Control visual de sistemas robóticos remotos

Rafael Kelly — CICESE
Marco A. Artega — UNAM

Antecedentes

- Robot
- Robótica
- Clasificación:
    - Robots manipuladores
    - Robots móviles
        - Robots terrestres
            - Robots con ruedas
            - Robots con patas
        - Robots acuáticos
            - Robots marinos
            - Robots submarinos
        - Robots aéreos

Visión en el guiado de sistemas robóticos

Robots manipuladores

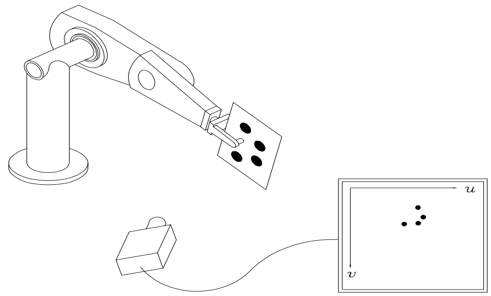


Figure 1: Cámara fija

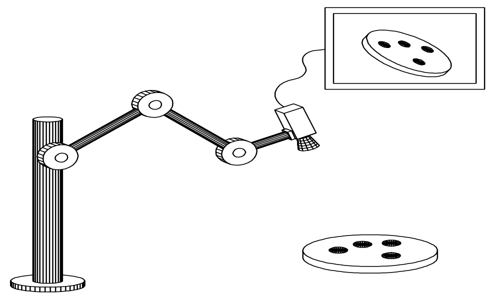


Figure 2: Cámara en mano

Robots móviles

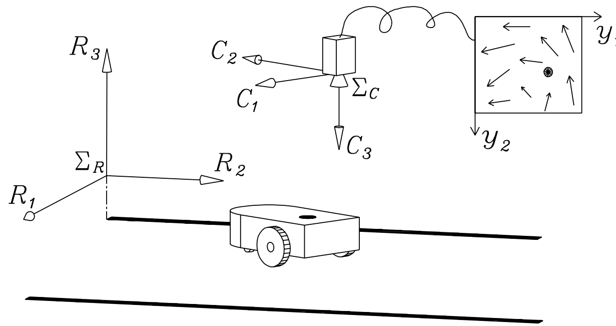


Figure 3: Robot móvil: Cámara fija

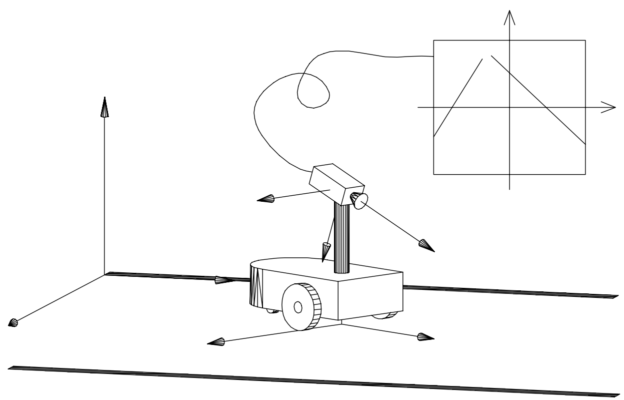


Figure 4: Robot móvil: Cámara a bordo

Teleoperación

