



Ingeniería Mecánica

E-ISSN: 1815-5944

revistaim@mecanica.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio

Echeverría

Cuba

González-Rodríguez, René; Hernández-Santana, Luís; Izaguirre, Eduardo; Rubio, Ernesto  
Estrategia de control para robots manipuladores con realimentación visual y plataforma electro-  
neumática de 3gdl

Ingeniería Mecánica, vol. 14, núm. 3, septiembre-diciembre, 2011, pp. 245-257

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría

Ciudad de La Habana, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=225121518008>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Estrategia de control para robots manipuladores con realimentación visual y plataforma electro-neumática de 3gdl

René González-Rodríguez, Luís Hernández-Santana, Eduardo Izaguirre, Ernesto Rubio

Recibido el 29 de junio de 2011; aceptado el 27 de agosto de 2011

### Resumen

En este artículo se presenta un esquema de control en el espacio de tarea para dos estructuras robóticas diferentes, una plataforma electro-neumática de tres grados de libertad y un sistema servovisual. El esquema de control está basado en la medición del espacio de tarea del sistema. Consta de dos lazos en cascada. En el lazo interno se ejecuta el control articular y en el externo el control en el espacio de tarea. Se presenta el análisis de estabilidad y los resultados experimentales que corroboran el buen funcionamiento del sistema propuesto en un robot manipulador y una plataforma electro-neumática de tres grados de libertad. El esquema presentado abre un nuevo campo de investigación en el área del control en el espacio de tarea para resolver problemas de control de trayectoria y control anticipatorio.

**Palabras claves:** control en el espacio de tarea, control servo visual, robot paralelo.

### Control Scheme for robots manipulators visual servoing and 3DOF electro-pneumatic platform

### Abstract

In this paper a control scheme in the task space is presented for a 3DOF Electro-Pneumatic Platform and Servo-visual System. The control scheme is based on the measurement of system task space state. The control system considers two loops in cascade, an internal loop solving the robot's joint control and an external loop the task space control. A stability analysis is developed under the conditions that it is possible to approximate the dynamic effect of the internal loop as an external loop time delay. To illustrate the proposed controller, the control system stability and its performance, experimental results using a 3DOF pneumatic parallel robot and servo-visual system are presented. Experimental results confirm the expected step response in the task space. The control scheme presented opens a new research field in the task space control with algorithms for the solution of trajectory control and feed-forward control.

**Key words:** task space control, visual servoing, parallel robot.

## Introducción

La robótica ha sido un paradigma para la ciencia en las últimas décadas. En los inicios, los esfuerzos de los científicos se consagraron a la solución del problema de controlar el movimiento de robots en ambientes estructurados, con soluciones de control en el espacio de las articulaciones. Estas soluciones se basan en señales brindadas por sensores acoplados a cada actuador articular. En muchos casos estas estructuras de control resultan en sistemas desacoplados por cada articulación, con, en general, una pobre respuesta ante incertidumbres. En otra dirección, los esquemas de control basados en el espacio de tarea tienen capacidad potencial de una respuesta superior ante incertidumbres del sistema: inercia, errores de modelación, fricción, tareas no estructuradas, etc. No obstante, en este caso se necesita la estimación del espacio de tarea; o la medición directa del mismo, lo que implica el uso de sensores no convencionales.

El objetivo de este trabajo es mejorar el comportamiento de sistemas robóticos industriales que operan en ambientes pobremente estructurados y con amplias incertidumbres. La solución propuesta se basa en un esquema de control cinemático en el espacio de tarea [1]. Varios autores han reportado soluciones para controlar estructuras cinemáticas en el espacio de tarea: control de robots paralelos [2, 3], adaptativos capaces de asumir las incertidumbres cinemáticas [4] o para seguimiento de trayectoria sin la necesidad de medir las velocidades articulares [5-7].

El sistema de control propuesto en este artículo consta de dos lazos en cascada, en el lazo interno se ejecuta el control articular y en el lazo externo es implementado el control en el espacio de tarea [1, 8]. La estrategia de control parte del principio de diseñar la respuesta dinámica del lazo interno más rápida que el lazo externo, de forma tal que su efecto pueda ser despreciado o aproximado a uno o dos retardos de muestreo del lazo externo. En este trabajo se evalúa el comportamiento del esquema de control en una plataforma electro-neumática de tres grados de libertad, utilizada por SIMPRO como simulador de movimientos espaciales y en un robot manipulador que porta en mano una cámara para seguimiento de objetos [9].

En el sistema servo-visual se considera el problema del control de robots manipuladores en 2D y 3D. En ambos una sola cámara está montada en la mano del manipulador que proporciona información visual del espacio de tarea, con el objetivo de mover al robot manteniendo la imagen del objeto seguido (una esfera) en el centro del plano de la imagen. En el control 3D el radio constante se usa también como una característica de la imagen. Un análisis de estabilidad en el tiempo discreto es desarrollado a partir de una aproximación lineal de la dinámica de la cámara. El control opera como un sistema tipo regulador, considerándose el movimiento del objeto como una perturbación. Como validación el control propuesto es implementado en un robot manipulador ASEA IRB6 con una cámara JAI CV-252 en mano, demostrándose su estabilidad y desempeño experimentalmente.

En el caso de la plataforma se busca la obtención de un sistema de control que satisfaga las exigencias de aplicaciones de dicho sistema en simuladores de conducción de bajo costo. Una solución de control articular es presentada por Izaguirre [10], donde el control opera como servo sistema y sus prestaciones son demostradas en experimentos reales. Esta aplicación demanda de una solución compleja para los lazos articulares, pues los sistemas neumáticos son altamente no lineales. En este trabajo se utiliza la metodología desarrollada por Rubio [11]. Para la medición del espacio de tarea se utilizan diversos sensores de posición: potenciómetros, encoders, laser y ultrasónicos. Mientras que para mediciones angulares se usa una Unidad de Medición Inercial (IMU) del tipo MTI.

