

# Training in Robot-Assisted Surgery: Design and Evaluation of Adaptive Methods

## Introduction

The last few decades have witnessed an exponential growth in medical technology: in particular, the application of robotics to surgery is assuming an increasing relevance year by year and this trend is even going to raise in the early future according to market analyses. Nowadays, Robot-Assisted Surgery has become adopted in a wide area of surgical interventions, including urology, gynecology and general abdominal surgery.

This technological development results to be easier for surgeons and safer for patients: on the one hand, it greatly simplifies operating with minimally invasive tools by adding increased dexterity, scaled and tremor-filtered movements, 3D vision, and enhanced ergonomics; on the other side, it leads to shorter recovery time and less blood loss.

Nevertheless, the use of robots in the operating room implies new control modalities, where the surgeon has to manipulate a couple of robotic masters in order to position the surgical instruments and the endoscopic camera inside the patient. This teleoperative approach detrimentally involves the need for learning how to deal with the new dynamics of the manipulators and how to compensate for the absence of haptic feedback.

For this reason, practical training has been an indispensable part of the process of introduction of robot-assisted surgery. In addition to reinforcing theoretical learning, such training endows physicians with hands-on experience and psychomotor skills. Ideally, a training platform has to transfer the required surgical skills as efficiently and safely as possible, together with allowing to objectively and constantly monitor the learning of the trainee. Although dry lab hands-on training programs designed for specific surgical scenarios have been receiving more attention, simulation for the development and refinement of general surgical skills has come to the forefront in recent years since it facilitates to match the ideal requirements previously listed.

All the benefits introduced by simulation-based education do not cancel the need for defining a training strategy. Several alternatives have been proposed in the past years but there exists no consensus regarding a standard approach that maximizes learning. Additionally, the current modalities are usually characterized by a pre-programmed training strategy, where the trainee performs a fixed bunch of exercises at the simulation console. Such an approach does not match a

fundamental idea that stands on the basis of learning: the effective learning occurs when the training is at an appropriate level of difficulty. The current thesis tries to address this limitation by means of the design of adaptive training modalities for robotic surgical training. Adaptive training can be defined as a training modality in which the task is varied as a function of how well the trainee performs. More specifically, the adaptivity was studied in terms of adaptive physical guidance applied during the execution of the training task and adaptive training curricula.

## **State of the Art**

As a consequence of the work structure and purposes, the bibliographic review addressed the research areas of the two main goals of the thesis: physical guidance and training curriculum.

### **Aim 1 - Physical Guidance**

The robotic manipulators, handled by the surgeon to perform the tele-operation, often allow the controlled application of forces and torques to the surgeon's hands that directly affect the user's motor system. This interaction has been studied in the surgical robotics literature under different terminologies, such as active constraints, virtual fixtures, or haptic guidance. These robotic assistive methods have been addressed with the premises of increased safety, increased accuracy and decreased cognitive load. This last aspect refers to the fact that, thanks to the help of the assistance, the user can focus on particular aspects of the exercise in the early training stages and, in turn, maximizing the learning benefit by preventing a cognitive overload. In spite of the abovementioned advantages, physical robotic assistance is one of the less visited approaches to enhance the efficacy of the training process. The cause of this low popularity is linked to the fact that providing such assistance for an elaborate task can be highly complicated and strictly task dependent; additionally, there are valid concerns that physical guidance may change the dynamics of the task to be learned. The few experimental studies investigating robotic assistance methods for surgical tele-operation training have shown results that are not totally conclusive, ranging from beneficial, through null to detrimental effects. This could be probably due to the lack of task complexity and short study duration of these studies. Additionally, in the studies that did not demonstrate any benefits introduced by the presence of the assistance, the application of the guidance in an ON-OFF fashion was common. This means the assistance was removed all at once either during the final stage of the training or in the evaluation phase, after an initial full deployment thereof. Concerns regarding creating dependency on the robotic assistance can be addressed by gradually decreasing the guidance intensity as the user reaches better performance in conducting the task. This approach, which has been formulated in the rehabilitation

field as assistance-as-needed, prevents the assistance from minimizing the voluntary control, which has been shown to reduce the effectiveness of learning. In this framework, the Challenge Point Theory (CPT) suggests that the optimal learning is achieved in correspondence to a specific functional task difficulty (FTD), which is determined by the skill level of the performing subject and the current conditions under which the task is executed. In a robot-assisted motor task, the latter is affected by the intensity of the provided assistance, such that higher assistance reduces the task difficulty level. Therefore, modulating the intensity of the robot assistance can provide a direct way of adapting the task difficulty in order to keep the user at the so-called Optimal Challenge Point (OCP).

In conclusion, the objective of the first phase of the work can be summarized by the following research hypothesis: *“The application of a performance-based adaptive physical guidance following the assistance-as-needed framework positively affects the training procedure”*.

## **Aim 2 - Training Curriculum**

There are many factors that influence a successful implementation of a robotic training program. Issues like training modalities, longer operative times, patient outcomes, cost, case volume, number of robotic cases to become proficient for operating are all items that require attention. In the recent years, expert robotic surgeons and numerous surgical societies and certifying organizations advocated the need for a unified approach and standardized curriculum for basic training, assessment, testing and certification in robotic surgery skills. In spite of this, there exists no consensus regarding a specific training program for robotic surgery. At present, the use of simulators to acquire the fundamental skills of robotic surgery plays a central role but the selection of the task the trainee has to perform to get higher proficiency is decided either by subjective and time-consuming evaluation made by an expert surgeon (mentored training) or by the trainee himself (self-manage training). Simulators paved the way to this second approach, reducing demands on faculty members' teaching time and program costs. As long as the learning is initially focused on the acquisition of basic skills, training could be managed by the trainee himself. However, there are only few studies on self-assessment, and those that do exist offer contradicting evidence. Some have reported poor correlation between self-assessments and expert assessment scores, whereas others have reported higher correlations, implying the appropriateness of self-managed training.

