



HAL
open science

Développement et validation d'un système de monitoring de l'ergonomie pour la formation en chirurgie robotique

Kun Yang

► **To cite this version:**

Kun Yang. Développement et validation d'un système de monitoring de l'ergonomie pour la formation en chirurgie robotique. Médecine humaine et pathologie. Université de Lorraine, 2016. Français. NNT : 2016LORR0033 . tel-01752231

HAL Id: tel-01752231

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752231v1>

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**Ecole Doctorale BioSE
(Biologie-Santé-Environnement)**

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

par le Dr **YANG Kun**

le 26 avril 2016

**Développement et validation d'un système
de monitoring de l'ergonomie pour la
formation en chirurgie robotique**

Membres du jury :

Rapporteurs Pr Philippe POIGNET, PhD, PU, Université de Montpellier
Pr Daniel CHEVALLIER, MD, PU-PH, Université de Nice Sophia-Antipolis

Examineurs Pr Serguei MALIKOV, MD, PhD, PU-PH, Université de Lorraine, Nancy
Pr Xin Huan WANG, MD, PhD, Université de Wuhan, Chine
Dr Manuela PEREZ, MD, PhD, MCU-PH, Université de Lorraine, Nancy
co-directrice de thèse
Pr Jacques HUBERT, MD, PU-PH, Université de Lorraine, Nancy
directeur de thèse

INSERM U947 **Laboratoire « Imagerie Adaptative
Diagnostic et Interventionnelle »**

Remerciements

Monsieur le Professeur Jacques HUBERT

Professeur d'Urologie

Vous nous avez ouvert les portes et accueilli en urologie au CHRU de Nancy puis en recherche scientifique à l'IADI. Vous n'êtes pas seulement un professeur respecté mais aussi un grand pédagogue. Peu importe où l'avenir nous mènera, nous serons toujours votre élève.

Soyez assuré, cher professeur et cher parrain, de notre sincère gratitude.

Madame le Docteur Manuela PEREZ

Maître de Conférences d'Anatomie

C'est un grand honneur pour nous d'avoir été votre élève pendant trois ans. Les nombreuses idées scientifiques que vous avez partagées avec nous sont la source de nos innovations et votre rigueur scientifique est un exemple pour nous. C'est avec un profond respect que nous vous exprimons nos remerciements pour l'intérêt porté à ce travail.

Monsieur le Professeur Daniel CHEVALLIER

Chef du Service d'Urologie

Membre de l'Académie Nationale de Chirurgie

Professeur Conventionné Université. Praticien Hospitalier

Service d'Urologie et C3M Unité INSERM 1065

Hôpital Universitaire Pasteur 2 -CS 51069 - 06001 Nice Cedex 1 (France)

Vous nous faites l'honneur d'accepter d'être membre du jury.

Votre implication en pédagogie chirurgicale est un exemple pour nous.

Recevez l'expression de notre profonde reconnaissance.

Monsieur le Professeur Serguei MALIKOV

Chef du Service de Chirurgie Vasculaire - CHRU Nancy

Vous nous faites l'honneur d'accepter d'être membre du jury.

Votre dynamisme et votre force d'innovation sont un modèle pour un médecin chercheur.

Recevez l'expression de notre profonde reconnaissance.

Monsieur Le Professeur Dr. Ing. Philippe POIGNET

Université Montpellier - IUT

LIRMM UMR 5506 CNRS UM

Vous nous faites l'honneur d'accepter d'être membre du jury.

La réputation du laboratoire de recherche en robotique que vous dirigez et vos travaux sont pour nous une source d'admiration.

Recevez l'expression de notre profonde reconnaissance

Monsieur le Professeur Xin Huan WANG

Chef du Service d'Urologie

Directeur du CHU Zhongnan,

Vous nous faites l'honneur d'accepter d'être membre du jury et de nous compter dans votre équipe urologique.

Votre leadership national chinois en chirurgie laparoscopique est pour nous une source de fierté.

Nous vous remercions de votre confiance et de votre contrôle.

Monsieur le Professeur Jacques FELBLINGER

Professeur de Radiologie

Directeur de l'unité IADI-UL-INSERM (U947)

Nous vous remercions pour la confiance que vous nous avez accordée durant ces années de thèse dans votre laboratoire où nous avons pu mener à bien ces recherches scientifiques.

Vous êtes un excellent pédagogue et travailler sous votre direction a été une chance pour nous.

Au Docteur Cyril PERRENOT

Mon chef de clinique, mon meilleur ami depuis huit ans. Merci pour ton aide. Je souhaite que nous puissions continuer notre coopération. Vive notre amitié et bienvenue en Chine.

Au Docteur Huangdong WEI

Notre cher collègue informaticien en Chine, ami de notre couple. Grâce à votre aide, nous avons finalisé ce système innovant. Merci pour votre efficacité et votre réactivité dans la mise en place de ce matériel.

A Madame le Docteur Claire HUBERT

Grâce à votre confiance, j'ai eu l'énergie nécessaire pour finaliser ce travail. Merci pour la relecture de ce travail.

Au Docteur Pierre-Etienne THEVENIAUD

C'est toi qui m'a soutenu pendant mon externat en France en 2005. C'est encore toi qui m'a encouragé pendant mon internat en 2010. C'est une chance pour moi de t'avoir connu.

A Nicolas HUBERT

Je te remercie sincèrement pour ta protection et ton compagnonnage. J'ai pu constater ta progression en chirurgie robotique et ton professionnalisme au fil de ces années. Et j'aimerais être un père heureux comme toi.

A mes co-internes

Benoit, Vladimir, Marcus, GIGI, Adrien, Romain....

Merci pour votre accompagnement !

Aux étudiants chinois des promotions 2007 et 2008

Merci pour votre participation à cette étude

A Zhen LI

Mes meilleurs souhaits pour toi, mon ami ; à l'année prochaine en Chine

A Papa et Maman

J'ai grandi et je vous aime.

*Je sais que vous m'attendez et je viendrai vous voir, dès mon retour en Chine,
après la soutenance de ma thèse*

A Ann

L'amour de ma vie, merci de ton sacrifice pour la famille.

Je t'aime et attends-moi. Rien ne peut plus nous séparer

PREAMBULE

L'introduction du robot en chirurgie a créé de nouvelles exigences en termes d'éducation chirurgicale qui, du fait de l'expansion rapide de cette technologie n'a que tardivement été prise en compte par les chercheurs et enseignants. La formation en chirurgie robotique utilisant le robot Da Vinci® est coûteuse car elle nécessite l'utilisation de consommables. Elle est difficilement envisageable dans une grande majorité de centres. Un moyen alliant accessibilité et validité pédagogique avec un bon rapport temps/coût-efficacité est donc indispensable pour apprendre la chirurgie robotique. Les simulateurs virtuels présentent de nombreux avantages pour répondre à ces besoins spécifiques. Cependant, les simulateurs robotiques actuellement disponibles sur le marché fournissent peu d'exercices reproduisant une réelle procédure chirurgicale. Ils sont généralement utilisés pour la formation technique de base.

C'est au cours de mon internat en urologie dans le service du Pr Jacques HUBERT que j'ai découvert la chirurgie robotique. J'ai pu constater les difficultés de formation pour les chirurgiens et les internes au bloc opératoire et découvrir la simulation et ses spécificités pédagogiques en encadrant les étudiants du DIU de chirurgie robotique. Parallèlement, les premiers travaux de recherche en pédagogie menés à l'Ecole de chirurgie par les Dr PEREZ et Dr PERRENOT ont montré une corrélation étroite entre les notes sur les simulateurs virtuels et sur le robot Da Vinci® ainsi qu'une différence d'efficacité et de dextérité des mouvements entre les experts et les novices. Fort de ces premiers constats encourageants, nous avons décidé de poursuivre sur cette thématique de recherche et j'ai réalisé mon master 2 puis ma thèse de science au sein de cette équipe de recherche.

L'objectif final de nos travaux est de répondre aux questions suivantes : Quels sont les points clés pour maîtriser l'utilisation du robot Da Vinci® et devenir un expert ? Comment enseigner efficacement ces points clés aux étudiants ?

L'apprentissage des interventions chirurgicales robotiques est un long parcours associant des connaissances cliniques, anatomiques, décisionnelles et techniques. La gestuelle très spécifique de manipulation du robot vient se rajouter aux apprentissages habituels du chirurgien. Elle nécessite une courbe d'apprentissage spécifique. L'implémentation rapide de cette nouvelle technologie dans les blocs opératoires du monde entier et particulièrement dans mon pays, la République Populaire de Chine, impose une prise de conscience des enjeux pédagogiques. Soutenu par une bourse du gouvernement Chinois, je commence ma recherche scientifique sur ce chemin innovant pour trouver une solution pour standardiser et accélérer la formation robotique.

Mon travail de recherche au cours de ces 3 années de thèse d'université s'est articulé de la manière suivante :

- La première étape [partie I] de notre réflexion sur la formation en chirurgie robotique a été menée en se basant sur les travaux de recherche nancéiens du Dr Nicolas HUBERT, qui a démontré que la chirurgie robot-assistée pouvait significativement diminuer la charge physique et offrir une ergonomie améliorée par rapport à la laparoscopie. Dans un autre article, Gyusung LEE et al ont pu analyser plus précisément l'ergonomie robotique. Ils ont retrouvé une différence significative de charge de travail des muscles trapèzes entre les experts et novices sur le robot. Enfin, mon travail de recherche de Master 2 avec le Docteur Cyril PERRENOT « Multicentric Evaluation of dV-Trainer for Fundamentals of Robotic Surgery » (MED-FRS) avait permis de prouver que le système de notation de l'ergonomie

« Workspace Range » proposé automatiquement par le simulateur robotique dV-Trainer n'était pas pertinent pour différencier une bonne et une mauvaise ergonomie. Cette première partie se compose d'un chapitre I-1 sur le contexte de la formation robotique par la simulation et d'un chapitre I-2 résumant les résultats de l'étude MED-FRS.

Cette première étape nous a permis de conclure à la nécessité de développer un outil de monitoring de l'ergonomie pour faciliter la formation des chirurgiens robotiques.

- La deuxième étape [partie II] explique les procédures de mise en place d'un nouveau système de monitoring de l'ergonomie qui nous a demandé 18 mois de travail et qui a été réalisée en collaboration avec un docteur en informatique de l'Université de Shanghai : « Système de Surveillance de Pression » (SSP). Dans cette deuxième partie, nous expliquons pourquoi nous avons choisi d'utiliser la pression des avant-bras sur les appuis-bras de la console du robot et/ou des simulateurs comme critère d'évaluation d'une bonne ergonomie. Le chapitre II-1 explique le développement technique du système SSP. Le chapitre II-2 concerne la validation de cet outil. Le chapitre II-3 détaille son utilisation pour la formation des chirurgiens.

Cette deuxième étape nous a permis de développer et de valider un système fiable et efficace de monitoring de l'ergonomie robotique.

- La troisième étape [partie III] synthétise les travaux de ma troisième année de thèse orientés vers l'amélioration du système SSP via l'ajout de fonctions supplémentaires. Le chapitre III-1 explique l'ajout d'une alarme informant l'étudiant des mauvaises positions et évalue son efficacité pédagogique pour l'amélioration de l'ergonomie. Le chapitre III-2 explique l'ajout de deux caméras complétant le monitoring de l'ergonomie en y ajoutant des informations sur le mouvement des mains et des pieds. Le chapitre III-3 détaille la validation d'un nouvel outil pédagogique complet incluant le SSP et les ajouts décrits ci-dessus que nous baptisé « Contrôleur d'Événement en Simulation Robotique » (CESIR)

Cette troisième étape nous a permis de développer un outil pédagogique complet et validé pour la formation en chirurgie robotique.

- Dans la dernière étape [partie IV], nous concluons sur les applications potentielles de ces travaux et nous développons les perspectives d'avenir pour l'enseignement et la recherche au travers d'une coopération franco-chinoise.

Le contenu du Chapitre II-2 correspond à l'article "Validation of a new ergonomic performance evaluation concept for Robotic Surgery: armrest load" **publié** par la revue *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*

Le contenu du Chapitre II-3 correspond à l'article "Armrest use, a limitation of robotic skill training" **soumis** dans la revue *Surgical Endoscopy*

Le contenu du Chapitre III-1 correspond à l'article "Alarm-corrected ergonomic armrest use could improve learning curves of novices on robotic simulator" **soumis** dans la revue *Surgical Endoscopy* et en cours de révisions mineures (envoyées le 28/2/2016).

Le contenu du Chapitre III-3 correspond à l'article "Effectiveness of an integrated video recording and replaying system in robotic surgical training" **accepté** dans la revue *Annals of Surgery*

Le contenu de la partie IV correspond à un article "Introduction of a new system for robotic training" **accepté** dans la revue nationale : *Medical Journal of China*

Abréviations

ARL	<i>ArmRest Load</i>
CESIR	Contrôleur d'Événement de Simulateur et de Robot
ddl	Degrés de Liberté
dVSS	<i>da Vinci[®] Skills SimulatorTM</i>
dVT	<i>dV-Trainer[®]</i>
EM	Economie du Mouvement
FDA	<i>Food and Drug Administration</i> (Administration Américaine des Aliments et des Médicaments)
FLS	<i>Fundamentals of Laparoscopic Surgery</i> (Principes Fondamentaux de Chirurgie Laparoscopique)
FRS	<i>Fundamentals of Robotic Surgery</i> (Principes Fondamentaux de Chirurgie Robotique)
GEARS	<i>Global Evaluative Assessment of Robotic Skills</i>
MIS	<i>Mini Invasive Surgery</i> (Chirurgie Mini Invasive)
RNIS	Réseau Numérique à Intégration de Services
RoSS	<i>Robotic Surgery Simulator[®]</i>
RV	Réalité Virtuelle
SEP	<i>SimSurgery Educational Platform[®]</i>
SSP	Système de Surveillance de Pression
SRI	<i>Stanford Research Institute</i> (Institut de Recherche de Stanford)
TATRC	<i>Telemedicine & Advanced Technology Research Center</i> (Centre de recherche de Télé médecine et de Technologie Avancée)
TRT	Temps de Réalisation de la Tâche

TABLE DES MATIERES

PREAMBULE	7
Abréviations	13
PARTIE I : BASE DE L'ETUDE	19
Chapitre I-1 Simulateurs en chirurgie robotique	20
<i>I.1.1 - Expansion de la chirurgie robotique.....</i>	<i>20</i>
<i>I.1.2 - Formation en chirurgie robotique</i>	<i>22</i>
<i>I.1.3 - Simulateurs disponibles.....</i>	<i>23</i>
<i>I.1.4 - Simulateur pour le DIU de robotique à NANCY.....</i>	<i>25</i>
<i>I.1.5 - Modules d'exercices.....</i>	<i>25</i>
I.1.5.1 Connaissances et techniques de base.....	27
I.1.5.2 Techniques chirurgicales avancées.....	27
I.1.5.3 Connaissance de procédures spécifiques	27
<i>I.1.6 - Système de notation.....</i>	<i>29</i>
Chapitre I-2 : Sélection des exercices sur simulateur	31
<i>I.2.1 - Objet de l'étude</i>	<i>31</i>
<i>I.2.2- Matériel et méthode</i>	<i>31</i>
I.2.2.1- Simulateur.....	31
I.2.2.2- Protocole de l'étude	32
<i>I.2.3- Résultats.....</i>	<i>34</i>
I.2.3.1-Validité de construction	34
I.2.3.2-Courbes d'apprentissage.....	34
<i>I.2.4- Conclusion.....</i>	<i>37</i>
Bilan de la partie I	37

PARTIE II : DEVELOPPEMENT DE SSP 39

Chapitre II-1 Mise en place du matériel de Système de Surveillance de Pression (SSP).....40

II-1.1 - Introduction..... 40

II-1.2 - Mise en place de SSP..... 44

II-1.2.1- Inconvénients des instruments actuels..... 44

II-1.2.2- Sélection du capteur..... 45

II-1.2.3- Prototype de SSP..... 45

II-1.2.4- Composition du SSP..... 46

II-1.3 - Pre test de SSP 48

II-1.3.1 - Sujets 48

II-1.3.2 - Matériel et méthode 49

II-1.3.3 - Remarques 49

II-1.3.4 - Résultats 50

II-1.3.4.1 - Faux positif..... 50

II-1.3.4.2 - Faux négatif 51

II-1.3.4.3 - Solutions..... 51

II-1.4 - Deuxième génération de SSP 52

II-1.4.1 circuit électronique..... 52

II-1.4.2 Re-test de TR 53

II-1.4.3 Problème et solution..... 53

Bilan du chapitre II-154

Chapitre II-2 Validation de SSP55

II-2.1 - Introduction..... 55

II-2.2 - Question posée au chapitre II-1 55

II-2.3 - Publication 56

Bilan du chapitre..... 81

Chapitre II-3 Comment améliorer l'ARL?	83
<i>II-3.1 - Introduction.....</i>	83
<i>II-3.2 - Solutions envisagées pour cette question :.....</i>	83
II-3.2.1 - Il n'y a pas assez d'experts dans le chapitre II.	83
II-3.2.2 - Est-ce que l'entraînement sur simulateur peut aider à améliorer l'ARL?	83
II-3.2.3 - Combien de temps faut-il passer sur dVT pour atteindre un score ARL professionnel ?	84
II-3.2.4 - Est-ce qu'un score ARL acquis au dVT peut se transférer au vrai robot ?	84
<i>II-3.3 - Publication</i>	85
<i>II-3.4 Réponses aux questions.....</i>	103
Bilan de la partie II	104

PARTIE III : FONCTIONS SUPPLEMENTAIRES 105

Chapitre III-1 - Ajout de l'alarme à SSP	106
<i>III-1. 1 - Introduction.....</i>	106
<i>III-1. 2 - Solution pour la question.....</i>	106
<i>III-1. 3 - Publication.....</i>	107
Bilan du chapitre III-1	126
Chapitre III-2: Mise en place de CESIR.....	127
<i>III-2. 1 - Introduction.....</i>	127
<i>III-2. 2 - Design du système.....</i>	128
<i>III-2. 3 - Fonctions du CESIR</i>	130
<i>III-2. 4 - Mise en place de CESIR</i>	131
Bilan du chapitre III-2	133

Chapitre III-3: Validation du CESIR.....	135
<i>III-3.1 - Introduction.....</i>	<i>135</i>
<i>III-3.2 - Solution envisagée pour la question</i>	<i>135</i>
<i>III-3.3 - Publication</i>	<i>136</i>
Bilan de la partie III	154

PARTIE IV : CONCLUSION ET FUTUR 155

Chapitre IV: Synthèse des publications et applications potentielles ...156

<i>IV.1 – Synthèse des publications.....</i>	<i>156</i>
<i>IV.2 – Applications potentielles et perspectives de collaboration franco-chinoise</i>	<i>157</i>
IV.2.1 – Développement à venir de la plateforme « CESIR »	158
IV.2.1.1 – Développements techniques :	158
IV.2.1.2 – Développements scientifiques :	158
IV.2.1.3 – Développement pédagogique :	159
IV.2.2– Applications du concept du CESIR à d’autres formations chirurgicales (exemple : coelioscopie, ...)	162
IV.2.3 - Réflexions sur la formation de technique robotique et la coopération franco-chinoise	163
IV.2.3.1 - Réflexions sur la formation à la technique robotique	163
IV.2.3.2 - Réflexions sur la coopération franco-chinoise.....	165
<i>IV.3 - Publication</i>	<i>166</i>
IV.3.1- Article franco-chinois :	166
IV.3.2 - La coopération franco-chinoise	

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 171

PARTIE I

BASE DE L'ETUDE

*nous introduisons le contexte de la formation en
chirurgie robotique: chapitre I-1 sur les
simulateurs et chapitre I-2 sur la sélection des
exercices et l'introduction des anciens standards
ergonomiques*

Chapitre I-1 Simulateurs en chirurgie robotique

1.1.1 - Expansion de la chirurgie robotique

La FDA américaine a approuvé le robot da Vinci® pour la chirurgie laparoscopique générale (pathologies de la vésicule biliaire et du reflux) en juillet 2000, pour la chirurgie thoracique en mars 2001, la prostatectomie radicale en mai 2001, la réparation valvulaire mitrale en novembre 2002 et les procédures gynécologiques en avril 2005 [1,2]. En 2011, Intuitive Surgical a introduit des instruments spécifiques pour la chirurgie mono trocart (Single-Site instruments) avec le système Si pour la procédure de cholécystectomie. Ces instruments ont été approuvés par la FDA pour l'hystérectomie et la salpingo-ovariectomie bénigne en 2013.