El trabajo se ha organizado de la siguiente forma: primeramente son presentados los conceptos generales de modelación, incluyendo las soluciones de los modelos de los sistemas sensoriales del espacio de tarea de ambos sistemas. A continuación se hace la formulación de un único problema de control, pasando luego a la presentación del esquema de control a ser implementado en ambos sistemas, seleccionando el regulador y demostrando su estabilidad, válida para los dos ejemplos en análisis. En el siguiente epígrafe se explican los detalles de la implementación práctica y se muestran los resultados experimentales. Finalmente se dan las conclusiones e ideas de trabajos futuros.

## Modelos matemáticos de sistemas robóticos

Como paso previo a la realización de cualquier esquema de control es necesario disponer de una descripción matemática del sistema a controlar. En el presente trabajo se propone aplicar el mismo esquema de control a dos sistemas diferentes. Un sistema servo-visual, figura 1.a; y una plataforma robótica paralela, figura 1.b. Se parte del principio de que el lazo final de control estará basado de la medición directa del espacio de tarea. Esta medición es hecha en el sistema servo-visual con una cámara que se mueve solidaria con el extremo de un manipulador y mediante una IMU (*Inertial Measurement Unit*) y sensores de posición articular (*encoders*),

la plataforma. En cada caso la información sensorial se expresa en espacio de tareas del robot, no en el espacio articular.

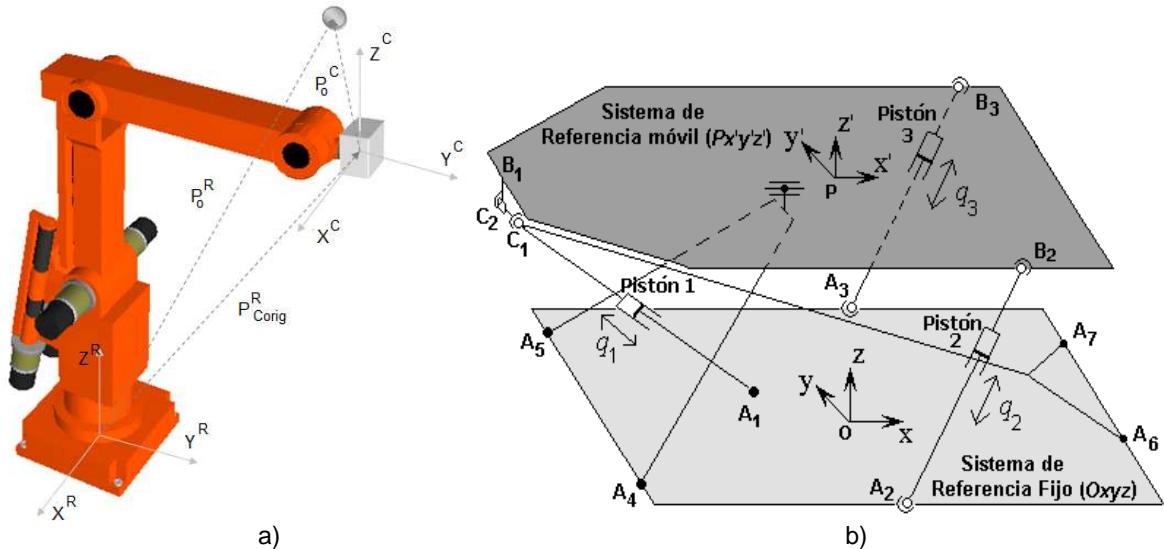


Figura 1. Sistema robótico para implementación de esquema de control en el espacio de tarea, a) Sistema servovisual, b) Electro-neumática de tres grados de libertad.

### Modelo cinemático de los robots

La cinemática de los robots nos ofrece la relación entre las posiciones articulares  $q$  y la correspondiente posición lineal ( $x, y, z$ ) y posición angular ( $\theta, \varphi, \psi$ ) de la herramienta final. Para un robot con  $n$ -ejes rígidos, la solución de la cinemática directa,  $\mathbf{f}(q_1, q_2, \dots, q_n)$ , puede ser calculada para cualquier robot, independientemente del número de articulaciones [12]. Una representación matemática genérica puede ser:

$$[x \ y \ z \ \theta \ \varphi \ \psi]^T = \mathbf{f}(q_1, q_2, \dots, q_n) = \mathbf{T} \quad (1)$$

Para los robots paralelos esta solución normalmente demanda la utilización de soluciones numéricas por su alta complejidad [13].

En otra dirección, la solución de la cinemática inversa,  $\mathbf{f}^{-1}(T)$ , nos proporciona las variables articulares,  $q$ , necesarias para alcanzar una determinada posición de la herramienta [12]. Una representación matemática genérica de la cinemática inversa puede ser:

$$[x \ y \ z \ \theta \ \varphi \ \psi]^T = \mathbf{f}(q_1, q_2, \dots, q_n) = \mathbf{T}^{-1} \quad (2)$$

### Modelo dinámico de los robots

Por las ecuaciones de Lagrange-Euler, en ausencia de fricción en las articulaciones y desestimando la dinámica de los motores y otras perturbaciones, para un manipulador rígido de  $n$  grados de libertad, el modelo dinámico, para robot series [14] y para robot paralelos [15] tiene la forma general:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (3)$$

Donde:

- $M(q)$   $n \times n$  Matriz de inercia simétrica definida positiva
- $q$   $n \times 1$  Vector de movimientos articulares
- $C(q, \dot{q})$   $n \times 1$  Vector de fuerza o torque centripeta y Coriolis
- $g(q)$   $n \times 1$  Vector de fuerza o torque gravitacional
- $\tau$   $n \times 1$  Vector de fuerza o torque aplicado al robot

### Modelo de la cámara en sistemas servovisuales

Se considera una cámara de video montada en el extremo operativo del robot con el sistema coordenado  $\Sigma_C$ , el cual se mueve en el espacio de tareas del robot caracterizado por el sistema coordenado del robot  $\Sigma_R$ ,  $\langle X^R, Y^R, Z^R \rangle$ , espacio de tarea. El origen del sistema coordenado de la cámara con respecto al sistema coordenado del robot se representa por el vector  $P_{Corg}^R$  con coordenadas  $[P_{xc}^R \ P_{yc}^R \ P_{zc}^R]^T \in \mathbb{R}^3$ .