These issues raise the question whether an automatic approach, based on objective performance-based computation of the user skill level, is able to compensate the lack of consistency of a self-managed training. The second phase of the work, therefore, aimed at validating whether *“An adaptive training curriculum allows to reach better final performances compared to a self-managed training”*.

## **Methods**

A preliminary step was necessary to test the two research hypotheses. This consisted in the development of a versatile platform to perform and study training. From a hardware perspective, the da Vinci Research Kit (dVRK) was used for all the experimental studies. This is a standard da Vinci surgical system (Intuitive Surgical Inc., Sunnyvale, US) that is integrated with control hardware and software that allow for reading the measurements and sending commands to the joints of each manipulator of the system directly. Since all the experiments were performed in Virtual Reality, the only dVRK's surgeon console was used. This includes a stereo viewer, a foot-pedal tray, and two master manipulators each comprising 7 actuated joints and a passive gripper.

In order to design the virtual reality environment, the authors developed an Assisted Teleoperation with Augmented Reality (ATAR) framework. This software architecture encompasses five Robot Operating System (ROS) nodes, namely: core simulation, teleoperation, assistance wrench generation, Graphical User Interface (GUI) and bridge to dVRK controllers. The core simulation node generates the graphics and physics of the virtual objects, along with the task logic and desired pose of the target objects. The 3D graphics are produced using the Visualization Toolkit (VTK) and OpenGL libraries and are sent to the dVRK stereo displays. The Bullet physics library is used to perform the dynamic simulation of 3D virtual objects. The robotic tools are simulated as kinematic objects resembling the da Vinci endoscopic tools and their pose is constrained to that of the master devices through the teleoperation node and with a translation down-scaling factor of 2. To ensure real-time interactivity with realistic collision detection, mesh objects are approximated through convex hull decomposition. Through the GUI node, the operator could control the task states and set various parameters. The node also collects, processes and records data. Furthermore, the GUI node calculates the performance of the user, as well as the intensity of the haptic guidance as a normalized number to the guidance which is communicated to the wrench generation node.

### **Aim 1 - Physical Guidance**

To carry out the first experimental study, the authors developed a classic steady-hand game often included in surgical robotics training curricula. In this complex bimanual visuo-motor task, the user moves a ring along a curved wire pathway, while attempting to avoid the ring and wire making contact and keeping the ring's plane perpendicular to the wire's tangent. In order to keep subjects engaged and motivated, an intuitive performance feedback was provided in two ways. First, the ring's color shifted gradually from yellow to red as the ring approached the wire, encouraging the subject

to keep the wire in the center of the ring. Second, upon the completion of each repetition, the subject's performance was reported to him/her by assigning a color from green to red (standing for good to bad performance).

The quantification of the user's performance was accomplished by measurement of task metrics (the maximum and RMS positional error, the RMS orientation error and the overall time of execution). All these metrics were expressed as values ranging from 0 to 1. To achieve this goal, a metric  $m$  was normalized and saturated by taking its ideal value  $m_{best}$  and its lower boundary  $m_{worst}$  (that were determined by taking into consideration the users' data). Finally, the overall performance was computed as a weighted sum of the metrics.

Regarding the acquisition protocol, sixteen novice users were randomly divided into two groups of eight: a "null group" that performed the task without receiving assistance and an "assisted group". The experiment proceeded in sessions of eight repetitions and each subject attended two sessions per day: one session in the morning and the other in the afternoon. To derive the natural learning curve of the task, as required to set some parameters of the assistance for the assisted group, the null group was studied first. The assisted group underwent a first session which started with three null repetitions and continued with five assisted ones with the maximum intensity of guidance. The three null repetitions were acquired to validate that both groups belonged to the same statistical population of performance at the beginning of the experiment. In the next sessions of the assisted group, the maximum intensity of the assistance was modulated according to an assistance-as-needed framework: starting from the user's performances, the maximum level of assistance was varied in order to keep the optimal challenge point for the subject and, in turn, maximizing his/her learning. Once the maximum assistance intensity reached a zero value, it was set to zero for all the following repetitions and sessions of the considered user.

A simple viscoelastic active constraint was used as the guidance method, where forces and torques were generated proportionally to the difference between the actual and ideal pose of the manipulators in the range between zero and the maximum level of assistance set by the framework that was previously described.

## **Aim 2 – Training Curriculum**

Moving to the second aim of the thesis, the authors designed a curriculum composed of elementary and complex tasks. The former aimed at training a single fundamental skill of robotic surgery, while the latter involved multiple skills at once. The starting point was the steady-hand task that was used also for the previous stage of the research. This complex task was broken down into its essential components by the analysis of a skill deconstruction list. Depth perception, hand-eye

coordination, wrist articulation and object exchange were identified as the elementary skills involved in the steady-hand exercise and four elementary tasks were developed in order to train each skill respectively. An additional complex task involving the same skills was also developed in order to test the transferability of the skills.

