

## Sistema de visión cámara en mano aplicable a la automatización en producción agrícola.

Miguel A. Salinas Cobián\* Emilio J. González Galván\*  
 Roberto Bartali M.\*\* J. Antonio Cárdenas Galindo\*  
 Mauro E. Maya Méndez\* Alejandro González de Alba\*

\* Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
 Facultad de Ingeniería

San Luis Potosí, San Luis Potosí  
 México (e-mail: miguelcobian05@gmail.com).

\*\* Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
 Facultad de Ciencias  
 San Luis Potosí, San Luis Potosí  
 México.

Resumen: Debido a la creciente demanda de sistemas automatizados para la recolección de cultivos, se ha planteado el desarrollo de un sistema de visión que pueda guiar a un robot manipulador en la recolección de hortalizas bajo la metodología de control conocida como manipulación en espacio de cámara (CSM por sus siglas en inglés). Una característica de este método es que los requerimientos de calibración del sistema de visión y del robot son mínimos, lo que lo hace apropiado para aplicaciones en ambientes no estructurados y de difícil acceso como los que se encuentran en cultivos, inclusive en invernaderos, que es el caso del presente trabajo. La metodología CSM se ha aplicado típicamente utilizando cámaras fijas que apuntan al espacio de trabajo de un robot manipulador. Dadas las condiciones donde se espera que opere el sistema propuesto, donde el producto que se desea cosechar puede estar oculto total o parcialmente para los sensores usados en la realización de la maniobra, la opción de incluir cámaras al extremo de un robot manipulador resulta atractiva. En este artículo se plantea una extensión de la metodología citada para un sistema de visión en configuración cámara en mano, incluyendo una metodología para la detección de objetivos de maniobra y un análisis del error del método en tareas de posicionamiento que permita validar el potencial de aplicación en el caso de producción agrícola.

*Palabras clave* : Control, Visión, Automatización, Producción agrícola.

### 1. INTRODUCCIÓN

Como se presenta en (Hutchinson et al., 1996) y (Muis y Ohnishi, 2005) existen dos tipos de configuraciones típicas dentro de los sistemas de control por visión: cámara fija y cámara en mano. La diferencia principal entre estas configuraciones radica en la ubicación de las cámaras respecto al actuador del robot. Mientras que en la configuración cámara fija se tienen cámaras estáticas observando casi a la totalidad del espacio de trabajo del robot, en la configuración de cámara en mano se tienen cámaras montadas en el efector final del robot observando sólo una porción del espacio de trabajo de éste, como se ejemplifica en la Figura 1.

La configuración cámara en mano es indispensable en sistemas de visión aplicados a la horticultura, por ejemplo (Van-Hente y Hemming, 2002; Satoshi et al., 2014; Hemming y Wouter-Bac, 2014), debido a que la visión de las cámaras puede ser obstruida por hojas y se requiere obtener diversas perspectivas del espacio de trabajo.

\* Agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.

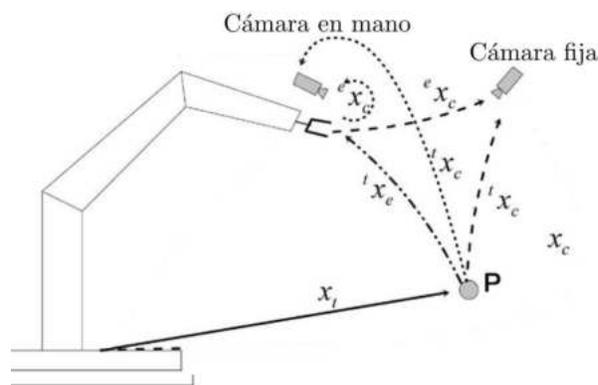


Figura 1. Configuración cámara en mano y cámara fija. (Muis y Ohnishi, 2005).