Los puntos de interés en el espacio de trabajo se identifican como  $P_o^C$  con coordenadas  $[P_{xo}^C \ P_{yo}^C \ P_{zo}^C]^T \in \mathbb{R}^3$  en el sistema coordenado de la cámara  $\Sigma_C$ , y  $P_o^R = [P_{xo}^R \ P_{yo}^R \ P_{zo}^R]^T \in \mathbb{R}^3$  en el sistema coordenado del robot  $\Sigma_R$ .

La imagen adquirida por la cámara contiene un arreglo bidimensional con la proyección de la escena 3D. Esta imagen permite el procesamiento computacional y la extracción de las características del espacio de tarea. Para la presentación de los resultados experimentales en este trabajo se usa un objeto esférico conocido de radio  $r_o$ . El centro de gravedad ( $u, v$ ) [pixel] y el radio  $r$  son usados como características de la imagen o estados. Se asume que las características de la imagen son la proyección en el plano 2D de las características del objeto en el espacio de tarea 3D. Se toma una proyección de perspectiva con distancia focal  $\lambda$  y  $\alpha$  como el factor de escala en pixel por metros dado por el muestreo de la cámara.

El punto  $P_o^C$  con coordenadas  $[P_{xo}^C \ P_{yo}^C \ P_{zo}^C]^T$  en el sistema coordenado de la cámara se proyecta en el punto ( $u, v$ ) [pixel] y en el radio aparente  $r$  en el plano imagen según la ecuación.

$$\xi = \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} = -h \begin{bmatrix} P_{xo}^C \\ P_{yo}^C \\ P_{zo}^C \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde  $h = \alpha \frac{\lambda}{P_{zo}^C}$

Lo que da una medición indirecta del espacio de tarea cartesiano ( $x, y, z$ ).

La orientación del sistema coordenado de la cámara,  $\Sigma_C$ , con respecto al sistema coordenado del robot,  $\Sigma_R$ , es representado por  $R_C^R = R_C^R(\phi, \theta, \psi) \in SO(3)$  donde  $R_C^R$  puede ser descrito por los ángulos de Euler.

Tomando  $(\phi, \theta, \psi)$  como el conjunto de ángulos de Euler, la matriz de rotación se puede obtener como la composición de las siguientes rotaciones: rotación del sistema coordinado por el ángulo  $\phi$  alrededor del eje Z, rotación del ángulo  $\theta$  alrededor del eje Y' y rotación del sistema coordinado por un ángulo  $\psi$  alrededor del eje Z''.

En este caso la matriz de rotación quedaría:

$$R_C^R = \begin{bmatrix} C\phi C\theta S\psi - S\phi S\psi - C\phi C\theta S\psi + S\phi C\psi C\phi S\theta \\ S\phi C\theta C\psi + C\phi S\psi - S\phi C\theta S\psi + C\phi C\psi S\phi S\theta \\ -S\theta C\psi \\ -S\theta C\psi \\ S\theta S\psi \\ C\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde Si es  $\sin(i)$  y Ci es  $\cos(i)$

Siguiendo la configuración de la figura 1.a, y teniendo en cuenta la ecuación (5), es posible obtener los componentes del vector  $P_o^C$  como:

$$\begin{bmatrix} P_{xo}^C \\ P_{yo}^C \\ P_{zo}^C \end{bmatrix} = R_C^R(\phi, \theta, \psi)^T \left( \begin{bmatrix} P_{xo}^R \\ P_{yo}^R \\ P_{zo}^R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{xc}^R \\ P_{yc}^R \\ P_{zc}^R \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

Según la figura 1.a, los ejes  $Z^R$  y  $Z^C$  son paralelos y; por simplicidad en el análisis, son tomados en la misma dirección. En este caso, los ángulos de Euler  $\phi = 0, \theta = 0$  y  $\psi$  variaría acorde a la rotación de la base del robot. Bajo estas condiciones la ecuación (6) sería,

$$R_C^R(\psi) = \begin{bmatrix} C\psi & -S\psi & 0 \\ S\psi & C\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para un análisis lineal solamente pequeñas variaciones alrededor del punto de operación serán tenidas en cuenta. Si se toma  $\psi_0 = 0$  como punto de operación y se tiene la aproximación lineal de (7), la variación de la ecuación (6) puede ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} \delta P_{xo}^C \\ \delta P_{yo}^C \\ \delta P_{zo}^C \end{bmatrix} = R_C^R(\psi) \left( \begin{bmatrix} \delta P_{xo}^R \\ \delta P_{yo}^R \\ \delta P_{zo}^R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta P_{xc}^R \\ \delta P_{yc}^R \\ \delta P_{zc}^R \end{bmatrix} \right) \quad (8)$$