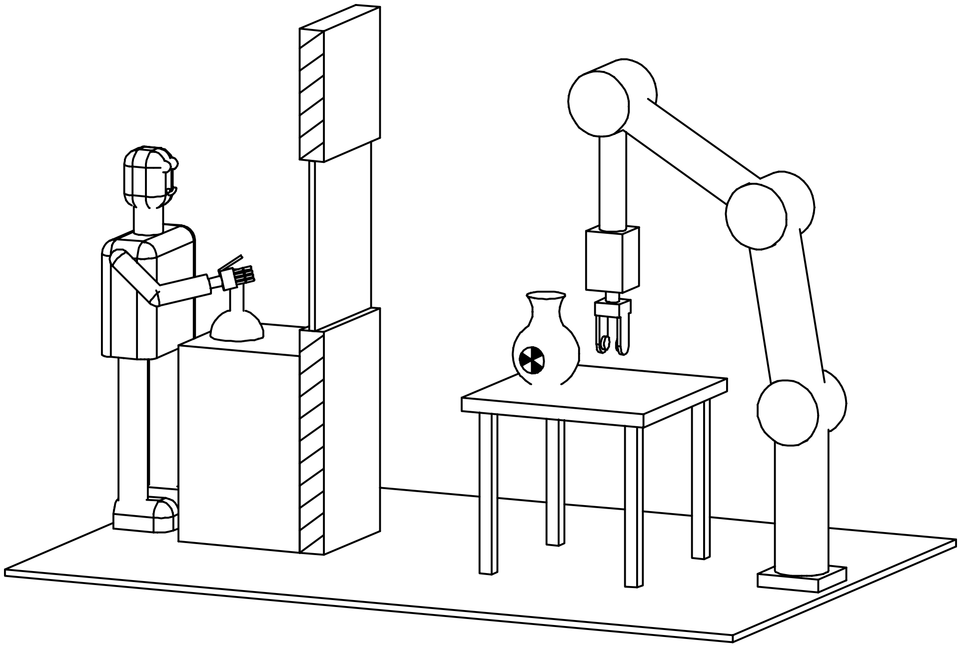


Figure 5: Telemanipulación

Operación remota

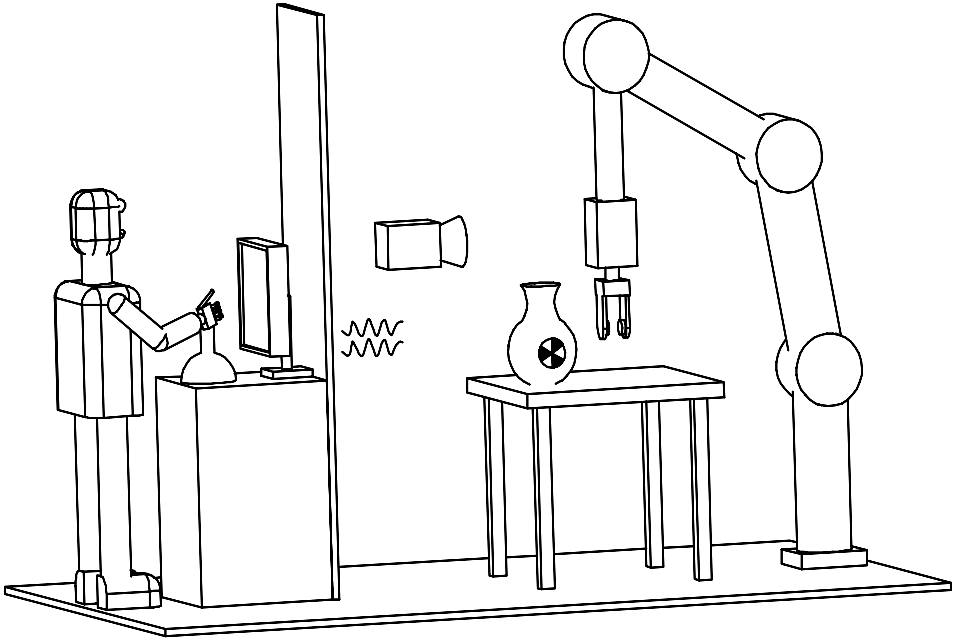


Figure 6: Operación remota

Operación remota: Robot manipulador

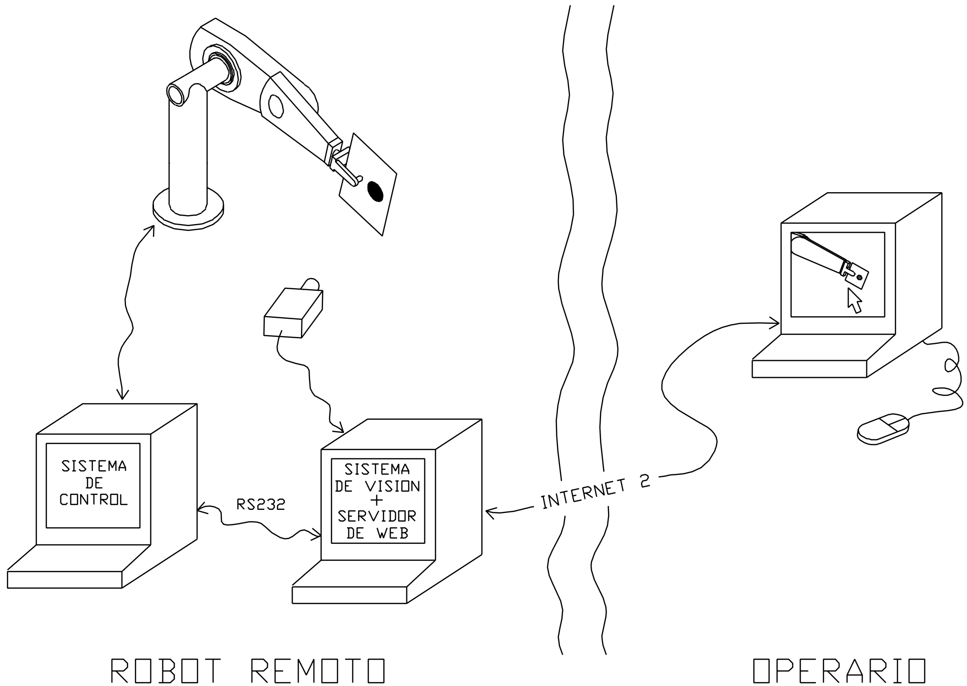


Figure 7: Operación remota: Robot manipulador

Operación remota: Robot móvil

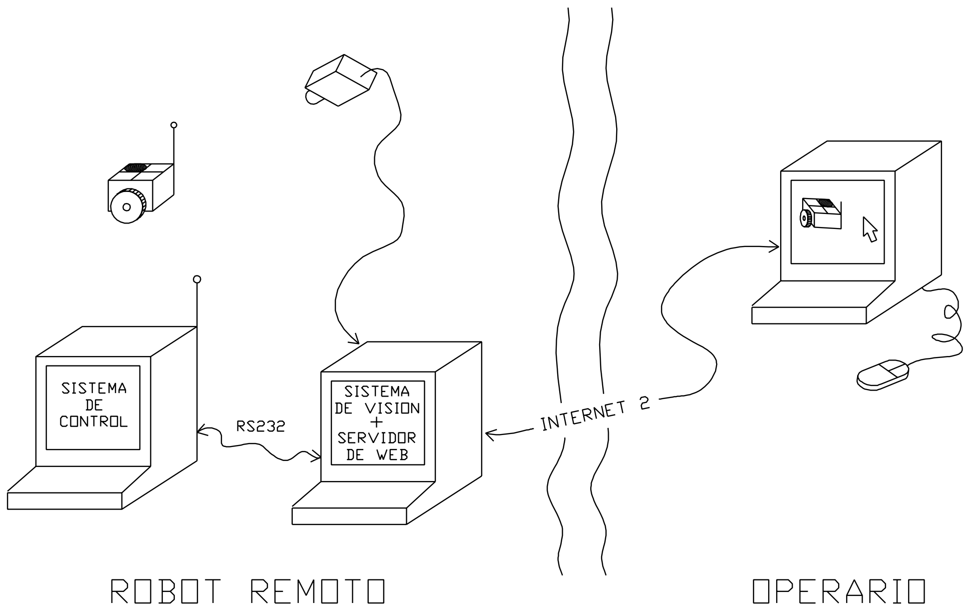
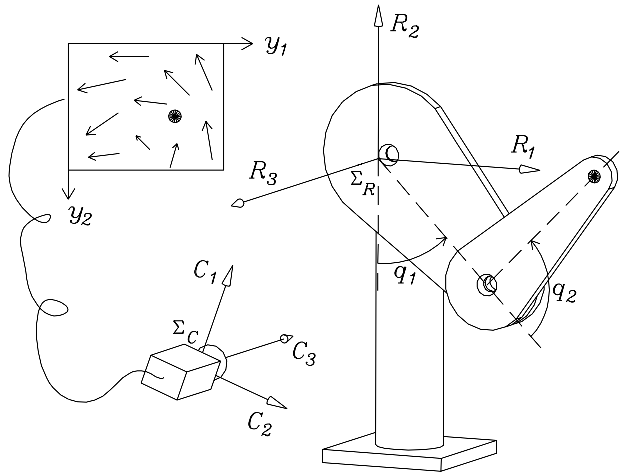