Au 30 septembre 2015, un total de 3288 robots da Vinci® étaient installés dans le monde dont la plupart (2254) aux États-Unis, 556 en Europe et 365 en Asie (Figure 1-1). Environ 643 000 procédures da Vinci® ont été effectuées durant l'année 2015, la majorité en gynécologie, urologie et chirurgie générale. Parmi celles-ci, les gestes les plus fréquemment effectués étaient l'hystérectomie, la prostatectomie et la cholécystectomie. D'autres spécialités telles la chirurgie cardiaque, thoracique, ORL, pédiatrique, vasculaire, etc. ont adopté cette technique [3]



Fig. 1-1 Nombre de robots da Vinci® installés dans le monde au 30 septembre 2015

Dans l'ensemble, la chirurgie robotique avec les systèmes da Vinci® se développe sans cesse dans une vaste gamme de spécialités chirurgicales. Cette technologie a apporté aux chirurgiens les avantages de l'ergonomie, et la facilité d'apprentissage et d'utilisation. Elle a aussi rendu possibles certaines procédures auparavant irréalisables en laparoscopie traditionnelle grâce à la visualisation avancée et la dextérité de manipulation. Cependant, dans la majorité des cas, elle n'a pas démontré de bénéfices francs pour les patients par rapport à la laparoscopie traditionnelle concernant les résultats oncologiques ou fonctionnels. Elle pourrait conduire à des pertes sanguines réduites ou une hospitalisation plus courte, mais souvent elle est associée à une durée opératoire plus longue et à un coût plus élevé [4].

1.1.2 - Formation en chirurgie robotique

La chirurgie robotique a connu un développement exponentiel au cours des 15 dernières années ; cependant, la nécessité d'un apprentissage n'a pas été prise en considération pendant longtemps. Les complications liées à cette chirurgie ont probablement été sous-estimées et c'est l'apparition de problèmes médico-légaux qui a attiré l'attention sur la nécessité d'une formation spécifique et l'existence d'une courbe d'apprentissage [5].

En effet, l'utilisation d'un robot nécessite pour tous les chirurgiens, quelque soit leur expérience clinique, de se familiariser avec l'utilisation technique de la console du robot. L'acquisition de connaissances techniques de base est un préalable nécessaire avant de développer des habiletés techniques procédurales.

L'apprentissage par simulation, inspiré de l'aéronautique, a commencé à se développer avec le dV-Trainer[®], premier simulateur spécifique apparu sur le marché, avec l'intérêt majeur d'un apprentissage de la technique en dehors du bloc opératoire, sans risque pour le patient.

Le développement rapide de la robotique dans de nombreuses disciplines chirurgicales impose une formation efficiente des chirurgiens à cette nouvelle technologie [6]. Par rapport au robot, la laparoscopie apporte aux patients les avantages de chirurgie mini-invasive (MIS) [7,8,9] mais une mauvaise ergonomie provoque des douleurs musculaires chez le chirurgien [10,11,12,13]. L'utilisation des appui-bras diminue la consommation d'énergie [14] et offre un confort augmentant la qualité de la performance [15]. La console du da Vinci[®] comprend une pédale de débrayage pour repositionner les avant-bras sur les appui-bras. Le robot diminue donc le travail physique et mental de l'opérateur [16,17] et les douleurs musculo-squelettiques [18].

1.1.3 - Simulateurs disponibles

La simulation chirurgicale a considérablement évolué au cours de ces deux dernières décennies avec le développement de la chirurgie laparoscopique et maintenant robotique. Cette approche de la formation chirurgicale a été validée comme un outil de formation et d'évaluation. Il a été démontré qu'elle permet d'améliorer la performance du chirurgien au bloc opératoire [19,20].

La formation sur simulateur chirurgical peut être séparée en deux catégories principales : le simulateur physique ou mécanique (la tâche est exécutée habituellement dans une boîte en utilisant des vrais instruments) et le simulateur en RV (la tâche est effectuée sur une plate-forme assistée par un ordinateur et dans des environnements virtuels produits artificiellement). Les améliorations du traitement de l'information ont conduit les simulateurs en RV à être plus réalistes. De plus, ils sont maintenant capables de fournir les informations statistiques sur la performance de l'utilisateur, une qualité que ne possède pas le simulateur mécanique [21].

Avant qu'un simulateur chirurgical ne puisse être utilisé pour évaluer les compétences des chirurgiens, il doit bénéficier de tests initiaux de validation à travers une variété de paramètres. Ceux-ci comprennent:

- l'évaluation de la validité apparente qui examine le réalisme du simulateur
- la validité de contenu examinant si le système enseigne ce qu'il est supposé enseigner
- la validité de construit concernant sa capacité à différencier les novices et les experts
- la validité concurrente qui teste dans quelle mesure les résultats sur le simulateur sont liés aux résultats lors d'un test de référence dans le même domaine

- la validité prédictive qui évalue dans quelle mesure la performance sur le simulateur prédit la performance future en clinique

Il y a actuellement cinq simulateurs robotiques en RV sur le marché (Figures 1-2) :

- le dV-Trainer® (dVT) de Mimic Technologies (Seattle, WA, États-Unis)
- le da Vinci® Skills Simulator™ (dVSS) d'Intuitive Surgical (Sunnyvale, CA, États-Unis)
- le Robotic Surgery Simulator® (RoSS) de Simulated Surgical Systems (Williamsville, NY, États-Unis)
- le SimSurgery Educational Platform® (SEP) de SimSurgery (Oslo, Norvège)
- et le RobotiX Mentor® de Symbionix (Cleveland, OH, USA) qui a été commercialisé plus récemment, en septembre 2014 [22].

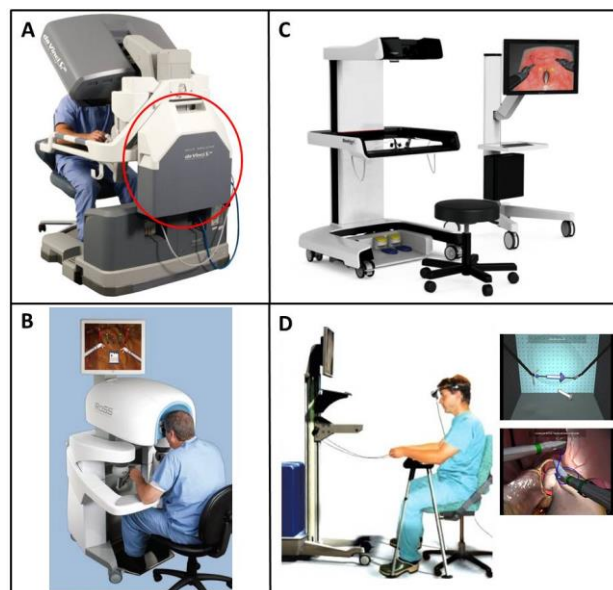


Fig. 1-2 quelques simulateurs robotiques commerciaux
le dVSS (A), le RoSS (B), le RobotiX Mentor (C) et le SEP (D)

Pour l'instant, le dVT est le système le plus largement adopté, avec également le plus d'études de validation [23,24,25].

Le dVSS d'Intuitive Surgical a intégré la technologie de simulation de Mimic et de Symbionix. Il est installé sur la console du da Vinci® Si, le transformant en une plate-forme d'apprentissage qui peut être utilisée dans ou à l'extérieur du bloc opératoire. Il présente des avantages uniques puisqu'il utilise le vrai robot comme interface.

Le RoSS dispose d'un modèle qui est connu comme le « HoST » dans lequel le simulateur guide les mains de l'utilisateur à reproduire les mouvements du chirurgien dans une procédure chirurgicale réelle, sur toute sa durée et en 3D.

Le SEP dispose d'une console connectée à deux instruments avec 7 ddl. Contrairement au système de robot, il ne fournit pas d'images 3D.

Le RobotiX Mentor est le seul système qui dispose d'exercices permettant aux utilisateurs d'effectuer librement des procédures chirurgicales spécifiques. Il inclut aussi le modèle de dôme développé par le programme de FRS.

1.1.4 - Simulateur pour le DIU de robotique à NANCY

L'équipe qui organise ce DIU à Nancy dispose actuellement de cinq simulateurs robotiques dV-Trainer® (dVT) de *Mimic Technologies*, un système qui a été largement validé. Avec le dVT, les stagiaires apprennent les techniques psychomotrices nécessaires pour contrôler le robot, telles que la manipulation de l'articulation endocorporelle EndoWrist®, la navigation de la caméra, la gestion des énergies, la réalisation d'un nœud et la suture....

1.1.5 - Modules d'exercices

Le dVT est donc le simulateur utilisé dans notre centre pour la formation et l'étude. Il a été mis sur le marché par Mimic Technologies en 2007. Le dVT est constitué d'une console proche de la console du robot da Vinci®, d'un système

de vision binoculaire ainsi que de deux manettes dont la position dans l'espace est réglée par des câbles reliés à des micromoteurs. À ses pieds, l'utilisateur dispose d'une réplique du pédalier du robot da Vinci® avec les pédales de caméra, de débrayage et de coagulation (Figure 1-3).



Fig. 1-3 Le simulateur robotique dV-Trainer® : la vue d'ensemble (A), la manette (B) et le pédalier (C)

La plate-forme MSim™ du dVT permet la simulation de plus de 60 exercices pour aider les stagiaires à acquérir les connaissances et les techniques de la chirurgie robotique, ce qui recouvre l'aperçu du robot da Vinci®, les techniques basiques de manipulation, les techniques chirurgicales avancées et aussi la connaissance des procédures spécifiques [26]:

I.1.5.1 Connaissances et techniques de base

- Aperçu de la console da Vinci[®] – passer en revue les fonctionnalités de base de da Vinci[®], tels que les icônes, l'ergonomie et les paramètres ;
- Manipulation EndoWrist[®] – développer la dextérité de EndoWrist[®] en travaillant avec deux ou trois instruments chirurgicaux de da Vinci[®] ;
- Caméra et débrayage – améliorer le contrôle de la caméra et apprendre à utiliser le débrayage de manière efficace ; s'entraîner sur le réglage de l'échelle du mouvement ;
- Dépannage – comprendre les messages d'erreur de da Vinci[®] et déterminer comment y réagir.

I.1.5.2 Techniques chirurgicales avancées

- Contrôle et conduite de l'aiguille – développer les compétences lors de la manipulation des aiguilles ;
- Suture et nœud – améliorer les techniques de suture et de nœud avec une variété de géométries communes à la chirurgie robotique ;
- Energie et dissection – apprendre à appliquer correctement l'énergie monopolaire et bipolaire ; pratiquer la dissection et gérer le saignement ;
- Jeux – développer les techniques de manipulation en jouant (aux jeux sérieux).

I.1.5.3 Connaissance de procédures spécifiques

- Maestro[™] AR – Utiliser les instruments virtuels et la vidéo 3D de procédures chirurgicales pour faire avancer la prise de décisions cliniques et la connaissance de procédures ; affiner les techniques spécifiques pour les procédures.

Plus d'exercices, comme le modèle de dôme de FRS, sont en cours de

développement et seront disponibles sur le dVT.

Certains exemples des exercices du dVT sont illustrés dans la [Figure 1-4](#).

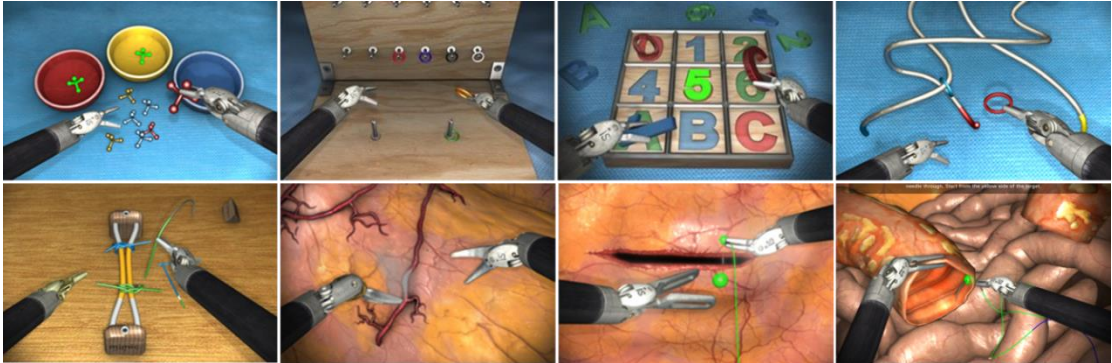


Fig. 1-4 quelques exercices disponibles sur le simulateur robotique dV-Trainer®

1.1.6 - Système de notation

Le dVT fournit un système de notation intégré – le MScore™. L'évaluation du MScore™ est basée sur les données de la moyenne et de l'écart type recueillies auprès de plus de 100 chirurgiens expérimentés qui ont chacun réalisé plus de 75 procédures robotiques. Plusieurs mesures sont utilisées pour représenter la performance pendant un exercice :

- Temps de réalisation de la tâche (TRT, en secondes) ;
- Économie du mouvement (EM, en centimètres) –distance totale parcourue par les instruments ;
- Collisions des instruments – nombre de fois où un instrument est en collision avec un autre ;
- Chutes – nombre de fois où la pièce saisie par les instruments tombe sur le plancher ;
- Cibles manquées – nombre de fois où le but n'est pas correctement touché ou traversé ;
- Instruments hors de vue (en centimètres) – distance totale parcourue par les instruments lorsqu'ils sont hors de vue ;
- Volume de l'espace de travail (en centimètres) – rayon combiné des deux sphères qui encapsulent le trajet parcouru par chaque manette ;
- Force excessive d'instruments (en secondes) – temps total pendant lequel la force d'instrument appliquée à l'instrument dépasse le seuil donné ;
- Temps d'énergie mal appliquée (en secondes) – temps total où l'énergie n'est pas correctement appliquée sur le tissu cible ou celui où une énergie excessive dépasse un seuil donné ;
- Volume total de saignement ;
- Vaisseaux déchirés – nombre de déchirements des vaisseaux sanguins

Chaque mesure est présentée avec la valeur exacte et un score calculé selon les données d'experts. Un score global est aussi fourni pour synthétiser les résultats de toutes les mesures (Figure 1-5). L'utilisateur peut choisir deux systèmes de notation selon les besoins: le système classique qui fournit un score sous forme pourcentage, ou le système « basé sur les compétences » qui calcule le score différemment lorsqu'une erreur critique est faite ou non.

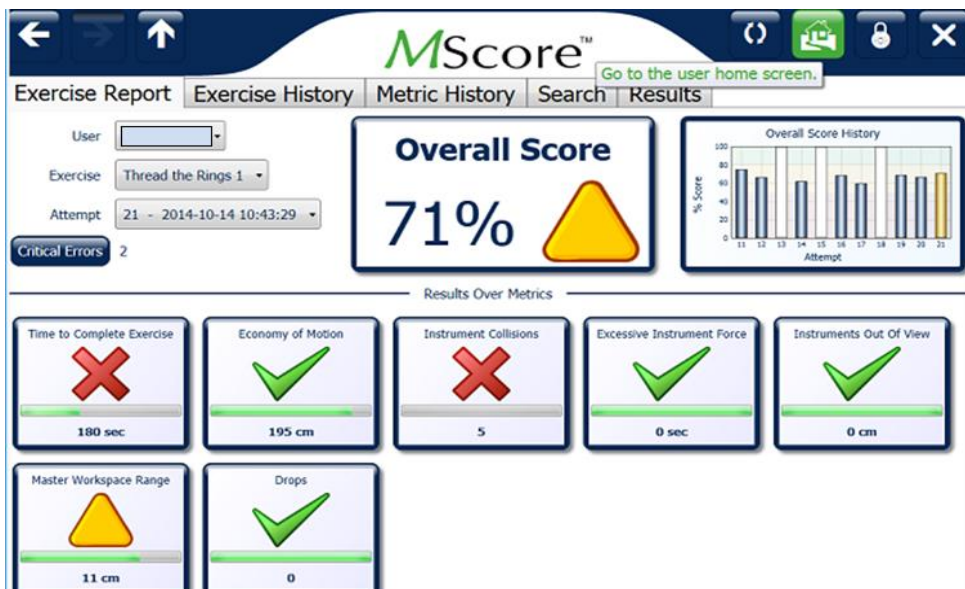


Fig. 1-5 Le système de notation MScore™ du dV-Trainer®

Chapitre I-2 : Sélection des exercices sur simulateur

I.2.1 - Objet de l'étude

Le but de cette étude est de sélectionner les meilleurs exercices pour l'évaluation et l'apprentissage des stagiaires. Le dVT est une plate-forme qui proposait initialement 29 exercices différents. Pour ce travail, nous n'avons pas assez de temps pour faire exécuter tous les exercices existants aux personnes qui ont accepté de participer à l'évaluation des tests. Certains exercices sont trop faciles, d'autres sont trop difficiles et d'autres ne sont pas validés ! Il nous a donc fallu sélectionner parmi tous les exercices proposés ceux qui ont une validité objective et qui pourront servir de base de travail.

I.2.2- Matériel et méthode

I.2.2.1- Simulateur

Nous avons retenu le dVT de Mimic

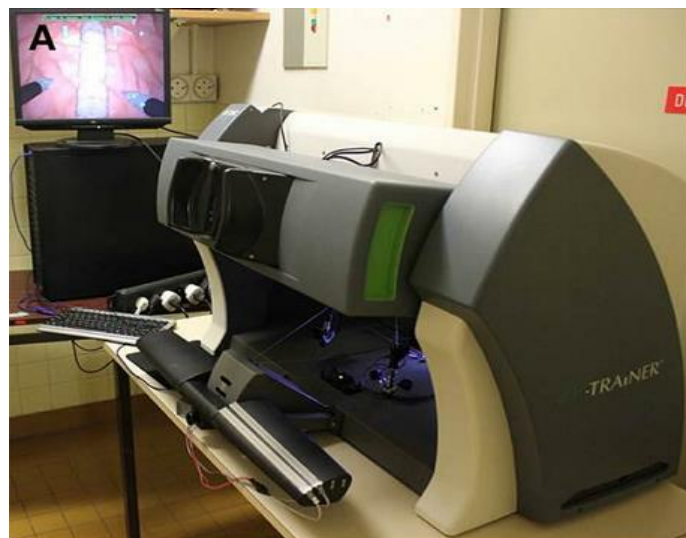


Fig.1-6 dV-Trainer

I.2.2.2- Protocole de l'étude

Il s'agit d'une évaluation prospective multicentrique (Chicago, New York et Nancy) de la validité et des courbes d'apprentissage des 29 exercices du simulateur dV-Trainer, menée d'Avril 2011 à Mars 2012 par 2 groupes de chirurgiens :

- le premier groupe est composé de seniors ou « chirurgiens robotiques » ayant une expérience minimale de 20 interventions chirurgicales au robot
- le deuxième groupe est composé de "novices" c'est-à-dire d'internes en chirurgie ou de chirurgiens ayant une expérience maximale de 2 heures en chirurgie robotique et/ou en simulation.

Au début du protocole, chaque participant bénéficiait de dix minutes de démonstration standardisée sur l'utilisation du simulateur à l'aide d'une vidéo. De même avant chaque nouvel exercice, il recevait des explications standardisées sur l'objectif de l'exercice.

Le groupe « senior » réalisait chaque exercice une fois.

Le groupe « novices », était randomisé en un sous-groupe A et un sous-groupe B. Les jeunes chirurgiens de chacun de ces sous-groupes testaient 15 exercices, équitablement répartis en fonction de leur niveau de difficulté. L'exercice « Pick and Place » était inclus dans les deux sous-groupes et utilisé pour vérifier l'homogénéité des deux sous-groupes.

Les "novices" réalisaient au total 20 répétitions des 15 exercices au cours de séances de une à deux heures.

Ce travail a fait l'objet du Master 2 du Docteur Cyril Perrenot auquel nous avons contribué.

Tableau 1-1 Liste des exercices pour les deux sous-groupes A et B

SOUS-GROUPE A	SOUS-GROUPE B
PICK AND PLACE (PP)	PICK AND PLACE (PP)
MATCH BOARD 1 (MB1)	RING RAIL (RR)
RING WALK 1 (RW1)	CAMERA TARGETING 1 (CT1)
SCALING (SC)	PEG BOARD 1 (PB1)
PEG BOARD 2 (PG2)	ROPE WALK (RW)
MATCH BOARD 2 (MB2)	SUTURE SPONGE 1 (SS1)
SUTURE SPONGE 2 (SS2)	THREAD THE RINGS 1 (TR1)
THREAD THE RINGS 2 (TR2)	NEEDLE TARGETING (NT)
DOTS AND NEEDLES 1 (DN1)	DOTS AND NEEDLES 2 (DN2)
TUBES 1 (TB1)	TUBES 2 (TB2)
ENERGY DISSECTION 1 (ED1)	ENERGY DISSECTION 2 (ED2)
ENERGY SWITCHING 2 (ES2)	ENERGY SWITCHING 1 (ES1)
RING RAIL 2 (RR2)	PEG BOARD 3 (PB3)
CAMERA TARGETING 2 (CT2)	RING WALK 2 (RW2)
RING WALK 3 (RW3)	MATCH BOARD 3 (MB3)

I.2.3- Résultats

I.2.3.1-Validité de construction

Les scores moyens des « chirurgiens robotiques » étaient significativement meilleurs que les scores des « novices »; 67.5% versus 54.4 % (Student T-test ; $p < 0,05$).

L'analyse séparée de chacun des 29 exercices confirmait cette différence. Cependant celle-ci n'était statistiquement significative que pour 14 des 29 exercices : Energy Dissection 1, Match Board 1 et 3, Needle Targeting, Peg Board 1 et 2, Pick and Place, Ring and Rail 2, Ring Walk 1, 2 et 3, Rope Walk, Scaling, Suture Sponge 1, Thread the Ring 1 et 2 (**Tableau 1-2**).