Las perturbaciones pueden estar expresadas como expansión de series de Taylor. Como solo interesa la dependencia lineal de las variables, se toma solamente el término de primer orden de la serie. Con este análisis la ecuación (4) quedaría como:

$$\delta \xi = \begin{bmatrix} \delta u \\ \delta v \\ \delta r \end{bmatrix} = -h \begin{bmatrix} \delta P_{xo}^C \\ \delta P_{yo}^C \\ -\frac{r_o \delta P_{zo}^C}{P_{zo}^C} \end{bmatrix} \quad (9)$$

y finalmente, según (8) y (9) se obtiene:

$$\delta \xi = h \begin{bmatrix} C\psi & 0S\psi & 0 \\ -S\psi & C\psi & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_o}{(P_{zo}^C)} \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \delta P_{xo}^R \\ \delta P_{yo}^R \\ \delta P_{zo}^R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta P_{xc}^R \\ \delta P_{yc}^R \\ \delta P_{zc}^R \end{bmatrix} \right) \quad (10)$$

En el caso de que  $\psi=0$ .

$$\delta \xi = h \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r_o}{(P_{zo}^C)} \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \delta P_{xo}^R \\ \delta P_{yo}^R \\ \delta P_{zo}^R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \delta P_{xc}^R \\ \delta P_{yc}^R \\ \delta P_{zc}^R \end{bmatrix} \right) \quad (11)$$

### Modelo de los sensores de la plataforma

El espacio de tarea para la plataforma está constituido por la posición y orientación del elemento móvil. Para nuestro caso dicho espacio está caracterizado por tres elementos, al ser el robot de tres grados de libertad. Según la figura 1.b los parámetros de interés para el sistema móvil serán: el cabeceo  $\theta$ , el alabeo  $\varphi$  y la altura  $h$ . Dichos parámetros son medidos directamente por sensores lineales, encoder para la altura e IMU y encoders para las posiciones angulares, y su modelo puede representarse mediante la matriz de ganancia  $K$ .

$$K = \begin{bmatrix} K_\theta & 0 & 0 \\ 0 & K_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & K_h \end{bmatrix} \quad (12)$$

### Formulación del problema de control

El problema de control se puede definir como: mover el manipulador de tal forma que desempeñe tareas formuladas en espacio de tarea a partir de la medición directa o indirecta de dicho espacio. En el sistema Servo-visual la proyección del centro de gravedad de un objeto en movimiento que se mantenga en el centro de la imagen con un radio aparente constante, medición indirecta del espacio de tarea cartesiano ( $x, y, z$ ); y la plataforma que alcance las posiciones deseadas (cabeceo, alabeo y altura) directamente en el espacio de tarea.

El problema de control es formulado como: diseñar un controlador que calcule la señal de control  $\Delta$  correspondiente al movimiento del sistema mecánico del robot de tal forma que el vector de características en el espacio de tarea, centro de gravedad del objeto y el radio para el servo-sistema o cabeceo, alabeo y altura para la plataforma alcance los estados deseados  $\xi_d$ .

El vector de errores de estado se puede definir como

$$\tilde{\xi} = \xi_d - \xi = \begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ v_d \\ r_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \quad \text{ó} \quad \tilde{\xi} = \xi_d - \xi = \begin{bmatrix} \tilde{\theta} \\ \tilde{\varphi} \\ \tilde{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_d \\ \varphi_d \\ h_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \theta \\ \varphi \\ h \end{bmatrix}$$

El que debe ser calculado en cada tiempo de muestreo y usado para mover el robot en la dirección y magnitud que permita disminuir el error. Entonces el propósito del control debe garantizar que

$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\xi} = 0 \in \mathfrak{R}^3$  con la condición inicial  $\tilde{\xi}(0)$  suficientemente pequeña.

Para el análisis matemático se realizan las siguientes consideraciones:

A1- Existe una configuración de posición en las articulaciones  $q_d$  para la cual  $\xi_d = \xi(q_d)$

A2- El vector de errores de características inicial  $\tilde{\xi}(0)$  es suficientemente pequeño.

A3- Las señales de entrada y de perturbación son de baja velocidad.

Consideración A1, garantiza que el problema de control sea soluble. Consideración A2 posibilita el análisis lineal alrededor del punto de operación. Consideración A3, condición para seguimiento de trayectoria.

#### Esquema de control en el espacio de tarea

Para la formulación del problema de control, el vector de estado del objeto solo puede ser medido directa o indirectamente en el espacio de tarea, por lo que, el conocimiento directo de los valores deseados de las posiciones de las articulaciones,  $q_d$ , no es conocido. Sin embargo, el vector de posiciones articulares puede ser obtenido como resultado de la estimación de la señal de control  $\Delta$  y la solución del problema cinemático directo [17].

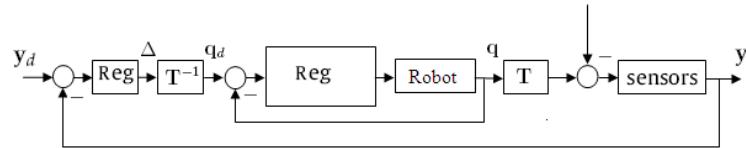


Figura 2. Esquema de control en el espacio de tarea.

La figura 2 muestra el diagrama de lazo cerrado propuesto. El control interno está desarrollado con una arquitectura abierta donde puede ser implementado cualquier tipo de controlador. Una posibilidad es usar un control no lineal en el estado de las variables conocido como torque-calculado [14] que toma como base el modelo dinámico del robot, ecuación (3), con la siguiente representación:

$$\tau = M(q)[\ddot{q}_d + K_{vi}\dot{\tilde{q}} + K_{pi}\tilde{q}] = C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)]$$

donde  $K_p \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  y  $K_v \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  matrices simétricas definidas positivas y  $\tilde{q} = q - q_d$ . Kelly y colaboradores [14] demuestran que con esta configuración el sistema en lazo cerrado se comporta como un sistema lineal multivariable desacoplado en cada una de las articulaciones del robot, sugiriendo que las matrices pueden ser expresadas como:  $K_{pi} = \text{diag}\{\omega_1^2, \dots, \omega_n^2\}$  y  $K_{vi} = \text{diag}\{\omega_1, \dots, \omega_n\}$ .

