

Introducción a técnicas avanzadas de control

CONTROL Y PROGRAMACIÓN DE ROBOTS

Grado en Electrónica, Robótica y Mecatrónica



Índice

1. Introducción
2. Control robusto
3. Control basado en energía.
4. Control adaptativo
5. Control predictivo
6. Control repetitivo (*Learning control*)
7. Otros enfoques

Introducción

- Técnicas de control avanzadas en función del **problema/criterio/hipótesis a resolver**.
- Posibilidad de mezclar estrategias.
- Sólo **ideas orientativas** de la filosofía de algunas estrategias.
- La primera idea es que cualquier **modificación sobre el PD/PID externo basada en control lineal** puede ser válida para mejorar resultados.

Control robusto

- Pretende **atenuar el efecto de las incertidumbres del modelo** respecto al robot real.
- Hipótesis: **incertidumbre acotada**.
- Algoritmo propuesto para este curso: **funciones de saturación**

- **Hipótesis:**

- Aceleración máxima de referencia acotada:

$$\sup_{t>0} \|\ddot{q}_r(t)\| < Acc_{\max} < \infty$$

- Incertidumbre multiplicativa de la matriz dinámica acotada:

$$\|E(q)\| \equiv \|M_A(q)^{-1} \hat{M}_A(q) - I\| \leq \alpha \leq 1 \quad \forall q$$

- Incertidumbre aditiva de los términos centrípetos y gravitatorios acotados en el tiempo:

$$\|\Delta VG(q, \dot{q})\| \equiv \|(C_A(q, \dot{q}) - \hat{C}_A(q, \dot{q}))\dot{q} + (G_A(q) - \hat{G}_A(q))\| \leq \phi(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, t)$$

Control robusto

◦ LEY DE CONTROL:

Control: $I_m = \hat{M}_A(q)(\ddot{q}_r + u + \Delta u) + \hat{C}_A(q, \dot{q})\dot{q} + \hat{G}_A(q)$

Bucle cerrado interno: $\ddot{\tilde{q}} = u + \Delta u$ (Dinámica del error:
DOBLE INTEGRADOR DESACOPLADO)

Control de bucle interno: $u = K_p \tilde{q} + K_D \dot{\tilde{q}} = \begin{bmatrix} K_p & K_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix}$ (Diseño de PD
para $\ddot{\tilde{q}}=u$)

Cálculo de señal de control adicional (Δu) :

- Definición de función de acotación: $K = \begin{bmatrix} K_p & K_D \end{bmatrix}$

$$\rho(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, t) = \frac{1}{1-\alpha} \left(\alpha \text{Acc}_{\max} + \alpha \|K\| \|x\| + \bar{M} \phi(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, t) \right) \quad x^T = \begin{bmatrix} \tilde{q} & \dot{\tilde{q}} \end{bmatrix}^T$$

$$\bar{M} \geq \max(M_A^{-1}(q))$$

- Cálculo de la única solución P simétrica y definida positiva de la ecuación:

$$(A - BK)^T P + P(A - BK) + Q = 0 \quad A = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ I_{n \times n} & 0_{n \times n} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} I_{n \times n} \\ 0_{n \times n} \end{bmatrix}$$

Q : simétrica y definida positiva

Control robusto

◦ LEY DE CONTROL:

Cálculo de señal de control adicional (Δu) :

$$\Delta u = \begin{cases} -\rho(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, t) \frac{B^T P x}{\|B^T P x\|} & \text{si } \|B^T P x\| \geq \varepsilon \\ \frac{-\rho(\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, t)}{\varepsilon} B^T P x & \text{si } \|B^T P x\| < \varepsilon \end{cases} \quad \varepsilon \ll 1$$

Control basado en energía

- Control basado en **Lyapunov**:
 - La idea es asegurar la estabilidad asintótica (exponencial a ser posible) del control del robot sin linealizar ni desacoplar el modelo del mismo.
- Control basado en **pasividad**:
 - Aprovecha la propiedad de pasividad de los modelos (*hamiltonianos*) del robot, sin intentar cancelar la dinámica no lineal del mismo, por lo que el control debe ser más robusto.
 - Un sistema pasivo es un sistema que disipa energía (la salida del sistema es más energética de que entrada del mismo).
 - La idea es modificar la energía natural del robot para alcanzar el objetivo deseado (control de posición o de trayectoria).

Control basado en energía

- Control **H_∞** :
 - También conocido como control con **ganancia L_2** .
 - Enfoque similar al de pasividad, en el sentido de disipación de energía.
 - Se basa en diseñar una ley de control que **atenúe la relación entre la energía del vector (ponderado) de errores frente a la energía de las perturbaciones**.
 - Supone que la energía de las perturbaciones está acotada.
 - El resultado es un **sistema en bucle cerrado no autónomo**, a diferencia del control por pasividad.

Control adaptativo

- Ley de control (parámetros o estructura) cambia en línea según condiciones de operación.
- Enfoques más comunes en robots:
 - Aplicación de técnicas adaptativas, desarrolladas para sistemas lineales (cambio de parámetros del controlador, cambio de controlador, ...).
 - Estimación de parámetros en línea para actualizar el modelo estimado del robot.
 - La ley de adaptación dependerá del enfoque del control (par calculado, pasividad, ...).

Control predictivo

- Hace uso del conocimiento (futuro) de las trayectorias deseadas para generar señales de control.
- Predicciones del comportamiento (futuro) basado en modelo:
 - Lineal si se utiliza como ley de control externa sobre sistema linealizado (por ejemplo, por realimentación).
 - No lineal se utiliza un modelo no lineal del robot.
- Se suele utilizar una funcional de coste cuadrática.
- En cierta manera, forma parte de este enfoque las leyes de control del tema anterior en las que en el cálculo del modelo dinámico se sustituye las medidas de las articulaciones por sus referencias.

Control repetitivo

- Uso en robots que deben hacer la **misma tarea de manera repetitiva**.
- La idea es utilizar la información tanto del error como de la señal de control en una iteración para ir modificando el control en futuras iteraciones.
- Ejemplo: robot de pintura que siempre ha de realizar la misma tarea (pintar un coche). La idea es que el robot vaya aprendiendo (**learning control**) a pintar cada vez mejor los futuros coches.

Otros enfoques

- Control de fuerza/posición
- Control de sistemas con fricción
- Control con realimentación visual
- Control de robots flexibles
- Control de sistemas subactuados
- ...