I.2.3.2-Courbes d'apprentissage

Les courbes d'apprentissage étaient analysées séparément pour chacun des 29 exercices (**Figure 1-7**). Le temps jusqu'à l'expertise était de 3,0 +/- 1,3 essais [2-7]. Le temps de plateau était plus long 6,6 +/- 1.5 essais [4-10].

L'examen détaillé des courbes mettait en évidence une progression régulière des scores de 13 exercices suggérant leur intérêt pédagogique élevé : Camera Targeting 2, Dots and Needle 2, Energy Dissection 2, Energy Switching 1, Match Board 1, 2 et 3, Ring Walk 3, Scaling, Suture Sponge 1 et 2, Tubes 1 et 2 . A l'inverse, 16 exercices présentaient des courbes d'apprentissage plates ou irrégulières, suggérant un intérêt pédagogique moindre (**Tableau 1-2**).

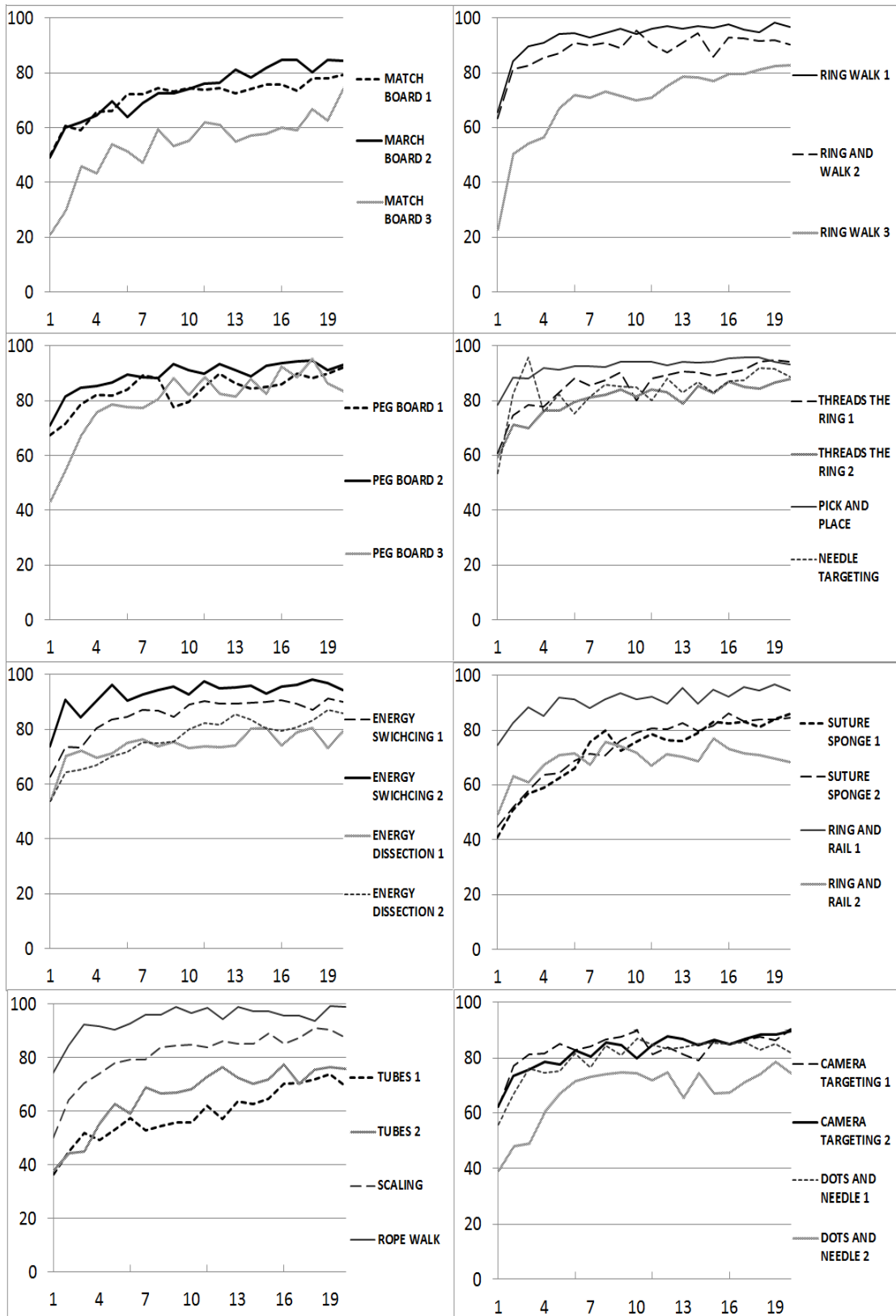


Figure 1-7 Courbe d'apprentissage des 29 exercices sur le simulateur dV-Trainer

Tableau 1-2 Validité de construction, reproductibilité et courbes d'apprentissage des 29 exercices du simulateur

	Validité de construction			Reproductibilité		Courbe d'apprentissage		
	Novice Moyenne %	Chir. Robot moyenne %	Student T-Test p=	Essai 18/19 r=	Essai 19/20 r=	Progression régulière	Temps de plateau CUSUM	Temps jusqu'à expertise
CT 1	62.2	74.3	0.10	0.66	0.56	-	4	2
CT 2	62.3	71.5	0.14	0.78	0.79	OUI	7	2
DN 1	55.8	66.3	0.19	0.52	0.48	-	7	2
DN 2	39.1	52.9	0.13	0.92	0.78	OUI	5	4
ED 1	53.9	67.8	0.05	0.57	0.63	-	5	2
ED 2	53.8	59.6	0.37	0.47	0.58	OUI	9	2
ES 1	62.9	69.0	0.24	0.87	0.45	OUI	9	2
ES 2	73.8	82.1	0.16	0.44	0.39	-	7	2
MB 1	49.6	69.9	0.00001	0.66	0.62	OUI	5	6
MB 2	49.0	60.3	0.10	0.81	0.66	OUI	9	2
MB 3	21.5	37.5	0.01	0.87	0.64	OUI	7	3
NT	53.3	73.0	0.02	0.68	0.62	-	7	2
PB 1	67.5	78.1	0.02	0.66	0.49	-	5	3
PB 2	70.7	82.5	0.02	0.20	0.03	-	8	3
PB 3	43.6	58.1	0.18	0.55	0.84	-	7	3
PP	78.3	93.0	0.00003	0.46	0.82	-	5	7
RR 1	74.7	87.7	0.009	0.92	0.70	-	7	3
RR 2	49.6	56.4	0.33	0.49	0.79	-	7	2
RW 1	65.5	88.5	0.0003	0.44	0.05	-	4	3
RW 2	63.5	81.7	0.01	0.80	0.00	-	5	3
RW 3	22.9	41.9	0.01	0.41	0.46	OUI	5	2
RW	74.2	86.0	0.04	0.05	0.33	-	6	3
SC	50.0	65.4	0.003	0.78	0.84	OUI	7	3
SS 1	40.7	57.8	0.05	0.65	0.86	OUI	6	4
SS 2	44.9	58.6	0.07	0.62	0.30	OUI	8	4
TR 1	60.9	81.3	0.003	0.78	0.72	-	7	5
TR 2	59.5	76.2	0.02	0.69	0.73	-	6	4
TB 1	36.4	48.3	0.08	0.77	0.78	OUI	10	3
TB 2	37.8	41.4	0.65	0.55	0.49	OUI	6	2

1.2.4- Conclusion

au vu de ce travail, nous retenons

- pour la formation les exercices : « Camera Targeting 2, Dots and Needles 2, Energy Switching 1, Match Board 2 et 3, Scaling, **Suture Sponge 1**, **Thread the Ring 1**, Tubes 1 »
- pour l'évaluation : les exercices « Match Board 3, Pick and Place, Ring and Rail 1, Scaling, **Suture Sponge 1**, **Thread the Ring 1** et 2 »
- pour la formation et l'évaluation sont retenus : **Suture Sponge 1** et **Thread the Ring 1**

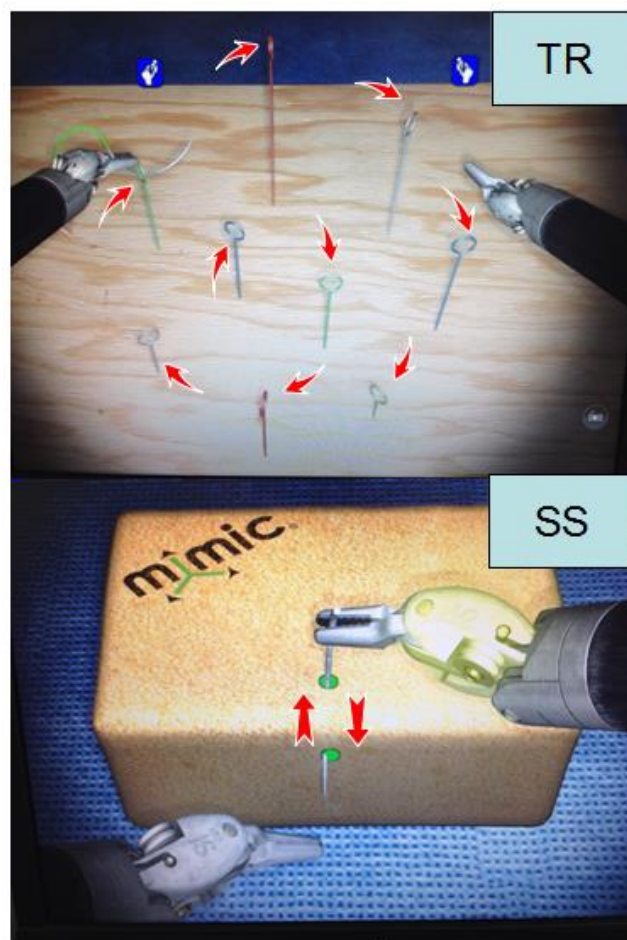


Figure 1-8 Thread the ring 1 et Suture sponge 1

Bilan de la partie I

Parmi les 29 exercices proposés par dVT, nous avons pu sélectionner et retenir 2 exercices (Thread the Ring 1 et Suture Sponge 1) pour la formation et l'évaluation.

Ces exercices sont la base de la recherche suivante.

PARTIE II

DEVELOPPEMENT DE SSP

nous développons le SSP pour suivre l'habitude ergonomique d'utilisation des appui-bras dans trois chapitres ;

le chapitre II-1 pour la mise en place du hardware de SSP , le chapitre II-2 sur sa validation, et le chapitre II-3 sur son application.

Chapitre II-1 Mise en place du matériel de Système de Surveillance de Pression (SSP)

II-1.1 - Introduction

Comme tout chirurgien, je compte sur la stabilité de mes mains pour assurer la précision de mes mouvements. Il est donc important de trouver un point d'appui le plus proche possible des mains selon le principe de levier. En chirurgie ouverte ou microchirurgie, ça peut être le bord de la table opératoire. Et en laparoscopie, ça peut être le trocart ou l'appui-bras ajouté. Plus le point de support est proche, plus la précision est grande. Lorsqu'il y a moins de muscles sollicités, la fatigue est moins importante.

Même si le robot a permis une ergonomie avantageuse par rapport à la chirurgie ouverte ou laparoscopique, il est apparu que les experts bénéficiaient plus de ces avantages ergonomiques que les novices avec plus d'efficacité concernant la manipulation [27] et moins de fatigue musculaire des avant-bras [28,29].

Compte tenu de l'importance de l'ergonomie en chirurgie, et de la différence entre les experts et les novices, l'ergonomie sera la clé pour différencier les niveaux et accélérer la formation aux techniques robotiques. L'ergonomie de l'opérateur pendant la chirurgie robotique/formation a besoin d'une étude approfondie.

D'autres équipes ont également relevé l'importance de l'ergonomie.

Jafri M et al [14] ont prouvé que l'utilisation d'appui-bras pendant la laparoscopie peut diminuer la consommation d'énergie et la fatigue.

Hubert N et al [17] ont prouvé la différence de fatigue musculaire des opérateurs entre laparoscopie et robot avec une étude EMG.

Lee G et al [18] ont étudié la différence de fatigue musculaire après un même test entre les experts et novices sur robot.

Nisky I et al [27] ont prouvé la différence d'efficacité et la manipulation entre les experts et novices sur robot par capteur magnétique.

Notre équipe a aussi testé le réseau de capteurs infrarouge pour étudier les mouvements et l'ergonomie des opérateurs au robot: pose des avant-bras sur les appui-bras pour partager la force de gravité et précisément les mouvements des doigts en utilisant le pédalier de débrayage.

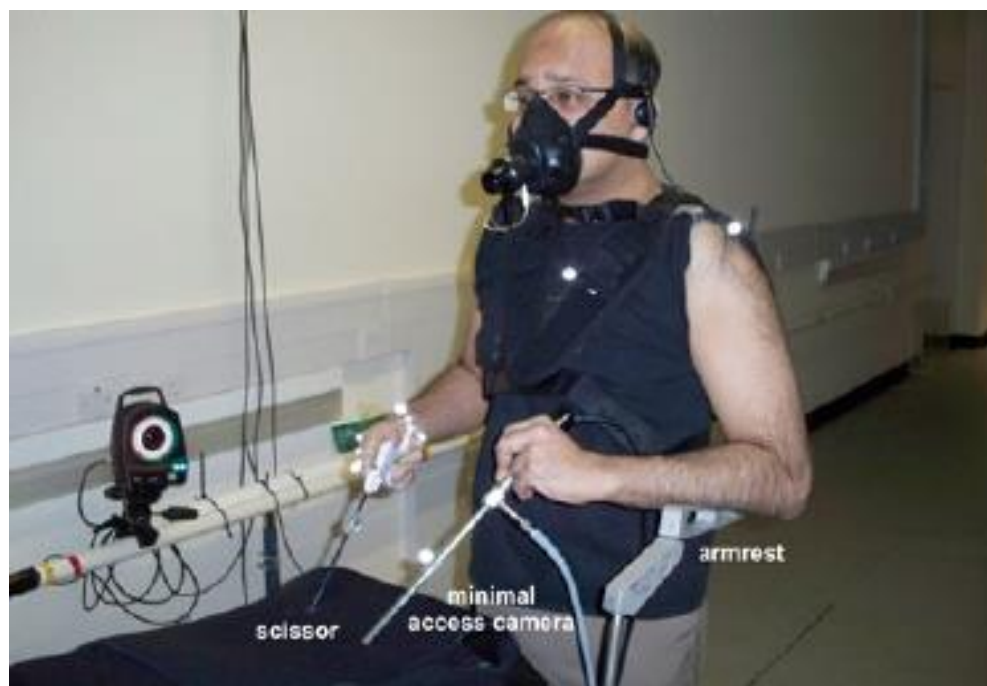


Figure 2-1 appui-bras lors d'une laparoscopie

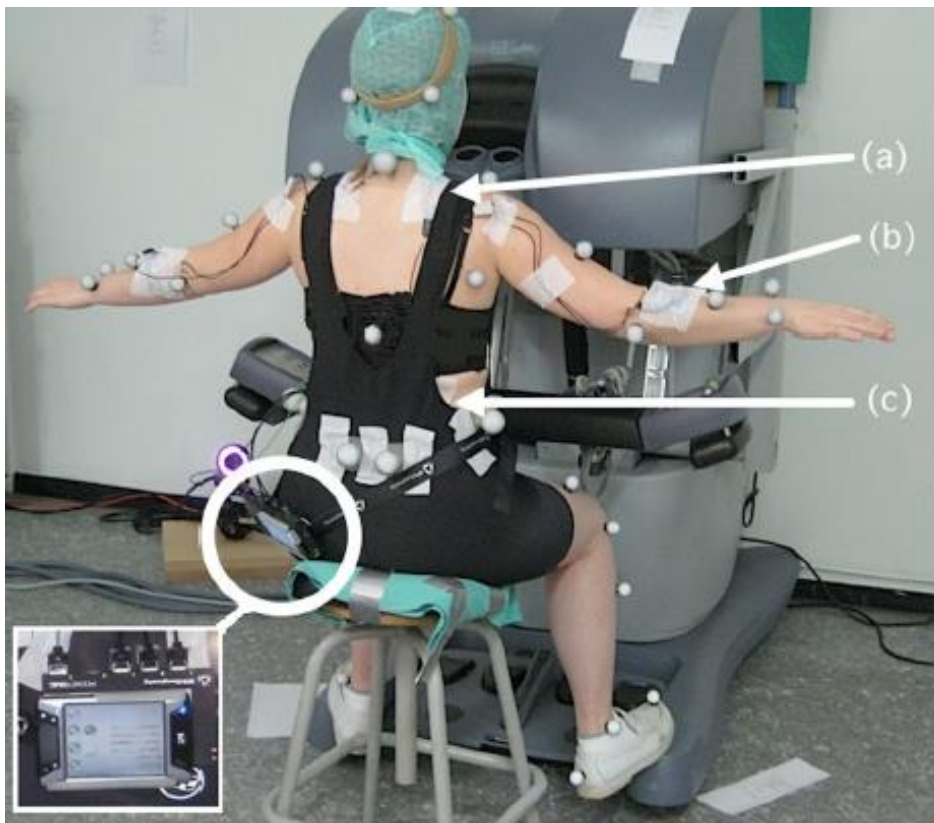


Figure 2-2 EMG sur opérateur en robot



Figure 2-3 EMG sur opérateur en robot

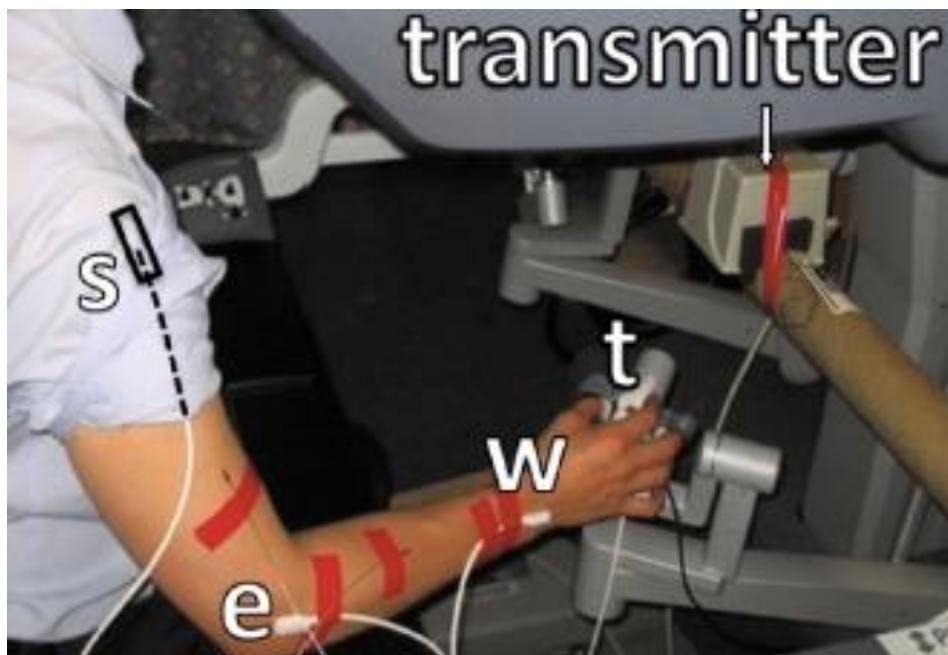


Figure 2-4 capteur magnétique installé au robot



Figure 2-5 capteur infrarouge installé devant la console

II-1.2 - Mise en place de Système de Surveillance de Pression (SSP)

II-1.2.1- Inconvénients des instruments actuels

Les instruments actuels utilisés pour les études en ergonomie présentent des inconvénients:

- Installation du capteur sur le corps de l'opérateur. La dextérité de l'opérateur est alors diminuée. La difficulté de désinfection est une autre contrainte pour leur application dans une salle d'opération.
- Manque de correction des erreurs ergonomiques. Les capteurs sont capables de détecter les erreurs ergonomiques de l'opérateur, mais ils ne peuvent les corriger de façon automatique.
- Coût et technicité : les capteurs avec leurs systèmes de surveillance sont trop chers. Le logiciel correspondant de tracking système par infrarouge est très compliqué à créer car il doit intégrer les données de 14 capteurs en même temps.
- Position des avant-bras sur les appui-bras : c'est la clé de l'ergonomie, car ce geste peut diminuer la fatigue et préciser les mouvements des avant-bras.

Nous avons donc besoin d'un nouvel instrument simple, peu cher et ne présentant pas d'inconfort pour l'opérateur. Puisque le but de cette recherche est de savoir si l'appui-bras du robot est utilisé ou non, un capteur flexible peut remplir ce rôle. Il est l'outil approprié pour vérifier la surface appliquée sur les appui-bras.

II-1.2.2- Sélection du capteur

Les capteurs de pression sont largement utilisés dans les domaines sportifs, de rééducation et d'orthopédie [30,31]. Le capteur de pression le plus populaire est le produit de l'entreprise INTERLINK electronics (Camarillo, CA, USA).