De esta forma cada articulación se comporta como un sistema lineal críticamente amortiguado, de segundo orden, con ancho de banda  $\omega_i$ . El ancho de banda  $\omega_i$  determina la velocidad de respuesta de cada articulación. En tal sentido el efecto dinámico del lazo interno puede ser independiente con respecto al lazo externo, pudiendo asumir la aproximación de que:

$$q(t) \cong q_d(t) \forall t > 0 \quad (13)$$

No obstante, el esquema de control de ambos sistemas será implementado digitalmente. Un tiempo de muestreo del lazo externo acorde a las características dinámicas en ambos casos podría ser escogido, por simplicidad igual para los dos casos, en un valor de 60ms. Ello es determinado en el servo-sistema por la velocidad de captura de la cámara [9] y en la plataforma por las características de las aplicaciones de la misma [8].

Para el caso de estudio dinámico en el campo discreto el comportamiento dinámico de lazo interno de las estructuras robóticas podría aproximarse a un retardo de tiempo del lazo externo [16] de esta forma la ecuación (13) quedaría como:

$$q(k) \cong q_d(k-1) \forall t > 0 \quad (14)$$

### Control de posición. Análisis de estabilidad

Para mostrar la estabilidad del sistema se presenta un controlador sencillo tipo I. La ley de control puede escribirse como:

$$\Delta = K_I \int \tilde{\xi} \quad (15)$$

donde  $K_I \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  es la matriz simétrica de las ganancias integrales:  $K_I = \begin{bmatrix} K_{I_1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{I_2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{I_3} \end{bmatrix}$

Para el tiempo de muestreo escogido del 60ms, la implementación digital de la ecuación (15) queda:

$$\Delta = \frac{0.06K_I}{(z-1)} \tilde{\xi} \quad (16)$$

Similar al trabajo presentado por Sim y colaboradores [17],  $\Delta$  puede ser interpretado como un incremento de coordenadas en el espacio de trabajo como resultado de los errores  $\tilde{\xi}$ . Solucionando la cinemática inversa  $T^{-1}$  es posible obtener  $q_d$ .

Sobre esta base, teniendo en cuenta la ecuación (13), la ecuación del regulador (16) y los modelos de los sensores, ecuación (11) para sistema servo-visual y ecuación (12) para la plataforma, el esquema de la figura 2 se puede simplificar respectivamente como se presenta en las figura 3.a y 3.b.

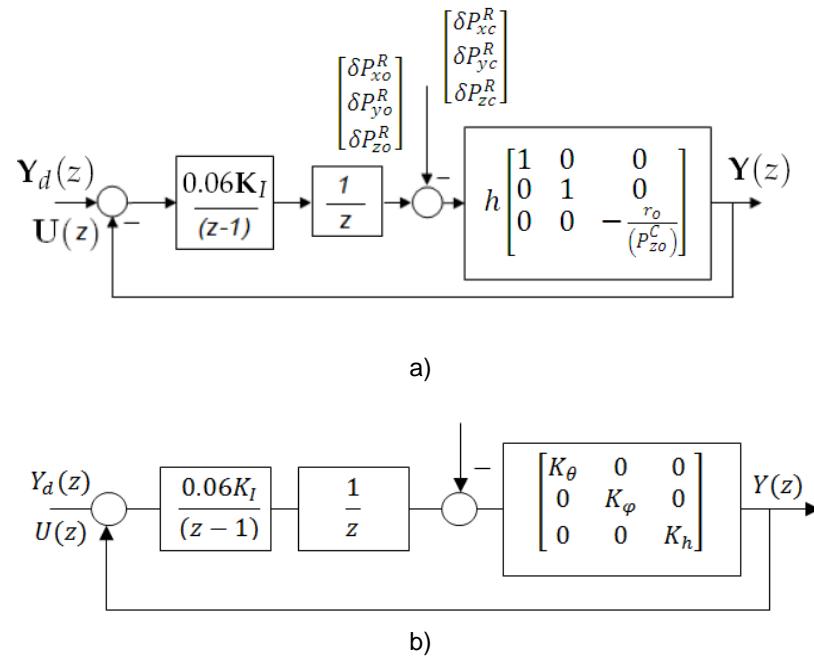


Figura 3. Esquema simplificado de control en el espacio de tarea, a) sistema servo-visual, b) Electro-neumática de tres grados de libertad.

De la figura 3 se puede apreciar que la ecuación de lazo cerrado tiene la siguiente estructura en transformada Z:

$$\frac{0.06K_I K}{(z^2 - z)} [Y_d(z) - Y(z)] = Y(z) \quad (17)$$

y en tiempo discreto la forma,

$$y(k+2) - y(k+1) = -0.06K_I Ky(k) + 0.06K_I Ky_d(k) \quad (18)$$

La ecuación (18) queda en el espacio de estado como:

$$\begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.06K_I K & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.06K_I K \end{bmatrix} y_d(k) \quad (19)$$

Analizando la correspondencia de la ecuación (19) con las figura 3.a y 3.b, es fácil percibirse de que estamos en presencia de tres lazos de control desacoplados en cada esquema.

