

Abstract

Human multi-robot interaction: from workspace sharing to physical collaboration

Martina Lippi

In decentralized systems, the control loop between robots, sensors, actuators and processing units does not close on the same physical device, but through a communication network on which the explicit or implicit exchange of information takes place; this leads each agent to only access *local* information despite a *global* task to accomplish. Furthermore, a human operator interacting with robotic systems represents a subsystem whose dynamics, however, is unknown and not deterministic.

The thesis work aims to investigate different aspects and scenarios that arise from human multi-robot collaboration. Despite the potential increase in performance in terms of efficiency, robustness to failure and flexibility resulting from the use of multiple robots in collaboration with humans (compared to the case with a single robot), this scenario is still unexplored in the current state of the art. More in detail, this collaboration requires to combine actions to ensure human safety and possibly assist him/her, and, at the same time, actions to coordinate the multi-robot system while handling any related constraints that it poses. Among the latter, for example, there are closed kinematic chains that characterize transport applications and, in general, cooperative manipulation of objects. Moreover, this coordination becomes more critical if a distributed control strategy is adopted.

The first identified scenario is that of pure *coexistence* of human operators and robots in the same working environment. In this context, a decentralized coordination architecture is designed that ensures human safety while achieving a cooperative robotic task. In particular, considering that in industrial applications it is typically preferable to preserve the path planned off-line, the solution proposes to modulate the task velocity of the multi-robot system, without deviations from its nominal path, in order to ensure human safety. Then, only if the dynamic modulation of the velocity is not sufficient to guarantee safety, an evasive action is foreseen; the latter is compliant with kinematic constraints deriving from rigidly connected robots.

The mere coexistence in the same work environment is, however, limiting in terms of possible collaborative tasks. Therefore, scenarios of multi-robot *physical* human interaction through co-manipulation of rigid objects are investigated. More in detail, a two-layer architecture is proposed, in which the top level establishes the dynamics to impose to the object based on the human interaction, while the bottom level allows to impose such dynamics in a distributed way and, at the same time, to regulate the internal stresses resulting from the manipulation of the same rigid object. In relation to the desired dynamics of the object, two possible scenarios are considered: (i) assistance to the person, formulated as a force regulation problem where the goal is to minimize the operator's effort in transporting the load, and (ii) shared control of the object, formulated as an optimization problem where the goal is to combine autonomous robot tasks with human intention.

However, the complexity of robotic tasks and the environment, the uncertainty of human behavior and the typical lack of awareness of mutual human-robot actions cause not only *intentional* but also *accidental* contacts to arise in a scenario of physical collaboration. For this reason, a data driven approach is proposed that allows to identify possible contact with the human on the basis of on board torque sensors, to distinguish its nature, intentional or accidental, and to react accordingly. Differently from solutions present in literature, the methodology allows to realize the above also in case the robot task itself requires interaction with the environment. For this purpose, recurrent neural networks are used for time series classification and Gaussian mixtures models to define the expected interaction wrenches.

In addition, note that, in order to achieve a safe human multi-robot collaboration, it is necessary that the multi-robot system itself is *reliable*, i.e., in case of faults, they need to be promptly detected and isolated not to compromise the personnel safety. For this reason, distributed solutions of fault identification and isolation are designed that, based on local state observers, allow to define residual signals for monitoring the health state of each robot in the team.

Finally, the role of the human operator can also be to provide *examples* to the robotic system rather than to perform tasks side-by-side with it. This functionality becomes particularly relevant when the state of the system cannot be easily determined analytically, for example for handling deformable objects, causing planning operations to achieve desired configurations extremely complex. Consequently, a solution is developed to enable visual and action planning based on examples in a high dimensional space. In particular, a latent space of reduced dimensionality is defined using images representing consecutive states of the system, and a graph structure is built in it to capture the dynamics of the system and, finally, to perform task planning.

The entire research activity is supported by a continuous prototyping and validation activity in both simulative and real environments.

Abstract

Interazione uomo multi-robot: da condivisione dello spazio di lavoro a collaborazione fisica

Martina Lippi

Nei sistemi distribuiti, il ciclo di controllo tra robot, sensori, attuatori e unità di calcolo non si chiude sullo stesso dispositivo fisico, ma attraverso una rete di comunicazione su cui avviene lo scambio esplicito o implicito di informazioni; da ciò deriva la località delle informazioni di cui dispone ciascun agente che si pone in contrasto con la globalità dei task da compiere. Inoltre, un operatore umano che interagisce con sistemi robotici rappresenta esso stesso un sottosistema la cui dinamica, tuttavia, è non nota e non deterministica.

