen, a través del cual se puede obtener, por ejemplo, una imagen panorámica, la cual es de más fácil interpretación para el ser humano.

Dicho proceso de rectificación se basa en el hecho de que cuando el eje óptico de la cámara está alineado con el eje del espejo, los puntos del ambiente 3D de igual altura e igual distancia al sistema de visión, se proyectan en la imagen formando una circunferencia. Es así que los puntos de igual distancia y diferentes alturas del espacio 3D se proyectan en la imagen formando circunferencias concéntricas. Por lo tanto, la rectificación se realiza mapeando las coordenadas del ángulo del sistema polar en la imagen omnidireccional adquirida en el eje horizontal del sistema cartesiano de la imagen panorámica resultante, y las coordenadas del radio del sistema polar en el eje vertical del sistema cartesiano. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de los resultados del proceso de rectificación explicado.

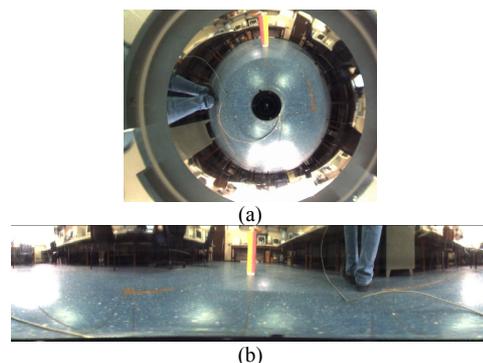


Figura 2. Resultado del proceso de rectificación. (a) Imagen omnidireccional. (b) Imagen panorámica.

#### 4. ESTRATEGIA DE SENSADO

En la implementación de diversos algoritmos de control para robots móviles autónomos, suele ser necesario disponer de la posición y orientación de los robots en el marco de referencia solidario al sistema de visión. Se pretende obtener esta información de postura utilizando exclusivamente el sistema de visión omnidireccional. La imagen omnidireccional obtenida se transforma a una imagen panorámica y sobre ésta se efectúan los procesos de preprocesamiento, segmentación, descripción, reconocimiento e interpretación; que permiten determinar los ángulos  $\alpha$  y  $\varphi$ , y la distancia  $Z$  que se muestran en la Figura 3.

Para poder determinar la posición y orientación de los robots se colocó sobre éstos un cilindro de dimensiones conocidas, el cual fue dividido en tres partes iguales (cada una ocupando  $120^\circ$  de la circunferencia total del cilindro) para obtener tres áreas coloridas ( $A1, A2, A3$ ).

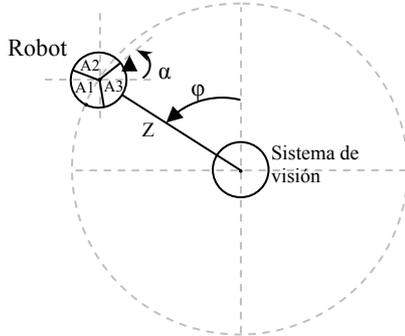


Figura 3. Definición de las variables a detectar por la estrategia de sensado.

El ángulo  $\varphi$  puede determinarse simplemente por la posición en la que se encuentra el cilindro en la imagen panorámica obtenida a partir de la transformación de la imagen omnidireccional, esto es:

$$\varphi = f_1(x) = -\frac{360}{I_w} x + 180 ; x = \frac{x_1 A^1}{A^1 + A^2} + \frac{x_2 A^2}{A^1 + A^2} \quad (1)$$

donde  $x_1, x_2$  son las coordenadas  $x$  de cada color visible del cilindro en la imagen panorámica;  $A^1, A^2$  son las áreas visibles de cada color en la imagen;  $I_w$  es la dimensión horizontal de la imagen panorámica en píxeles. Esta expresión puede ser fácilmente obtenida si se considera que  $\varphi = 0^\circ$  cuando el cilindro es detectado en el centro de la imagen panorámica y considerando también que  $\varphi$  toma valores positivos cuando se producen giros antihorarios del cilindro respecto del sistema de visión (cilindro detectado en la mitad izquierda de la imagen) y negativos cuando se producen giros en el sentido horario (cilindro detectado en la mitad derecha de la imagen). En otras palabras, el ángulo  $\varphi$  tomará valores en el rango  $[-\pi; \pi]$ .