Como ejemplo presentamos el lazo cabeceo de la figura 3.a como:

$$\begin{bmatrix} \theta(k+1) \\ \theta(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.06K_{I_1} K_\theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(k) \\ \theta(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.06K_{I_1} K_\theta \end{bmatrix} \theta_d(k) \quad (20)$$

y el de la coordenadas del centro de gravedad en el plano imagen  $u$  para la figura 3.b

$$\begin{bmatrix} u(k+1) \\ u(k+2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.06K_{I_1} h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.06K_{I_1} h \end{bmatrix} u_d(k) \quad (21)$$

Los polos de lazo cerrado se escogen para  $K_{I_1} h = K_{I_1} K_\theta = 3$ . En este caso la respuesta temporal a una entrada escalón será sobreamortiguada. Siempre que  $K_{I_1} h = K_{I_1} K_\theta < 20$ , el sistema será estable.

Un análisis más completo de la estabilidad de los esquemas de la figura 3 es realizado por Hernández [1], incluyendo el caso en que  $\psi$  sea diferente de cero [9].

### Implementación del esquema de control

El esquema de control de la figura 2, cuya estabilidad ha sido demostrada en el epígrafe anterior, es implementado físicamente en el sistema servo-visual y en la plataforma.

La implementación implica la aproximación de la dinámica interna de ambos sistemas a un retardo de trasportación  $z^{-1}$ , encontrar la solución particular de la ecuación (2), cinemática inversa, para cada caso e implementar el regulador (16) con una ganancia que cumpla los requisitos de diseño de la figura 4, en ese

caso tomamos,  $K_I K = \begin{bmatrix} 6 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 6 \end{bmatrix}$

### Sistema servovisual

Las ecuaciones cinemáticas del manipulador del sistema servo-visual, figura 1.a, se obtienen basadas en la representación de Denavit-Hartenberg, donde según Barrientos [5] tendrían una forma,

Tabla 1. Parámetros de Denavit-Hartenberg

Eslabón	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$q_i$
1	0	$\frac{\pi}{2}$	$d_1$	$q_1$
2	$a_2$	0	0	$q_2$
3	$a_3$	0	0	$q_3$

A partir de lo que es posible obtener las ecuaciones de la cinemática inversa como:

$$q_1 = \arctan \left( \frac{P_{yc}^R}{P_{xc}^R} \right) \quad q_2 = \arctan \left( \frac{P_{zc}^R - d_1}{\pm \sqrt{P_{xc}^{R^2} + P_{yc}^{R^2}}} \right) + \arctan \left( \frac{a_3 \sin(q_3)}{a_2 + a_3 \cos(q_3)} \right)$$

$$q_3 = \arctan \left( \frac{\pm \sqrt{1 - \cos^2(q_3)}}{\cos(q_3)} \right) \quad \cos(q_3) = \frac{P_{xc}^{R^2} + P_{yc}^{R^2} + (P_{zc}^R - d_1)^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3}$$

$y, d_1 = 0.8m, a_2 = 0.4m$  y  $a_3 = 0.67m$ , parámetros geométrico del robot.

En la implementación real se tiene en cuenta la dinámica de los motores de corriente directa de cada articulación, que calculada como:  $G(s)_{motor} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} = \frac{1550}{s(0.024s + 1)}$

El esquema de control fue implementado en la plataforma desarrollada para el robot ASEA IRB6. El algoritmo de control para el lazo interno, un controlador PID que cumple las condiciones de para hacer posible la ecuación (14) fue implementado en el ambiente Real Time WorkshopToolbox y Real Time Windows Target de MATLAB/Simulink. La figura 4 a) muestra una vista del sistema implementado.

Para el sistema de visión se usó una cámara monocromática JAI CV-252. El software de captura y procesamiento de imagen en tiempo real fue implementado en Borland Delphi usando las herramientas de la MatroxImage Library para optimizar el tiempo de procesamiento y extracción de características de la imagen. Para el experimento se usó una distancia focal de  $\lambda = 8\text{mm}$  y factor escala  $\alpha = 129 \frac{\text{pixels}}{\text{mm}}$ .

La respuesta en el tiempo frente a un paso en las condiciones iniciales se muestra en la Figura 5 a) para los tres parámetros: radio proyectado en la imagen, las coordenadas del centro de gravedad en el plano imagen u y v. En ambos casos el tiempo de establecimiento es obtenido alrededor de los 1,5s y sin error en estado estable, logrando los requerimientos de diseño.

### Plataforma electro-neumática de tres grados de libertad

De forma compacta y de acuerdo a la figura 1.a, la ecuación (2) tendría una solución particular para la plataforma como:

$$L_1^2 = [2076 - \lambda_0 - 940 \cos(\varphi)]^2 + [740 + h + 940 \sin(\varphi)]^2$$

$$L_2^2 = [1397 - \lambda_0 + 720 \cos(\varphi) + \lambda_1]^2 + \lambda_2^2 + (\lambda_3 - \lambda_4)^2$$

$$L_3^2 = [1397 - \lambda_0 + 720 \cos(\varphi) + \lambda_1]^2 + \lambda_2^2 + (\lambda_3 + \lambda_4)^2$$

donde:

$$\lambda_0 = \sqrt{1672^2 - 1720h - h^2}$$

$$\lambda_1 = 500 \sin(\theta) \sin(\varphi)$$

$$\lambda_2 = 500 \cos(\varphi) - 500$$

$$\lambda_3 = 500 \sin(\theta) \cos(\varphi)$$

$$\lambda_4 = 720 \sin(\varphi) + 945 + h$$

Finalmente, las variables articulares serían:

$$q_1 = L_1 - L_{01}$$

$$q_2 = L_2 - L_{02}$$

$$q_3 = L_3 - L_{03}$$

Donde  $L_i$  es la posición inicial de cada uno de los cilindros.