Il lavoro di tesi si pone l'obiettivo di investigare diversi aspetti e scenari che insorgono da tale collaborazione uomo multi-robot. Nonostante il potenziale incremento di prestazioni in termini di efficienza, robustezza ai guasti e flessibilità che deriva dall'uso di più robot in collaborazione con persone (rispetto al caso con singolo robot), tale collaborazione è ancora inesplorata nel corrente stato dell'arte. Più in dettaglio, tale collaborazione richiede di conciliare azioni per assicurare la sicurezza dell'operatore umano ed eventualmente assisterlo, e, al contempo, azioni per gestire il coordinamento del sistema multi-robot e dei relativi eventuali vincoli che esso pone. Tra questi ultimi, ad esempio, emergono catene cinematiche chiuse che caratterizzano applicazioni di trasporto e, in generale, di manipolazione cooperante di oggetti. Tale coordinamento diviene maggiormente critico qualora, inoltre, si adotti una strategia di controllo decentralizzato.

Il primo scenario individuato è quello di pura *coesistenza* di operatori umani e robot nello stesso ambiente di lavoro. In tale contesto, è stata proposta una architettura di coordinamento decentralizzata che ha lo scopo di garantire la sicurezza degli operatori. In particolare, considerando che in applicazioni industriali è tipicamente preferibile preservare il percorso pianificato off-line, la soluzione propone di modulare la velocità del task del sistema multi-robot, senza deviazioni dal suo percorso nominale, al fine di garantire la sicurezza della persona. Pertanto, solo qualora la modulazione dinamica della velocità non sia sufficiente per garantire la sicurezza, si prevede il ricorso ad un'azione evasiva; quest'ultima risulta conforme con vincoli cinematici derivanti da robot connessi in maniera rigida.

La sola coesistenza nello stesso ambiente di lavoro è, però, limitante ai fini dei possibili task collaborativi. Pertanto, sono stati investigati scenari di interazione *fisica* uomo multi-robot per mezzo di co-manipolazione di oggetti rigidi. Più in dettaglio, è stata proposta una architettura a doppio livello, in cui il livello superiore stabilisce la dinamica da imporre all'oggetto in base all'interazione con la persona, mentre il livello inferiore consente di imporre tale dinamica in maniera distribuita e, al contempo, di regolare le forze interne derivanti dalla manipolazione dello stesso oggetto. In relazione alla dinamica desiderata dell'oggetto, sono stati considerati due possibili scenari: (i) assistenza alla persona, formulato come problema di regolazione delle forze in cui l'obiettivo è minimizzare lo sforzo dell'operatore nel trasporto del carico, e (ii) controllo condiviso dell'oggetto, formulato come problema di ottimizzazione in cui l'obiettivo è combinare task autonomi dei robot con volontà della persona.

Tuttavia, la complessità dei task robotici e dell'ambiente, l'incertezza del comportamento umano e la tipica carenza di consapevolezza delle azioni reciproche uomo-robot fanno sì che in uno scenario di collaborazione fisica possano insorgere non solo contatti *intenzionali*, ma anche *accidentali*. Per tale ragione, è stato proposto un approccio orientato ai dati che consente di identificare possibile contatto con la persona sulla base di sensori di coppia a bordo del robot, distinguerne la natura, intenzionale o accidentale, e reagire in accordo ad essa. Diversamente da soluzioni presenti in letteratura, la metodologia consente di effettuare quanto sopra anche nel caso in cui il task stesso del robot richieda interazione con *l'ambiente*. A tale scopo, sono state utilizzate reti neurali ricorrenti per la classificazione delle serie temporali e misture di modelli gaussiani per modellare le forze di interazione attese.

Si noti, inoltre, che, per realizzare una collaborazione uomo multi-robot *sicura*, è necessario che il sistema multi-robot stesso sia *affidabile*, ossia che, in caso di guasti, questi vengano prontamente individuati ed isolati senza compromettere la sicurezza del personale. A tale scopo, sono state progettate opportune metodologie distribuite di identificazione e isolamento dei guasti che, sulla base di osservatori dello stato, consentono di definire segnali residui per il monitoraggio dello stato di funzionamento di ciascun robot nel team.

Infine, il ruolo dell'operatore umano può anche essere quello di fornire *esempi* per il sistema robotico piuttosto che di eseguire task al fianco di quest'ultimo. Tale funzionalità diviene particolarmente rilevante quando lo stato del sistema non può essere facilmente determinato analiticamente, ad esempio per la manipolazione di oggetti deformabili, rendendo estremamente complessa la pianificazione per il conseguimento di configurazioni desiderate. In virtù di ciò, è stata sviluppata una soluzione che consente di effettuare pianificazione visuale e attuativa a partire da esempi in uno spazio di elevata dimensionalità. In particolare, sulla base di immagini rappresentanti stati consecutivi del sistema, è definito uno spazio latente di dimensionalità ridotta ed è costruita una struttura a grafo in esso che consente di catturare la dinamica del sistema e, infine, effettuare pianificazione.

L'intera attività di ricerca è stata supportata da una continua attività di prototipazione e validazione sia in ambienti simulativi che reali.