Concebida en el año 1987 (Skaar et al., 1987), la metodología de control de robots por visión de CSM ha demostrado su utilidad en tareas que involucran el control de la posición y orientación de robots manipuladores en un espacio tridimensional y de la que se han derivado diversas variantes en su uso. Por ejemplo, el uso de múltiples

sensores en el posicionamiento de un robot manipulador (González-Galván et al., 2001), la implementación de un control de impedancia combinado con control por visión (Bonilla et al., 2010), un sistema de reconocimiento de superficies arbitrarias (Ramírez, 2018), etc.; en cada caso se ha utilizado una configuración de cámara fija. Debido que hasta el momento no se había presentado un problema que requiriera de un sistema de visión que fuera capaz de detectar objetivos ocultos dentro del espacio de cámara, no se había planteado una metodología CSM para sistemas en configuración cámara en mano. En este trabajo se plantea la variante de manipulación en espacio de cámara para sistemas en configuración cámara en mano (EIH-CSM), además del desarrollo de un sistema de visión con un grado de precisión apropiado para una aplicación como la cosecha de hortalizas. Se concibe en este caso al sistema como uno consistente de un robot manipulador montado en una base móvil, de modo que pueda desplazarse de una planta a otra. Un sistema de visión y su correspondiente análisis de imágenes será capaz de detectar al fruto maduro, aprovechando características como la forma, color o tamaño de dicho producto. La ubicación del centroide de ese fruto en el espacio de la imagen de dos o más cámaras usadas para la maniobra se constituirá como punto objetivo para ser alcanzado por el robot manipulador usando una herramienta de sujeción y corte. En este artículo se detalla la metodología para que, usando la información de la ubicación del objetivo en cada una de las imágenes, se determine la posición tridimensional del objetivo y de ahí, la configuración del robot que permita alcanzar al producto que se desea cosechar.

## 2. MODELO LINEAL DE CSM

### 2.1 Parámetros de visión

Para el desarrollo del sistema en configuración cámara en mano se propone el modelo lineal de CSM descrito por Rendón-Mancha et al. (2010), el cual utiliza un modelo de cámara de perspectiva.

$$x_{ci} = \frac{P_{11}x_i + P_{12}y_i + P_{13}z_i + P_{14}}{P_{31}x_i + P_{32}y_i + P_{33}z_i + 1} \quad (1)$$

$$y_{ci} = \frac{P_{21}x_i + P_{22}y_i + P_{23}z_i + P_{24}}{P_{31}x_i + P_{32}y_i + P_{33}z_i + 1} \quad (2)$$

En las ecuaciones (1) y (2) las variables  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  representan la posición tridimensional de un punto  $i$  respecto a un sistema de coordenadas global;  $x_{ci}$  y  $y_{ci}$  son sus correspondientes coordenadas bidimensionales con respecto a un sistema coordenado en el centro de la imagen obtenida por la cámara y finalmente  $P_{11}$  a  $P_{33}$  representan a los parámetros lineales de visión.

Reacomodando las ecuaciones anteriores se obtiene una variante recursiva del modelo lineal (3) y (4), como sigue:

$$x_{ci} = P_{11}x_i + P_{12}y_i + P_{13}z_i + P_{14} - P_{31}x_{ci}x_i - P_{32}x_{ci}y_i - P_{33}x_{ci}z_i \quad (3)$$

$$y_{ci} = P_{21}x_i + P_{22}y_i + P_{23}z_i + P_{24} - P_{31}y_{ci}x_i - P_{32}y_{ci}y_i - P_{33}y_{ci}z_i \quad (4)$$

Considerando  $m$  mediciones tanto de la posición tridimensional de puntos conocidos, así como su respectiva ubicación en la imagen, es posible obtener un modelo lineal de la forma  $Y = AX$  como sigue:

$$Y = [x_{c1} \ y_{c1} \ \cdots \ x_{cm} \ y_{cm}]^T \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{c1}x_1 & -x_{c1}y_1 & -x_{c1}z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -y_{c1}x_1 & -y_{c1}y_1 & -y_{c1}z_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_m & y_m & z_m & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_{cm}x_m & -x_{cm}y_m & -x_{cm}z_m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_m & y_m & z_m & 1 & -x_{cm}x_m & -y_{cm}y_m & -y_{cm}z_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$X = [P_{11} \ P_{12} \ P_{13} \ P_{14} \ P_{21} \ P_{22} \ P_{23} \ P_{24} \ P_{31} \ P_{32} \ P_{33}]^T \quad (7)$$

Considerando  $m$  muestras, es posible obtener valores óptimos del vector de parámetros de visión, los cuales son diferentes para cada cámara, a través de una estimación por mínimos cuadrados como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\hat{\mathbf{X}} = [A^T A]^{-1} [A^T Y] \quad (8)$$

