

Abstract

Collaborative robotics plays a crucial role in Industry 4.0 and is driving Industry 5.0, fostering a human-centered industrial paradigm. Unlike traditional industrial robots confined to safety cages, collaborative robots share workspaces with human operators, enhancing industrial processes by increasing flexibility and adaptability. However, this close interaction poses substantial challenges, particularly in ensuring human safety while preserving efficiency. Overcoming these challenges requires advancements in perception, motion planning, and task planning.

This thesis tackles these challenges mainly at the task planning level. It introduces the concept of synergy, quantifying the robot's performance slowdown caused by concurrent human task execution due to safety requirements like ISO/TS 15066. This metric can be estimated from past executions or through simulation as a regression task. Leveraging this synergy metric, it proposes two mixed-integer nonlinear programming models for human-aware task allocation and scheduling. These models integrate synergy to generate safer and more efficient task plans, proactively reducing unnecessary interference between agents. The methods were validated in simulation and real-world industrial scenarios, specifically in a human-robot collaboration setting for e-waste disassembly.

Furthermore, deploying robots in dynamic environments shared with humans introduces significant uncertainty. Often, the objective is to complete tasks as fast as possible, but robot task durations are not known in advance. To address this, the thesis combines low-level real-time updates of action durations via a Kalman filter in the execution loop with a high-level exploration-exploitation module inspired by Thompson Sampling. This integrates with traditional temporal planners without adding computational overhead, enabling reasoning about action duration uncertainties and adapting robot behavior to dynamic environments. The effectiveness of the method was validated in a multi-robot social scenario.

Sommario

La robotica collaborativa rappresenta un pilastro fondamentale per i moderni processi produttivi, promuovendo un paradigma industriale incentrato sugli operatori umani. A differenza dei robot industriali tradizionali, confinati in ambienti protetti, i robot collaborativi condividono lo spazio di lavoro con gli operatori umani, aumentando la flessibilità e l'adattabilità. Tuttavia, questa interazione introduce sfide significative, specialmente nel garantire la sicurezza senza compromettere l'efficienza.

Questa tesi affronta tali sfide a livello decisionale, ovvero di pianificazione dei compiti. Viene proposto il concetto di sinergia, una metrica che quantifica la riduzione delle prestazioni del robot dovuta all'esecuzione simultanea di compiti da parte di un operatore umano, a causa delle normative di sicurezza, come la ISO/TS 15066. Questo parametro può essere stimato utilizzando dati storici formalizzandolo come un problema di regressione. Sulla base di questa metrica, vengono proposti due modelli di programmazione non lineare mista intera per l'allocazione e la schedulazione dei compiti in contesti uomo-robot. Questi modelli integrano i coefficienti di sinergia per generare piani operativi più sicuri ed efficienti, riducendo in modo proattivo le interferenze non necessarie tra gli agenti.

Inoltre, l'impiego di robot in ambienti dinamici condivisi con le persone introduce un alto grado di incertezza in termini di durata delle azioni. In questo ambito, la tesi propone un approccio che combina l'aggiornamento in tempo reale delle durate delle azioni in fase di esecuzione tramite un filtro di Kalman, con un modulo di esplorazione-sfruttamento ispirato alla strategia di Thompson Sampling. L'approccio si integra con i pianificatori tradizionali senza aumentarne il carico computazionale, usando le informazioni di incertezza delle durate in fase di generazione del problema, rendendo robusto l'impiego di robot in ambienti dinamici.

L'efficacia dei metodi proposti è stata valutata attraverso simulazioni e casi studio reali, sia in contesti industriali che sociali.