The quantification of the user's performance was accomplished by measurement of task metrics (the average depth error, the execution time, the average positional error, the average orientation error and the number of drops while performing an object instrument to instrument exchange). As in the first aim, these were normalized and summed with specific weights to compute the global score in each task.

A user study was carried out with twelve non-medical participants with none to little experience with robotic teleoperation. The users were randomly divided into two groups: a "control group", performing the self-managed training, and an "experimental group", undergoing the adaptive training. The total time was selected as a training constraint to have comparable protocols between the two groups. In particular, this study focused on a single session characterized by three parts. Firstly, the subjects performed two repetitions of the complex task in order to assess that all the trainees initially belonged to the same statistical population in terms of performances. Secondly, the users underwent 45 minutes of training: the ones belonging to the control group directly chose their exercises and they were provided with their percentage performance after each task repetition; the experimental group was provided with the task to perform according to the adaptive algorithm. The adaptive logic automatically modulated the training curriculum of the experimental group as a function of the performances in order to fill the gaps in the different surgical skills. Finally, all the subjects went through a final test, consisting of four repetitions of the steady-hand task and four repetitions of the second complex task, which was totally new to them.

In both the experimental studies, the research outline was explained to all the subjects prior to enrollment and all the participants gave informed consent. Additionally, the users were introduced to the dVRK console, as well as they were shown videos of a successful execution of each task involved in the study.

Due to the small sample size, non-parametric statistical significance tests were used to compare the training effects on the two groups. The Kruskal-Wallis test (first study) and the Wilcoxon rank sum test (second study) were employed with the different metrics as dependent variable, and the training groups as independent factor. The statistical analysis was performed in MATLAB.

## **Results and Discussion**

## **Aim 1 - Physical Guidance**

As far as it concerns the results obtained from the first user study, the acquisitions were continued for ten sessions and the data acquired from the non-assisted group was used to select the parameters of the assistive method and metrics standardization. Considering the learning curve of the null group, an evident progress in terms of average performance and a reduction of the intra-subject variability and intra-session variability characterized the outcomes (especially during the first six sessions). Results suggested that the task comprised enough complexity to require multiple sessions of training to reach high performance. As expected, the assisted subjects experienced a different learning curve. The first three non-assisted repetitions resulted in performances not statistically different from those of the null group, confirming that both groups belonged to the same population of expertise at the start of the experiment. When the assistance was fully active, the performance of the subjects rapidly increased as expected. By the end of the second session, where the assistance was still fully deployed, the subjects had reached a level of performance equal to that of the final sessions of the null group. The high performance at this stage was due to the consistent contribution of the haptic assistance. As the assistance was gradually diminished, the performance of the subjects first decreased and as the subjects gathered more skills, the high performance was recovered.

The assistance intensity that was generated for each subject of the assisted group at each repetition featured a decreasing trend and it was removed in different sessions for different subjects (one user reached null assistance in the fifth session, followed by a second subject in the sixth session, while the rest of the them lost the assistance in the seventh session).

A more detailed analysis was carried out by examining the single performance metrics. In terms of accuracy, considering rotation and positional error, no statistically significant enhancement was observed in the non-assisted part of the learning curve of the assisted group with respect to that of the null group. However, considering the time-accuracy tradeoff present in a demanding motor tasks, it could be concluded that faster task completion of the assisted subjects at the seventh session ( $p < 0,05$ ), while having equal level of accuracy to that of the null's group ninth and tenth sessions can imply a slightly faster learning rate for the assisted-group.

## **Aim 2 – Training Curriculum**

In the second experimental study addressing the efficacy of an adaptive curriculum, the analysis of the task composition of the training session of each group showed how the experimental users performed a higher number of tasks during the training compared to the control group (24 vs. 13,  $p = 0,009$ ). This could be explained considering that those subjects had just to perform the task

the adaptive algorithm selected for them, while the users belonging to the control group had to think about which task to execute. Considering the time constraints related to the usage of simulators by medical residents, these results highlight that an automatic schedule of the training allows to take full advantage of the available time with the device.

Moving to the global performances in the complex task before and after training, both the groups were characterized by an increase of performances and a reduction of their variability. The initial baseline assessment resulted in the absence of statistically significant difference between the control and experimental users ( $p = 0,94$ ). On the other hand, the analysis of the final outcomes led to the conclusion that the adaptive training allowed to achieve higher final performances (65% vs. 48%,  $p = 0,002$ ).

In order to better understand these outcomes, the final skill performances were analyzed and it turned out that the performances were significantly higher in the experimental group across all the elementary skills (depth perception,  $p = 0,04$ ; hand-eye coordination,  $p = 0,004$ ; wrist articulation,  $p = 0,009$ ; object transfer,  $p = 0,002$ ). Furthermore, the users who underwent the adaptive training showed lower variability of final performances both intra skill and inter skills. These results can be interpreted by assuming that the adaptive training achieved its goal of structuring the curriculum to fill the subject's gaps in each skill.

Finally, the performances of the subjects in the second complex task during the final assessment stage have showed that the experimental group performances were statistically significantly higher with respect to the ones of the control users (38% vs. 19%,  $p = 0,04$ ). As supposed in the previous clause, this result leads to the conclusion that the adaptive training better taught the elementary skills instead of the singular complex task.