Las posiciones  $x_1$  y  $x_2$  se determinan encontrando los centros de masa de cada color visible del cilindro, segmentado en la imagen panorámica completa. Luego se coloca una ventana centrada en dichos

centros de masa y se repite el proceso dentro de esta región de la imagen. De esta forma se reduce la influencia del ruido que pueda existir en la imagen. Este procedimiento claramente no otorgará buenos resultados en el caso en que los colores del cilindro se encuentren en los distintos extremos de la imagen, cosa que podría ocurrir cuando el cilindro es detectado con  $\varphi$  próximo a  $\pi$ . Situación que se ilustra en la Figura 4 (a). Esto se resuelve cambiando la forma de cálculo del ángulo  $\varphi$ , de la siguiente manera.

$$\varphi = \frac{\varphi_1 A^1}{A^1 + A^2} + \frac{\varphi_2 A^2}{A^1 + A^2} \quad (2)$$

$$\text{si } |x_1 - x_2| > \frac{I_w}{2} \Rightarrow$$

$$\varphi_1 = f_2(x_1) = \begin{cases} -\frac{360}{I_w} x_1 + 180 & \text{si } x_1 \leq \frac{I_w}{2} \\ -\frac{360}{I_w} x_1 + 540 & \text{si } x_1 > \frac{I_w}{2} \end{cases}$$

$$\varphi_2 = f_2(x_2) = \begin{cases} -\frac{360}{I_w} x_2 + 180 & \text{si } x_2 \leq \frac{I_w}{2} \\ -\frac{360}{I_w} x_2 + 540 & \text{si } x_2 > \frac{I_w}{2} \end{cases}$$

$$\text{si } |x_1 - x_2| < \frac{I_w}{2} \Rightarrow \varphi_i = f_1(x_i) = -\frac{360}{I_w} x_i + 180$$

De este modo se logra considerar el rango de variación para ángulo  $\varphi$  entre  $[-\pi; \pi]$  ó  $[0; 2\pi]$  según convenga en cada caso.

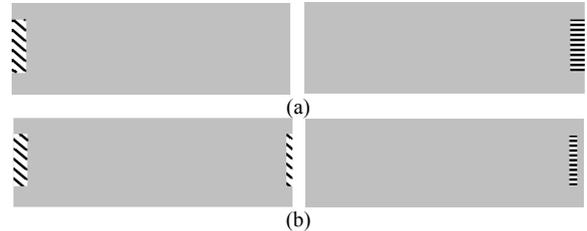


Figura 4. Imágenes panorámicas segmentadas.

En el caso de que uno de los colores visibles se encuentre dividido (Figura 4(b)), se agrega un nuevo inconveniente en la determinación de la posición  $x_i$  del color seccionado. Para solucionarlo, se considera que no se podrá encontrar ningún color integrante del cilindro en la región de la imagen centrada en el centro de masa del color detectado en la imagen completa. Si esto ocurre, se procesan por separado los dos extremos de la imagen, y se determina la posición del color detectado de la siguiente manera: asumiendo que los colores encontrados están en los bordes de la imagen,

$$x_i = x_{i1} - (I_w - x_{i2}); \text{si } x_i < 0 \Rightarrow x_i = I_w + x_i \quad (3)$$

Luego se procede al cálculo del ángulo  $\varphi$  como se explicó anteriormente.

En el proceso de determinación de la distancia  $Z$  entre el sistema de visión del robot líder y el cilindro colorido perteneciente al robot se consideraron dos situaciones distintas –cabe aclarar que siempre será necesario conocer las dimensiones del cilindro, ya que con una sola cámara no se dispone de percepción

de profundidad-. La primera de ellas (válida para cualquier posición del robot seguidor) fue utilizando, previa calibración del sistema, la medida en píxeles de la dimensión horizontal del cilindro medida en la imagen panorámica. Para ello se utiliza el modelo “pin-hole” de la cámara :

$$x = \lambda \frac{X}{Z} \Rightarrow Z = \lambda \frac{X}{x} \quad (4)$$

donde  $x$  es la dimensión horizontal del cilindro medido en la imagen [píxeles];  $X$  es la dimensión horizontal real del tubo [metros];  $Z$  es la distancia entre el tubo y el sistema de visión [metros]; y  $\lambda$  es la distancia focal de la cámara [píxeles].