### 2.2 Estimación de la posición de un punto objetivo

La posición tridimensional de un punto dentro del espacio observado por al menos dos cámaras puede obtenerse al minimizar la función descrita a continuación.

$$\phi = \sum_{k=1}^{n_c} [x_c^{(k)} - f_x(x, y, z; P^{(k)})]^2 + [y_c^{(k)} - f_y(x, y, z; P^{(k)})]^2 \quad (9)$$

Donde:

$$f_x(x, y, z; P^{(k)}) \equiv (P_{11}^{(k)} - P_{31}^{(k)} x_c^{(k)})x + (P_{12}^{(k)} - P_{32}^{(k)} x_c^{(k)})y + (P_{13}^{(k)} - P_{33}^{(k)} x_c^{(k)})z + P_{14}^{(k)} \quad (10)$$

$$f_y(x, y, z; P^{(k)}) \equiv (P_{21}^{(k)} - P_{31}^{(k)} y_c^{(k)})x + (P_{22}^{(k)} - P_{32}^{(k)} y_c^{(k)})y + (P_{23}^{(k)} - P_{33}^{(k)} y_c^{(k)})z + P_{24}^{(k)} \quad (11)$$

Las variables  $x, y, z$  simbolizan la posición tridimensional de un objeto dentro del espacio de visión de las cámaras,  $P$  representa el vector de parámetros asociado a cada cámara y el superíndice ( $k$ ) define las mediciones y parámetros de visión asociados con la  $k^{\text{ésima}}$  cámara.

La suma se realiza hasta  $n_c$  que es el número de cámaras apuntando al mismo punto objetivo.

La condición necesaria para la minimización de la función escalar  $\phi$ , conduce a la solución para  $(x, y, z)$  en la ecuación (13):

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = B^{-1}V \quad (13)$$

Donde B es una matriz simétrica cuyos componentes se describen como:

$$\begin{aligned} B_{11} &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{11}^{(k)} - P_{31}^{(k)} x_c^{(k)})^2 + (P_{21}^{(k)} - P_{31}^{(k)} y_c^{(k)})^2 \\ B_{12} = B_{21} &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{11}^{(k)} - P_{31}^{(k)} x_c^{(k)})(P_{12}^{(k)} - P_{32}^{(k)} x_c^{(k)}) + \\ &\quad (P_{21}^{(k)} - P_{31}^{(k)} y_c^{(k)})(P_{22}^{(k)} - P_{32}^{(k)} y_c^{(k)}) \\ B_{13} = B_{31} &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{11}^{(k)} - P_{31}^{(k)} x_c^{(k)})(P_{13}^{(k)} - P_{33}^{(k)} x_c^{(k)}) + \\ &\quad (P_{21}^{(k)} - P_{31}^{(k)} y_c^{(k)})(P_{23}^{(k)} - P_{33}^{(k)} y_c^{(k)}) \\ B_{22} &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{12}^{(k)} - P_{32}^{(k)} x_c^{(k)})^2 + (P_{22}^{(k)} - P_{32}^{(k)} y_c^{(k)})^2 \\ B_{23} = B_{32} &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{12}^{(k)} - P_{32}^{(k)} x_c^{(k)})(P_{13}^{(k)} - P_{33}^{(k)} x_c^{(k)}) + \\ &\quad (P_{22}^{(k)} - P_{32}^{(k)} y_c^{(k)})(P_{23}^{(k)} - P_{33}^{(k)} y_c^{(k)}) \\ B_{33} &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{13}^{(k)} - P_{33}^{(k)} x_c^{(k)})^2 + (P_{23}^{(k)} - P_{33}^{(k)} y_c^{(k)})^2 \end{aligned} \quad (14)$$

Y los componentes del vector V son:

$$\begin{aligned} V_1 &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{11}^{(k)} - P_{31}^{(k)} x_c^{(k)})(x_c^{(k)} - P_{14}^{(k)}) + \\ &\quad (P_{21}^{(k)} - P_{31}^{(k)} y_c^{(k)})(y_c^{(k)} - P_{24}^{(k)}) \\ V_2 &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{12}^{(k)} - P_{32}^{(k)} x_c^{(k)})(x_c^{(k)} - P_{14}^{(k)}) + \\ &\quad (P_{22}^{(k)} - P_{32}^{(k)} y_c^{(k)})(y_c^{(k)} - P_{24}^{(k)}) \\ V_3 &= \sum_{k=1}^{n_c} (P_{13}^{(k)} - P_{33}^{(k)} x_c^{(k)})(x_c^{(k)} - P_{14}^{(k)}) + \\ &\quad (P_{23}^{(k)} - P_{33}^{(k)} y_c^{(k)})(y_c^{(k)} - P_{24}^{(k)}) \end{aligned} \quad (15)$$

