

# CONTROL VISUAL DE SISTEMAS ROBÓTICOS REMOTOS

## REPORTE TÉCNICO

NOVIEMBRE 2004 – JUNIO 2005

Rafael Kelly  
CICESE

Marco A. Artega  
UNAM

## 1 Objetivos

El objetivo primario de este proyecto es la control de sistemas robóticos —tanto manipuladores como móviles— haciendo uso de sensado visual, esto en forma remota empleando como canal de información Internet 2. Véase la figura 1.

Es gracias a la característica del ancho de banda de Internet 2 que hace viable el envío de información como es el video, para controlar en forma remota dispositivos robóticos.

Como parte importante para llevar a cabo este proyecto, habrá de realizarse una aplicación para transmitir video, acceso remoto a éste y comunicación con el sistema de control. Es también importante el análisis y diseño de los algoritmos de control y su prueba matemática de estabilidad.

## 2 Actividades realizadas

Durante el primer semestre de actividades se han abordado los siguientes tópicos:

- Desarrollo de la aplicación para transmisión de video y su interacción remota (CICESE: avance 60%)
- Desarrollo e instalación de aplicación para cámaras estereoscópicas (UNAM: 80%)
- Análisis y diseño del sistema de control visual para robots manipuladores (CICESE y UNAM: avance 80%)
- Recepción e instalación de los robots móviles (CICESE: avance 30%)

Además, se realizó una visita de trabajo y coordinación del proyecto por parte de 2 integrantes del CICESE a la UNAM durante la tercer semana de febrero. Así mismo, se presentaron los avances del proyecto en la reunión de primavera del CUDI celebrada en Veracruz la última semana de abril.

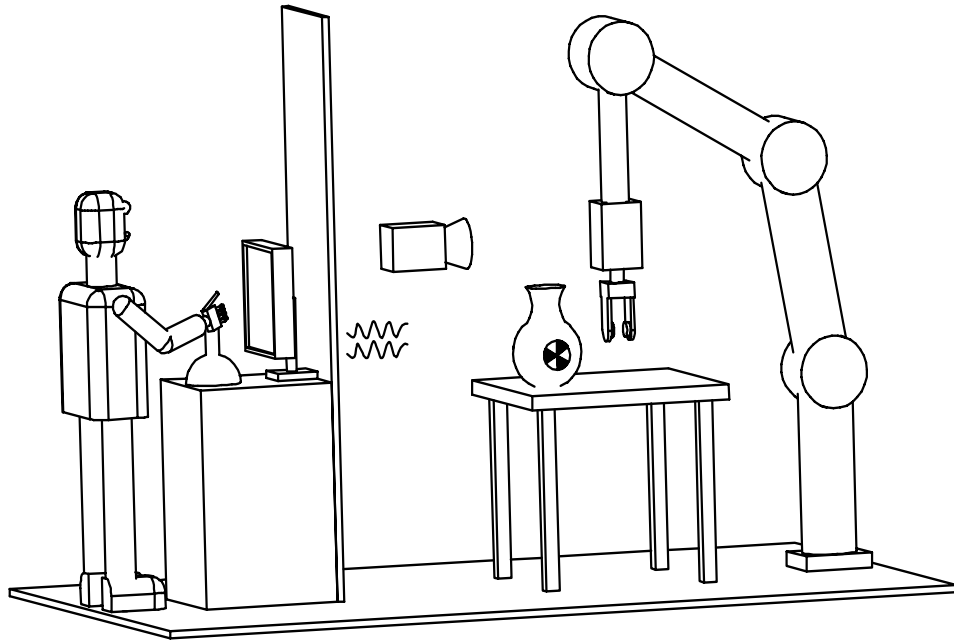


Figure 1: Operación remota

A continuación se describen brevemente las actividades listadas previamente.

## 2.1 Desarrollo de la aplicación para transmisión de video y su interacción remota

Se ha considerado el empleo de dos tipos de cámaras para la transmisión de video a través de internet 2: quickcam de baja resolución conectada por medio de USB y cámara analógica de resolución estandar conectada a través de una tarjeta digitalizadora. En esta etapa se cuenta ya con el desarrollo de la aplicación relativa a la interacción remota con el video empleado la cámara a baja resolución. Quedan pendiente realizar las pruebas a través de internet 2 y el manejo de la cámara de resolución estandar. La aplicación está siendo desarrollada en Java.

## 2.2 Desarrollo e instalación de aplicación para cámaras estereoscópicas

El empleo de 2 cámaras (visión estereoscópica) resulta importante en caso de robots desplazándose en espacio 3D. Por ello, se está procediendo a instalar un juego de 2 cámaras con la intención de explorar la viabilidad de su uso para manipulación remota.