A los fines de obtener mayor precisión en las mediciones de la distancia  $Z$  se repite el cálculo, utilizando toda el área del cilindro para los casos en que con el primer método se obtiene  $Z > 65 \text{ cm}$  (distancia a la cual se puede ver la totalidad del cilindro en la imagen capturada). Este valor de  $Z$  límite fue obtenido experimentalmente. Para este nuevo cálculo se utiliza la relación:

$$a = \lambda^2 \frac{A}{Z^2} \Rightarrow Z = \lambda \sqrt{\frac{A}{a}} \quad (5)$$

donde  $a$  es el área del tubo medida en la imagen [píxeles];  $A$  es el área real del tubo que se proyecta en la imagen (diámetro x altura) [metros]

De esta forma, con la medida de distancia entre el sistema de visión y el cilindro, y el ángulo  $\varphi$ , se pueden determinar las coordenadas  $x$  e  $y$  del robot en el marco de referencia asociado al sistema de visión

Por último, el ángulo de orientación del cilindro  $\alpha$  se obtiene a partir de la proporción de colores visibles ( $A_1, A_2, A_3$ ), de la rotación relativa del cilindro respecto del sistema de visión, y del conocimiento a priori de la ubicación de cada uno de los colores, según el algoritmo que se presenta en la Figura 5.

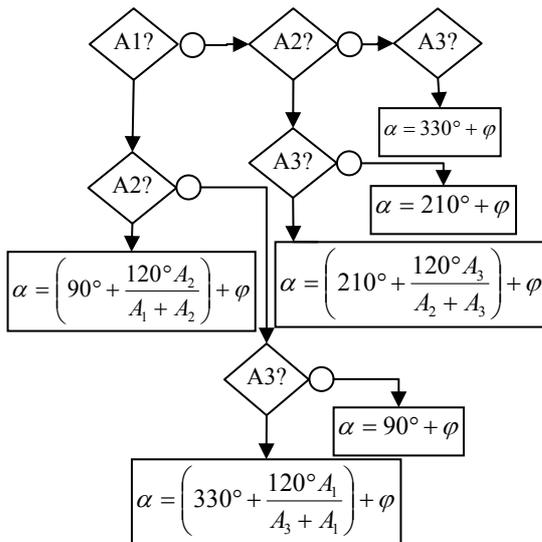


Figura 5. Algoritmo de cálculo para el ángulo  $\alpha$ .

#### 5. VALIDACIÓN DEL MÉTODO

A los fines de evaluar el desempeño de la estrategia

propuesta, se adquirieron 50 imágenes con diferentes posiciones y orientaciones del cilindro que posteriormente debiera colocarse sobre un robot móvil. Estas imágenes fueron luego procesadas siguiendo la metodología explicada. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

La Figura 6 muestra los resultados para la medición de la distancia  $Z$ . La Figura 7 muestra los resultados de la medición del ángulo de orientación  $\alpha$ . Se observa que en la medición de la distancia  $Z$  se producen errores de hasta un 10% y en la medición del ángulo  $\alpha$  se producen errores que, en su mayoría, están por debajo de los 10 grados.

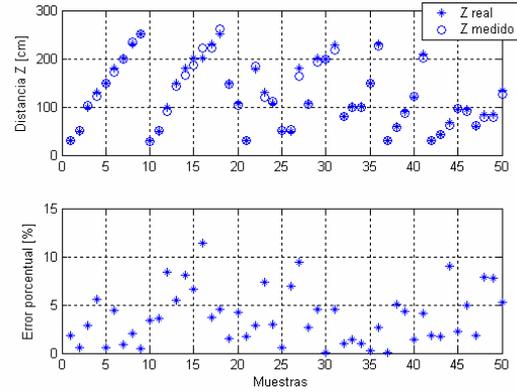


Figura 6. Medición de la distancia  $Z$ .

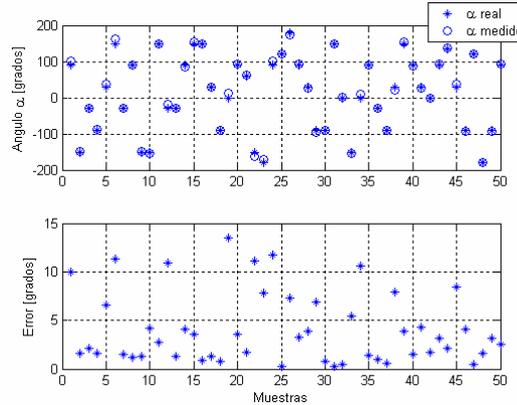


Figura 7. Medición del ángulo  $\alpha$ .