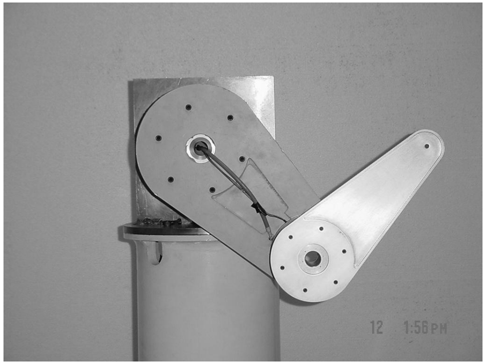
Figure 8: Operación remota: Robot móvil

Análisis: Operación remota del robot manipulador

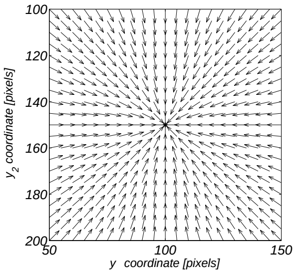


- Modelo dinámico: $M(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + C(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau}$
- Cinemática directa: $\boldsymbol{x}_R(\boldsymbol{q}) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$

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



Campo de velocidad deseado



- Cinemática perceptual:

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

donde

  - λ es la distancia focal
  - α es el factor de convesrsión de metros a pixeles
  - $\boldsymbol{O}_R^C = [O_{R1}^C \;\; O_{R2}^C \;\; O_{R3}^C]^T$ es la posición del origen de la cámara
  - $[u_0 \;\; v_0]^T$ es un sesgo

- Cinemática perceptual diferencial:

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

donde

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

Sistema de control

Subsistema de velocidad articular

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

dende

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

Subsistema cinemático

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

donde K es una matriz simétrica y definida positiva.

Sistema en malla cerrada

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

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 β es una constante satisfaciendo

$$0 < \beta < \frac{2\lambda_m\{K_v\}\lambda_m\{K\}}{k_J^2}, \tag{1}$$

Derivada temporal

$$\dot{V}(\boldsymbol{\rho},\boldsymbol{\xi},\tilde{\boldsymbol{\omega}}) = -\beta\boldsymbol{\rho}^T K\boldsymbol{\rho} + \beta\boldsymbol{\rho}^T J(\boldsymbol{q})\tilde{\boldsymbol{\omega}} - \tilde{\boldsymbol{\omega}}^T K_v\tilde{\boldsymbol{\omega}},$$

$$\dot{V}(\boldsymbol{\rho},\boldsymbol{\xi},\tilde{\boldsymbol{\omega}}) \le -\begin{bmatrix}\|\boldsymbol{\rho}\|\\ \|\tilde{\boldsymbol{\omega}}\|\end{bmatrix}^T \underbrace{\begin{bmatrix}\beta\lambda_m\{K\} & -\frac{1}{2}\beta k_J \\ -\frac{1}{2}\beta k_J & \lambda_m\{K_v\}\end{bmatrix}}_{Q} \begin{bmatrix}\|\boldsymbol{\rho}\|\\ \|\tilde{\boldsymbol{\omega}}\|\end{bmatrix}.$$

