

# CONTROL VISUAL DE SISTEMAS ROBÓTICOS REMOTOS

## REPORTE TÉCNICO FINAL

NOVIEMBRE 2004 – MARZO 2006

Rafael Kelly      Marco A. Arteaga  
CICESE            UNAM

## 1 Resumen

El objetivo primario de este proyecto es el control de sistemas robóticos haciendo uso de sensado visual —sin calibración completa—, esto en forma remota empleando como canal de información Internet 2. Véase la Figura 1. Es el ancho de banda de Internet 2 el que hace viable el envío de información como es el video, para controlar en forma remota dispositivos robóticos.

La realización del proyecto ha requerido la integración de tres sistemas: sistema de visión en tiempo-real, sistema de control en tiempo-real y sistema de servidor WEB y de aplicación de video. El proyecto se enfocó básicamente al desarrollo del último sistema mediante una aplicación para transmitir video, acceso remoto a éste y comunicación con el sistema de control. Las pruebas efectuadas en el control del brazo robótico construido en el CICESE desde las instalaciones de la UNAM resultaron exitosas. También importante fue el uso de un esquema de control novedoso que permite el control del robot sin requerir la calibración completa de la cámara.

## 2 Actividades realizadas

Durante el proyecto se han abordado los siguientes tópicos:

- Infraestructura de experimentación
- Arquitectura del sistema
- Sistema de visión
- Sistema de Control
- Sistema servidor
- Análisis y diseño del sistema de control visual para robots manipuladores

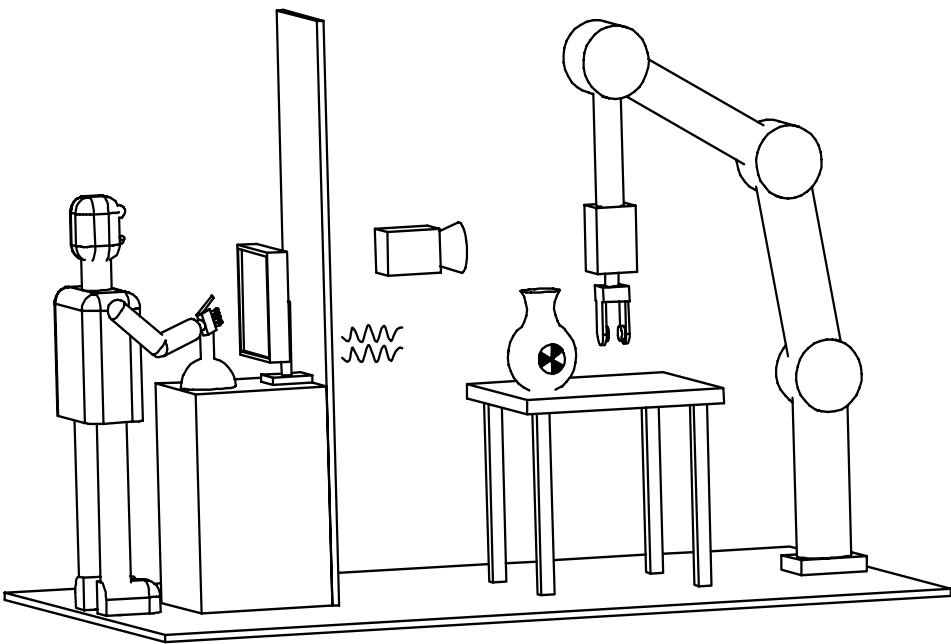


Figura 1: Operación remota

- Validación y experimentación del sistema

Además, se realizaron visitas de trabajo y coordinación del proyecto por integrantes del CICESE a la UNAM. Así mismo, se presentaron los avances del proyecto en la reunión de primavera del CUDI celebrada en Veracruz la última semana de abril de 2005 y se tiene programada otra presentación en la reunión de primavera a realizarse en Oaxaca en abril de 2006.

La lista de participantes en este proyecto además de los responsables es: Por parte del CICESE: Carmen Monroy, Eusebio Bugarín y Dann de la Torre. Por parte de la UNAM: Ricardo Pérez, Eduardo Pérez, Adrián Castillo y Luis Sagredo.