#### 6. ALGORITMO DE CONTROL

En esta Sección se presenta un algoritmo de control de formación para robots móviles, basado en la información de postura de los robots obtenida mediante la estrategia de sensado propuesta en las Secciones anteriores. Para ello se considera que el sistema de visión catadióptrico se encuentra posicionado en el centro del sistema de coordenadas asociado al robot líder, y que cada uno de los restantes robots integrantes del grupo posee un cilindro coloreado, como se explicó en la Sección 4.

El error de formación se define de la siguiente manera (Kelly et al., 2004; Carelli et al, 2006):

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{y}_d - \mathbf{y} \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_d = \mathbf{y}(\xi_d); \quad \mathbf{y} = \mathbf{y}(\xi) = \mathbf{y}(\xi_d - \tilde{\xi})$$

con  $\xi = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \dots \quad \xi_n]^T$ ;  $\xi_i = [x_i \quad y_i]^T$ ;  
 $\xi_d = [\xi_{d1} \quad \xi_{d2} \quad \dots \quad \xi_{dn}]^T$ ;  $\xi_{di} = [x_{di} \quad y_{di}]^T$ .

donde  $x_i, y_i$  son las coordenadas del  $i$ -ésimo robot en el marco de referencia asociado al robot líder;  $x_{di}, y_{di}$  son las coordenadas de la ubicación deseada dentro de la formación para el  $i$ -ésimo robot en el marco de referencia asociado al robot líder;  $y$  es la variable de salida, la cual captura información sobre el estado (postura, forma, momentos, etc.) del grupo de robots;  $y_d$  es la variable de salida deseada.

La función  $y(\xi)$  se define de modo que es continua y diferenciable, y la matriz Jacobiana  $J$  en la siguiente relación:

$$\dot{y} = J(\xi)\dot{\xi} \quad ; \quad J(\xi) = \frac{\partial y(\xi)}{\partial \xi} \in \mathbb{R}^{2n \times 2n} \quad (7)$$

es de rango completo. En el presente trabajo se utilizará la siguiente definición de la variable de salida:

$$y(\xi) = \xi = [x_1 \ y_1 \ x_2 \ y_2 \ \dots \ x_n \ y_n]^T \quad (8)$$

El objetivo de control consiste en hacer llegar los robots móviles a la formación deseada definida por  $y_d$ . Formalmente, el objetivo de control consiste en satisfacer:  $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{y}(t) = 0$ .

Como primer paso, un vector con velocidades de referencia para los robots es especificado como una función del tiempo calculada como sigue:

$$\dot{\xi}_r = J^{-1}(\xi) \{ \dot{y}_d + f_{\tilde{y}}(\tilde{y}) \} \quad (9)$$

Donde  $f_{\tilde{y}}(\tilde{y})$  es una función de saturación sobre el error de salida, tal que  $x^T f_{\tilde{y}}(x) > 0$  para todo  $x \neq 0$ .

El vector  $\dot{\xi}_r$  representa las velocidades que debería tener cada robot de la formación (excepto el líder, que evoluciona con una ley propia fijando la trayectoria), en el sistema de referencia asociado al robot líder, para alcanzar la formación deseada.

Suponiendo que los robots alcanzan exactamente la velocidad de referencia, es decir que  $\dot{\xi} \equiv \dot{\xi}_r$ , de la Ec. (9) se obtiene la siguiente ecuación de lazo cerrado:

$$\tilde{y} + f_{\tilde{y}}(\tilde{y}) = 0 \quad (10)$$

Introduciendo la siguiente función candidata de Lyapunov y su derivada temporal en las trayectorias del sistema representado por la Ec. (10):

$$V = \frac{1}{2} \tilde{y}^T \tilde{y} \quad ; \quad \dot{V} = \tilde{y}^T \dot{\tilde{y}} = -\tilde{y}^T f_{\tilde{y}}(\tilde{y}) < 0 \quad (11)$$

resulta claro que el sistema en lazo cerrado tiene estabilidad asintótica,  $\tilde{y}(t) \rightarrow 0$  con  $t \rightarrow \infty$ . Esta condición es verificada para el caso ideal en que los robots sigan exactamente su velocidad de referencia. Esto no es así para un controlador real, el cual eventualmente alcanza la velocidad de referencia asintóticamente. La convergencia del error de control a cero bajo esta condición real será analizada al final de esta sección.

