



Università degli Studi di Salerno

.DIEM

**Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione
ed Elettrica e Matematica Applicata**

Dottorato di Ricerca in Ingegneria dell'Informazione
Ciclo 38

TESI DI DOTTORATO / PH.D. THESIS

Human-aware haptic teleoperation for safe and dexterous interactions

LORENZO Pagliara

SUPERVISORS:

PROF. PASQUALE CHIACCHIO

PROF. GIOVANNI RUSSO

PHD PROGRAM DIRECTOR: **PROF. PASQUALE FOGGIA**

Anno 2026

Abstract

Advanced robotics is a key pillar of the ongoing fourth industrial revolution, with robots now required to perform complex tasks that often involve physical interaction with humans. An effective deployment of physical human-robot interaction requires the fulfillment of safety and dependability requirements, ensuring a safe and predictable behavior even in the presence of faults or unforeseen events, as well as fostering human acceptance, which critically relies on the robot displaying human-like and transparent behaviors.

In this context, haptic teleoperation has emerged as one of the most advanced modalities of physical human-robot interaction, capable of extending human cognitive and manipulative capabilities into remote environments, and combining them with the skills of robots. The bidirectional nature of haptic bilateral teleoperation systems enhances the human situational awareness and the safety of the interaction, but also introduces several challenges in terms of stability and usability, arising from the strong coupling of the different entities and by the presence of unreliable network conditions in the communication channel connecting them. In such a scenario, this dissertation contributes to three fundamental aspects in the design of human-aware haptic bilateral teleoperation systems: haptic feedback rendering,

interaction control, and mapping and scaling techniques, with an emphasis on their integration to ensure safe and effective task execution.

A first contribution is the formal assessment of haptic teleoperation under time delays, highlighting how haptic feedback improves the safety of the considered task, increases human awareness, allowing to compensate for communication delays, and improves the usability of the system. When applied to a planetary manipulation tasks, haptic teleoperation enables the execution of the latter, requiring a high degree of accuracy, with a success rate 2.25 times higher than that of unilateral teleoperation systems, relying solely on visual feedback, almost nullifying the probability of failure due to exceeding a safety threshold in the exerted forces.

Building on this analysis, two novel haptic bilateral teleoperation systems for precision tasks are proposed. The first leverages a novel virtualized force feedback that enables a natural perception of contact states, increasing human operator awareness and system stability. Furthermore, it integrates an interaction force limitation strategy, to enhance task safety according to the current certification process of applications with physical human-robot interaction. The second, conceived for free-hand dental procedures, integrates the virtualized force feedback with an eye-hand coordination mapping strategy, enabling the human operator to perceive the motion correspondence between their movements and those of the end-effector observed in the view of an eye-in-hand camera, preserving manual dexterity and expertise. Such system leverages a novel force limitation strategy, ensuring procedural safety also in highly unstructured environments. Experimental validation of both systems demonstrates improvements in accuracy, safety, and usability of the

system, compared to state-of-the-art approaches. Furthermore, the haptic bilateral teleoperation system for free-hand dental procedures was clinically evaluated with 19 participants with different levels of experience in the dental field, who performed four dental scaling procedures on a resin model using the system equipped with an active dental scaler. The study confirmed the feasibility of the system for free-hand dental procedures and showed consistent performance across all user groups. Participants effectively completed the tasks and reported high usability and comfort, highlighting the potential of this system as a reliable and intuitive platform for both clinical and educational applications.

Finally, on the topic of human supervisory control, this thesis presents a novel control framework and a robotic system for dependable robotized bolting operations, integrating state-of-the-art components with a multimodal human-robot interface and a high-level supervisor orchestrating them. An experimental evaluation on a representative bolting task confirms that this approach enables dependable execution, reliable fault detection, and effective operator intervention. Overall, the results demonstrate that integrating human supervision with direct control capabilities enhances system safety and dependability.

In conclusion, the results achieved in this dissertation show that designing human-aware haptic teleoperation systems, with novel strategies for haptic feedback rendering, interaction control, mapping and scaling, significantly improves both safety and usability in interaction tasks, and paves the way for new approaches to transferring human knowledge to the robot, bridging the gap between direct human control and autonomous robotic behavior.

La robotica avanzata rappresenta un pilastro fondamentale della quarta rivoluzione industriale in corso, con robot oggi chiamati a svolgere compiti complessi che spesso prevedono un'interazione fisica con gli esseri umani. Un impiego efficace dell'interazione fisica uomo-robot richiede il soddisfacimento di requisiti di sicurezza e affidabilità, garantendo un comportamento sicuro e prevedibile anche in presenza di guasti o eventi imprevisti, oltre a favorire l'accettazione da parte dell'utente, che dipende in modo critico dalla capacità del robot di mostrare comportamenti trasparenti e simili a quelli umani.