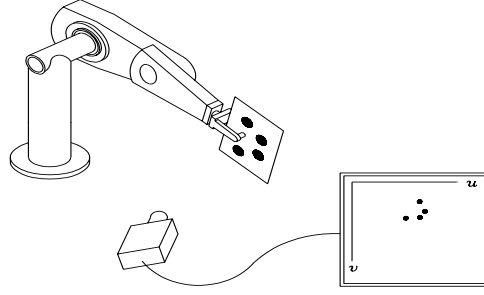


Figure 2: Cámara fija

### 2.3 Análisis y diseño del sistema de control visual para robots manipuladores

Para desarrollar el sistema de control visual remoto, se precisa de un algoritmo de control adecuado. La configuración física genérica el sistema se presenta en la figura 2. Esta consiste de un robot manipulador con marcas en su extremo terminal y una (o más) cámara(s) capturando la escena.

El modelo dinámico de robots manipuladores viene dado por

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

donde  $\mathbf{q}$  es el vector de posiciones articulares,  $\boldsymbol{\tau}$  el vector de pares y fuerzas aplicados por los actuadores en las articulaciones,  $M(\mathbf{q})$  es la matriz de inercia,  $C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  es la matriz centrífuga y de Coriolis,  $\mathbf{g}(\mathbf{q})$  es el vector de pares debidos a la acción de la gravedad.

Considerando el mecanismo que se ha desarrollado mostrado en la figura 3, el modelo cinemático directo corresponde a un mapa  $\mathbf{x}_R(\mathbf{q}) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  donde

$$\mathbf{x}_R(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 0.26 \sin(q_1) + 0.26 \sin(q_1 + q_2) \\ -0.26 \cos(q_1) - 0.26 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}.$$

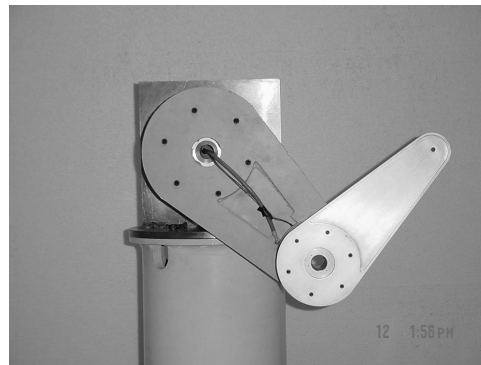


Figure 3: Brazo robótico experimental

El enfoque seguido para el sistema de control es el denominado por “campo de velocidad”. La figura 4 muestra un campo de velocidad cuyas líneas de flujo tienden hacia un punto.

Más adelante, este punto corresponderá al indicado por el usuario remoto al interactuar con el video a través del “ratón”.

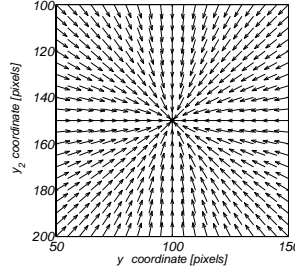


Figure 4: Campo de velocidad deseado

El modelo cinemático perceptual relaciona las coordenadas articulares  $\mathbf{q}$  con las coordenadas de imagen, aquí denotadas por  $\mathbf{y}$  de la siguiente manera:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \frac{\alpha\lambda}{O_{R3}^C - \lambda} R(\phi) \left[ \mathbf{x}_R(\mathbf{q}) - \begin{bmatrix} O_{R1}^C \\ O_{R2}^C \end{bmatrix} \right] + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad ; R(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ \sin(\phi) & -\cos(\phi) \end{bmatrix}$$

donde  $\lambda$  es la distancia focal,  $\alpha$  es el factor de conversión de metros a pixeles,  $\mathbf{O}_R^C = [O_{R1}^C \ O_{R2}^C \ O_{R3}^C]^T$  es la posición del origen de la cámara y  $[u_0 \ v_0]^T$  es un sesgo.

El modelo cinemático diferencial perceptual viene dado por

$$\dot{\mathbf{y}} = \frac{\alpha\lambda}{O_{R3}^C - \lambda} R(\phi) J_A(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} = J(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}}$$

donde  $J_A(\mathbf{q}) = \partial \mathbf{x}_R(\mathbf{q}) / \partial \mathbf{q}$  es la matriz jacobiana analítica y  $J(\mathbf{q}) = \frac{\alpha\lambda}{O_{R3}^C - \lambda} R(\phi) J_A(\mathbf{q})$  es el jacobiano perceptual (supuesto de rango completo y acotado)

## Sistema de control

El sistema de control diseñado consta de dos subsistemas que se describen enseguida.