Hasta ahora se ha probado la convergencia del error de formación en el marco de referencia asociado al robot líder pero, como éste tiene una velocidad propia, debe entonces sumarse un vector  $\dot{\xi}_s$  al vector

$\dot{\xi}_r$  para generar el movimiento deseado que permita seguir al líder y mantener la formación,

$$\dot{\xi}_r = \dot{\xi}_r + \dot{\xi}_s \quad (12)$$

Donde el vector  $\dot{\xi}_s$  es la velocidad en el marco de referencia global del punto de posición deseada  $(x_{di}, y_{di})$ , debida a la velocidad del robot líder, que puede calcularse a partir del conocimiento de las velocidades lineal y angular del robot líder y de las coordenadas de la posición deseada  $(x_{di}, y_{di})$ :

$$r_1 = \frac{v'}{\Omega} \quad ; \quad r_{2i} = \sqrt{(r_1 + x_{di})^2 + y_{di}^2}$$

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{y_{di}}{r_1 + x_{di}}\right) \quad ; \quad |\dot{\xi}_{si}| = \Omega r_{2i}$$

$$\dot{\xi}_{ssi} = |\dot{\xi}_{si}| \cos\left(\beta_i + \frac{\pi}{2}\right) \quad ; \quad \dot{\xi}_{syi} = |\dot{\xi}_{si}| \sin\left(\beta_i + \frac{\pi}{2}\right)$$

Donde  $r_1$  y  $r_{2i}$  son los radios de giro virtuales del marco de referencia móvil y del vector  $\xi_{di}$  respectivamente,  $v'$  y  $\Omega$  son las velocidades lineal y angular respectivamente del robot líder. El subíndice  $i$  hace referencia a cada uno de los integrantes del sistema multirobot, excepto el robot líder. Esta situación se ilustra en la Figura 8.

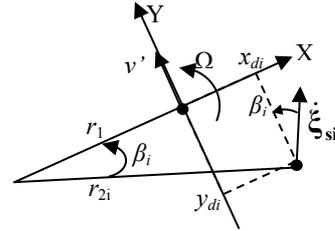


Figura 8. Cálculo de la velocidad del punto  $\xi_{di}$ .

Las acciones de control para la velocidad lineal y rotacional del robot serán calculadas para asegurar que el robot alcance la velocidad de referencia asintóticamente. La ley de control propuesta para el control de dirección es:

$$\omega_{ci} = k_{\omega i} f(\tilde{\alpha}_i) + \dot{\alpha}_{ri} + \Omega \quad (13)$$

donde,  $\tilde{\alpha}_i = \alpha_{ri} - \alpha_i$  es el error angular entre el  $i$ -ésimo robot y la dirección de la velocidad deseada;  $\dot{\alpha}_{ri}$  es la variación temporal de la dirección de la velocidad deseada;  $\Omega$  es la velocidad angular del robot líder;  $f(\tilde{\alpha}_i)$  es una función de saturación sobre el error de dirección de la velocidad del robot, tal que  $x f(x) > 0$ ; y  $k_{\omega i}$  es una constante positiva.

Considerando la Ec. (13) y el modelo cinemático de un robot en un marco de referencia móvil, se obtiene la ecuación de lazo cerrado,

$$k_{\omega i} f(\tilde{\alpha}_i) + \dot{\tilde{\alpha}}_i = 0 \quad (14)$$

Tomando la siguiente función candidata de Lyapunov y su derivada temporal:

$$V = \frac{1}{2} \tilde{\alpha}_i^2 \quad ; \quad \dot{V} = \tilde{\alpha}_i \dot{\tilde{\alpha}}_i = -k_{\omega i} \tilde{\alpha}_i f(\tilde{\alpha}_i) < 0 \quad (15)$$

Lo cual implica que  $\tilde{\alpha}_i(t) \rightarrow 0$  con  $t \rightarrow \infty$ .

La ley de control propuesta para el control de la velocidad lineal es:

$$v_{c_i} = \left| \dot{\xi}_{r_i} \right| \cos \tilde{\alpha}_i \quad (16)$$

La cual obviamente logrará que  $v_{c_i} \rightarrow \left| \dot{\xi}_{r_i} \right|$ , ya que se ha probado que  $\tilde{\alpha}_i(t) \rightarrow 0$ . El factor  $\cos \tilde{\alpha}_i$  se agregó para evitar acciones de control elevadas cuando el error de orientación es grande.