A continuación se describen brevemente las actividades listadas previamente.

### 3 Infraestructura de experimentación

Se puso en operación un brazo robótico de dos articulaciones de tecnología de actuación directa. El robot es controlado mediante los pares que ejercen los actuadores en las articulaciones; por lo tanto no se trata de un dispositivo servo-controlado. Al extremo del segundo eslabón se encuentra un disco negro; es el objeto distintivo que se deseará ubicar en algún punto de la pantalla por el usuario remoto. Ver Figura 2.

Una cámara se localiza en frente del robot y es la que proporciona la información que es usada para extraer el centroide del disco colocado al final del segundo eslabón. También la señal de video es transmitida a través del servidor al usuario remoto mediante el protocolo UDP vía Internet 2.

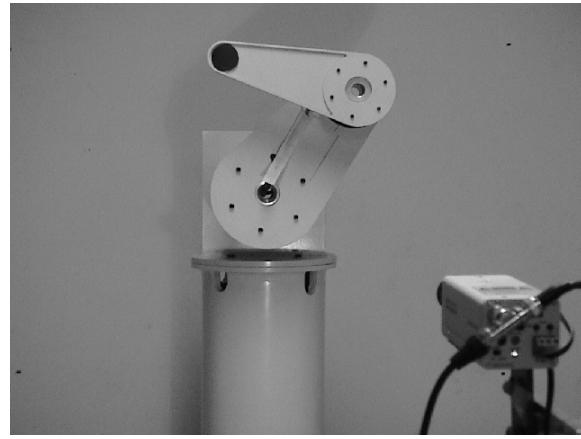


Figura 2: Brazo robótico y cámara

## 4 Arquitectura del sistema

Para llevar a cabo el proyecto, se diseñó una arquitectura hardware basada en tres sistemas de acuerdo con la Figura 3:

- Sistema de visión
- Sistema de Control
- Sistema servidor

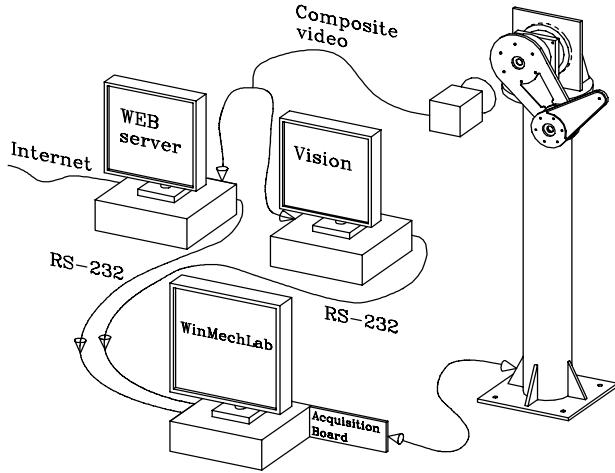


Figura 3: Arquitectura del sistema de control visual remoto

## 5 Sistema de visión

El sistema de visión fue implementado en una plataforma Linux y equipado con una tarjeta para adquisición de video compuesto modelo PV-BT878P de la compañía PixelView. Se

empleó una cámara Samsung modelo SD-410ND que envía la señal de video en el formato NTSC.

El software consiste de dos módulos: el de configuración y el de procesamiento de imágenes. El primero permite definir la talla de la imagen, el número de objetos distintivos, el umbral de binarización, etc. El segundo módulo permite seleccionar el objeto distintivo en la imagen binarizada, iniciar el proceso de extracción del centroide y transferir sus coordenadas al sistema de control mediante comunicación serie.

El sistema adquiere imágenes de  $640 \times 480$  pixels a una cadencia de 30 Hz. El centroide se calcula al mismo ritmo y es obtenido sobre una ventana móvil de 20 píxeles.

La Figura 4 muestra la pantalla durante una sesión experimental. Se aprecian 4 ventanas: la del video en vivo, la del video binarizado, la de diálogo y la de despliegue de las coordenadas del centroide.