Le capteur idéal est celui qui couvrirait toute la surface de l'appui-bras de dVT ou DVSS. Mais la commande en vue d'une personnalisation faite auprès de l'industriel a été refusée car cela aurait nécessité de construire une ligne de fabrication spécifique et le coût en aurait été prohibitif ! Nous avons donc été amenés à utiliser les produits en vente comme le FRS 408 (Figure 2-6), capteur assez long mais trop étroit.



Figure 2-6 capteurs de pression

II-1.2.3- Prototype de SSP

Après la conception du système, le premier prototype de capteurs de

pression a été fabriqué avec l'aide de Monsieur Huan dong WEI (Post-doc, informaticien à Beijing). Ce prototype est nommé SSP : Système de Surveillance de Pression.

II-1.2.4- Composition du SSP

Le premier prototype de SSP est composé de trois parties: deux capteurs, un circuit analogique et un logiciel sur la base de Labwindows

(Figures 2-7 et 2-8)

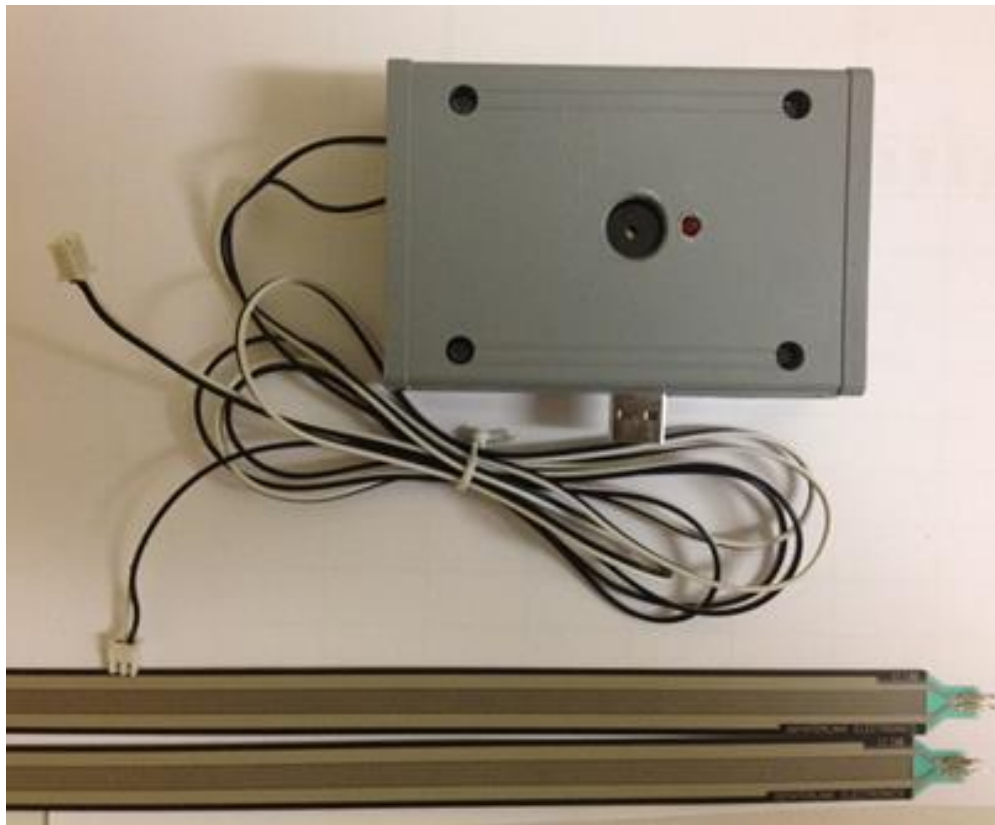


Figure 2-7 1^{er} prototype de SSP: deux capteurs et son circuit analogique

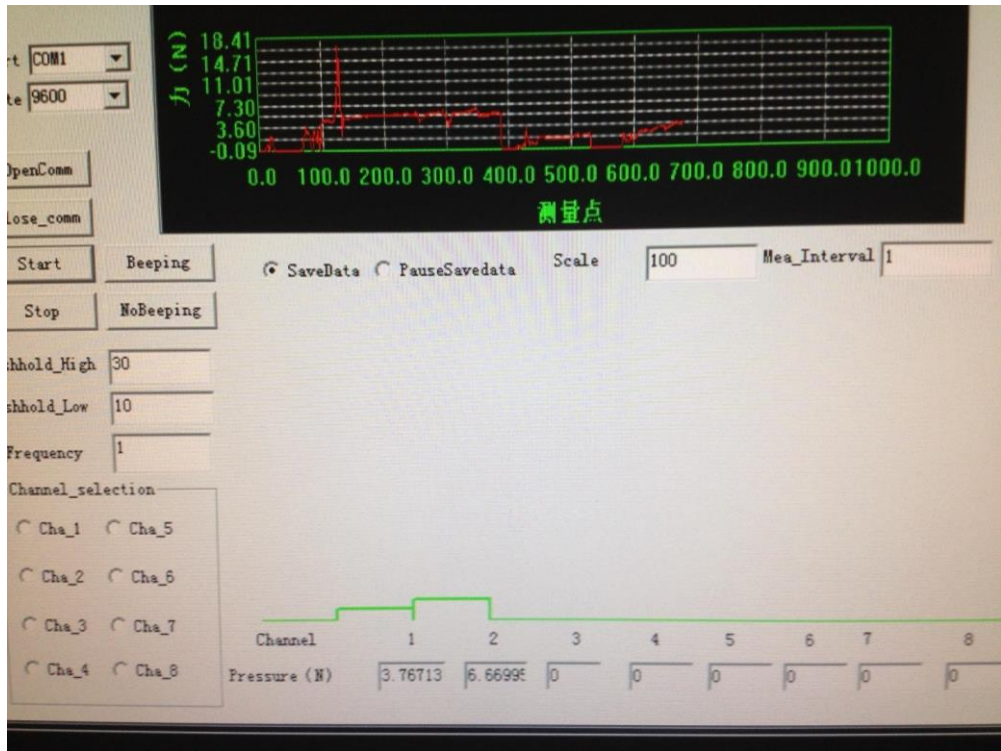


Figure 2-8 interface du logiciel de SSP : signaux positifs sur canaux 1 et 2

II-1.3 - Pre test de SSP

Un pré-test a été organisé pour vérifier la faisabilité de SSP.

II-1.3.1 - Sujets

Cinq professeurs (≥ 500 heures de pratique sur simulateur) ont été invités à pratiquer le test « Thread the Ring 1 » (TR), (Figure 2- 9) à 30 reprises sur le dV-Trainer.

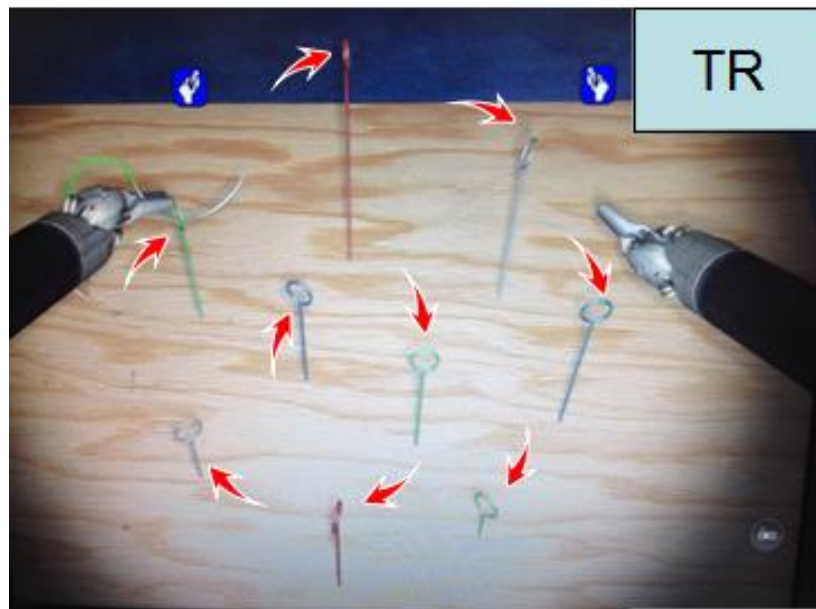


Figure 2-9 Thread the Ring 1 (TR) et le mouvement des pinces

II-1.3.2 - Matériel et méthode

L'appui-bras est réglé de façon à avoir deux hauteurs différentes. Les experts ont répété ce test TR 15 fois à chaque hauteur soit 30 tests au total.

Un capteur est fixé sur le bord arrière de l'appui-bras. L'autre capteur est changé de position comme indiqué sur la [Figure 2-10](#).

Pour chaque position de bras, sont réalisés 3 exercices TR.

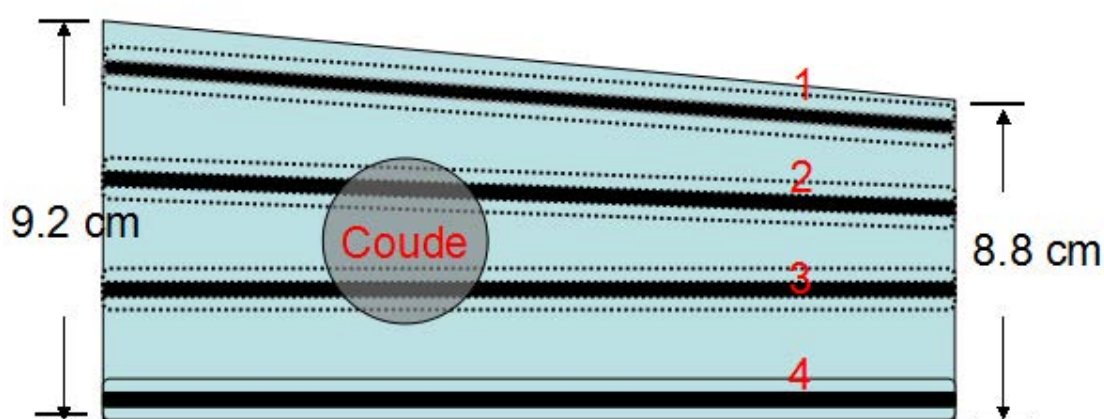


Figure 2 -10 installation de capteurs sur l'appui bras droit

II-1.3.3 - Remarques

- Il est demandé aux experts de garder au maximum leurs avant-bras sur les appui-bras.
- Le test TR qui a été retenu propose un mouvement large des avant-bras.
- La position des capteurs est calculée, l'espace entre deux zones de détection est à 1.8 cm, ce qui est moins large que la taille du coude.
- Les autres hauteurs d'appui-bras sont très rarement utilisées.
- Le FRS 408 est capable de détecter une force à 0.01 newton

II-1.3.4 - Résultats (Tableau 2-1)

- Il y a un capteur sur chaque hauteur ce qui représente un taux d'appui supérieur à 99%. (Une sensibilité > 99% signifie que au moins un capteur peut détecter l'appui du bras)

- Quatre capteurs de pression offrent une sensibilité suffisante pour détecter la force sur l'appui bras.

- Le SSP est capable de suivre la force sur l'appui-bras

Nombre de volontaire		Hauteur 3/5				Hauteur 4/5			
		1.1/ 1.3cm	3.3/ 3.9cm	5.4/ 6.6cm	6.7/ 7.7cm	1.1/ 1.3cm	3.3/ 3.9cm	5.4/ 6.6cm	6.7/ 7.7cm
1	Sensibilité (%)	5.5	87.1	88	99.1	4	55.1	99.6	100
	Force moyenne)	0.027	1.371	1.54	4.86	0.014	0.77	3.2	7.1
2	Sensibilité	66.7	95.2	99.7	99.9	28.9	99.2	100	100
	Force moyenne	0.49	1.7	3.8	6.64	0.11	2.88	3.75	4.17
3	Sensibilité	2.6	16.7	58.8	99.4	27.5	63.3	99.3	99.8
	Force moyenne	0.012	0.129	0.694	5.02	0.035	0.71	1.58	2.8
4	Sensibilité	31.8	76.3	99.7	99.9	70.5	87.1	99.3	99.5
	Force moyenne	0.073	0.569	1.966	3.22	0.44	1.21	1.62	1.8
5	Sensibilité	1	12.1	85.2	99.9	1.5	6.9	85.2	99.9
	Force moyenne	0.002	0.06	3.4	6.9	0.03	0.069	3.4	5.1

Tableau 2-1 la distribution du taux d'appui

II-1.3.4.1 - Faux positif

Après une force importante ou une utilisation de durée longue, le capteur présente une déformation élastique. Il pourra y avoir alors un signal sur l'écran même s'il n'est pas touché .

II-1.3.4.2 - Faux négatif

Cette situation est rarissime (<0.5%) et peut survenir quand le coude est mince et se localise dans la zone "muette" entre deux capteurs.

II-1.3.4.3 - Solutions

- Pour les faux positifs, il est proposé une auto-calibration avant mesure et une fenêtre pour chaque capteur pour un contrôle visuel de la ligne de base à la fin de chaque mesure. (Si cette ligne de base n'est pas à zéro après l'exercice, les données d'ergonomie sont considérées comme un faux positif et l'exercice sera exclu et le SSP recalibré)

- Pour les faux négatifs, il est décidé d'installer 4 capteurs côte à côte de chaque côté pour diminuer la zone "muette"

- Les opérateurs sur dVT sont invités à toucher l'appui-bras avec leurs avant-bras. (pas seulement avec les coudes)

II-1.4 - Deuxième génération de SSP

Une amélioration de SSP est mise en place suite aux tests faits avec le prototype. 4 FRS 408 sont donc installés de chaque côté et un circuit analogique est reconstruit avec la fonction d'auto-calibration et logiciel sur la base de National instrument (Fig. 2-11)

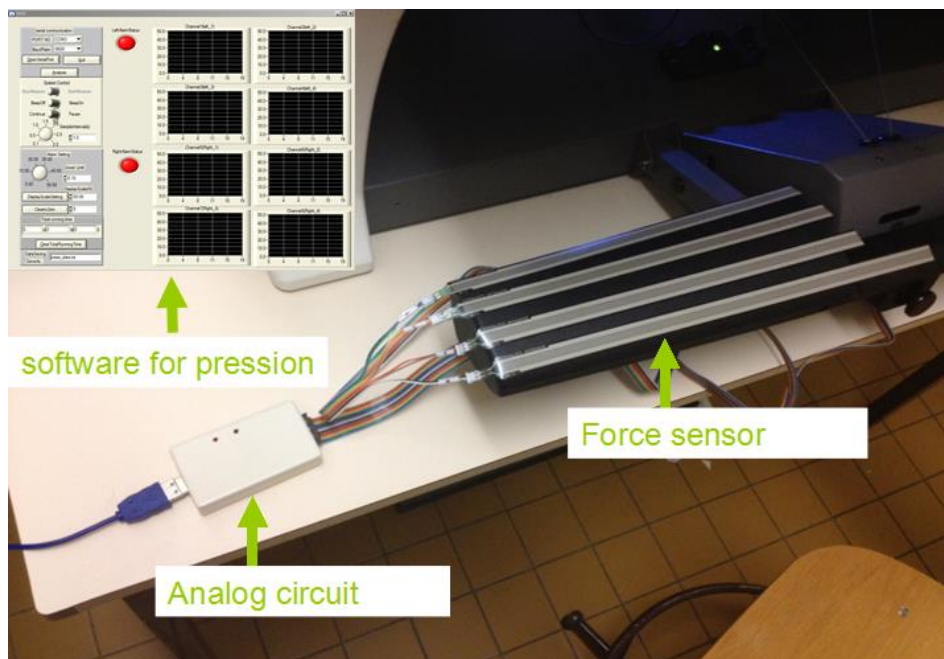


Figure 2-11 2ème génération de SSP. Bras soulevé=capteurs non touchés

II-1.4.1 circuit électronique (Figure 2-12)

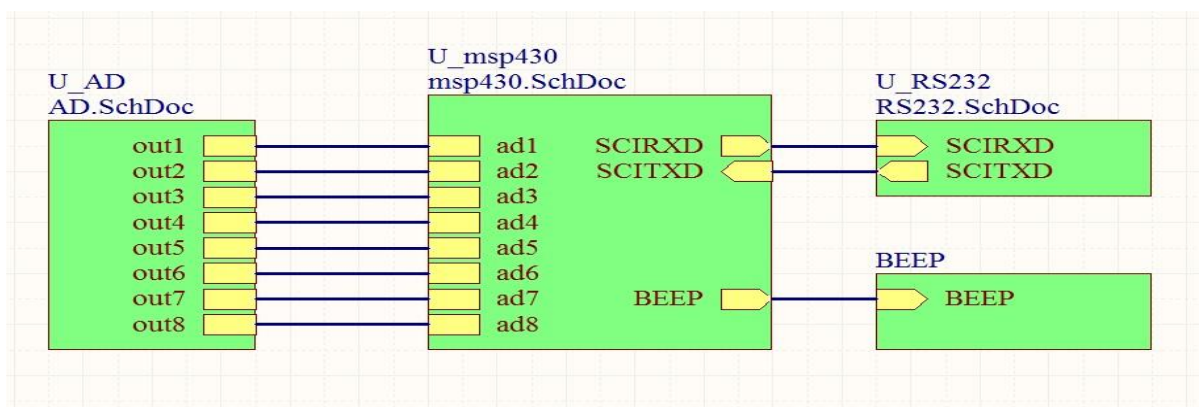


FIG 2-12 circuit électronique de 2^{ème} génération de SSP avec 8 capteurs

II-1.4.2 Re-test de TR

Nous demandons aux 5 experts de répéter le test TR 3 fois sur 2 hauteurs prédéfinies avec ce SSP de 2ème génération. Il leur est demandé de garder leurs bras en place. Il présentent tous un excellent taux d'appui à 100%.

II-1.4.3 Problème et solution

L'extrémité des capteurs est très fragile et risque d'être cassée. Le déplacement des capteurs devient donc difficile.

Nous préconisons l'installation des capteurs sur un tissu élastique et sa protection en recouvrant les parties fragiles. **(Figure 2-13)**



Figure 2-13 capteurs protégés et installés sur l'appui bras droit de dVT

Bilan du chapitre II-1

- Nous avons donc mis en place et amélioré le SSP
- C'est une solution directe pour l'étude ergonomique de l'utilisation des appui bras sur dV-Trainier
- le SSP répond à notre besoin: pas de capteur sur le corps, efficace, peu cher

Mais est-ce que le SSP est un outil utile?

Chapitre II-2 Validation de SSP

II-2.1 - Introduction

Au bloc opératoire, il a été constaté que les novices soulevaient souvent leurs avant-bras en l'air. Le même phénomène est aussi observé pendant la procédure d'entraînement de novices sur dVT. Ce dVT propose un critère "Workspace Range" pour évaluer l'ergonomie. Il concerne l'espace de mouvement des joystick dans la console qui est calculé automatiquement par le dVT. L'efficacité de l'utilisation de joystick est prise en compte, mais l'importance de l'appui-bras pour diminuer la fatigue et améliorer la précision du mouvement est ignorée.

Notre hypothèse est que l'utilisation de l'appui-bras de robot/ simulateur est une habitude ergonomique expérience-dépendante issue de la constatation que les experts utilisent mieux l'appui-bras que les novices.

Pour vérifier cette hypothèse, le chiffre donné par le SSP doit être capable de différencier les novices et les experts. C'est le but de cette étude

II-2.2 - Question posée au chapitre II-1

Est-ce que le SSP est un outil utile ?

La validation de SSP sera vérifiée par une étude de validité de construction: est-ce qu'il existe une différence d'utilisation des appui-bras entre les novices et experts?

II-2.3 - Publication

The International Journal of **Medical Robotics** and **Computer Assisted Surgery**



THE INTERNATIONAL JOURNAL OF MEDICAL ROBOTICS AND COMPUTER ASSISTED SURGERY
Int J Med Robotics Comput Assist Surg (2016)
Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/rcs.1723

ORIGINAL ARTICLE

A new system for evaluation of armrest use in robotic surgery and validation of a new ergonomic concept – armrest load

Kun YANG^{1,2}, Manuela PEREZ^{1,2,3}, Cyril PERRENOT^{1,2,3}, Nicolas HUBERT^{1,2,4},
Jacques FELBLINGER^{1,2,5,6,7}, Jacques HUBERT^{1,2,4}

1. Université de Lorraine, IADI, Nancy, F-54000, France.
2. Inserm, U947, Nancy, F-54000, France.
3. CHRU Nancy, Department of Emergency and General Surgery, Nancy, F-54000, France.
4. CHRU Nancy, Department of Urology, Nancy, F-54000, France.
5. Inserm, CIC-IT 801, Nancy, F-54000, France.
6. CHRU Nancy, Imagerie / IADI, Nancy, F-54000, France.
7. CHRU Nancy, Recherche / CIC-IT 801, Nancy, F-54000, France.

Abstract

Background: The da Vinci robot provides a sitting position and an armrest to decrease workload and increase dexterity. We investigated the surgeon's ergonomic behavior by installing force sensors on the dV-Trainer[®] simulator's armrest to measure the "Armrest Load" during the performance of simulated exercises.

Methods: Five experts and 48 novices performed two robotic simulation exercises on the dV-Trainer. We calculated the "Armrest load" and evaluated their armrest-using habits. Overall score and workspace range were evaluated automatically by the simulator and compared with "Armrest load".