## **Conclusions**

As a conclusion, the thesis addressed the lack of globally accepted and totally reliable approaches to simulation-based training for the acquisition of the fundamental practical skills in robot-assisted surgery. After the development of a software for training studies in virtual reality simulation environments, adaptive methodologies were designed and evaluated by means of experimental studies on non-medical participants using the master console of a da Vinci Research Kit.

The first part of the work proposed a robotic assistance-as-needed method applied to the training of a complex bimanual visuo-motor task. Results showed that while both non-assisted and assisted groups achieved similar performances at the end of the training, subjects who received



assistance achieved high performance in terms of completion time faster than the non-assisted subjects did. Although the achieved reduction in training time was not substantial, these results are promising and further investigations are needed. More experimental work is needed to validate the findings of this work with different tasks, including interaction with real objects (augmented reality). At the same time, it must be noted that the beneficial effects of robot assistance could be limited to certain types of tasks.

The second stage of the work involved the comparison of a user-managed training to an adaptive approach where the curriculum was automatically and dynamically structured on the basis of the trainee's performances. The results were promising, showing that the final performances of the latter trainees were significantly higher and their skill learning featured more uniformity and higher end points compared to the former. The research focused just on the initial part of the trainees' learning curve and longer or multiple session experiments should be performed. Finally, further analyses should involve a third acquisition group which performs a training supervised by an expert in order to assess the efficacy of the adaptive algorithm with respect to a subjective coaching.

Both the experimental studies were performed on a relatively small sample size mainly due to the difficulty of recruiting subjects and the exponentially growing number of acquisition sessions with larger sample sizes. A larger sample size can lead to more statistical determinism. Additionally, including experimental sessions on medical participants would increase the work reliability and its impact on the addressed research area.

## **SOMMARIO (VERSIONE IN ITALIANO)**

### **Introduzione**

Negli ultimi decenni si è assistito ad una crescita esponenziale delle tecnologie in campo medico: in particolare, l'applicazione della robotica alla chirurgia ha assunto una rilevanza sempre crescente e secondo analisi di mercato questa tendenza è destinata persino a rafforzarsi negli anni a venire. Oggigiorno, la chirurgia robotica (Robot-Assisted Surgery, RAS) è adottata in un ampio spettro di specialità chirurgiche, fra cui soprattutto l'urologia, la ginecologia e la chirurgia addominale generale.

Questo approccio risulta essere più semplice per i chirurghi e più sicuro per i pazienti: da un lato infatti semplifica notevolmente operazioni svolte tramite strumentazione mini-invasiva andando ad introdurre maggiore destrezza, movimenti scalati e filtrati del tremore fisiologico, visione tridimensionale e migliore ergonomia; dall'altro, comporta tempi di recupero più brevi ed inferiori perdite di sangue.

Ciononostante, l'utilizzo di robot in sala operatoria implica nuove modalità di controllo, in cui il chirurgo deve utilizzare una coppia di manipolatori robotici al fine di posizionare gli strumenti chirurgici e la telecamera endoscopica all'interno del paziente. Tale approccio teleoperativo comporta lo svantaggio di dover imparare come gestire le nuove dinamiche di questi manipolatori, nonché l'assenza di feedback aptico.

Per questa ragione, un adeguato training costituisce un presupposto indispensabile nel processo di introduzione della chirurgia robotica. Oltre ad adeguate conoscenze teoriche, tale training permette infatti ai chirurghi di apprendere le necessarie abilità psicomotorie. In via teorica, una piattaforma di training deve trasferire le competenze pratiche richieste in modo efficiente e sicuro, così come deve permettere di monitorare costantemente ed obiettivamente l'apprendimento del tirocinante. Nonostante programmi di training creati per specifici scenari chirurgici utilizzando modelli reali abbiano ricevuto particolare attenzione, le tecnologie di simulazione sono diventate recentemente principale alternativa per sviluppare e raffinare competenze chirurgiche pratiche, dal momento che meglio rispecchiano le caratteristiche ideali prima elencate.

Tutti i benefici introdotti dall'utilizzo di simulatori non cancellano la necessità di definire una strategia di training. Numerose alternative sono state proposte negli anni passati, ma non si è giunti a comune accordo riguardo quale sia l'approccio che massimizzi l'apprendimento. In aggiunta, le correnti alternative sono tipicamente caratterizzate da una strategia di training prefissata, dove l'apprendista esegue un determinato set di esercizi alla console di simulazione. Tale approccio non

risulta in accordo con un'idea fondamentale alla base delle teorie di apprendimento: quest'ultimo avviene effettivamente soltanto quando l'allenamento è svolto ad un appropriato livello di difficoltà. La presente tesi tenta di superare questa limitazione tramite lo sviluppo di modalità adattive di training per la chirurgia robotica. Una procedura di training si definisce adattiva quando l'esercizio di allenamento è modificato in funzione di come il praticante lo svolge. Nello specifico, l'idea di adattività è stata studiata in termini di applicazione di guida adattiva durante lo svolgimento del task di allenamento e di curriculum di training adattivo.

### **Stato dell'arte**

In virtù della struttura e dei fini del lavoro, la ricerca bibliografica si è rivolta ai due ambiti di guida aptica e curriculum di training.