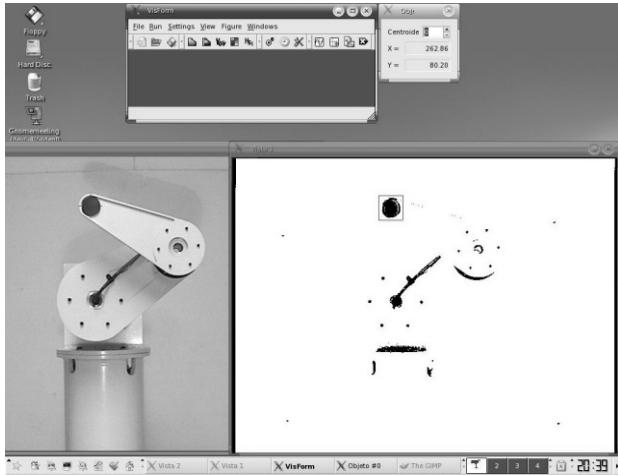


Figura 4: Sistema de visión: pantalla

## 6 Sistema de control

La plataforma del sistema de control fue previamente desarrollada por el grupo del CICESE. Se trata de un software general denominado *WinMechLab* por *Windows Mechatronics Laboratory*. Este es la aplicación en la cual fue programado el algoritmo de control y se ejecuta en Windows equipado con el módulo RTX. Esto permite operar como sistema de tiempo-real garantizando periodos de muestreo de 2.5 ms.

La computadora del sistema de control dispone de dos puertos serie de comunicación. Uno de ellos se enlaza al sistema de visión para recibir las coordenadas del centroide, mientras que el otro se conecta al sistema servidor para capturar las coordenadas deseadas para el centroide que han sido indicadas en la interfaz gráfica por el usuario remoto. Ambos enlaces serie trabajan a 115,200 bauds. Además la computadora está dotada de una tarjeta de adquisición de datos para comunicarse con los manejadores electrónicos de los actuadores del robot.

## 7 Sistema servidor

El sistema servidor opera en una plataforma Windows XP. Tiene programadas dos aplicaciones básicas: un servidor WEB basado en *Tomcat Apache* y un servidor de aplicación de video desarrollado mediante la biblioteca *Java Media Framework*. Ambos fueron programados en Java. La computadora del sistema servidor cuenta con una tarjeta de adquisición del video *FlyVideo2000FM* de la marca *LifeView*. Por lo tanto, el sistema es compatible con cualquier cámara bajo el estandar de televisión NTSC.

El éxito del proyecto gira en torno a la calidad de la señal de video transmitida al usuario remoto. Es ahí donde se cuenta con la ventaja del ancho de banda ofrecido por Internet 2. Para ello se optó por la transmisión de video en la modalidad de “video continuo” (*streaming video*) mediante el protocolo UDP.

El usuario puede accesar al servidor e interactuar con el video en vivo invocando la dirección del sitio WEB a traves de cualquier navegador. La interfaz gráfica es la que se indica en la Figura 5 la cual se destina principalmente a mostrar el video en vivo.

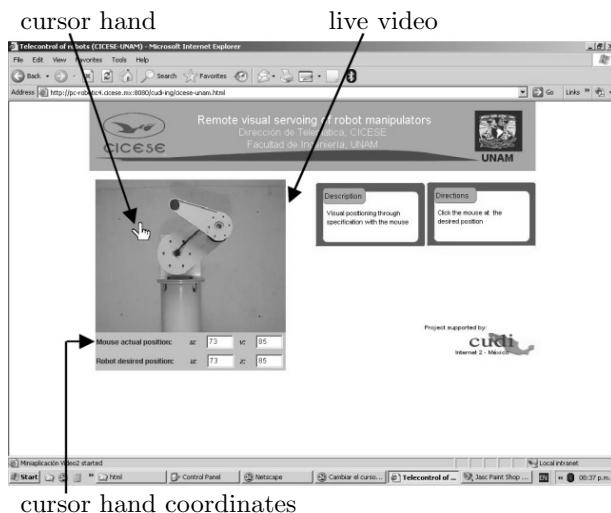


Figura 5: Interface de la página WEB

En la interfaz gráfica el usuario interactua a través del ratón ubicandolo en la posición de la pantalla donde desea que el extremo del brazo robótico se posicione. Las coordenadas de ese punto son transmitidas desde el usuario remoto al sistema servidor mediante TCP por Internet 2 y luego, como ya se ha descrito, del sistema servidor al sistema de control mediante un enlace serie.