Results: Statistically significant differences exist for overall score, workspace range and "armrest load" between novices and experts.

Conclusion: The armrest load score is a direct, sensitive measure for the ergonomic evaluation of a simulator's armrest use. This experience-dependent ergonomic difference between experts and novices ($p=0.007$) highlights the importance of ergonomic training for robot novice users.

Key words: Ergonomics, Robotic surgery, Robotic simulator, dV-trainer, Armrest load, Force sensor

Introduction

Laparoscopy offers patients the advantage of minimally invasive surgery (MIS), but surgeons who perform it suffer from poor ergonomics [1,2,3] and a higher risk of musculoskeletal disorder [4,5,6,7]. The use of armrests as a forearm support decreases energy consumption[8]and offers comfort, increasing task performance benefits in laparoscopic surgery [9].

One of the purposes of the da Vinci system (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA, USA) is to offer such ergonomic advantages. Hence, the console of the da Vinci includes a clutch system to release the operator's hands from the instruments, allowing repositioning of the master controllers without moving the robotic arms. As a result, the use of the da Vinci robot significantly decreases physical and mental workload compared with a laparoscopic procedure. In microsurgery, stabilized forearms reduce tremors and improve motion precision. By translating this positioning to robotic surgical training, the surgeon's performance can be improved [10]. Given the above, experts, compared with novices, benefit more from the ergonomic advantages of the daVinci system because of their more efficient use of the master controllers [11]and thereby induce less workload of the forearm muscles[12]. Knowing that ergonomics improves skills in other types of surgery, we can anticipate the same benefits for robotic surgery. If we are able to train novices to acquire better ergonomics and to decrease their workload, we can also increase their ability with robotic systems.

In the operating room, experts more consistently use the robotic armrest than novices. We observed the same phenomenon during novice-training courses on the dV-Trainer® (dVT) simulator (Mimic, Seattle, WA, USA). Criteria such as "workspace range", which are automatically calculated by the simulator, only evaluates the radius of the user's working volume on the master controllers, and ignores armrest use; consequently, there is a need for a device that measures

the use of the armrest. The forearm force sensor of such a device should possess the following features: it should adequately cover the surface area of the armrest, be durable and reliable enough to withstand frequent operator use, and be non-sensitive for the operator. The corresponding software should evaluate armrest use automatically and provide a comprehensive score. The system should be validated with regard to construct validity, comparing experts' and novices' performance.

Using the armrest is the key to reduce the fatigue and assure the precision of forearms' movement. As ergonomic training is currently not considered as a valuable criterion in robotic surgery, it is fundamental to demonstrate the importance and value of expert ergonomic movement in the robotic skill training procedure.

The purpose of this study was to develop a new force sensor system to evaluate armrest use during robotic surgery simulation. We also aimed to create a criterion "Armrest load" (ARL) to evaluate surgeons' ergonomic behavior and investigate the ergonomic differences between experts and novices.

In the future, after validation, such a sensor system could be used as a training ergonomic device to improve skills and performance.

Materials and methods

Participants

Participants in this study included 38 surgeons and 10 nurses with no robot or simulator experience. Five experts with at least 600 hours of dVT simulator experience were recruited for the study. Informed consent was obtained from all participants. The novice group involved 32 males and 16 females with an average age of 31.11 (\pm 11.22) years. Five of the male experts were right-handed with an average age of 33.6 (\pm 4.93) years.

Simulator and exercises

The dVT is a stand-alone robotic surgery simulator developed by Mimic Technologies, Inc. (Figure 1). Several studies have demonstrated the simulator's face, content and construct validity as a tool for robotic skills training[13,14]. The dVT provides an automatic scoring system for the operator's performance evaluation with seven categories: time to complete exercise, economy of motion, instrument collisions, excessive instrument force, instrument out of view, master workspace range, drops and an overall score for global evaluation. The overall score was used to confirm the robotic skills levels of all candidates. Among the seven automatic scores, developers designed the "Master workspace range" criterion to evaluate ergonomics. This score is focused on the positions of the joysticks and the hands.

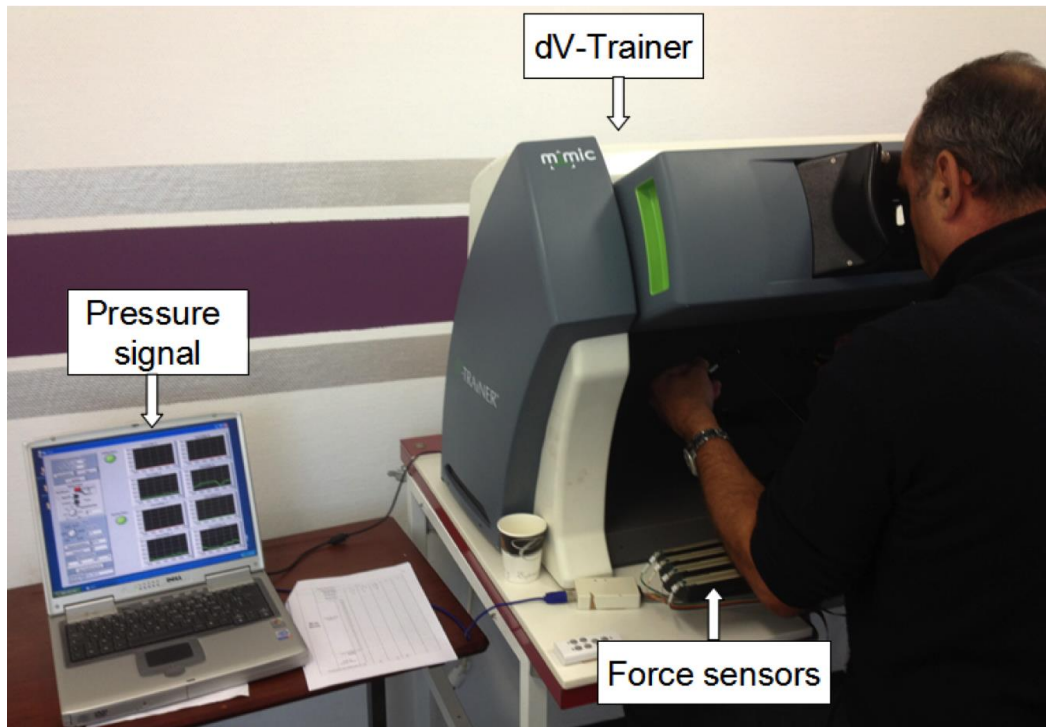


Figure 1. PSS system on the dV-Trainer

Based on expert opinion and literature review, we chose the Thread the Rings 1 (TR) and Suture Sponge (SS) exercises for the study, as these exercises reproduce a surgical procedure [15,16]. TR and SS simulate different suturing tasks. TR is a simulation of a horizontal running suture, driving a needle through a series of rings. As the rings are located on a platform in many directions, some located on the edge of the visual field, TR requires a large range of forearm motion. SS is a vertical suturing exercise that requires the operator to demonstrate both backhand and forehand suturing using both right and left hands. It requires very precise needle control even if there is less forearm movement, as the entrance and exit points are positioned on the same axis and same area (Figure 2).

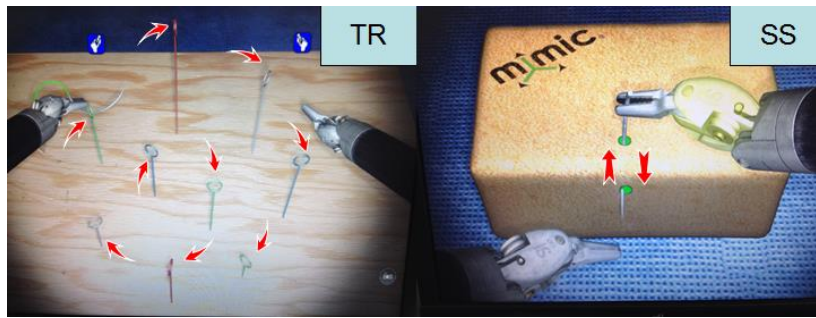


Figure 2. Exercises

Protocol and data collection

- Novices were required to complete the exercises three times. This included two warm-up attempts and the final testing attempt. The overall score and workspace range score on the dVT were recorded during the final attempt.
- Experts completed the exercise one time without warm-up. Their overall scores and workspace range score on the dVT were recorded after their initial attempt.
- Both groups had to complete the exercises from a static position, and were not allowed to use the navigation feature of the camera. The only master controller positioning feature they were permitted to use was the clutching pedal.

Pressure surveillance system and evaluation criteria

The Pressure Surveillance System (PSS) was designed to register the pressure of the surgeons' forearms on the dVT's armrest (Figure 3).

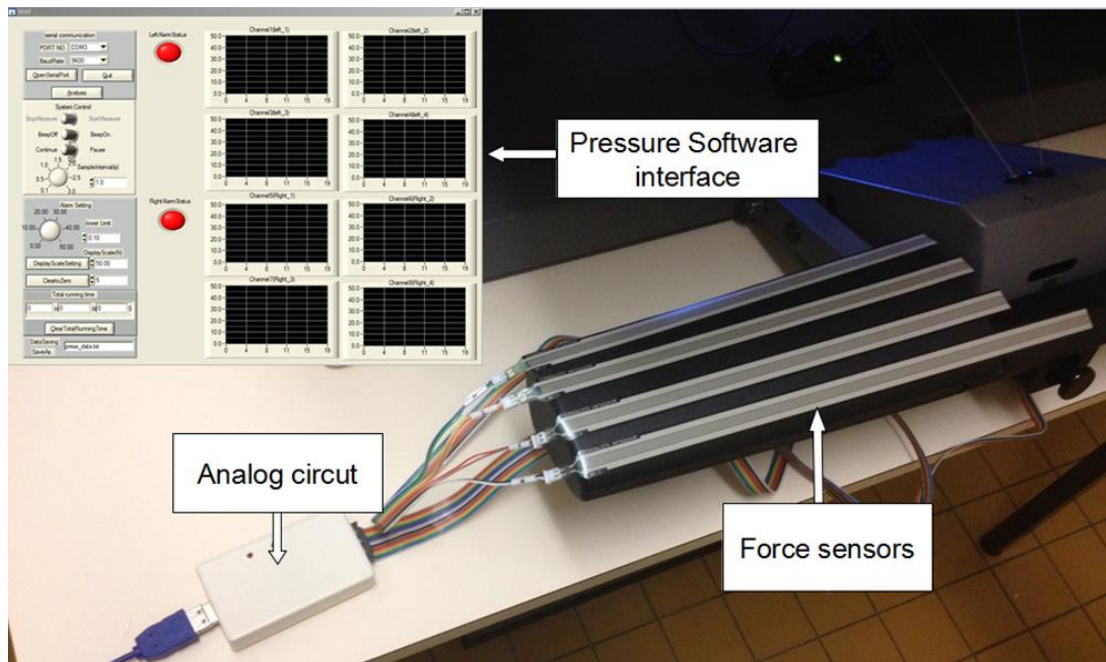


Figure 3. Composition of PSS system

The PSS comprises three parts: eight Force Sensing Resistors (FSR 408[®], *Interlink Electronics*[®], Camarillo, CA, USA) located on the armrests, an analogic circuit, and Lab Windows based software.

We considered three criteria when designing the ArmRest Load score (ARL). Physically, the fatigue of the arm muscles increases with the duration of leaving the armrest. The longer the arms stay in the air, the more energy they consume. The longest period that the arms were not on the armrest was identified and selected as the first metric: 'T' (max time).

For the same reason, the total number of times of leaving the armrest "F" (frequency) was chosen as the second metric.

T and F can define the absolute time of the forearms leaving the armrest, but they ignore the relationship with the total time to complete the exercise. For this reason, we chose R (touching rate = time of touching armrest / total time of exercise) as a metric that included the total time and made different tasks comparable (some of them lasting seconds and others lasting up to ten minutes).

Given the above, the PPS automatically evaluates each exercise performed during the test, with T (seconds), F (times), and R (%) as the key data for ergonomic evaluation.

Technical data and mathematical process

For accuracy control, we demonstrated that four sensors on each side would offer a false negative rate less than 0.5%. To avoid false positive errors, we calibrated all the sensors at the beginning and rechecked the baseline at the end of each attempt. (Figure 1)

We designed a formula to calculate the armrest load (ARL):

$$\text{Armrest load} = 100 \times 0.995^{\text{EIH}} \text{ (EIH: Ergonomic Index of Habit)}$$

$$EIH_L = \frac{T_{L\max}^{1.2} \times F_{L\max} + T_{L\max-1}^{1.2} \times F_{L\max-1} + T_{L\max-2}^{1.2} \times F_{L\max-2}}{R_{left}}$$

$$EIH_R = \frac{T_{R\max}^{1.2} \times F_{R\max} + T_{R\max-1}^{1.2} \times F_{R\max-1} + T_{R\max-2}^{1.2} \times F_{R\max-2}}{R_{right}}$$

$$EIH = EIH_L + EIH_R$$

(L=left side; R= right side; max= Max time forearm off the armrest; max-1= max time -1 second; max-2= max time-2 seconds. For example, if max time= 10 seconds, max-1= 9 seconds, max-2= 8 seconds, these three sections were included to assure the accuracy of Armrest load)

EIH was defined as an index increasing with the severity of ergonomic errors with

a range of $[0, +\infty]$, which increased with T and F, and reduced with R.

With the same absolute time, a shorter T with bigger F was better than a longer T with smaller F because of more chances to release the forearm. An index of 1.2 to T could differentiate the two situations, and also avoided the necessity of calculating the absolute time of the forearms' leaving twice, as it was already contained in R (a pure formula of experience).

We prefer a score ranging from $[0-100]$ as the result of ergonomic examinations (100 means perfect). So we treated the EIH as an index to meet this need.

This score was named "Armrest Load" (ARL), and evaluated the use of the armrest. A perfect Armrest Load is 100, with $R = 100\%$, $T = 0$ and $F = 0$, which means that the forearms always stay on the armrest without ever leaving it.

The design details are explained in the complementary information file.

Statistical analysis.

- We controlled the ARL distribution for each group using the Kolmogorov-Smirnov test.
- Analysis of variance one way (ANOVA) or Student's t-test was used to compare the overall score, workspace range and ARL of the two groups:
 - ANOVA was used to compare the overall score and workspace range because of their normal distributions. We used Student's t-test to recheck these results.
 - We confirmed ARL's normal distribution using the K-S test, and then used ANOVA to compare the ARL scores between groups.
- Statistical analysis was completed using SPSS ver. 19 (SPSS, Inc, Chicago, USA) with significance level p at 0.05.

Results

dV-Trainer performances:

Overall score (Figure 4):

Statistically significant differences were found for TR and SS scores between both groups.

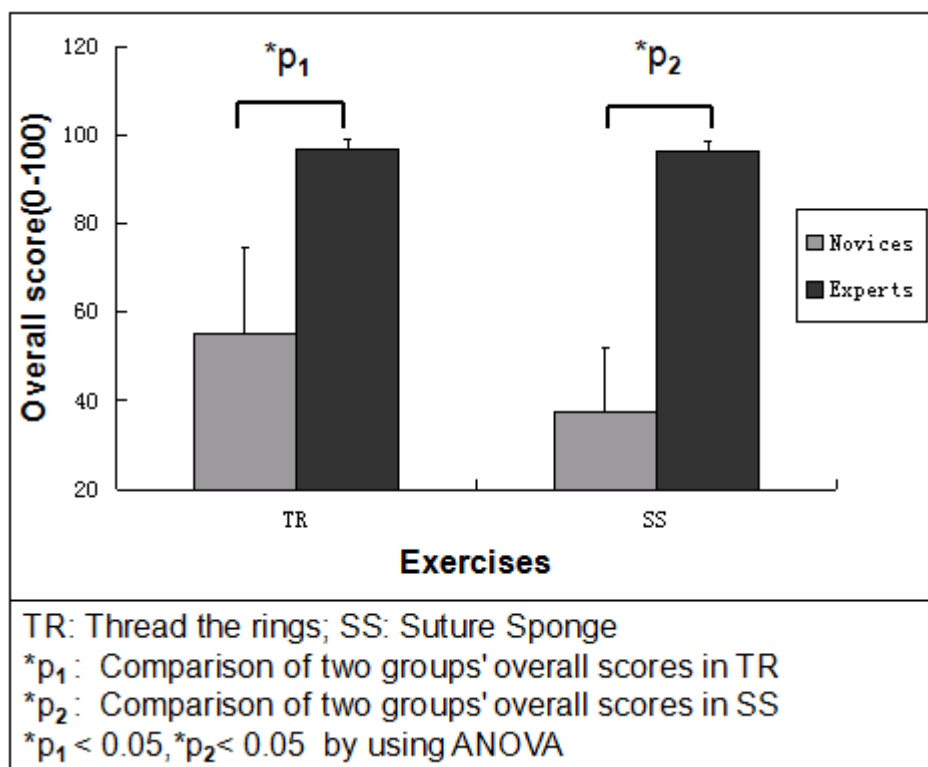


Figure 4. Overall score comparison

Workspace range (Figure 5):

Statistically significant differences were also found in TR and SS for workspace range between the two groups.

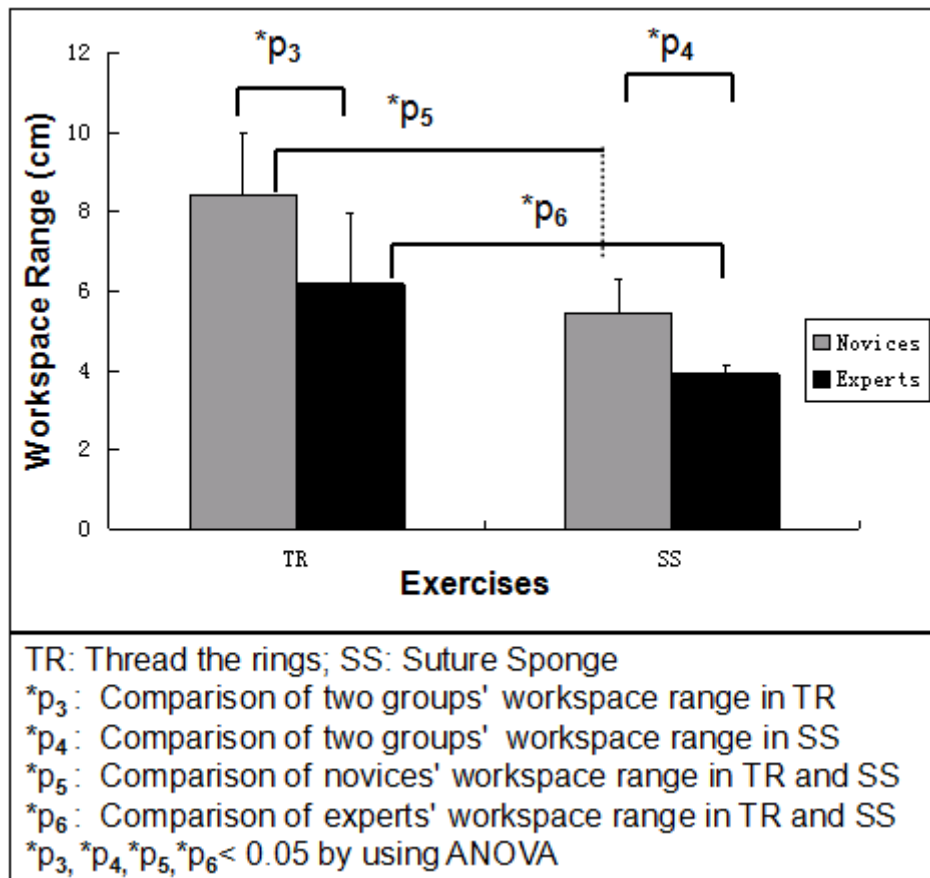


Figure 5. Workspace Range comparison

Ergonomic results on PSS:

Max time of forearms off the armrest (T) (Figure 6):

No statistically significant difference in T existed between the two forearms in the novice or the expert groups ($P_7, P_8, P_9, P_{10} > 0.05$); no statistically significant difference in T was found between the two exercises TR and SS in each group ($P_{11}, P_{12} > 0.05$).

A statistically significant difference existed between the two groups with $P_{13} < 0.01$.