La configuración del robot de 6 grados de libertad se evalúa utilizando el modelo cinemático inverso del robot, disponible en el controlador del mismo, de manera que se asegura el posicionamiento del efecto final, manteniendo una orientación fija de la herramienta del robot respecto al sistema coordinado unido a la base del mismo.

### 3. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE CÁMARA

El equipo seleccionado para este proyecto es un robot FANUC modelo LR mate 200iC (Figura 2); para la metodología presentada en este trabajo se considera solamente al robot manipulador que en un entorno real estaría colocado sobre una plataforma móvil. Adicionalmente se usan dos cámaras logitech c270 con una resolución de 1.2 megapíxeles.

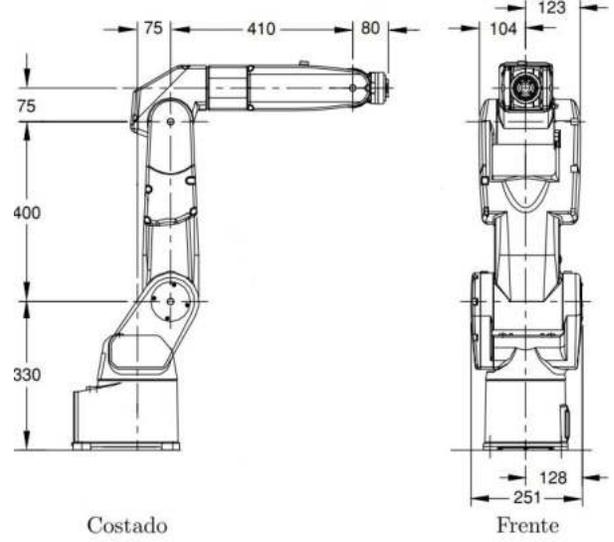


Figura 2. Medidas en milímetros del robot FANUC LR mate 200iC.

Con el objeto de obtener muestras que permitan la evaluación de los parámetros de visión de cada cámara se ubica, dentro del espacio de trabajo del robot, un marco con puntos que sean visibles a los sensores, cada uno con una ubicación tridimensional conocida (Figura 3). De estos puntos se obtiene su posición tridimensional respecto al sistema coordinado en el efector final, asumiendo que éste es el sistema coordinado global del sistema de visión. Esto se hace con la finalidad de poder simular virtualmente un espacio móvil unido al extremo del robot. La Figura 4 muestra que al desplazar el efector final a una posición arbitraria los puntos virtuales se desplazan manteniendo su relación respecto al extremo del robot.

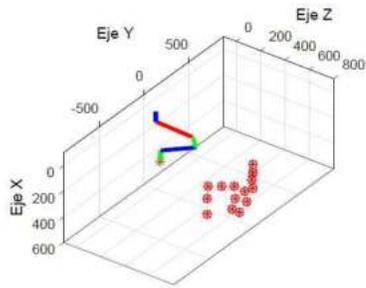


Figura 3. Marco con puntos dentro del espacio de trabajo del robot.

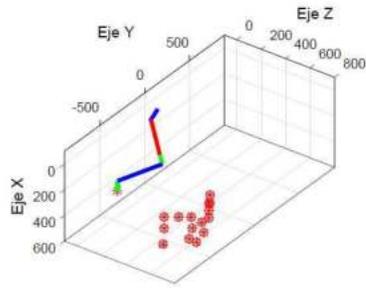
Para simular este espacio se mantienen fijas las coordenadas de los puntos muestra respecto al sistema coordinado en el extremo del robot. Las coordenadas fijas no cambian sin importar la configuración del manipulador por lo que, al seleccionar un valor de juntas aleatorio, el marco virtual sigue al efector final y a las cámaras.

Las configuraciones del robot usadas para simular el espacio móvil unido al efector se muestran en la Tabla 1.