## 8 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. 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 debido a la acción de la gravedad.

Considerando el mecanismo que se ha desarrollado mostrado en la Figura 6, el modelo cinemático directo corresponde a un mapa  $\mathbf{x}_R(\mathbf{q}) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  donde

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

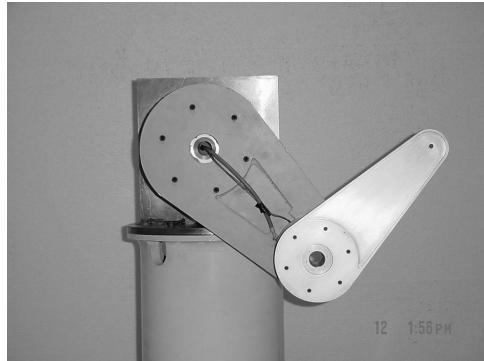


Figura 6: Brazo robótico experimental

El enfoque seguido para el sistema de control es el denominado por “campo de velocidad”. La Figura 7 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 de la computadora.

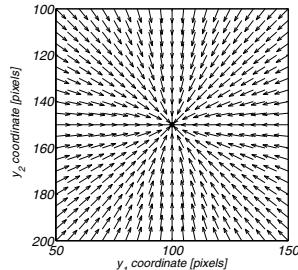


Figura 7: Campo de velocidad deseado

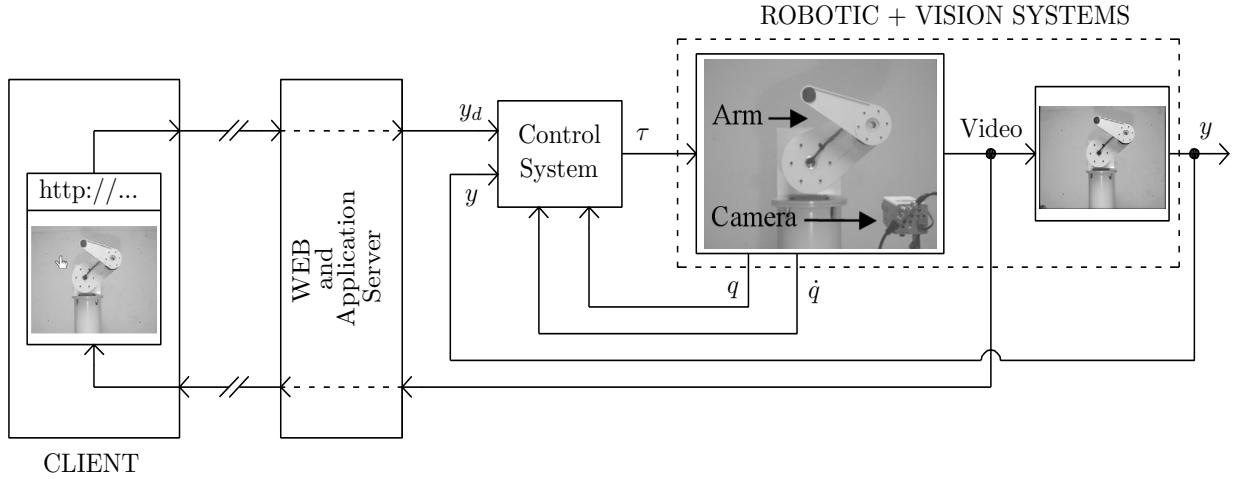


Figura 8: Diagrama de bloques

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

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

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. El diagrama de bloques se muestra en la Figura 8.