### Subsistema de velocidad articular

Este subsistema corresponde a un lazo interno de control de velocidad articular. Este tiene la estructura de un control PI de velocidad con compensación. La ley de control correspondiente es

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= M(\mathbf{q})\dot{\boldsymbol{\omega}}_d + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\boldsymbol{\omega}_d + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + K_v\tilde{\boldsymbol{\omega}} + K_i\boldsymbol{\xi} \\ \dot{\boldsymbol{\xi}} &= \tilde{\boldsymbol{\omega}} \end{aligned}$$

donde  $K_v$  y  $K_i$  son matrices simétricas definidas positivas,  $\tilde{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\omega}_d - \dot{\mathbf{q}}$  es el vector de error de velocidad articular y  $\boldsymbol{\omega}_d$  es la velocidad articular deseada

## Subsistema cinemático

Este subsistema corresponde a un lazo externo de control cinemático que genera la señal de referencia de velocidad articular que luego es empleada en el lazo interno de control de velocidad. La ley de control correspondiente es

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{\rho}} &= \mathbf{e}, \\ \boldsymbol{\omega}_d &= J(\mathbf{q})^{-1}[\mathbf{v}(\mathbf{y}) + K\boldsymbol{\rho}],\end{aligned}$$

donde  $K$  es una matriz simétrica y definida positiva.

## Análisis del sistema en malla cerrada

El sistema en malla cerrada se obtiene al sustituir las leyes de control en el modelo dinámico del robot. Esto conduce a la siguiente ecuación diferencial ordinaria

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho} \\ \boldsymbol{\xi} \\ \tilde{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K\boldsymbol{\rho} + J(\mathbf{q})\tilde{\boldsymbol{\omega}} \\ \tilde{\boldsymbol{\omega}} \\ -M(\mathbf{q})^{-1} [C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\tilde{\boldsymbol{\omega}} + K_v\tilde{\boldsymbol{\omega}} + K_i\boldsymbol{\xi}] \end{bmatrix}$$

El origen del espacio de estado corresponde a un equilibrio de esta ecuación cuya estabilidad puede ser determinada mediante la siguiente función de Lyapunov:

$$V(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\xi}, \tilde{\boldsymbol{\omega}}) = \frac{\beta}{2} \boldsymbol{\rho}^T \boldsymbol{\rho} + \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\omega}}^T M(\mathbf{q}) \tilde{\boldsymbol{\omega}} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\xi}^T K_i \boldsymbol{\xi},$$

donde  $\beta$  es una constante satisfaciendo

$$0 < \beta < \frac{2\lambda_m\{K_v\}\lambda_m\{K\}}{k_J^2}. \quad (1)$$

Mediante sencillas operaciones algebraicas, se llega a la conclusión de que la derivada temporal de la función de Lyapunov resulta

$$\begin{aligned}\dot{V}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\xi}, \tilde{\boldsymbol{\omega}}) &= -\beta \boldsymbol{\rho}^T K \boldsymbol{\rho} + \beta \boldsymbol{\rho}^T J(\mathbf{q}) \tilde{\boldsymbol{\omega}} - \tilde{\boldsymbol{\omega}}^T K_v \tilde{\boldsymbol{\omega}}, \\ \dot{V}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\xi}, \tilde{\boldsymbol{\omega}}) &\leq - \begin{bmatrix} \|\boldsymbol{\rho}\| \\ \|\tilde{\boldsymbol{\omega}}\| \end{bmatrix}^T \underbrace{\begin{bmatrix} \beta\lambda_m\{K\} & -\frac{1}{2}\beta k_J \\ -\frac{1}{2}\beta k_J & \lambda_m\{K_v\} \end{bmatrix}}_Q \begin{bmatrix} \|\boldsymbol{\rho}\| \\ \|\tilde{\boldsymbol{\omega}}\| \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

donde la matriz simétrica  $Q$  es definida positiva en virtud de la selección de  $\beta$ . Debido al signo menos, se tiene que  $\dot{V}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\xi}, \tilde{\boldsymbol{\omega}})$  es una función semidefinida negativa. Esto y el hecho que  $V(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\xi}, \tilde{\boldsymbol{\omega}})$  es definida positiva, son suficientes para garantizar a través del método directo de Lyapunov que el equilibrio es estable.

## **2.4 Recepción e instalación de los robots móviles**

El equipo de robots móviles celulares fue recibido a finales de mayo. Ya se ha iniciado la etapa de instalación y las primeras pruebas sobre comunicación inalámbrica y el procesado de visión para extracción de características.

## **3 Conclusiones**

En términos generales, el desarrollo del proyecto va siguiendo el calendario programado originalmente. Los ensayos del sistema de control visual remoto se espera que inicien durante agosto de forma que el sistema sea completamente operativo hacia finales de septiembre o principios de octubre.