#### **Obiettivo 1 – Guida aptica**

I manipolatori robotici impiegati dal chirurgo per effettuare la teleoperazione permettono spesso un'applicazione controllata di forze e momenti alle mani dell'operatore stesso, agendo direttamente sul suo sistema motorio. Questa interazione è stata studiata in letteratura sotto diversi nomi, quali active constraints, virtual fixtures o guida aptica. Questo approccio di assistenza comporta una più alta sicurezza ed accuratezza, nonché una riduzione del carico cognitivo. Quest'ultimo aspetto si riferisce al fatto che grazie all'effetto dell'assistenza, il soggetto può concentrarsi su particolari aspetti dell'esercizio e specialmente nelle fasi iniziali dell'apprendimento, può massimizzare quest'ultimo andando a prevenire un eccessivo carico cognitivo. Nonostante questi vantaggi, lo studio di tale approccio per ottimizzare la procedura di training è stato decisamente limitato. La causa di questa bassa popolarità è legata al fatto che fornire assistenza per esercizi complessi può essere estremamente difficile da un punto di vista implementativo; al contempo, è facilmente intuibile che l'applicazione di assistenza possa alterare le dinamiche dell'esercizio stesso, distorcendone l'apprendimento. I pochi studi sperimentali compiuti a riguardo dell'utilizzo di assistenza per l'apprendimento della chirurgia teleoperativa hanno portato a risultati non del tutto conclusivi sull'argomento, con effetti positivi, nulli, o in alcuni casi negativi. Questo può essere dovuto alla bassa complessità degli esercizi studiati e alla corta durata degli studi stessi. In più, nelle ricerche che non hanno dimostrato alcun beneficio dell'assistenza, questa era applicata seguendo un approccio ON-OFF: in altre parole, l'assistenza era rimossa completamente nelle fasi finali del training o in fase valutativa, dopo un'applicazione iniziale alla massima intensità. Le perplessità riguardo la creazione di dipendenza dall'assistenza possono essere superate andandone a modulare gradualmente l'intensità

come il soggetto inizia a migliorare nello svolgimento dell'esercizio. Questo approccio, che è stato formulato in ambito riabilitativo come "assistance-as-needed" (letteralmente, assistenza quanto necessaria), permette di prevenire la minimizzazione del controllo volontario dell'utente (e di conseguenza dell'apprendimento) se sottoposto ad eccessiva assistenza. In questa panoramica, la cosiddetta Challenge Point Theory (CPT) suggerisce che l'apprendimento ottimale è raggiunto in corrispondenza di una specifica difficoltà funzionale dell'esercizio, vale a dire la porzione di difficoltà dipendente dal livello di maestria del soggetto e dalle correnti condizioni in cui l'esercizio viene eseguito. Modulare l'intensità della guida robotica può quindi variare il livello di difficoltà funzionale dell'esercizio e mantenere l'utente al suo Optimal Challenge Point (OCP), dove l'apprendimento risulta massimo.

In conclusione, il fine della prima parte del lavoro può essere riassunto con la seguente ipotesi di ricerca: *"L'applicazione di una guida adattiva, basata sulle performance dell'utente e strutturata seguendo il concetto di assistance-as-needed, influisce positivamente sulla procedura di training"*.

## **Obiettivo 2 – Curriculum di training**

Ci sono numerosi fattori che influenzano il successo di un programma di training per la chirurgia robotica. Problematiche come le modalità di training, le lunghe tempistiche, gli effetti sul paziente, i costi, il numero di casi necessari per raggiungere il livello di competenza necessario, etc. sono tutti fattori da tenere in considerazione. Negli ultimi anni, esperti chirurghi e numerose società operanti nel campo della chirurgia robotica hanno manifestato la necessità di un approccio comune e di un curriculum standard per l'allenamento e la valutazione delle competenze pratiche necessarie. Nonostante questo, non esiste consenso riguardo uno specifico programma di addestramento per la chirurgia robotica. Al momento, l'utilizzo di simulatori gioca un ruolo centrale nell'acquisizione delle skill chirurgiche fondamentali, ma la selezione degli esercizi che l'apprendista deve svolgere avviene o in modo soggettivo ed oneroso tramite valutazione di un esperto (training supervisionato) o per decisione del tirocinante stesso (training autogestito). I simulatori hanno in particolare spianato la strada a questo secondo approccio, riducendo i costi e il tempo richiesto ad esperti per fare da mentori. Soprattutto nella fase iniziale dell'apprendimento (rivolta all'acquisizione di skill basilari), la procedura di training può essere effettuata senza l'intervento di un esperto e gestita dall'apprendista stesso. In ogni caso, ci sono soltanto pochi studi riguardo l'autovalutazione e gestione in fase di apprendimento, ed i risultati non sono pienamente concordi. Alcuni hanno riportato scarsa correlazione fra il giudizio di un esperto e quello del tirocinante, mentre altri hanno mostrato una maggiore concordanza.

Questi dubbi portano a chiedersi se un approccio automatico e basato su una misura oggettiva del livello di apprendimento dell'utente possa compensare le alcune di un training auto-gestito. La seconda fase della tesi ambisce dunque a validare se *“Un curriculum di training adattivo permetta di raggiungere performance finali migliori se confrontato con un training gestito dell'apprendista stesso”*.