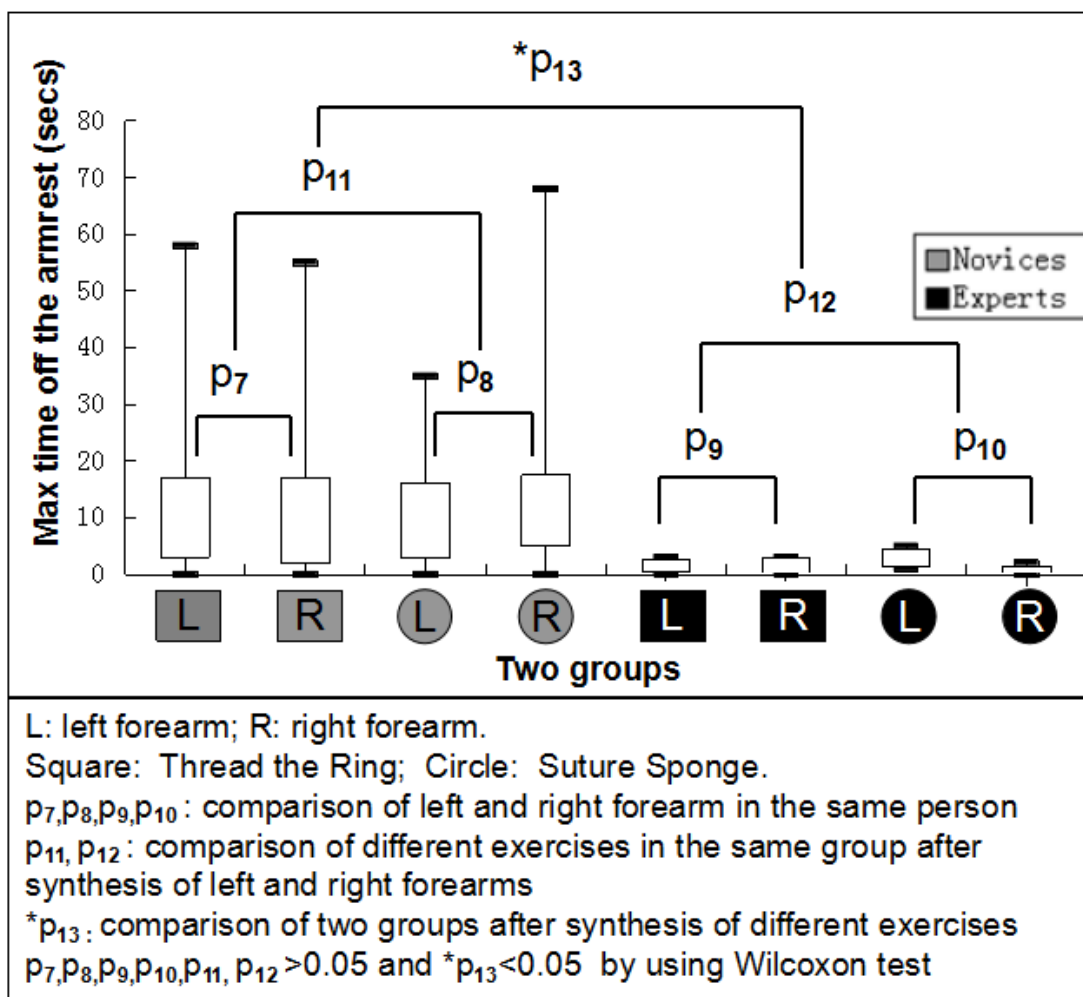


Figure 6. Max time of forearms off the armrest in two groups

Frequency of forearms off the armrest (F) (Figure 7):

No statistically significant difference in F was found between the two forearms in the novice or the expert group ($P_{14}, P_{15}, P_{16}, P_{17} > 0.05$); no statistically significant difference in F existed between the two exercises TR and SS in the two groups ($P_{18}, P_{19} > 0.05$). However, a statistically significant difference was found between the two groups with $P_{20} < 0.01$.

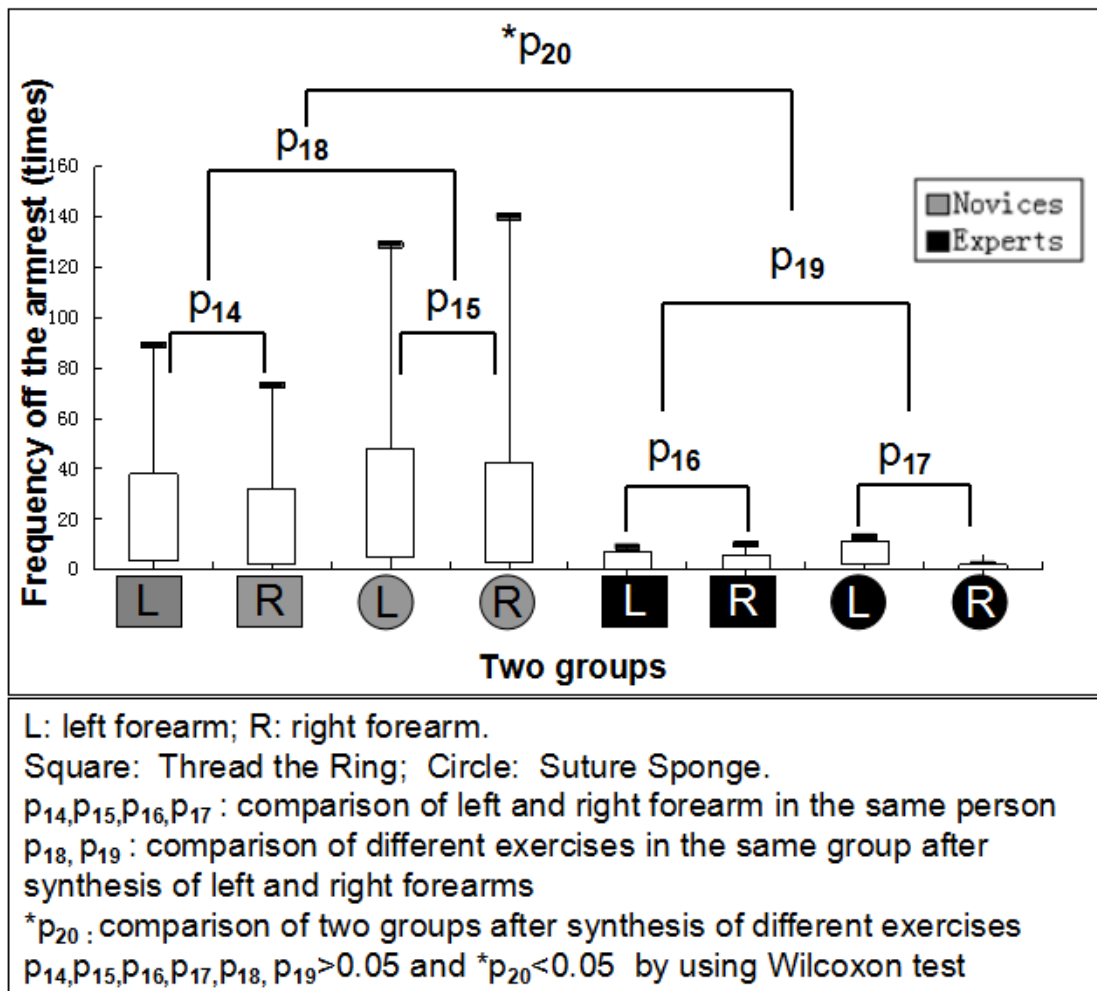


Figure 7. Frequency of forearms off the armrest in two group

Touching rate of forearms off the armrest (R) (Figure 8):

No statistically significant difference in R was found between the two forearms in the novice group for TR and SS ($P_{21}, P_{22} > 0.05$) and TR in the expert group ($P_{23} > 0.05$); a statistically difference only existed in the SS of the expert group with $P_{24} = 0.043$.

No statistically significant difference in R existed between the two exercises in each group ($P_{25}, P_{26} > 0.05$).

A statistically significant difference existed between the two groups with $P_{27} < 0.01$.

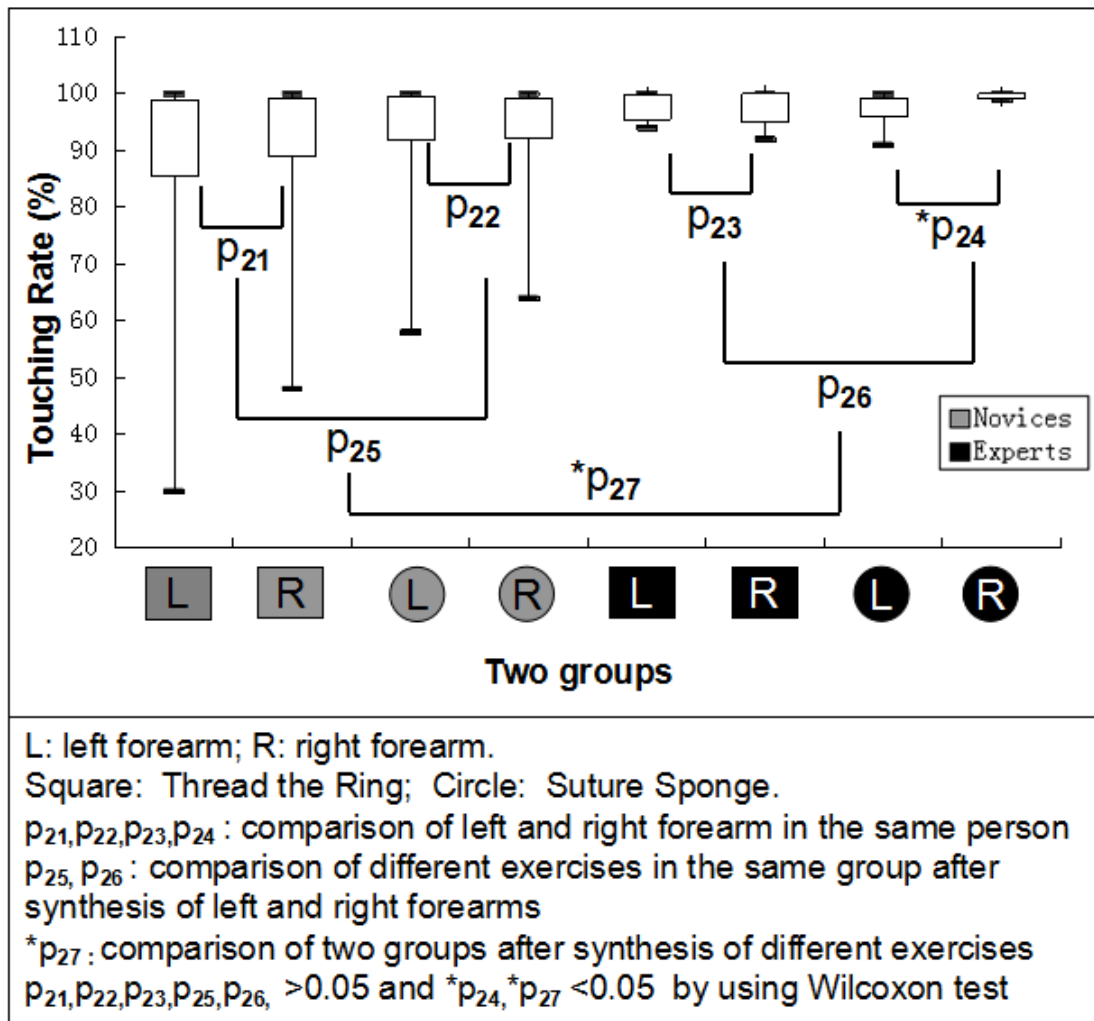


Figure 8. Touching rate on the armrest in two groups

Synthetic analysis (ARL):

Using the armrest load formula, we calculated the ARL score (Figure 9):

We used the Kolmogorov-Smirnov to confirm the normal distribution of our result ($P_{TR\ Novice} = 0.227$, $P_{SS\ Novice} = 0.140$, $P_{TR\ Expert} = 0.995$, $P_{SS\ Expert} = 0.999$).

No statistically significant difference of ARL existed inside each group, including both exercises.

However, ARL showed a statistically significant difference between the two

groups ($p_{30}=0.007$).

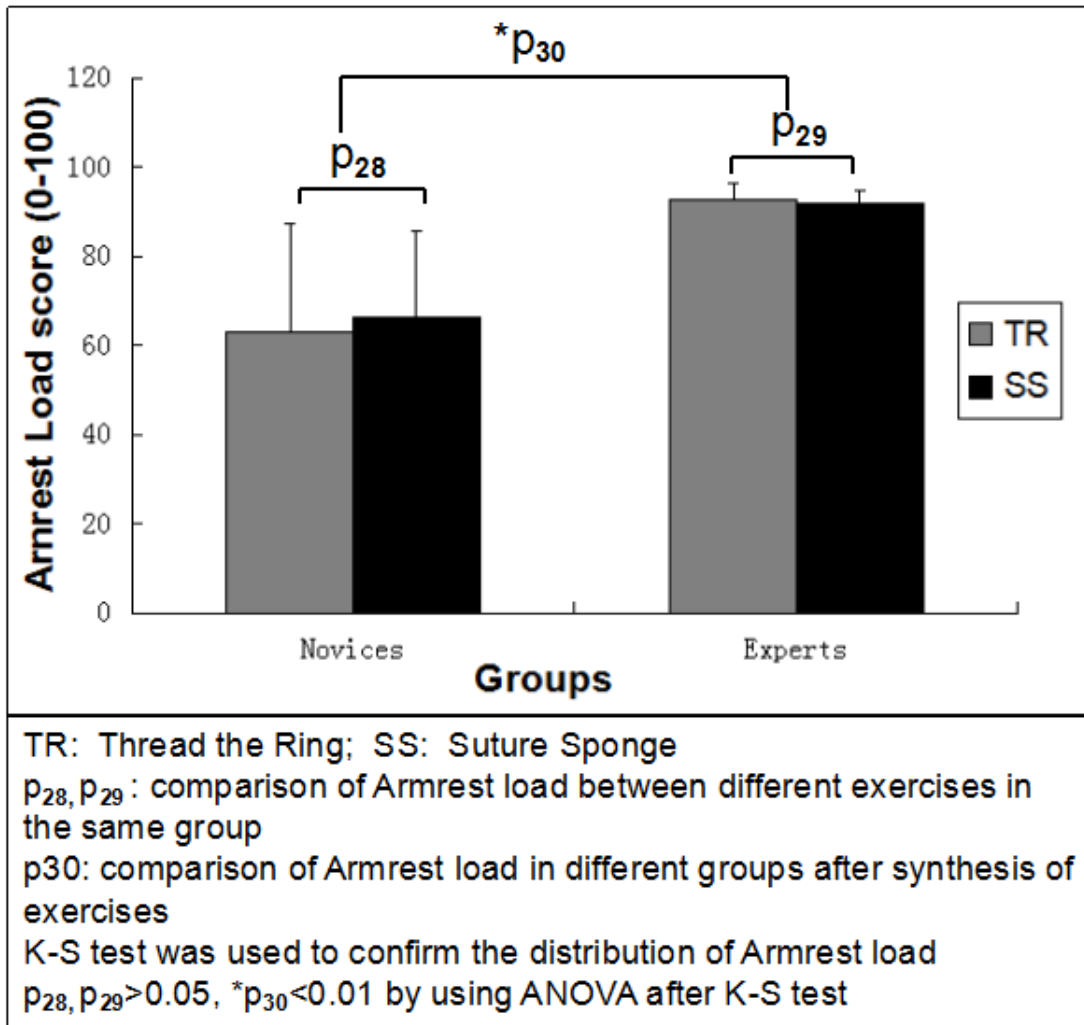


Figure 9. Comparison of Armrest load score between two groups

Discussion

Our study demonstrated that the experts had a significantly higher ARL than the novices. The use of the PSS demonstrated effective use of the armrest by experts during robotic simulated exercises, which in turn showed better ergonomic practices than novices. We created a new standard to evaluate ergonomics using a tool that will enable future training of novices.

Interest in motion stabilization

ARL represents a score that evaluates the forearm ergonomics position, and good ergonomics can improve skill ability. Safwat et al. showed that positioning the forearm on a support significantly reduces tremors and increases the movement's accuracy [17]. For the same reason, Goto produced an intelligent armrest that follows the surgeon's arm automatically to improve the precision of microsurgical procedures [18]. Given the above, proper ergonomics not only stabilizes movement, but also reduces fatigue. In laparoscopy, using armrests may decrease energy consumption [8] and improve the surgeon's comfort [9]. A similar phenomenon has also been found in robotics: multiple studies reported that robotic experts using the armrest routinely demonstrated less load on the trapezius muscle than laparoscopic experts and novices on the robot [19,20]. Our study showed the following: experts who demonstrated proper ergonomics while resting their forearms performed better than novices who ignored the use of proper ergonomics and clutching technique while performing the exercises.

Experts' strategy

The ergonomic design of the da Vinci allows surgeons to complete challenging tasks with precision and comfort. Nisky et al. demonstrated that during a simple point-to-point movement, the experts produced less end point error than novices when using the clutch to reduce the arm motion [11]. Our study confirmed this

phenomenon: the experts subconsciously separated a long movement into short ones by using the clutch pedal. Thus, the experts achieved a significantly lower workspace range than the novices (Figure 5).

Current ergonomic evaluation methods

Current objective evaluation methods include the workspace range on simulator, the additional magnetic tracking system [11] and EMG [19] on the operator.

The workspace range was designed to automatically measure the efficient movement of the robotic master controllers. The initial position of the robotic master controllers was defined as the center of a sphere with the radius of the sphere representing the defined workspace area. If the operators' movements of the robotic master controllers traveled outside of the sphere, the length in centimeters outside of the designated radius would be summed and would count against the operator. Considering that the defined workspace range does not adequately address overall ergonomic evaluation, it is feasible to achieve a perfect workspace range score without both forearms positioned on the armrests.

A magnetic tracking system can be installed on the joystick or the surgeon's fingers to analyse the efficiency of hands' movements. It does not focus on the use of the armrest, and additionally provides the results only at the end of the exercise after corresponding analysis by the software .

The EMG curve indicates directly the muscles fatigue, but it has to be installed on the body of operator. This limits its application in the operation room.

We did not choose to use EMG or a magnetic tracking system because we wanted to avoid surgeons' discomfort placing sensors on the arms or affecting their mobility with obstacles within the workspace. And these three methods lack the ability to warn the operator when they are not demonstrating proper ergonomics (i.e., their forearms are not positioned on the armrest).

Development of the sensor system

Consequently, we felt that the PSS was an ideal solution for studying ergonomic habits and armrest use. The simplistic design of the system facilitated easy installation on both the dVT and the da Vinci Robot without affecting the operator's mobility. The PSS system measuring ARL appears to be a welcomed addition to aid in improved performance.

To capture the forearm positioning on the armrests, we theoretically needed a force sensor covering the full surface of the armrest to avoid false negatives. Since *Interlink Electronics*® was not able to develop a customized sensor, and the FRS408® sensor was not wide enough, we built a prototype of PSS with two sensors for the initial pre-test. We then recruited four experts to perform the TR exercise 30 times to validate force sensor positioning, and found that false negatives occurred only when the forearms touched areas not covered by the force sensors. To address this issue, we added two additional sensors to each armrest to cover the voids between the sensors. The additional sensors made the void narrower than the size of the human elbow, and this design allowed a false negative score of less than 0.5%. Also, during the pre-test, we noticed that an elastic deformation of the sensors appeared after long use or an extreme amount of pressure. To avoid false positives, we separately monitored each sensor to control the baseline (Figure 1). Additionally, as part of the PSS, we automatically calibrated each sensor prior to the start of each test. Visual control of the baseline was also realized at the end of each exercise.

Selection of exercises

During training courses, we noticed that novices tended to raise their arms when they needed to reach a target on the periphery of the operative field or when they

changed the instrument's direction. Both novices and experts faced the same conditions, but experts adjusted their position to avoid an excessive workload. Novices did not do this because they were only focused on performing the procedure. In the operation room, ergonomic errors mostly occur during complex periods of a procedure, as the operator's stress increases. So, for the test we chose two tasks that combined those criteria of ergonomic errors: surgery on the periphery of the operative field (TR) and stress based on task difficulty (SS).

Results explanation

The PSS system has the potential to offer three ergonomic data points (T, F and R). This complex process is compared separately in figures 6, 7, and 8. Because of the symmetry of TR and SS, only one comparison of R in the expert group showed a difference ($*p_{24} = 0.043$ in Figure 8). In the original data, one expert got an R of 90.8% on the left forearm. His ergonomic mistake among five experts caused this statistical difference (close to 0.05). We suggest that a repeat of the exercise could amend his error.

The ARL score revealed a significant difference in performance between the two groups ($p < 0.001$), confirming its effectiveness for construct validity. Surprisingly, we found no difference in each ARL score group according to task difficulty. The resulting difference of ARL between novices and experts also demonstrates the importance of early ergonomic training to improve clutching use and adequate positioning before moving to a surgical procedure. Consequently, a comprehensive program should first focus on the acquisition of proper ergonomics, and enable novices to learn to use the clutch before moving to more difficult exercises.

Limitations

One of the limitations of our study was the recruitment of experts with the

requisite 600 hours of dVT simulator experience. We were only able to find four acceptable candidates in our training center. The fifth candidate was an instructor from the Florida Hospital Nicholson Center.

Physical and mental workloads, which can be linked to the use of ergonomic habits were not evaluated in this study. Validated scales such as NASA TLX and Borg CR-10 would help to confirm the relationship. The proficiency of using the armrest and the economic motion of joystick were both experience-dependent skills. Their relationship could need more investigation.

Proper ergonomic position in robotic surgery suggested

The ideal ergonomics in robotic surgery are a sitting position with arms on the armrest, shoulders relaxed, elbows at a vertical angle and forehead supported constantly on the armrest. The robot and the simulator allowed us to adapt the ergonomics setting for each user to improve the surgeon's position. A full use of armrest is necessary to improve dexterity and reduce fatigue, so we recommended in our training class an ergonomic position for a robotic/simulator user [19] (Figure 10):

1. Support forehead with the console
2. Keep neck and back straight
3. Relax the shoulder
4. Position forearms well on the armrest in the installation (three 90°s)
5. Use the clutch pedal (da Vinci S) or finger clutch (da Vinci SI and XI) to separate the long movement of forearms in short step

To help to maintain this position, ergonomic training using the PSS seems to be useful.