Para la obtención de los reguladores de las articulaciones se utilizó el método desarrollado por Rubio [4] donde se parte de la dinámica de los sistemas electro-neumáticos, y se obtienen los siguientes reguladores, que cumplen las condiciones de para hacer posible la ecuación (14), como se presenta en la Tabla II.

Tabla II. Funciones transferenciales obtenidas para los controladores y sistema electro-neumático

Funciones Transferenciales		
	Controladores	Sist. Electro-neumático
Pistón 1	$\frac{265(s^2 + 7.7s + 253)(s + 3)}{s(s^2 + 146.7s + 6267)}$	$\frac{246}{s(s^2 + 7.73s + 253)}$
Pistones 2 y 3	$\frac{32(s^2 + 7.7s + 1349)(s + 3)}{s(s^2 + 146.7s + 6267)}$	$\frac{2008}{s(s^2 + 7.3s + 1349)}$

A continuación se presentan las pruebas experimentales, realizados con el propósito de evaluar el desempeño del sistema de control, así como el comportamiento del error articular. Se emplea un ordenador Pentium D a 3 GHz donde se inserta una tarjeta PCI Humusoft MF624 de 16 E/S analógicas que posibilita efectuar la adquisición de la medición articular (sensada por los potenciómetros lineales), mientras que la posición en el espacio de tarea es medida mediante encoders en altura y con encoders y una Unidad de Medición Inercial (IMU) del tipo MTi para mediciones angulares. La tarjeta envía las señales de mando hacia las válvulas proporcionales de flujo MPYE-5-3/8.

La plataforma electro-neumática de tres grados de libertad con su sistema de sensores se muestra en la figura 4 b). En la figura 5 b) se muestran los resultados experimentales obtenidos ante variaciones de tipo escalón en las tres variables del espacio de tarea: altura, cabeceo y ladeo. En los tres casos los resultados son satisfactorios acorde a las expectativas de diseño, con un tiempo de establecimiento de menos de 2s y cero error en estado estacionario, para cada una de las coordenadas del espacio de tarea.



Figura 4. Plataforma experimental. a) Sistema servovisual, b) Plataforma electro-neumática.

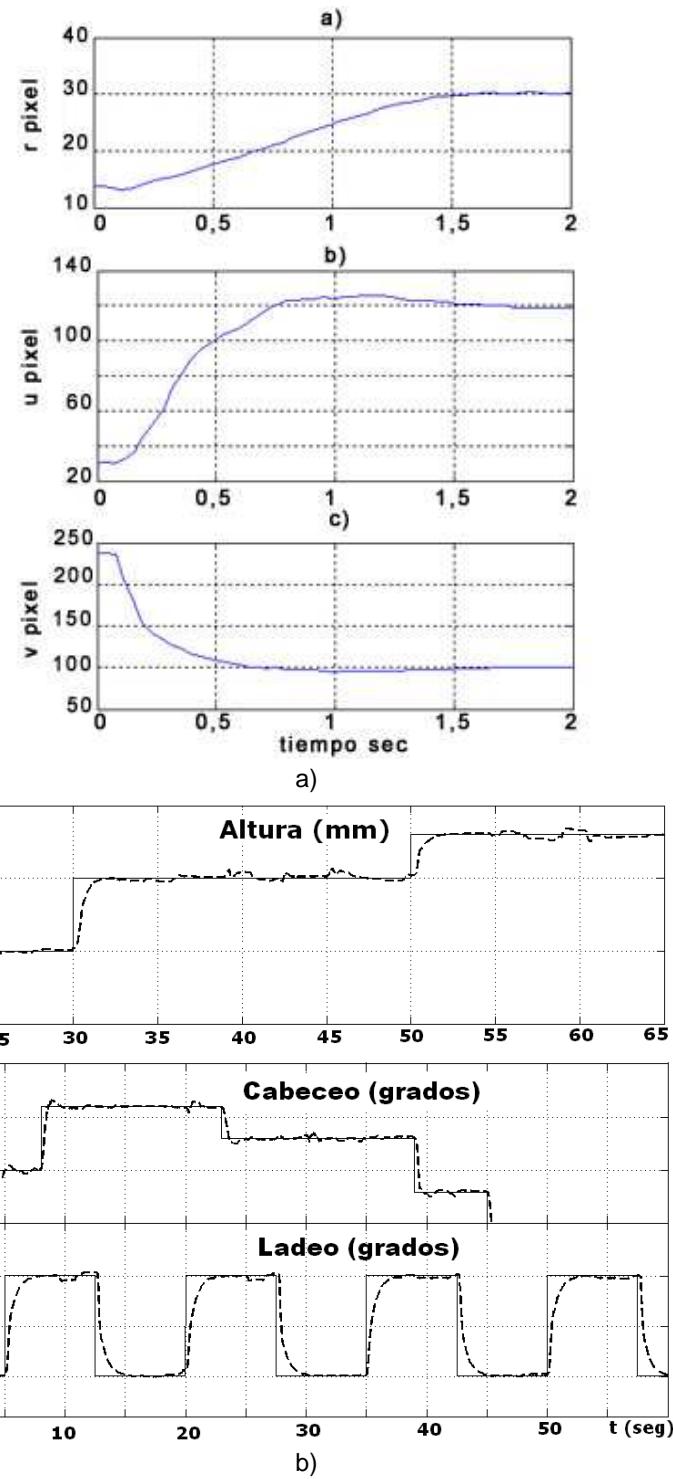


Figura 5. Respuesta en el tiempo. a) Sistema servo-visual, b) Plataforma móvil bajo el esquema de control en el espacio de tareas.

