

validação de sistemas embebidos com testes *Hardware-in-the-Loop*

SAE - Sistemas de Automação e Energia, Lda

Com a evolução dos sistemas robóticos e a sua crescente integração em ambientes industriais, médicos, domésticos e até espaciais, a fiabilidade dos sistemas embebidos que os controlam tornou-se absolutamente crítica.



Sensores, atuadores, algoritmos de controlo, redes de comunicação e Inteligência Artificial precisam de funcionar de forma integrada, precisa e robusta. Num cenário em que a validação de comportamentos em situações reais pode ser dispendiosa ou mesmo perigosa, os testes do tipo *Hardware-in-the-Loop* (HIL) oferecem uma solução eficaz e segura para validar os componentes críticos de um sistema robótico ainda durante a fase de desenvolvimento.

A técnica HIL permite ligar fisicamente uma Unidade de Controlo Eletrónica (ECU) — que pode ser, por exemplo, o microcontrolador central de um *robot* móvel — a um ambiente de simulação que reproduz, com elevada fidelidade, o comportamento do mundo físico. Este ambiente, muitas vezes descrito como um gémeo digital, inclui modelos matemáticos dos sensores, dos atuadores e da dinâmica do sistema que a ECU irá controlar. Desta forma, é possível testar o *software* e o *hardware* de controlo em cenários virtuais, mas com comportamento próximo do real, de forma controlada, segura e repetível.

A aplicação desta técnica à robótica tem-se revelado particularmente útil nas fases de desenvolvimento e validação de sistemas autónomos, onde os algoritmos precisam de responder com precisão a estímulos complexos e variáveis. Por exemplo, é possível testar o sistema de navegação de um *robot* num cenário urbano simulado, com tráfego, obstáculos e condições ambientais diversas, sem necessidade de colocar o *robot* real em movimento. A ECU recebe os dados dos sensores simulados, processa-os e envia comandos aos atuadores virtuais, permitindo observar todo o ciclo de controlo como se estivesse no terreno.

Um sistema HIL típico em robótica inclui:

- A ECU real, que executa o *firmware* e os algoritmos de controlo;
- A plataforma de simulação em tempo real, que corre os modelos do *robot* e do ambiente;
- As *interfaces* que permitem a comunicação entre ambos.

Estas *interfaces* podem incluir conversores de sinal, barramentos digitais como CAN ou SPI, ou ainda protocolos Ethernet para integração com sistemas ROS (*Robot Operating System*). A precisão temporal da simulação é essencial para garantir que a ECU interage com o ambiente virtual da mesma forma que o faria no mundo físico.

Na robótica móvel, o HIL é usado para validar algoritmos de localização e mapeamento (SLAM), controlo de trajetória, deteção e evasão de obstáculos, entre outros. No caso de braços robóticos, permite testar algoritmos de controlo de força e posição, detetando problemas de estabilidade ou coordenação antes mesmo de o sistema ser ligado fisicamente. Em *robots* colaborativos (*cobots*), é possível simular a interação com operadores humanos, testando limites de força e reação a movimentos inesperados, assegurando que o sistema atua dentro dos critérios de segurança estabelecidos.

“A técnica HIL permite ligar fisicamente uma Unidade de Controlo Eletrónica (ECU) — que pode ser, por exemplo, o microcontrolador central de um *robot* móvel — a um ambiente de simulação que reproduz, com elevada fidelidade, o comportamento do mundo físico.



Além das vantagens técnicas, o HIL oferece benefícios económicos significativos. A possibilidade de realizar testes exaustivos sem desgaste de *hardware* físico reduz custos de manutenção e de substituição de componentes durante o desenvolvimento. A repetição de