In questo contesto, la teleoperazione aptica si è affermata come una delle modalità più avanzate di interazione fisica uomo-robot, capace di estendere le capacità cognitive e manipolative dell'essere umano in ambienti remoti, combinandole con le abilità dei robot. La natura bidirezionale dei sistemi di teleoperazione aptica bilaterale potenzia la consapevolezza situazionale dell'operatore e la sicurezza dell'interazione, ma introduce anche diverse sfide in termini di stabilità e usabilità, derivanti dal forte accoppiamento tra le varie entità coinvolte e dalle condizioni di rete non affidabili nel canale di comunicazione che le collega. In tale scenario, questa tesi contribuisce a tre aspetti fondamentali della progettazione di sistemi di teleoperazione aptica bilaterale human-aware: rendering aptico, controllo dell'interazione e tecniche di mappatura e scaling, con particolare attenzione alla loro integrazione per garantire un'esecuzione del compito sicura ed efficace.

Un primo contributo consiste nella valutazione formale della teleoperazione aptica in presenza di ritardi di comunicazione, mostrando come il feedback aptico migliori la sicurezza del compito considerato, aumenti la consapevolezza dell'operatore, permetta di compensare i ritardi e migliori l'usabilità del sistema.

Applicata a un compito di manipolazione in ambito planetario, la teleoperazione aptica consente l'esecuzione dell'attività, che richiede elevata precisione, con una percentuale di successo 2,25 volte superiore rispetto ai sistemi unilaterali basati esclusivamente su feedback visivo, riducendo quasi a zero la probabilità di fallimento dovuta al superamento di una soglia di sicurezza nelle forze esercitate.

A partire da questa analisi, vengono proposti due innovativi sistemi di teleoperazione aptica bilaterale per compiti di precisione. Il primo sfrutta un nuovo schema di forze feedback virtualizzato che consente una percezione naturale degli stati di contatto, aumentando la consapevolezza dell'operatore e la stabilità del sistema. Inoltre integra una strategia di limitazione delle forze di interazione, finalizzata a migliorare la sicurezza del compito in accordo con gli attuali processi di certificazione per applicazioni con interazione fisica uomo-robot. Il secondo sistema, concepito per procedure dentali free-hand, integra il forze feedback virtualizzato con una strategia di mappatura basata sulla coordinazione occhio-mano, permettendo all'operatore di percepire la corrispondenza tra i propri movimenti e quelli dell'end-effector osservato tramite una camera eye-in-hand, preservando destrezza ed expertise manuale. Il sistema impiega inoltre una nuova strategia di limitazione delle forze, garantendo sicurezza procedurale anche in ambienti altamente non strutturati. La validazione sperimentale di entrambi i sistemi dimostra miglioramenti in accuratezza, sicurezza e usabilità rispetto agli approcci allo stato dell'arte. Inoltre, il sistema di teleoperazione aptica bilaterale per procedure dentali free-hand è stato valutato clinicamente con 19 partecipanti con differenti livelli di esperienza nel settore odontoiatrico, che hanno eseguito quattro procedure di scaling su un modello in resina utilizzando il sistema dotato di scaler dentale attivo. Lo studio ha confermato la fattibilità

del sistema per procedure dentali free-hand e ha evidenziato prestazioni consistenti in tutti i gruppi di utenti. I partecipanti hanno completato efficacemente i compiti e riportato elevata usabilità e comfort, evidenziando il potenziale del sistema come piattaforma affidabile e intuitiva sia per applicazioni cliniche che formative.

Infine, sul tema del controllo supervisionato umano, questa tesi presenta un nuovo framework di controllo e un sistema robotico per operazioni robotizzate di avvitatura affidabili, integrando componenti allo stato dell'arte con un'interfaccia uomo-robot multimodale e un supervisore di alto livello che ne coordina il funzionamento. Una valutazione sperimentale su un compito rappresentativo di avvitatura conferma che questo approccio consente un'esecuzione affidabile, una rilevazione dei guasti robusta e un intervento efficace dell'operatore. Complessivamente, i risultati dimostrano che l'integrazione tra supervisione umana e capacità di controllo diretto migliora la sicurezza e l'affidabilità del sistema.

In conclusione, i risultati ottenuti in questa tesi mostrano che la progettazione di sistemi di teleoperazione aptica human-aware, con nuove strategie di rendering aptico, controllo dell'interazione, mappatura e scaling, migliora in modo significativo sia la sicurezza sia l'usabilità nei compiti di interazione, e apre la strada a nuovi approcci per il trasferimento della conoscenza umana al robot, colmando il divario tra controllo umano diretto e comportamento robotico autonomo.