## Conclusiones.

En este artículo ha sido presentado un esquema de control en el espacio de tarea que se ha implementado en dos estructuras robóticas diferentes: una plataforma electro-neumática de tres grados de libertad y un sistema servo-visual. El esquema de control está basado en la medición directa o indirecta del espacio de tarea del sistema, usando para ello sistemas sensoriales adecuados. La filosofía de control se establece con dos lazos en cascada, en el lazo interno se ejecuta el control articular y en el lazo externo es implementado el control en el espacio de tarea. El análisis de estabilidad en campo discreto se hace bajo el principio de diseñar la respuesta dinámica del lazo interno más rápida que el lazo externo, de forma tal que su efecto pueda ser aproximado a un retardo de muestreo del lazo externo, obteniendo una solución de modelación de muy alta simplicidad.

La efectividad del esquema de control propuesto, la estabilidad y su comportamiento, es evaluado mediante resultados experimentales en una Plataforma electro-neumática de tres grados de libertad y un sistema servo-visual. Los resultados experimentales demuestran la efectividad del esquema propuesto en dos estructuras robóticas muy diferentes, lo que le da una gran versatilidad a dicho esquema. En ambos casos las salidas experimentales confirman la respuesta esperada ante entradas tipo escalón con una buena respuesta transitoria y cero errores en estado estacionario. El esquema presentado abre un nuevo campo de investigación en el área del control en el espacio de tarea para resolver problemas de control de trayectoria y anticipatorio.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración brindada por el Centro de Investigaciones y Desarrollo de Simuladores (CIDSIM) de La Habana, Cuba, por el apoyo de sus especialistas, directivos y personal técnico en general, así como a su disposición de facilitar los medios técnicos y de cómputo necesarios para el desarrollo de las investigaciones y experimentos que en este trabajo se exponen.

## Referencias.

1. Hernández, L., Izaguirre, E., et al. Kinematic Task Space Control Scheme for 3DOF Pneumatic Parallel Robot. *Intelligent Mechatronics*. 2011. ISBN 978-953-307-300-2.
2. Guglielmetti, P. y Longchamp, R. "Task space control of the delta parallel robot". *Control Engineering Practice*. 1993, vol. 1, nº 4, p. 337-342.
3. Kim, H. S., Cho, Y. M., et al. "Robust nonlinear task space control for 6 DOF parallel manipulator". *Automática*. 2005, vol. 41, nº 9, p. 1591-1600.
4. Liu, C., Cheah, C. C., et al. "Adaptive task-space regulation of rigid-link flexible-joint robots with uncertain kinematics". *Automática*. 2008, vol. 44, nº 7, p. 1806-1814.
5. Liang, X., Huang, X., et al. "Adaptive Task-Space Tracking Control of Robots Without Task-Space- and Joint-Space-Velocity Measurements". *IEEE Transactions on robotics*. 2010, vol. 26, nº 4.
6. Nguyen-Tuong, D. y Jan, P. "Learning Task-Space Tracking Control with Kernels". En: *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Francisco, CA, USA. 2011.
7. Cheah, C. C. y Li, X. "Singularity-Robust Task-space Tracking Control of Robot". En: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai, China. 2011.
8. Cheah, C. C. y Slotine, J. J. E. "Task-space Setpoint Control of Robots with Dual Task-space Information". En: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Kobe, Japan. 2009.
9. Hernández, L., Sahli, H. et al. "Vision-based 2D and 3D Control of Robot Manipulators" En: Jimenez, A. y Al Hadithi, B. M. (editor). *Robot Manipulators Trends and Development*. 2010, Cap. 21, ISBN 978-953-307-073-5.
10. Izaguirre, E., et al. "Control desacoplado de plataforma neumática de 3-GDL utilizada como simulador de Movimiento". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2011. vol. 8, nº 1-12, ISSN 1697-7912.
11. Rubio, E. y Hernández, L. "Modelado, identificación y control de actuadores lineales electro-neumáticos. Aplicación en plataforma de dos grados de libertad". *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. 2007, vol. 4, nº 4, p. 58-69. ISSN 1697-7912.
12. Barrientos, A., et al. *Fundamentos de Robótica*. McGraw Hill, 1997. 316 p. ISBN 8448108159.

13. Merlet, J. P. "Jacobian, Manipulability, Condition Number, and Accuracy of Parallel Robots". *Journal of Mechanical Design*. 2006, vol. 128, nº 1, p. 199-207. ISSN 1050-0472.
14. R. Kelly, R. y Santibañez, V. *Control de movimiento de robots manipuladores*. Madrid: Pearson Education, 2003. 344 p. ISBN 9788420538310.
15. Gupta, A. "Design, Control and Performance of RiceWrist: A Force Feedback Wrist Exoskeleton for Rehabilitation and Training". *The International Journal of Robotics Research*. 2008, vol. 27, nº 2, p. 233-251. ISSN 1741-3176.
16. Bonfe, M., et al. "Variable structure pid based visual servoing for robotic tracking and manipulation". En: *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Lausanne, Switzerland. 2002.
17. Sim, T. P., et al. "A pragmatic 3d visual servoing system". En: *International Conference on Robotics and Automation*. Washington, DC. USA. 2002.

**René González-Rodríguez<sup>I</sup>, Luís Hernández-Santana<sup>II</sup>, Eduardo Izaguirre<sup>II</sup>, Ernesto Rubio<sup>II</sup>**

I. Empresa de Automatización Integral. CEDAI. Cuba

E-mail: [voltus@cedai.com.cu](mailto:voltus@cedai.com.cu)

II. Universidad Central de Las Villas Marta Abreu. Grupo de Investigaciones de Automática, Robótica y Percepción. Cuba

E-mail: [luishs@uclv.edu.cu](mailto:luishs@uclv.edu.cu), [izaguirre@uclv.edu.cu](mailto:izaguirre@uclv.edu.cu), [rubio@uclv.edu.cu](mailto:rubio@uclv.edu.cu)