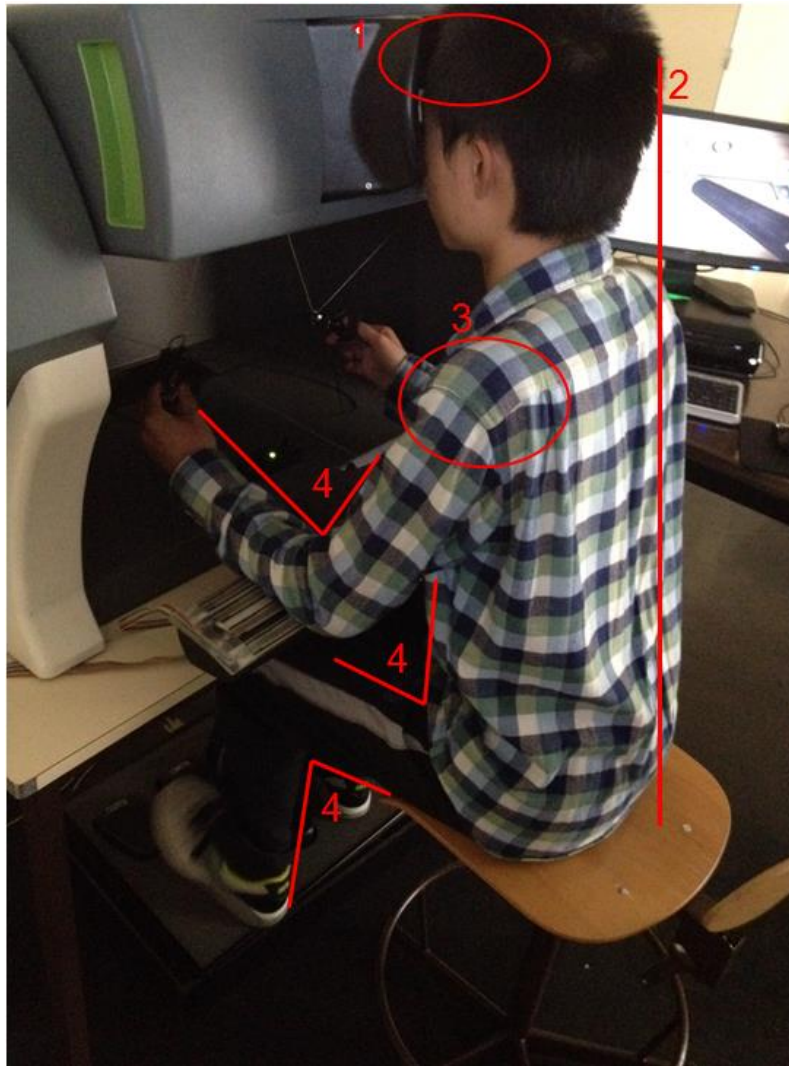


Figure 10. Suggestion of ergonomic position for robotic users

Future work

The scoring calculation function, the additional display, and the corrective action alarm system provided the operator with an easy-to-follow system to improve performance. An audible alarm sounding when the operator is not demonstrating proper ergonomics could immediately and effectively alert the operator to adapt their position. We would also add some cameras to study the movement of the forearms simultaneously. The PSS can be included in a training program to teach novices to immediately acquire a proper ergonomic posture. Additional studies will need to be performed to validate its new functions and effectively design a

training curriculum that focuses on this type of skill development.

Conclusion

The armrest load score based on data provided by the new PSS allows differentiating the experience level of the surgeon in robotic surgery (experts vs novices, $p=0.007$). It is a direct indicator of ergonomic evaluation as it relates to the use of the simulator's armrests. Using the PSS System to measure armrest load provides a valuable training tool for developing proper ergonomics and clutching for the trainee. The association of both workspace range and ARL guarantees an optimum overall performance.

Acknowledgments

The authors would like to thank all the participants in this study and Gabriela HOSSU for her assistance to build the formula of ARL

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest

Funding

Kun YANG is supported by a fellowship provided by the China Scholarship Council for studies at Lorraine University – Nancy France. No other specific funding was obtained.

References:

1. Berguer R, Forkey DL, Smith WD, The effect of laparoscopic instrument working angle on surgeons' upper extremity workload. *Surg Endosc* 2001;15:1027-1029.
2. Eman TA, Hanna G, Guschieri A. Ergonomic principles of task alignment, visual display, and direction of execution of laparoscopic bowel suturing. *Surg endosc* 2002;16:267-271.
3. Johnston WKIII, Hollenbeck BK, wolf JS Jr. Comparison of neuromuscular injuries to the surgeon during hand-assisted and standard laparoscopic urologic surgery. *J Endourol* 2005;19:377-381.
4. Berguer R, Rab GT, Abu-Ghaida H, Alarcon A, Chung J. A comparison of surgeon's posture during laparoscopic and open surgical procedures. *Surg Endosc.* 1997 ;11:139-142.
5. Kaya OI, Moran M, Ozkardes AB, Taskin EY, Seker GE, Ozmen MM. Ergonomic problems encountered by the surgical team during video endoscopic surgery. *Surg Laparosc endosc percutan Tech.* 2008 ; 18:40-4.
6. Miller K, Benden M, Pickens A, Shipp E, Zheng Q. Ergonomics principles associated with laparoscopic surgeon injury/illness. *Hum Factors.* 2012; 54: 1087-92
7. Park A, Lee G, Seagull FJ, Meenaghan N, Dexter D. Patients benefit while surgeons suffer: an impending epidemic. *J Am Coll Surg.* 2010; 210:306-13.
8. Mansoor Jafri, Stuart Brown, Arnold G, Abboud R, Wang W. Energy consumption during simulated minimal access surgery with and without using an armrest. *Surg Endosc.* 2013;27:971-977.
9. Galleano R, Carter F, Brown S, Frank T, Cuschieri A. Can Armrests Improve Comfort and Task Performance in Laparoscopic Surgery?. *Ann Surg.* 2006;243:329-33.
10. Perez M, Perrenot C, Tran N, Hossu G, Felblinger J, Hubert J. Prior experience in micro-surgery may improve the surgeon's performance in robotic surgical training. *Int J Med robot.*2013;9:351-358.
11. Ilana N, Okamura AM, Hsieh MH, Effect of robotic manipulators on movements of novices and surgeons. *Surg Endosc.* 2014;28:2145-58.

12. Van der Schatte Olivier RH, Van't Hullenaar CD, Ruurda JP, Broeders IA. Ergonomic, user comfort, and performance in standard and robot-assisted laparoscopic surgery. *Surg Endosc.* 2009;23:1365-1371.
13. Perrenot C, Perez M, Tran N, Jehl JP, Felblinger J, Bresler L, Hubert J. The virtual reality simulator dV-trainer[®] is a valid assessment tool for robotic surgical skills. *Surg Endosc* 2012;26: 2587-93
14. Tergas AI, Sheth SB, Green IC, Giuntoli RL, Winder AD, Fader AN. Validation of Study of Surgical Training Using a Virtual Robotic Surgery Simulator. *JLS.* 2013;17:219–226.
15. Foell K, Furse A, Honey R.J.D.A, Pace, K.T, Lee, J.Y Multidisciplinary validation study of the da Vinci Skills Simulator: educational tool and assessment device. *Journal of Robotic Surgery*, 2013,7: 365-369.
16. Lee J Y, Mucksavage P, Kerbl D C, Huynh, V.B, Etafy, M, McDougall, E.M. Validation study of a virtual reality robotic simulator—role as an assessment tool?. *The Journal of urology*, 2012, 187: 998-1002
17. Safwat B, Su EL, Gassert R, Teo CL, Burdet E. The role of posture, magnification, and grip force on microscopic accuracy. *Ann biomed Eng.* 2009;37:997-1006.
18. Goto T, Hongo K, Yako T, Hara Y, Okamoto J, Toyoda K, Fujie MG, Iseki H. The concept and feasibility of EXPERT: intelligent armrest using robotics technology. *Neurosurgery.* 2013;72 Suppl 1:39-42.
19. Hubert N, Gilles M, Desbrosses K, Meyer JP, Felbinger J, Hubert J. Ergonomic assessment of the surgeon's physical workload during standard and robotic assisted laparoscopic procedures. *Int J Med Robotics Comput Assist Surg.* 2013; 9: 142–147.
20. Lee GI, Lee MR, Clanton T, Sutton E, Park AE, Marohn MR. Comparative assessment of physical and cognitive ergonomics associated with robotic and traditional laparoscopic surgeries. *Endosc* 2014;28:456-465.

Bilan du chapitre II-2 et de l'article

- Les experts profitent mieux de l'appui bras du dVT que les novices sur le T et F plus petit et le R plus large. (T=Temps max de bras soulevés, F=la fréquence de bras soulevés, R=Taux d'appui)
- Le score ARL est aussi efficace que les comparaisons séparées mais en facilite l'utilisation.
- Le score ARL est capable d'évaluer l'utilisation de l'appui-bras du Simulateur ou du Robot.
- Il répond à notre besoin: pas de capteur sur le corps, efficace, bon marché.
- Nous proposons des conseils aux novices pour améliorer leur ARL

réponse à la question posée au chapitre II-1

est-ce que le SSP est un outil utile?

Oui. Il y a une différence significative dans l'utilisation ergonomique des appui-bras entre les experts et novices. Le score ARL sur SSP permet de différencier efficacement les niveaux.

Questions qui se posent à l'issue de ce chapitre :

- Il n'y a pas assez d'experts dans cette étude. (il n'y a que 5 experts inclus par rapport aux 48 novices dans cette étude)
- Est-ce qu'un entraînement sur simulateur peut aider à améliorer le score ARL?
- Combien de temps un novice doit-il passer sur dVT pour arriver à un score ARL professionnel ?
- Est-ce que un bon score ARL acquis en dVT peut se transférer au robot, au bloc opératoire?

Chapitre II-3 Comment améliorer l'ARL?

II-3.1 - Introduction

Nous avons confirmé la validité de construction de l'ARL par une comparaison entre les groupes novices et experts. Mais du fait d'un critère d'inclusion des experts (≥ 600 h d'expérience sur dVT) très sélectif, nous n'avons réussi à recruter que 5 experts pour l'étude du chapitre 3. L'étude suivante a pour but d'amener des novices à un niveau d'expert sur deux tâches et évaluer leur changement de score ARL. Et on s'intéresse aussi à leur performance sur le vrai robot.

Notre hypothèse est que l'entraînement permet d'améliorer la performance. Comme facteur expérience-dépendant, leur score ARL sera aussi amélioré. Et les progrès en performance et en score ARL peuvent être transférés au vrai robot.

II-3.2 - Solutions envisagées pour cette question :

II-3.2.1 - Il n'y a pas assez d'experts dans le chapitre II.

Nous essayons d'amener les novices à un niveau d'expert par un entraînement suffisant sur des tâches particulières.

II-3.2.2 - Est-ce que l'entraînement sur simulateur peut aider à améliorer l'ARL?

La réponse dépend de la comparaison du score ARL des novices avant et après la formation.

II-3.2.3 - Combien de temps faut-il passer sur dVT pour atteindre un score ARL professionnel ?

Nous allons évaluer le temps nécessaire à la progression d'un novice à un niveau expert sur deux tâches.

II-3.2.4 - Est-ce qu'un score ARL acquis au dVT peut se transférer au vrai robot ?

Nous allons comparer les scores ARL des volontaires sur dVT et dVSS après la formation.

II-3.3 - Publication

Article **soumis** à la revue «Surgery Endoscopy»

Armrest use: a limitation of Robotic skill training

Authors:

Kun YANG MD^{1,2,4}, Manuela PEREZ MD, PhD^{1,3}, Nicolas HUBERT MD^{1,4},
Gabriela HOSSU PhD¹, Cyril PERRENOT MD^{1,3}, Jacques HUBERT MD^{1,4}

Affiliations:

1. IADI / Inserm U947, Lorraine University, Nancy, F-54000, France
2. Wuhan University, Department of Urology, Zhongnan Hospital, Wuhan, 430071, China
3. Department of Emergency and General Surgery, CHU Nancy, Nancy, F-54000, France
4. Department of Urology, CHU Nancy, Nancy, F-54000, France

Abstract

Purpose: The training benefits of robotic surgery simulators should be determined with quantified variables. This study investigates operators' performance quality, mental stress, and ergonomic habits through a training curriculum on robotic simulators.

Materials and Methods: Forty-eight volunteers without robotic surgery experience were recruited to practice two exercises on a dV-trainer® for fifteen hours; then, fifteen of them repeated the same tasks on a da Vinci Surgical Skill Simulator. The simulator software (M-score^a) provided an automatic evaluation of the overall score for the surgeons' performance. Each participant provided a subjective difficulty score for each exercise. Their ergonomic habits were evaluated based on the workspace range and armrest load - a validated criteria evaluating the proficiency of using the armrest-. The scores of the novices' last attempts on the dV-trainer were compared with their initial levels and the scores of five experts. The score on the da Vinci Surgical Skill Simulator were compared with the last attempt on the dV-trainer for the fifteen novices who performed both.

Results: Fifteen hours of training on the dV-Trainer significantly improved the surgeons' performance scores to expert level with a significantly reduced workload, but their ergonomic score was still far from expert level. The training progress of the novice group on the dV-Trainer completely transferred to the da Vinci Surgical Skill Simulator.

Conclusion: Sufficient training on the dV-Trainer improves novices' performance, reduces psychological stress, and inculcates better ergonomic habits. Among the evaluated criteria, novices had the most difficulty in achieving expert levels of ergonomic training.

Key words: robotic surgery, robotic simulator training, dVSS, dV-Trainer, ergonomic training.

Introduction

The da Vinci Surgical System (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA, USA) offers numerous benefits for both surgeons and patients in minimally invasive surgery. The progress of EndoWrist[®] technology and three-dimensional vision helps surgeons complete surgical procedures with relative ease and comfort compared to laparoscopy. The ergonomic progress significantly reduces surgeons' physical and mental workloads.¹⁻³ However, the rapid development of robotic surgery and the increased adverse events rate during the initial learning period highlights the importance of robotic training.⁴

Training curricula directly on da Vinci Surgical Systems is expensive.⁵ Virtual reality simulators, such as the da Vinci Surgical Skill Simulator (dVSS; based on the actual da Vinci console), dV-Trainer (dVT; Mimic Technologies Inc., Seattle, WA, USA), Robotic Surgery Simulator (RoSS; Simulated Surgical Skills, LLC, Williamsville, NY, USA), and more recently the RobotX mentor (Simbionix Corp, Cleveland, OH, USA) were developed as accessible and cheap training solutions. Prior studies demonstrated their face, content, and construct validity.^{4,6} They are useful training tools.⁷⁻⁹

The armrest on the da Vinci Surgical System introduced a particular ergonomic advantage compared to laparoscopy. Experts benefited more from the ergonomic advantage of the devices (i.e., reduced forearm muscle workload) than novices.¹⁰ They required less motion to complete complex procedures in a limited workspace range (WR).^{11,12} The key to keeping an ergonomic position is the frequent use of the clutch to adequately position the forearms on the armrest.

There is an urgent need to study the efficacy of virtual simulation for acquisition competence in and safe execution of clinical robotic-assisted surgery.¹³ Previous studies based on robotic training mostly focused on performance improvement.^{14,15} A comprehensive evaluation is required to

maximize the simulators' value for this purpose. In this study, we include psychological and ergonomic assessments to evaluate the training effect on robotic simulators (dVT and dVSS) in addition to performance improvement.

Material and methods

Simulators

The training simulators considered in this study—i.e., the dVT (Figure 1) and dVSS (Figure 2) - both provide the same simulation tasks and an automatic scoring system (M-score^a). This software includes a scoring utility with seven criteria: time, economy of motion, drops, instrument collisions, excessive instrument force, instruments out of view, and master WR. The overall score, which represents a combination of these criteria, is automatically generated by a computerized algorithm created by the manufacturer.

Pressure surveillance system

Hardware

The pressure surveillance system (PSS) was designed to register the pressure of the subject's forearms on the armrest of the dVT (Figure.1). The PSS comprises eight force-sensing resistors (FSR 408[®], Interlink Electronics[®], Camarillo, CA, USA) located on the armrests, an analog circuit, and Lab Windows-based software.

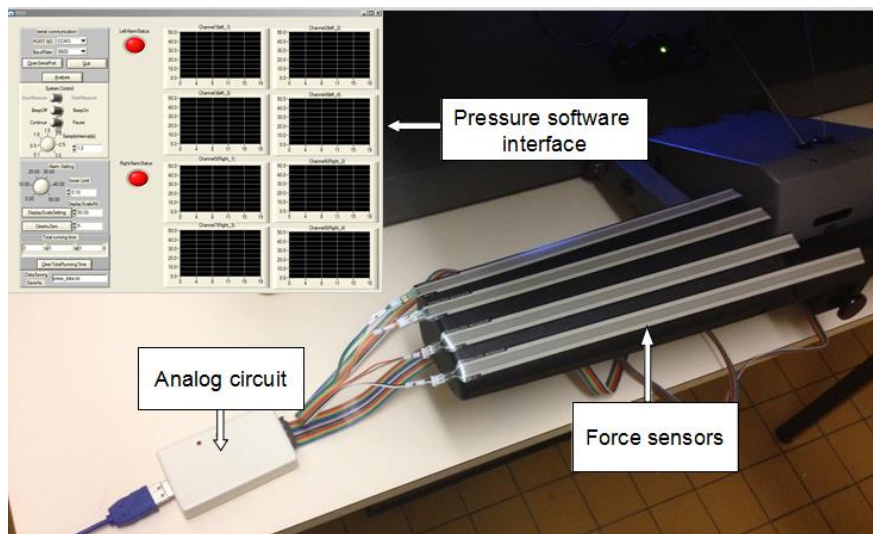


Figure 1. PSS on dV-Trainer



Figure 2. PSS on the actual robotic console

Selection of criteria

In a previous study, we considered three metrics for defining an armrest load score (ARL): 1) T, the maximum time that a subject's arm is not in contact with the armrest; 2) F, the total number of times that the operator's arms lost contact with the armrest; 3) R, the time in contact with the armrest expressed as a percentage of the total time of the exercise.

Definition of Armrest Load (ARL)

We developed the following formula to calculate the ARL:

$$ARL = 100 \times (0.995)^{EIH} ,$$

where the Ergonomic Index of Habit (EIH) is,

$$EIH_L = \frac{T_{Lmax}^{1.2} \times F_{Lmax} + T_{Lmax-1}^{1.2} \times F_{Lmax-1} + T_{Lmax-2}^{1.2} \times F_{Lmax-2}}{R_{left}}$$

$$EIH_R = \frac{T_{Rmax}^{1.2} \times F_{Rmax} + T_{Rmax-1}^{1.2} \times F_{Rmax-1} + T_{Rmax-2}^{1.2} \times F_{Rmax-2}}{R_{Right}}$$

$$EIH = EIH_L + EIH_R \quad (L:left side, R: right side)$$

We sought to obtain scores in the range [0,100] based on ergonomic examinations. This formula for the ARL as a function of the EIH meets this requirement. A perfect ARL is 100, which occurs when R = 100%, T = 0, and F = 0. An ARL of 100 implies that the forearms remained in contact with the armrest throughout an exercise. Details of the derivation of the ARL formula are provided in the supplementary information file.

Subjects

Subjects in this study included 38 surgeons and 10 nurses with no robot or simulator experience and 5 expert users of the dVT (at least 600 hours experience). Informed consent was obtained from all participants and data collected under a de-identified ID number. The novice group involved 32 males and 16 females with an average age of 31.11 (± 11.22) years, and the expert group comprised 5 males with an average age of 33.6 (± 4.93) years.

Exercises

Based on expert opinion and literature review we chose the “Thread the Rings 1” (TR) and “Suture Sponge 1” (SS) exercises. The TR exercise is a simulation of a horizontal running suture: driving a needle through a series of rings. The SS exercise is a vertical suturing exercise that requires the operator to demonstrate both backhand and forehand suturing skills using both right and left hands (Figure 3).