De este modo, en el diseño del controlador se ha probado que  $\dot{\xi} - \dot{\xi}_r = \rho$  con  $\rho(t) \rightarrow \mathbf{0}$  (convergencia asintótica de las velocidades). Ahora la Ec. (10) se puede escribir como:

$$\dot{\tilde{y}} + \mathbf{f}_y(\tilde{y}) = \mathbf{J}\rho \quad (17)$$

Considerando la siguiente función candidata de Lyapunov y su derivada temporal:

$$V = \frac{1}{2} \tilde{y}^T \tilde{y}; \dot{V} = \tilde{y}^T \dot{\tilde{y}} = -\tilde{y}^T \mathbf{f}_y(\tilde{y}) + \tilde{y}^T \mathbf{J}\rho \quad (18)$$

Por lo que una condición suficiente para que la función  $\dot{V}$  sea definida negativa es que:  $\|\tilde{y}\| > \|\mathbf{J}\|\|\rho\|$ , y como  $\rho(t) \rightarrow \mathbf{0}$ , esto implica que  $\|\tilde{y}(t)\| \rightarrow 0$ .

### 6.1 Resultados de simulación

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos durante la experiencia en simulación del algoritmo de control de formación presentado anteriormente. Para ello se consideró un sistema integrado por tres robots, un líder que sigue una trayectoria arbitraria y dos seguidores.

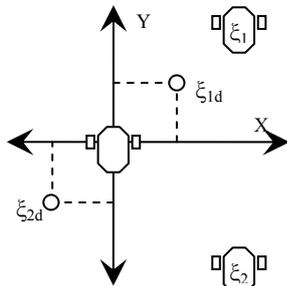


Figura 9: Condición inicial y formación deseada.



Figura 10: Errores de control de formación.

En la Figura 10 se puede observar la evolución de la norma del error de formación  $\|\tilde{\xi}_1\|; \|\tilde{\xi}_2\|$ .

## 7 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una estrategia de sensado visual para aplicaciones en navegación autónoma de robots móviles, utilizando un sistema de visión omnidireccional catadióptrico. Se propuso también un algoritmo de control estable para la navegación en formación de un grupo de robots móviles, basado en

la información de postura obtenida mediante el sistema de visión.

Mediante la estrategia de sensado presentada es posible obtener la posición y orientación de un robot en el marco de referencia del sistema de visión, colocando sobre el robot un cilindro coloreado de dimensiones conocidas. Las principales ventajas de utilizar un sistema catadióptrico radican en el hecho de que este permite establecer cualquier formación deseada  $\xi_d$  para la navegación coordinada del grupo de robots, ya que estos nunca quedarán fuera del campo visual del robot líder, y que todo el grupo de robots puede ser detectado con una sola imagen. Además, la rectificación a panorámica de las imágenes adquiridas y la utilización del cilindro descrito permite la utilización de robots de igual altura sin la necesidad de disponer de un líder más alto. Los resultados obtenidos en el proceso de validación del método muestran que su desempeño es aceptable para las aplicaciones de robótica móvil para las que fue diseñado. Conjuntamente se obtuvieron buenos resultados en las simulaciones del algoritmo de control, quedando como trabajo futuro la implementación del sistema propuesto para un grupo real de robots.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las Agencias SPU de Argentina y CAPES de Brasil (Proyecto N° 018/04) por otorgar el financiamiento necesario para que el presente trabajo pueda desarrollarse.

### REFERENCIAS

- Baker S., Nayar S. K., "A Theory of Catadioptric Image Formation", Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision, Bombay, India, pp. 3542, (1998).
- Carelli R., De la Cruz C., Roberti F., "Centralized formation control of non-holonomic mobile robots", Latin American Applied Research, **36**, 6369 (2006).
- Gaspar J., "Omnidirectional Vision for Mobile Robot Navigation", Phd Thesis, Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico, (2003).
- Kelly, R., Carelli R., Ibarra Zannatha J., y Monroy C., "Control de una pandilla de robots móviles para el seguimiento de una constelación de puntos objetivo", VI Congreso Mexicano de Robótica, COMRob, Torreón, México, (2004).
- Matsumoto Y., Ikeda K., Inaba M., Inoue H., "Exploration and navigation in corridor environment based on omniview sequence", IROS 2000, pp 1505-1510, (2000).
- Vassallo R., Santos-Victor J., Schneebeli H., "A general approach for egomotion estimation with omnidirectional images", IEEE Workshop on Omnidirectional Vision 2002, pp 97-103, (2002).
- Vassallo R., Franca A., Schneebeli H., "Detecção de obstáculos através de um Fluxo Óptico Padrão obtido a partir de imagens omnidirecionais", SBAI/IEEE-LARS (2005).
- Yagi Y., "Omnidirectional sensing and its applications", IEICE Transactions on Information and Systems, E82D(3):568-579, (1999).