MANUAL DE ESTUDIO · SISTEMAS ROBÓTICOS

Sensores, control y seguridad en sistemas robóticos

Capítulo 03 · En el video: **minuto 31:06** · Duración 14:50

Objetivo. Relacionar los sensores y el controlador de un robot con las normas de seguridad y calcular la distancia mínima de un escáner.

Ideas clave

Cinco subsistemas

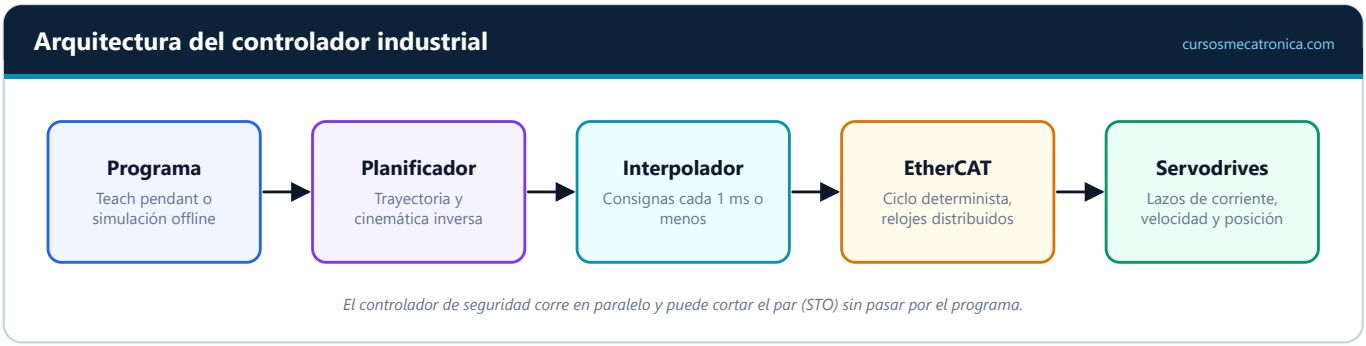
Estructura mecánica, actuación, sensórica, control y seguridad. Las aleaciones livianas y el arnés interno guiado reducen la inercia y alargan la vida de los cables que se tuercen en cada ciclo.

Sensores propioceptivos

Miden el estado del propio robot. El encoder incremental en cuadratura entrega 4 cuentas por línea; el multivuelta absoluto no necesita referenciarse; el resolver es robusto ante temperatura y vibración. Con el encoder en el motor, la resolución en la articulación se multiplica por la reducción.

Sensores exteroceptivos

Miden el entorno. El sensor de fuerza y par de seis ejes en la muñeca (galgas extensiométricas) permite controlar el contacto al pulir o ensamblar. La visión puede ir en la muñeca (eye-in-hand) o fija en la celda; el LiDAR y las cámaras 3D entregan nubes de puntos.



Del programa al motor.

Teach pendant

La consola trae parada de emergencia y un dispositivo habilitador de tres posiciones: solo permite mover el robot con el botón a medio camino; si se suelta o se aprieta con fuerza (pánico), se detiene. La programación offline simula la celda antes de llevarla al robot.

ISO 10218 e ISO/TS 15066

Los cuatro modos colaborativos son parada monitoreada, guiado manual, monitoreo de velocidad y separación, y limitación de potencia y fuerza. Este último compara el par externo estimado con umbrales biomecánicos.



Salida de seguridad_celda.py.

Distancia de separación

ISO 13855 fija dónde poner un escáner o cortina: $S = K \cdot T + C$, con K = 1600 mm/s (velocidad de aproximación de una persona) y T el tiempo del detector más el de parada del robot.

Fórmulas y relaciones

Relación	Expresión	Cómo leerla
Resolución articular	$\Delta\theta = 360° / (4 \cdot N \cdot i)$	N líneas del encoder, i reducción.
Resolución en el TCP	$\Delta s = R \cdot \Delta\theta \ (\text{rad})$	R: distancia al eje.
Distancia mínima (ISO 13855)	$S = K \cdot (t_1 + t_2) + C$	K = 1600 mm/s.
Escáner horizontal	$C = 1200 - 0{,}4 \cdot H \ (\geq 850 \text{ mm})$	H: altura del plano de detección.
Par externo	$\tau_{ext} = \tau_{medido} - \tau_{modelo}$	Se compara con un umbral.