Si se supone que el marco virtual de puntos muestra sigue al efector final y a las cámaras, se puede llegar a la conclusión de que las coordenadas de los puntos muestra no cambian respecto al sistema coordinado en la imagen.



(a) Configuración 1.



(b) Configuración 2.

Figura 4. Simulación de espacio móvil unido al efector final.

Tabla 1. Posición y orientación del efector final para la simulación del efector final.

Parámetro	Configuración 1	Configuración 2
$x$	365.213	365.223
$y$	0.000	-494.208
$z$	38.5498	39.295
$w$	-90.003	-90.001
$p$	42.136	42.133
$r$	-90.001	-90.003

Los centroides de los puntos en cada cámara se ilustran en las Figuras 5 y 6.



Figura 5. Detección de centroides en la cámara izquierda.

Una vez obtenidas las coordenadas tridimensionales de los puntos muestra respecto al efector final y las coordenadas bidimensionales referidas al sistema en el centro de la imagen, se realiza la estimación de parámetros de visión para cada cámara. Los parámetros de visión son mostrados en la Tabla 2.



Figura 6. Detección de centroides en la cámara derecha.

Tabla 2. Parámetros de visión de las cámaras involucradas.

Parámetros de visión	Cámara izquierda (L)	Cámara derecha (R)
$P_{11}$	0.40564	0.14743
$P_{12}$	-14.57357	-11.23900
$P_{13}$	-13.67305	-14.850946
$P_{14}$	1319.12463	-736.60452
$P_{21}$	19.93199	18.57295
$P_{22}$	1.57595	1.65640
$P_{23}$	-1.06608	-1.11321
$P_{24}$	-1721.95503	-1473.76827
$P_{31}$	0.00116	0.00130
$P_{32}$	-0.01035	-0.01143
$P_{33}$	0.01045	0.00804

Tabla 3. Resultados del error del sistema de visión.

Criterio	$x$ (mm)	$y$ (mm)	$z$ (mm)
Error máximo absoluto por eje:	1.72	2.76	2.07
Error mínimo absoluto por eje:	0.004	0.10	0.41
Error promedio por eje:	0.62	0.65	0.83

Estos parámetros de visión son válidos para cualquier configuración que puedan tomar las juntas del robot ya que, al realizar la estimación de parámetros respecto al sistema coordinado en el efector final, ninguna de las mediciones involucradas cambia.

#### 4. ERROR DE POSICIONAMIENTO DEL SISTEMA DE VISIÓN

Para cada punto muestra se estima su posición tridimensional por medio de las mediciones realizadas con cada cámara. Se obtiene una diferencia entre la posición estimada y la posición medida de cada punto, esta diferencia se considera como el error del sistema de visión. En la Tabla 3 se muestran los criterios del error evaluados. La Figura 7 muestra los puntos medidos y estimados referidos al sistema en el efector final del robot.

Debido a la magnitud del error máximo, se puede decir que los parámetros de visión estimados son los correctos. Adicionalmente la magnitud de este error es compatible con una aplicación como la de recolección de tomates.

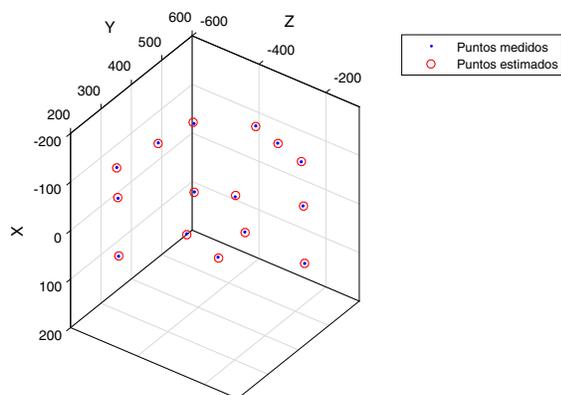


Figura 7. Gráfica de puntos medidos contra estimados.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El diagrama de bloques siguiente ejemplifica el proceso que se sigue para una tarea de posicionamiento del robot manipulador.