Análisis: Operación remota del robot móvil

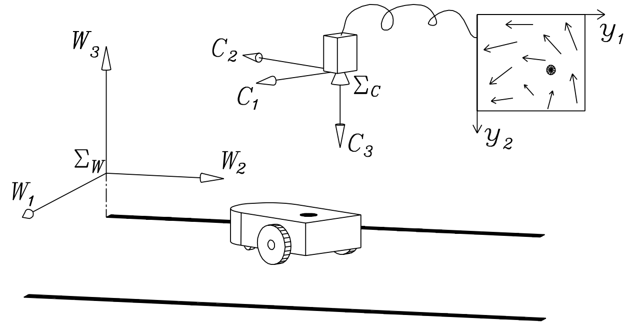


Figure 9: Robot móvil: cámara fija

- Modelo cinemático de postura:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x_{W1} \\ x_{W2} \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

donde x_{W1}, x_{W2} es la posición del robot y θ su orientación. Las acción de control $\boldsymbol{u} = [u_1 \;\; u_2]^T$ corresponden a la velocidad lineal y angular del robot.

- Cinemática perceptual:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{y} &= \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, \\ &= \underbrace{\frac{\alpha\lambda}{O^C_{W3}-\lambda} R(\phi)\left[\boldsymbol{x}_W - \begin{bmatrix} O^C_{W1} \\ \\ O^C_{W2} \end{bmatrix}\right] + \begin{bmatrix} u_0 \\ \\ v_0 \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_W)},\end{aligned} \tag{3}$$

donde

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ \sin(\phi) & -\cos(\phi) \end{bmatrix}$$

- Cinemática perceptual diferencial:

$$\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{y}} &= \frac{\alpha\lambda}{O^C_{W3}-\lambda} R(\phi) \begin{bmatrix} \dot{x}_{W1} \\ \dot{x}_{W2} \end{bmatrix}, \\ &= \frac{\alpha\lambda}{O^C_{W3}-\lambda} R(\phi) \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} u_1, \\ &= \frac{\alpha\lambda}{O^C_{W3}-\lambda} \begin{bmatrix} \cos(\theta-\phi) \\ -\sin(\theta-\phi) \end{bmatrix} u_1,\end{aligned} \tag{4}$$

Sistema de control

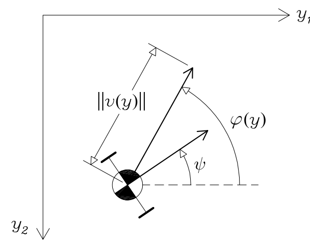


Figure 10: Vista del robot en la pantalla

$$
\begin{aligned}
u_1 &= \frac{1}{\gamma}\,\|\boldsymbol{v}(\boldsymbol{y})\|\,, && (5)\\
u_2 &= k\ \sin\left(\varphi(\boldsymbol{y}) - \bar{\psi}\right) + \|\boldsymbol{v}(\boldsymbol{y})\|\,\frac{\partial\varphi(\boldsymbol{y})}{\partial\boldsymbol{y}}^T \begin{bmatrix} \cos(\bar{\psi}) \\ -\sin(\bar{\psi}) \end{bmatrix} && (6)
\end{aligned}
$$

donde k es una constante positiva de diseño y γ depende de parámetros de visión.

Sistema en malla cerrada

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\boldsymbol{y}\\ \\ \psi\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{v}(\boldsymbol{y}) + \begin{bmatrix}\cos(\psi)-\cos(\varphi)\\ -\sin(\psi)+\sin(\varphi)\end{bmatrix}\|\boldsymbol{v}(\boldsymbol{y})\|\\ \\ k\ \sin\left(\varphi(\boldsymbol{y})-\bar{\psi}\right)+\dot{\varphi}\end{bmatrix}. \tag{7}$$

Principio de invariancia de LaSalle

$$V(\boldsymbol{y},\psi) = \frac{1}{2}\left[\varphi(\boldsymbol{y})-\psi\right]^2.$$

Derivada temporal

$$\dot{V}(\boldsymbol{y},\psi) = -k\left[\varphi(\boldsymbol{y})-\psi\right]\ \sin\left(\varphi(\boldsymbol{y})-\bar{\psi}\right).$$

$$\dot{V}(\boldsymbol{y},\psi) \le 0 \quad \forall \begin{bmatrix}\boldsymbol{y}\\ \psi\end{bmatrix} \in \mathcal{D}.$$