## **Metodi**

Al fine di testare le due ipotesi di ricerca, è stato necessario compiere uno step preliminare, vale a dire lo sviluppo di una piattaforma versatile per effettuare e studiare il training. Dal punto di vista dell'hardware, è stato impiegato il dVRK, da Vinci Research Kit. Si tratta di un sistema chirurgico da Vinci standard (prodotto da Intuitive Surgical Inc., Sunnyvale, US), integrato con hardware e software di controllo che permettono di effettuare misure e inviare comandi direttamente ai giunti di ciascun manipolatore del sistema. Dal momento che gli esperimenti sono stati effettuati in realtà virtuale, è stata impiegata la sola “surgeon console” del dVRK. Quest'ultima include un visore stereoscopico, un set di comandi a pedale, nonché due manipolatori (ciascuno dotato di 7 giunti attuati ed un gripper passivo).

Per disegnare esercizi di training in realtà virtuale, è stata sviluppata una piattaforma di nome ATAR (Assisted Teleoperation with Augmented Reality). La sua architettura software comprende cinque nodi ROS (Robot Operating System), rispettivamente: il core di simulazione, il nodo di teleoperazione, il generatore di forza assistiva, l'interfaccia grafica (Graphical User Interface, GUI) e il bridge ai controllori del dVRK. Il core di simulazione genera la grafica e la fisica degli oggetti in realtà virtuale, così come la logica alla base dei diversi esercizi e la posa desiderata degli oggetti target. La grafica tridimensionale è gestita utilizzando VTK, Visualization Toolkit, e librerie OpenGL, e viene inviata ai visori stereoscopici della “surgeon console”. La fisica dell'ambiente di simulazione è invece realizzata tramite le librerie Bullet Physics. I manipolatori robotici virtuali sono simulati come oggetti cinematici di aspetto simile ai reali effettori del da Vinci e seguono i movimenti dei master del dVRK grazie al nodo di teleoperazione (con un fattore di scala 1 a 2). Per assicurare una interattività realistica dei diversi oggetti virtuali, le mesh di questi ultimi sono approssimate tramite “convex hull decomposition”. Grazie all'interfaccia grafica, è possibile selezionare l'esercizio da eseguire, nonché controllare la registrazione dei dati. Inoltre, quest'ultimo nodo permette di calcolare le performance dell'utente e l'intensità della guida aptica comunicata come valore normalizzato al nodo generatore di forza assistiva.

## Obiettivo 1 – Guida aptica

Per portare a compimento il primo studio sperimentale, è stato sviluppato un classico esercizio di mano ferma (steady-hand task) spesso incluso nei curriculum di training per la chirurgia robotica. In questo complesso task visuomotorio bimanuale, l'utente muove un anello lungo una traiettoria curva, cercando di mantenere il centro dell'anello al centro della traiettoria e di orientare l'anello perpendicolarmente rispetto alla direzione tangente della traiettoria. Al fine di mantenere il soggetto coinvolto e motivato, viene fornito un duplice ed intuitivo feedback di performance: da un lato, il colore dell'anello varia gradualmente da giallo a rosso a seconda della corretta posizione del centro dell'anello; dall'altro, alla fine di ogni ripetizione la performance del soggetto gli è comunicata tramite assegnazione di un colore da verde a rosso (rispettivamente indici di ottima e pessima performance).

La quantificazione della performance del soggetto è stata effettuata tramite misura di metriche associate al task (errore posizionale massimo e RMS, errore di orientamento RMS, nonché tempo totale di esecuzione di una ripetizione). Tutte le metriche sono state espresse come valore fra 0 e 1: a tal proposito, ciascuna metrica  $m$  è stata normalizzata e saturata tenendo conto di un suo valore ideale,  $m_{best}$ , e di un limite inferiore,  $m_{worst}$  (determinati a partire dai dati dei diversi utenti registrati). Infine, la performance globale è stata calcolata come somma pesata delle suddette metriche.

Riguardo il protocollo di acquisizione, sedici utenti non medici ed inesperti in termini di teleoperazione sono stati divisi casualmente in due gruppi: un "gruppo nullo" che ha eseguito il training senza ricevere assistenza ed un "gruppo assistito". Gli esperimenti sono stati strutturati in sessioni di otto ripetizioni ciascuna, svolte in giorni consecutivi (due al giorno, una al mattino ed una al pomeriggio). Al fine di derivare la naturale curva di apprendimento del task analizzato, nonché per ricavare parametri necessari per regolare la guida aptica del gruppo assistito, il gruppo nullo è stato studiato per primo.

Per quanto riguarda l'assistenza, un approccio viscoelastico è stato impiegato per generare forze e momenti proporzionali all'errore dell'utente, vale a dire la differenza fra posa attuale e ideale di ciascun manipolatore, e compresi in un range fra 0 ed un valore di intensità massima normalizzato (fra 0 e 1), determinato secondo l'approccio di assistance-as-needed. Infatti, la modulazione di questo numero è avvenuta a partire dalle performance del soggetto, andando a mantenere in ogni ripetizione il detto Optimal Challenge Point, così da massimizzare l'apprendimento. Nello specifico, la prima sessione ha fatto eccezione in quanto costituita da tre ripetizioni senza guida (al fine di verificare che i due gruppi appartenessero inizialmente alla stessa popolazione statistica), seguite dalle restanti cinque al più alto valore di intensità massima (1). Inoltre, nel momento in cui un certo utente avesse

raggiunto valore di assistenza massima nullo, la guida sarebbe stata rimossa per tutte le successive ripetizioni e sessioni.