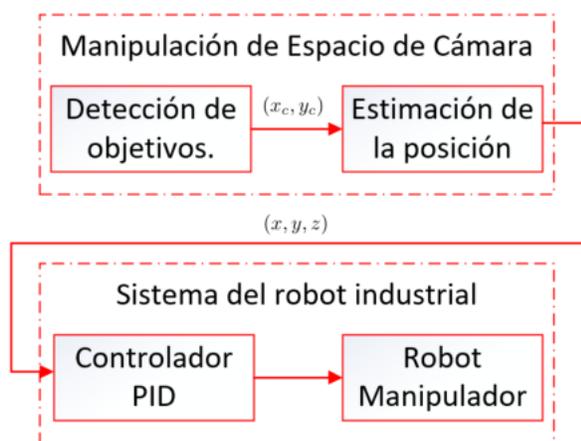


Figura 8. Diagrama de bloques del sistema de control por visión.

Para verificar el funcionamiento adecuado del sistema de visión se colocan dos esferas de color rojo (simulando en este caso un jitomate) frente al robot. Estas esferas se colocan de manera que las cámaras sólo puedan observar una a la vez. La utilización de las esferas se hace con el objetivo de validar una primera aproximación al problema de detección. En experimentos futuros se usarán frutos maduros reales.

En la Figura 9 se observa una imagen de las esferas dentro del espacio de trabajo del robot.

La detección de las esferas rojas se realiza por medio de un algoritmo de tratamiento de imágenes especializado. Como resultado de dicho algoritmo se obtiene una imagen binarizada con la cual se pueden obtener los centroides de las proyecciones de las esferas en la imagen.

Con las coordenadas en la imagen de cada cámara se estima la posición del objetivo respecto al sistema en el efector final y, utilizando el modelo cinemático del robot,

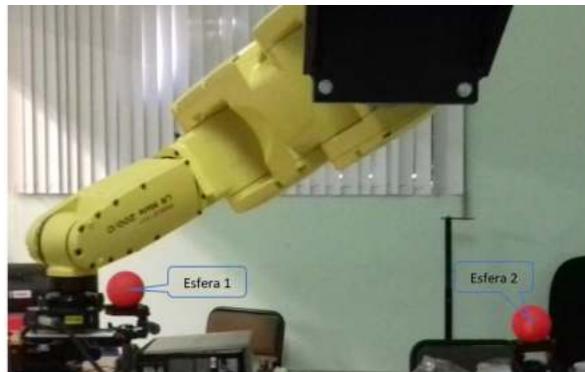


Figura 9. Esferas colocadas dentro del espacio de trabajo del robot.

se puede referir esta posición al sistema coordinado unido a la base del robot. Las mediciones obtenidas se muestran en la Tabla 4 para ambas esferas.

Tabla 4. Valores para la estimación de la posición de las esferas.

	Configuración del manipulador $\theta$ (Grados)	Posición del centroide (cámara L)		Posición del centroide (cámara R)	
		$x_c$ (Píxeles)	$y_c$ (Píxeles)	$x_c$ (Píxeles)	$y_c$ (Píxeles)
Esfera 1	$J_1$	57.53			
	$J_2$	39.41			
	$J_3$	-49.19	-95.24	-66.97	-78.00
	$J_4$	-64.28			-111.79
	$J_5$	69.46			
	$J_6$	-96.06			
Esfera 2	$J_1$	-48.55			
	$J_2$	24.66			
	$J_3$	-58.60	50.63	-240.39	102.03
	$J_4$	52.99			-281.92
	$J_5$	69.82			
	$J_6$	-156.72			

Las coordenadas estimadas de cada esfera respecto a la base del robot se observan en la Tabla 5.

Tabla 5. Coordenadas tridimensionales de las esferas respecto a la base del robot.

	x (mm)	y (mm)	z (mm)
Esfera 1	423.19	465.44	625.59
Esfera 2	481.48	-364.96	565.95

Para verificar las coordenadas estimadas de los puntos objetivo respecto a la base del robot, se hace uso del mismo robot manipulador. En este caso, como no se puede posicionar al efector final del robot en el centro geométrico del objetivo, a la coordenada  $z$  se establece una separación de -300 milímetros para la primera esfera y -200 milímetros para la segunda esfera, mientras que a las coordenadas  $x$  y  $y$  se les da el valor proveniente de la estimación.

En las Figuras 10 y 11 se ven las coordenadas del efector final respecto a la base del robot.

Se mide la distancia que existe entre el efector final y cada una de las esferas a lo largo del eje  $z$  en la base del robot. Se verifican, en las Figuras 12 y 13, las separaciones dadas al efector final.