Ejemplo resuelto: dónde poner el escáner de una celda

1. Escáner con plano a 300 mm del piso: $C = 1200 - 0{,}4 \cdot 300 = 1080$ mm.
2. Tiempo del escáner 80 ms y tiempo de parada del robot 420 ms: T = 0,50 s.
3. $S = 1600 \cdot 0{,}50 + 1080 = 1880$ mm.
4. El campo de protección debe empezar a 1,88 m del punto peligroso más cercano.

Si el robot frenara en 300 ms, S bajaría a 1,68 m. seguridad_celda.py calcula además la resolución del encoder y simula la detección de un choque.

Modos colaborativos (ISO 10218 / ISO/TS 15066)

Modo	Cómo funciona	Ejemplo
Parada monitoreada	El robot se detiene cuando entra la persona	Carga manual de una pieza
Guiado manual	La persona mueve el robot con un mando en la muñeca	Enseñar posiciones
Velocidad y separación	Baja la velocidad según la distancia medida	Celda con escáner
Potencia y fuerza	Limita el par y la energía de contacto	Cobot junto al operario

Código del capítulo

Los archivos completos vienen en el paquete ZIP del capítulo (carpeta `codigo/`).

seguridad_celda.py — resolución del encoder en el TCP, distancia ISO 13855 y supervisión del par externo.

```
"""
seguridad_celda.py — Capítulo 03: resolución del encoder, distancia de separación
(ISO 13855) y supervisión del par externo con parada de categoría 1.
"""
import math


def resolucion_tcp(pulsos_vuelta, reduccion, radio_m):
    """Paso angular en la articulación y desplazamiento en el TCP por cuenta (cuadratura ×4)."""
    cuentas = 4 * pulsos_vuelta * reduccion
    paso = 2 * math.pi / cuentas
    return math.degrees(paso), paso * radio_m


def distancia_iso13855(t_detector, t_parada, altura_mm, k=1600):
    """Escáner de plano horizontal: S = K·T + C, con C = 1200 − 0,4·H (mínimo 850 mm)."""
    c = max(850, 1200 - 0.4 * altura_mm)
    return k * (t_detector + t_parada) + c, c


def par_modelo(t):
    """Par que el modelo dinámico predice para el movimiento (N·m)."""
    return 30 + 8 * math.sin(2 * math.pi * 0.5 * t)


def par_medido(t):
    """Par estimado con la corriente del motor: modelo + ruido + choque a los 1,20 s."""
    ruido = 1.2 * math.sin(37 * t) + 0.8 * math.sin(91 * t)
    choque = 0.0 if t < 1.20 else min(60.0, 150 * (t - 1.20))
    return par_modelo(t) + ruido + choque


def supervisar(umbral=12.0, dt=0.001, duracion=2.0):
    """Devuelve el instante de detección y el de reposo (parada de categoría 1, 0,15 s)."""
    t = 0.0
    while t < duracion:
        externo = par_medido(t) - par_modelo(t)
        if abs(externo) > umbral:
            return t, t + 0.15
        t += dt
    return None, None


if __name__ == '__main__':
    grados, metros = resolucion_tcp(pulsos_vuelta=2500, reduccion=100, radio_m=1.2)
    print(f'Encoder 2500 ppr ×4, reductor 100:1 -> {grados * 3600:.2f} arcsec por cuenta,'
```

```
          f' {metros * 1e6:.2f} µm en el TCP a 1,2 m')

    s, c = distancia_iso13855(t_detector=0.080, t_parada=0.420, altura_mm=300)
    print(f'ISO 13855: C = {c:.0f} mm, S = 1600 × 0,50 + {c:.0f} = {s:.0f} mm')

    t_det, t_reposo = supervisar()
    print(f'Choque a 1,200 s -> detectado a {t_det:.3f} s'
          f' (umbral 12 N·m), robot en reposo a {t_reposo:.3f} s')
```

Errores frecuentes

- Usar el tiempo de parada del catálogo con carga mínima en vez de con la carga real.
- Olvidar el factor 4 de la cuadratura al calcular la resolución.
- Poner el escáner a la distancia S medida desde el robot y no desde el punto peligroso.

Autoevaluación

1. ¿Qué hace el habilitador si el operario lo aprieta a fondo?
2. ¿Qué valor de K usa ISO 13855 para una persona caminando?
3. ¿Qué mide un sensor exteroceptivo?

Respuestas. 1. Detiene el robot (posición de pánico). **2.** 1600 mm/s. **3.** El entorno (fuerza de contacto, imagen, distancia).