## **Obiettivo 2 – Curriculum di training**

Andando ad analizzare il secondo scopo del lavoro, abbiamo introdotto un curriculum di training composto da task elementari e complessi: i primi con lo scopo di allenare una singola abilità fondamentale della chirurgia robotica, i secondi invece comprendenti molteplici abilità in uno stesso esercizio. Il punto di partenza è stato il task complesso sviluppato per il primo obiettivo: quest'ultimo è stato destrutturato nelle sue componenti essenziali tramite un "elenco di scomposizione in skill elementari" presente in letteratura. Percezione tridimensionale, coordinazione occhio-mano, mobilità del polso e scambio di oggetti sono state identificate come le quattro abilità presenti ed altrettanti task elementari sono stati sviluppati per allenare nello specifico ciascuna di esse. Un ulteriore task complesso che comprendesse le medesime skill elementari è stato creato con il fine di testare la trasferibilità delle skill acquisite.

Similarmente al primo obiettivo, la quantificazione delle performance dell'utente è stata effettuata tramite misura di metriche (in questo caso, errore di profondità medio, tempo di esecuzione, errore posizionale medio, errore di orientamento medio, e numero di cadute dell'oggetto target durante un suo trasferimento da strumento a strumento). Ancora una volta, queste sono state normalizzate e sommate con pesi specifici per ottenere un punteggio globale associato all'esecuzione di ciascun task. Lo studio sperimentale ha coinvolto dodici partecipanti non medici, inesperti in termini di teleoperazione robotica. Questi sono stati divisi casualmente in due gruppi, un "gruppo di controllo", che ha auto gestito il proprio training, ed un "gruppo sperimentale", che è andato incontro al training adattivo. Il tempo totale di allenamento è stato selezionato come vincolo per poter confrontare i due gruppi. In particolare, lo studio si è concentrato su una singola sessione divisa in tre parti: un'iniziale valutazione della baseline tramite due ripetizioni dello steady-hand task; 45 minuti di training, dove gli utenti del gruppo di controllo hanno scelto i propri esercizi, mentre quelli appartenenti al gruppo sperimentale hanno svolto l'esercizio suggerito dall'algoritmo adattivo; ed infine un test di valutazione delle performance finali per via di quattro ripetizioni dello steady-hand task ed altrettante del secondo task complesso (totalmente nuovo agli utenti). Per quanto riguarda la logica adattiva, il curriculum del gruppo sperimentale è stato creato in funzione delle performance dei soggetti al fine di minimizzare le lacune nelle differenti skill elementari.

In entrambi gli studi (obiettivo 1 e 2), scopo della ricerca e protocollo sono stati spiegati a tutti i soggetti prima dell'inizio degli esperimenti e gli utenti hanno fornito consenso informato. In aggiunta, tutti i partecipanti sono stati introdotti al sistema dVRK e hanno visto video di corrette esecuzioni dei task a cui sarebbero stati sottoposti.

A causa del modesto campionario, test non parametrici sono stati impiegati per valutare gli effetti del training sui due gruppi presenti nei diversi studi. Il test Kruskal-Wallis (obiettivo 1) e Wilcoxon rank sum (obiettivo 2) sono stati utilizzati con le differenti metriche come variabili dipendenti ed i gruppi come fattori indipendenti. L'analisi statistica è stata effettuata usando il software MATLAB.

## **Risultati e Discussione**

### **Obiettivo 1 – Guida aptica**

Per quanto riguarda i risultati ottenuti dal primo esperimento, le acquisizioni sono proseguite per dieci sessioni e i dati raccolti per il gruppo non assistito sono stati impiegati per settare parametri del metodo di assistenza e normalizzare le metriche per il calcolo delle performance. Considerando la curva di apprendimento del gruppo nullo, un progresso evidente in termini di performance media ed una riduzione della variabilità intra ed inter soggetto ha caratterizzato i risultati (specialmente nelle ultime sei sessioni). I risultati hanno suggerito che il task studiato fosse sufficientemente complesso da richiedere sessioni multiple per raggiungere un livello di maestria. Come pronosticabile, il gruppo assistito ha seguito una curva di apprendimento ben differente, fatta eccezione per il punto di partenza, ossia le tre ripetizioni iniziali senza assistenza (dove i risultati hanno evidenziato assenza di differenza statisticamente significativa fra i due gruppi). Ad applicazione della guida aptica, le performance degli utenti sono rapidamente aumentate ed entro la fine della seconda sessione hanno raggiunto livello comparabile con le ultime sessioni del gruppo nullo. Le alte performance in questa fase sono naturalmente dovute all'elevato contributo dell'assistenza. Come questa è stata gradualmente ridotta, le performance sono inizialmente diminuite, per poi andare a saturare ad alto valore nel momento in cui soggetti hanno acquisito maggiore abilità.

Diversi profili di intensità dell'assistenza sono stati generati per ciascun soggetto del gruppo assistito, tutti accumulati da un trend decrescente e da una rimozione definitiva della guida dopo un numero differente di sessioni (un utente alla quinta, un secondo alla sesta ed i restanti alla settima).

Un'analisi più dettagliata è stata condotta esaminando le singole metriche di performance. In termini di accuratezza, considerando gli errori di posizione ed orientamento, non è stata osservata alcuna differenza statisticamente significativa fra i due gruppi al momento della rimozione dell'assistenza.



Tuttavia, considerando il trade-off fra accuratezza e tempo in un esercizio visuomotorio complesso, è possibile affermare che un tempo di esecuzione minore dei soggetti assistiti alla settima sessione (assistenza rimossa per tutti i soggetti), pur avendo livelli di accuratezza comparabili con quelli delle ultime due sessioni del gruppo nullo, implica un apprendimento leggermente più rapido per il gruppo sperimentale.