### 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,  $\tilde{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\omega}_d - \dot{\boldsymbol{q}}$  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

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

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

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

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

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

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

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

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.

## 9 Validación y experimentación del sistema

Los experimentos se realizaron entre el CICESE y la UNAM, estando separados por una distancia aproximada de 2,200 km. El sistema robótico se encontró instalado en el CICESE, véase la Figura 9.

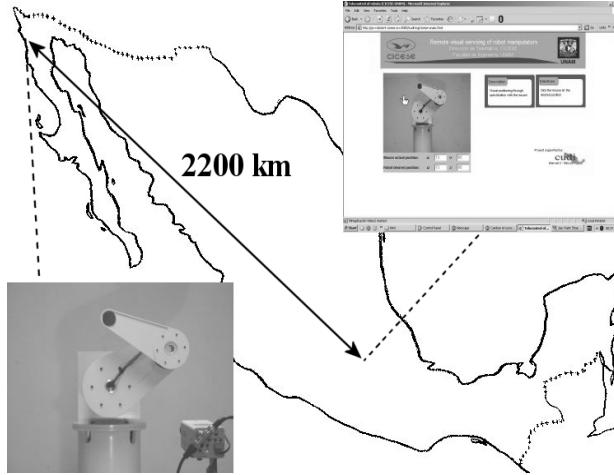


Figura 9: Control visual remoto

Con referencia a la calibración de la cámara, solamente los siguientes datos son requeridos:  $\lambda = 0.008$  [m],  $\alpha = 72000$  [pixels/m],  $O_{R3}^C = 1.24$  [m] y la orientación de la cámara  $\phi = 0.0$  [rad]. Por lo tanto, con esta información es imposible reconstruir la ubicación de un punto en el plano de movimiento del robot a partir de la proyección de ese punto en el plano de la imagen (pantalla).

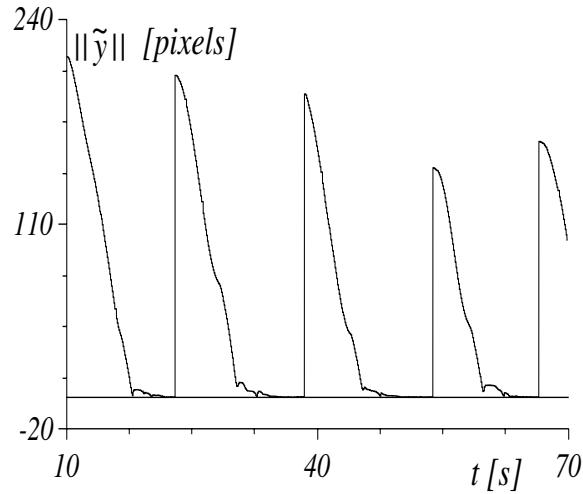


Figura 10: Distancia a posición deseada  $\|\tilde{y}\|$

Se realizaron experimentos locales y también distantes desde la UNAM. A la vista, no hubo percepción de retraso en el video transmitido y en todos los casos la prestación del

sistema en su conjunto resultó satisfactoria. Los experimentos consistieron en transmitir la imagen de video a la UNAM. Ahí se utilizó el cursor para proporcionar un punto de referencia que el efecto final del robot tenía que alcanzar.

Como índice de prestación del sistema se puede tomar la distancia entre la posición del extremo del robot y la posición deseada. Esto se cuantifica en la Figura 10. Se observa que el error crece abruptamente cada vez que se proporciona una nueva referencia con el cursor. Una vista más precisa muestra que este indicador resulta asintóticamente menor a 2 [pixels].

## 10 Conclusiones

El desarrollo de este proyecto ha permitido constatar el potencial que ofrece Internet 2 por su ancho de banda para aplicaciones interactivas sobre control visual de sistemas robóticos. Este es un primer paso hacia el desarrollo de proyectos más ambiciosos como el seguimiento de trazas especificadas por el usuario remoto y control visual de robots móviles —terrestres y aéreos—.