## 6. CONCLUSIONES

En este artículo se propone una extensión de la metodología CSM lineal, con la finalidad del desarrollo de sistemas

```

World                               Tool:10
Configuration: F U T, 0, 0, 0
x: 423.024 y: 465.005 z: 325.046
w: -90.002 p: 42.133 r: -90.004

```

Figura 10. Posición del extremo del robot a 300 mm de distancia de la esfera 1 a lo largo del eje Z.

```

World                               Tool:10
Configuration: F U T, 0, 0, -1
x: 481.879 y: -364.503 z: 365.951
w: -90.005 p: 42.137 r: -90.002

```

Figura 11. Posición del extremo del robot a 200 mm de distancia de la esfera 2 a lo largo del eje Z.



Figura 12. Medición de la separación entre el efector final del robot y la esfera 1.



Figura 13. Medición de la separación entre el efector final del robot y la esfera 2.

de visión con una configuración de cámara en mano. Una de las ventajas más importantes de esta variante es la facilidad de ubicar objetivos que puedan estar ocultos en una cierta posición de las cámaras. Esto debido a que, a diferencia de los sistemas con cámara fija, los sistemas cámara en mano pueden obtener distintas perspectivas de un mismo espacio de trabajo.

Las pruebas experimentales mostraron una coincidencia entre la separación establecida para la posición de las esferas con respecto al robot y las mediciones realizadas. Esto permite validar que esta metodología es aplicable al

caso de cámara en mano. En el mismo sentido, con base en la pruebas experimentales y al análisis del error en la estimación de la posición de los puntos muestra, se puede afirmar que el nivel de precisión es apropiado para el tipo de maniobra propuesta en este trabajo.

Es importante resaltar la simplicidad del algoritmo desarrollado, la facilidad de calibración y el empleo de cámaras disponibles comercialmente a un costo reducido. Estos aspectos son apropiados para una aplicación en condiciones en las que la puesta en operación y mantenimiento del sistema pueden ser demandantes por las condiciones del entorno.

Finalmente, algunos problemas que se pueden presentar al momento de llevar este sistema de visión a un invernadero pueden ser la variación de luz en el entorno del tomate, la identificación de ramas u hojas marchitas en lugar de tomates, el bloqueo del campo de visión de las cámaras por la vegetación, etc. También algo importante a resolver es la trayectoria que debe seguir el robot para lograr detectar la mayor cantidad de tomates, además del acercamiento de la herramienta al producto a cosechar.

## REFERENCIAS

- Bonilla, I., González-Galván, E.J., Chávez-Olivares, C., Mendoza, M., Loredo-Flores, A., Reyes, F., y Zhang, B. (2010). A vision-based, impedance control strategy for industrial robot manipulators. *6th annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, 216–221.
- González-Galván, E.J., Ramirez, S.R.C., y García, H.M.D. (2001). Aplicación de sensores múltiples para el posicionamiento tridimensional de robots usando visión. *Interciencia*, 26, 541–546.
- Hemming, J. y Wouter-Bac, C. (2014). A robot for harvesting sweet-pepper in greenhouses. *International Conference of Agricultural Engineering*.
- Hutchinson, S., Hagger, G.D., y Corke, P.I. (1996). A tutorial on visual servo control. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, 12, 651–670.
- Muis, A. y Ohnishi, K. (2005). Eye-to-hand approach on eye-in-hand configuration within real-time visual servoing. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, 10, 404–410.
- Ramírez, A. (2018). *Sistema de teleoperación sobre superficies arbitrarias con visión no calibrada*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Rendón-Mancha, J.M., Cárdenas, A., García, M.A., González-Galván, E., y Lara, B. (2010). Robot positioning using camera-space manipulation with a linear camera model. *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, 4, 726–733.
- Satoshi, Y., Hayashi, S., Hirotaka, Y., y Kobayashi, K. (2014). Development of a stationary robotic strawberry harvester with a picking mechanism that approaches the target fruit from below. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, 3(48), 216–269.
- Skaar, S.B., Brockman, W.H., y Hanson, R. (1987). Camera-space manipulation. *The International Journal of Robotics Research*, 6, 20–32.
- Van-Hente, E.J. y Hemming, J. (2002). An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses. *Autonomous Robots*, 13, 241–158.