## **Obiettivo 2 – Curriculum di training**

Nel secondo esperimento rivolto a testare l'efficacia di un curriculum di training adattivo, l'analisi dei task eseguiti dai due gruppi nei 45 minuti di training ha mostrato che i soggetti sperimentali hanno eseguito un numero di esercizi più elevato rispetto al gruppo di controllo (24 contro 13,  $p = 0.009$ ). Questo può essere spiegato considerando che tali soggetti hanno soltanto dovuto eseguire il task proposto dall'algorithmo adattivo, senza dover ragionare su quale scegliere come per gli utenti del gruppo nullo. Se si pensa ai limiti di tempo a disposizione con il simulatore da parte di un tirocinante, questi risultati mostrano come un programma di training automatico possa ottimizzare tale tempo a patto che gli effetti del training siano almeno comparabili con quelli del gruppo nullo.

A tal proposito, sono state analizzate per i due gruppi le performance iniziali e finali nello steady-hand task. Tutti i partecipanti hanno mostrato un incremento della performance media ed una riduzione della variabilità. L'iniziale valutazione della baseline è risultata in un'assenza di differenza statisticamente significativa fra gruppo nullo e sperimentale ( $p = 0.94$ ). Dall'altro lato, l'analisi delle performance finali ha portato a concludere che gli utenti soggetti al training adattivo avessero raggiunto performance superiori (65% contro 48% del gruppo nullo,  $p = 0.002$ ).

Al fine di meglio comprendere tali esiti, le performance finali associate alle singole skill elementari sono state analizzate, andando a concludere per ciascuna di esse effetti maggiori del training adattivo (percezione tridimensionale,  $p = 0.04$ ; coordinazione occhio-mano,  $p = 0.004$ ; mobilità del polso,  $p = 0.009$ ; scambio di oggetti,  $p = 0.002$ ). In aggiunta, i partecipanti del gruppo sperimentale hanno mostrato minore variabilità finale inter ed intra skill. Questi risultati possono essere interpretati assumendo che il training adattivo abbia effettivamente raggiunto il suo obiettivo di strutturare il curriculum al fine di colmare le lacune nelle singole skill.

Infine, le performance finali nel secondo task complesso volto a testare la trasferibilità delle skill acquisite hanno mostrato un trend simile, con risultati superiori per il gruppo sperimentale rispetto a quello nullo (38% vs. 19%,  $p = 0.04$ ). Come detto precedentemente, questo esito porta a concludere che il training adattivo ha meglio insegnato le abilità elementari e non il solo esercizio complesso (steady-hand task).

## Conclusioni

In conclusione, la tesi ha affrontato la mancanza di un approccio globalmente riconosciuto ed adottato al training per l'acquisizione delle competenze pratiche fondamentali della chirurgia robotica tramite l'utilizzo di simulatori. In seguito allo sviluppo di un software per studiare ed effettuare training in ambienti di simulazione, sono state studiate metodologie adattive tramite studi sperimentali compiuti su soggetti non medici usando la master console di un da Vinci Research Kit.

La prima parte del lavoro ha proposto l'utilizzo di guida aptica secondo l'approccio di assistance-as-needed durante l'apprendimento di un complesso esercizio visuomotorio bimanuale. I risultati hanno mostrato simili performance finali da parte dei soggetti assistiti e non; tuttavia i primi hanno ottenuto risultati migliori in termini di tempo di completamento dell'esercizio più velocemente rispetto ai partecipanti che non hanno ricevuto l'assistenza. Nonostante tale riduzione del tempo necessario all'apprendimento non fosse consistente, tali esiti risultano promettenti ed ulteriori ricerche possono dimostrare questo potenziale. Inoltre, maggiori studi possono validare tali risultati su differenti esercizi, compresi task in realtà aumentata. Allo stesso tempo, deve essere notato che gli effetti positivi dell'assistenza possono essere limitati solo ad alcune tipologie di esercizi che ne permettano l'implementazione.

La seconda fase della ricerca ha riguardato il confronto fra un training auto gestito dall'utente ed un approccio adattivo, dove il curriculum è stato automaticamente e dinamicamente strutturato sulla base delle performance. I risultati sono stati promettenti, mostrando come i risultati finali del gruppo sperimentale (training adattivo) fossero significativamente più alti e come il loro apprendimento delle skill elementari fosse stato maggiore, nonché più omogeneo rispetto al gruppo nullo (training auto-gestito). La ricerca si è soffermata soltanto sulla parte iniziale della curva di apprendimento dei partecipanti: sessioni multiple permetterebbero di analizzarla nella sua completezza. Infine, uno studio più dettagliato dovrebbe comprendere un terzo gruppo di confronto che effettui un training supervisionato da un esperto, al fine di definire l'efficacia dell'approccio adattivo rispetto a quest'ultimo.

Entrambi gli esperimenti sono stati effettuati su un campionario di utenti relativamente piccolo a causa della difficoltà nel trovare partecipanti disponibili e dell'elevato numero di acquisizioni per ciascun soggetto. Una popolazione più ampia permetterebbe di ottenere risultati di maggior valore statistico. Inoltre, includere sessioni su tirocinanti in chirurgia aumenterebbe il valore e l'impatto del lavoro nell'area di ricerca studiata.