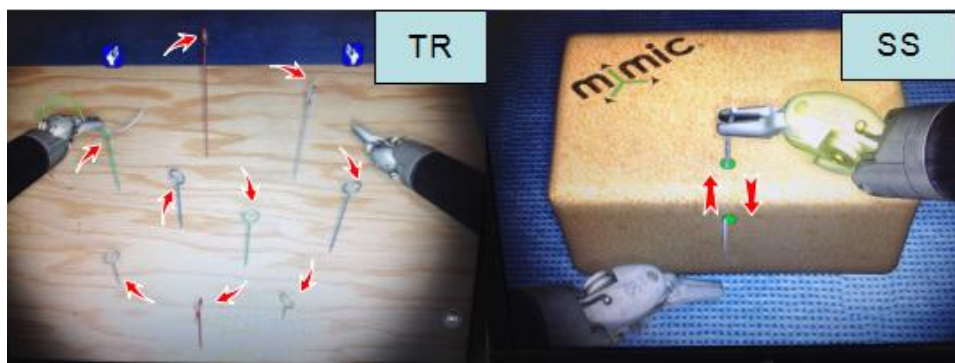


Figure 3. The TR and SS exercises; red arrows show the movement of the needles/forearms in the exercise

Data collection

After a standardized explanation of the functionalities of the simulator, the 48 novices, first completed the exercises once on the dVT for an initial level evaluation. The overall score (OS) and WR were automatically evaluated by the dVT. The novices then evaluated the difficulty score (DS) of the exercise on a 0–10 scale (0 = easy and 10 = difficult). Additionally, the ARL was calculated based on the data recorded by the PSS. After fifteen hours of training on the TR and SS exercises, the novices reevaluated the DS of the two exercises. The OS, WR, and ARL of their final attempts were recorded. After two warm-up attempts, the experts completed the exercise once. Their OS, DS, WR, and ARL were recorded. Both groups had to complete the exercises from a static position, and

they were not allowed to use the navigation feature of the camera. The only master controller-positioning feature that they were permitted to utilize was clutching. After the dVT training, 15 of the novices repeated the two exercises on the dVSS without warm-up. Their OS, DS, WR, and ARL were recorded.

Statistical analysis

The distribution of data for each group was checked by the Kolmogorov–Smirnov test. A one-way analysis of variance (ANOVA) or student t-test was used to compare the OS, WR, and ARL. The Wilcoxon test was used to compare the DS. Statistical analysis was completed by using SPSS ver. 19 (SPSS Inc., Chicago, USA) with significance level p at 0.05.

Results

Overall score

Figure 4 shows the OS data for the dVT exercises. Fifteen hours of training on the TR and SS exercises significantly improved the novices' OS on both exercises ($p < 0.001$). At the end of training, no statistical difference of OS existed between experts and novices ($p > 0.05$).

Difficulty score

Figure 5 shows the DS data for the dVT exercises. Fifteen hours of training significantly decreased the DS evaluated by the novices on both tasks ($p < 0.05$). The novices' DS scores after training were even lower than the experts' DS scores on both tasks ($p < 0.05$).

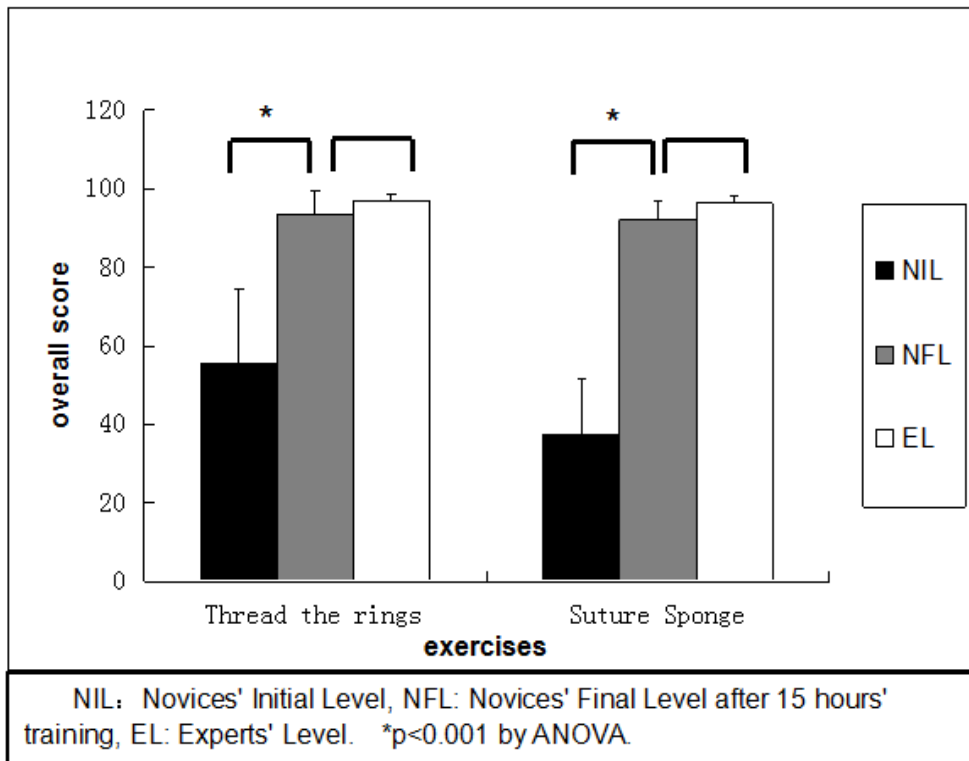


Figure 4. Comparison of overall score

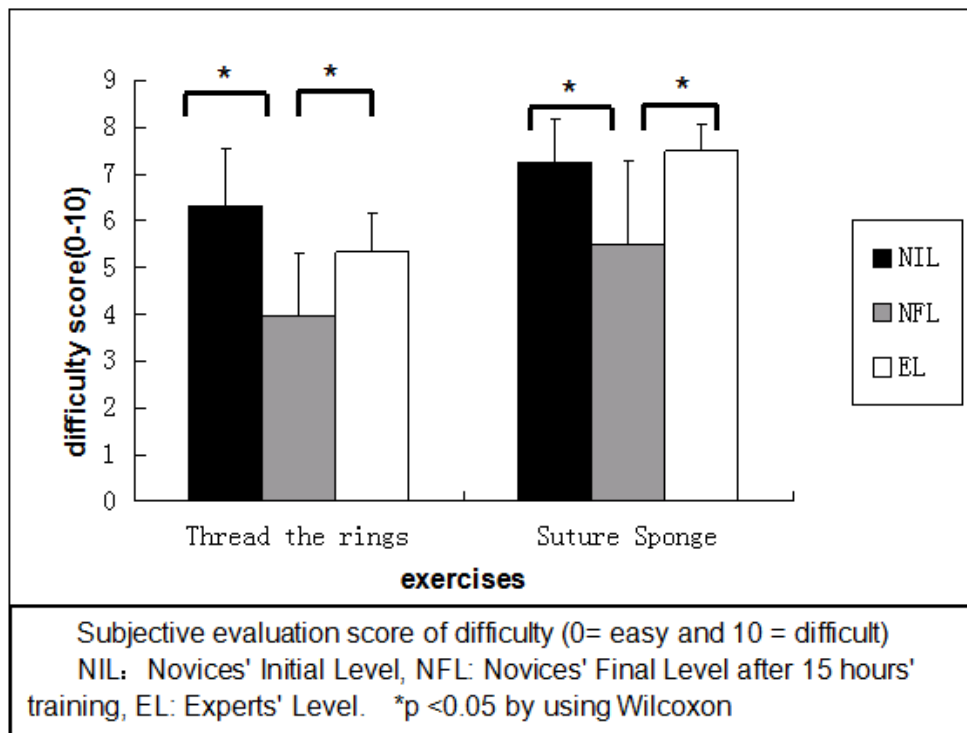


Figure 5. Figure 5. Comparison of difficulty score

Workspace range

Figure 6 shows the WR data for the dVT exercises. Fifteen hours of training significantly improved the WR of the novices for both tasks ($p < 0.05$). At the end of training, no significant difference of WR existed for the two tasks between the novice and expert groups.

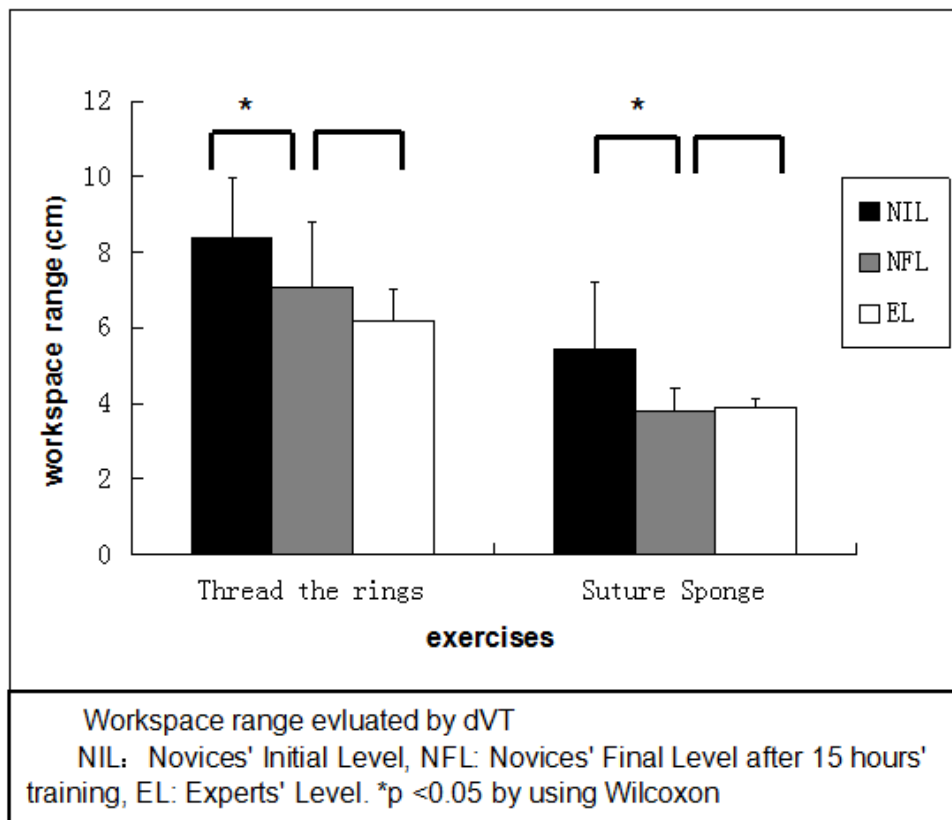


Figure 6. Comparison of Workspace Range

Armrest Load

Figure 7 shows the ARL data for the dVT exercises. Fifteen hours of training significantly improved the ARL of the novices in both tasks ($p < 0.05$), but the experts' ARL values were still significantly higher than those of the novices in both tasks after training ($p < 0.05$).

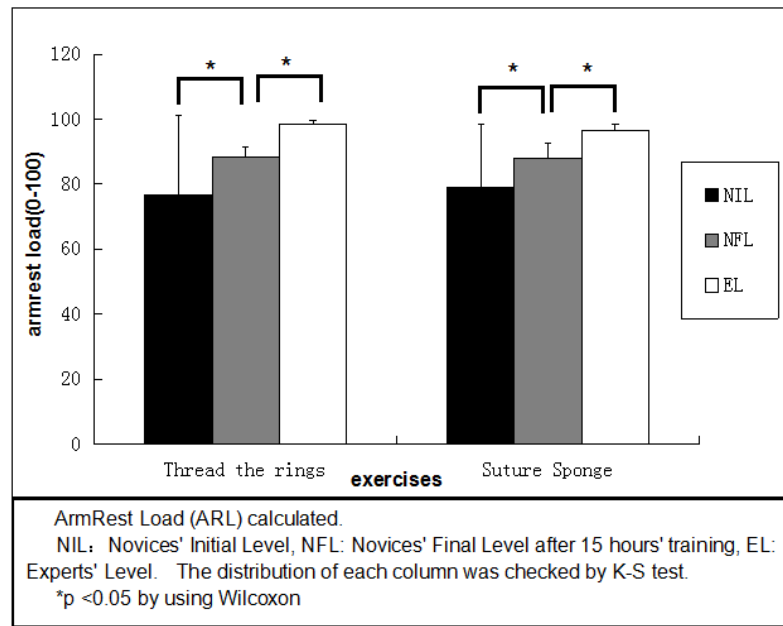


Figure 7. Comparison of Armrest load score

Comparison of dVT to DVSS (table 1)

Fifteen novices repeated the same tasks on the dVSS after training. The OS, DS, WR, and ARL were compared with their final attempts on the dVT in table 1. No significant difference existed for the OS, WR, and ARL of the two tasks between the two trials on the dVT and dVSS. The dVSS reduced the difficulty score of the SS exercise (p=0.021) but not in the TR exercise (p=0.179).

Table 1. Fifteen volunteers' scores between last attempt on dVT and first attempt on dVSS.

Exercises	Scores	Last attempt on dVT	First attempt on dVSS	p
Thread the rings	OS	92.84±3.86	91.35±4.50	p=0.222
	DS	3.88±1.59	3.44±1.06	p=0.179
	WR	7.11±1.99	7.42±1.64	p=0.502
	ARL	86.27±4.99	86.85±4.88	p=0.615
Suture sponge	OS	92.82±4.97	91.46±6.41	p=0.447
	DS	5.31±2.17	4.29±1.84	*p=0.021
	WR	4.17±0.96	4.02±0.84	p=0.467
	ARL	87.50±3.98	85.81±6.78	p=0.442

*p <0.05

Discussion

The results of this study show that training on the dVT can significantly improve a novices' performance quality, increase their comfort, and reduce their mental workload. This progress on the dVT perfectly translates to the dVSS with the actual robotic console. Similar to previous studies for the validation of the dVT,^{4,6} the trainees' performance (OS) in this study was also significantly improved on the dVT after training. Even for a novice, adequate training (15 hours focused on two tasks) permits them to nearly achieve an expert mastery of both tasks.

We proposed new metrics for the evaluation of the training effect on robotic simulators introducing an ergonomic surveillance and the investigation of mental work. Considering that the defined workspace range does not adequately address overall ergonomic evaluation, it is feasible to achieve a perfect WR score without both forearms positioned on the armrests. Some previous studies also showed the ergonomic difference between the novices and experts by adding electromyography (EMG)^{16,17} or a magnetic tracking system.^{18,19} In our opinion, using the armrest is the core ergonomic habit for not only stabilizing movement but also reducing fatigue. In laparoscopy, armrest use could reduce energy consumption²⁰ and improve the surgeon's comfort.¹ During microsurgery, positioning the forearm in a support significantly reduces tremors and increases the accuracy of movement.^{21,22} Consequently, we feel that the PSS was an ideal tool for use in evaluating and training surgeons' ergonomic habits and armrest use. The simple design of the system facilitates the installation on both the dVT and the dVSS without adversely affecting the operator's mobility.

The ARL score represented the use of the armrest. It revealed a significant difference in performance between the novices and experts groups ($p < 0.05$), confirming its effectiveness for construct validity. In agreement with the results of

using EMG or magnetic tracking system, this resulting difference of ARL between the two groups also demonstrates the importance of early ergonomic training to improve the use of clutching and positioning before moving to surgical procedures.

We also investigated the mental work of the trainees with a subjective evaluation score (i.e., DS). The novel environment subjected the novices to substantial stress and high workload.¹² With the accumulation of experience after training, the novices' DS values decreased significantly for both tasks. Training on the dVT could not only improve their performance quality but also reduce their workload. In addition to the main result, we observed some interesting phenomena.

First, fifteen hours of training improved the novice's OS (Figure 4) and WR (Figure 6) to an expert level. However, a significant difference of ARL still existed at the end of the training between the two groups (Figure 7). Therefore, the ARL was a more sensible expertise standard for ergonomic evaluation than workspace range; the professional habit of using the armrest is an important but until now neglected factor. If the novices do not acquire a professional habit of using the armrest, they might retain these ergonomic errors in real robotic procedures. This should be further investigated due to the difficulty to achieve a professional level. For example, we could add an audible alarm to the PSS system; when the operator is not demonstrating proper ergonomics during the exercise, it could immediately and effectively alert the operator to perform the task in the proper ergonomic position.

Second, the novices underestimated the difficulty of both tasks more than the experts did ($p < 0.05$ in both exercises in Figure 5). The experts knew all the tasks on dVT with at least 600 hours of experience, but the novices had only 15 hours experience on two tasks. The high performance score reflecting an easy

task would lead to positivity bias in the novice group. For this reason, we strongly suggest that trainers show novices - or let them try - the hardest tasks, such as the challenge exercises, at the end of their simulation training.

Finally, we noted that the novices completed the SS task with a lower DS on the dVSS. Owing to the actual robotic console, the operator could better control the direction of the needle with the joystick. This advantage helps decrease the difficulty of the SS, but it did not significantly improve the performance or ergonomics.

Overall, simulator training is necessary for novice surgeons for the acquisition of robotic surgical skills. Their progress acquired in technique, comfort, and stress reduction could transfer to real robotic surgery. Among the evaluated criteria (OS, DS, WR, ARL), the ergonomic training was still deficient from an expert level compared to the efficacy of other progress. In our opinion, the frequent use of clutching to keep the forearms on the armrests is one of the most difficult skills to develop for novices. Specific curriculum for its ergonomic training should be addressed and validated.

This study also has some limitations. Owing to the novices' time constraints, we could only realize the final check with 15 volunteers on the dVSS. Additionally, it is challenging to recruit experts with the requisite 600 hours of dVT simulator experience. Given our experience as a pioneer robotic training center in Europe, we were only able to find five qualified candidates. Finally, to simplify the evaluation, we only selected two simulation tasks for the test. The volunteer's performance on dVSS simulator might be somewhat different from a real operation using the robot.

Conclusion

Sufficient training on the dVT improves novices' performance quality, reduces their psychological stress, and teaches them better ergonomic habits. The progress acquired on the dVT could completely transfer to the dVSS. Among the evaluated criteria, the ergonomic one is the most difficult to achieve an expert level, even after 15 hours of training. This suggests needs for more attention and development.

Acknowledgement

The authors would like to thank all the volunteers in this study. Kun Yang is supported by a fellowship provided by the China Scholarship Council for studies at Lorraine University, Nancy, France.

References:

1. Stefanidis D, Wang F, Korndorffer JR Jr et al: Robotic assistance improves intracorporeal suturing performance and safety in the operating room while decreasing operator workload. *Surg Endosc* 2010; **24**: 377.
2. Hubert N, Gilles M, Desbrosses K et al: Ergonomic assessment of the surgeon's physical workload during standard and robotic assisted laparoscopic procedures. *Int J Med Robot* 2013; **9**: 142.
3. Zihni AM, Ohu I, Cavallo JA et al: Ergonomic analysis of robot-assisted and traditional laparoscopic procedures. *Surg Endosc* 2014; **12**: 3379.
4. Hanzly MI, Al-Tartir T, Raza SJ et al: Simulation-based training in robot-assisted surgery: current evidence of value and potential trends for the future. *Curr Urol Rep* 2015; **16**: 41.
5. Amodeo A, Linares Quevedo A, Joseph JV et al: Robotic laparoscopic surgery: cost and training. *Minerva Urol Nefrol* 2009; **61**: 121.
6. Abboudi H, Khan MS, Aboumarzouk O et al: Current status of validation for robotic surgery simulators—a systematic review. *BJU Int* 2013; **2**: 194.
7. Hung AJ, Patil MB, Zehnder P et al: Concurrent and predictive validation of a novel robotic surgery simulator: a prospective, randomized study. *J Urol* 2012; **187**: 630.
8. Hung AJ, Zehnder P, Patil MB et al: Face, content and construct validity of a novel robotic surgery simulator. *J Urol* 2011; **186**: 1019.
9. Lee JY, Mucksavage P, Kerbl DC et al: Validation study of a virtual reality robotic simulator—role as an assessment tool? *J Urol* 2012; **187**: 998.

10. Klein MI, Warm JS, Riley MA et al: Mental workload and stress perceived by novice operators in the laparoscopic and robotic minimally invasive surgical interfaces. *J Endourol* 2012; **26**: 1089.
11. Van der Schatte Olivier RH, Van't Hullenaar CD, Ruurda JP et al: Ergonomics, user comfort, and performance in standard and robot-assisted laparoscopic surgery. *Surg Endosc* 2009; **23**: 1365.
12. Hockey GR: Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload; a cognitive-energetical framework. *Biol Psychol* 1997; **45**: 73.
13. Moglia A, Ferrari V, Morelli L et al: A systematic review of virtual reality simulators for robot-assisted surgery. *Eur Urol* 2015.
14. Lee JY, Mucksavage P, Sundaram CP et al: Best practices for robotic surgery training and credentialing. *J Urol* 2011; **185**: 1191.
15. Foell K, Furse A, Honey RJD'A et al: Multidisciplinary validation study of the da Vinci Skills Simulator: educational tool and assessment device. *J Robotic Surg* 2013; **7**: 365.
16. Lee GI, Lee MR, Clanton T et al: Comparative assessment of physical and cognitive ergonomics associated with robotic and traditional laparoscopic surgeries. *Surg Endosc* 2014; **28**: 456.
17. Uemura M, Tomikawa M, Kumashiro R et al: Analysis of hand motion differentiates expert and novice surgeons. *J Surg Res* 2014; **188**: 8.
18. Nisky I, Okamura AM and Hsieh MH: Effect of robotic manipulators on movements of novices and surgeons. *Surg Endosc* 2014; **28**: 2145

19. Tausch TJ, Kowalewski TM, White LW et al: Content and construct validation of a robotic surgery curriculum using an electromagnetic instrument tracker. *J Urol* 2012; **188**: 919.
20. Jafri M, Brown S, Arnold G et al: Energy consumption during simulated minimal access surgery with and without using an armrest. *Surg Endosc* 2013; **27**: 971.
21. Safwat B, Su EL, Gassert R et al: The role of posture, magnification, and grip force on microscopic accuracy. *Ann Biomed Eng* 2009; **37**: 997.
22. Goto T, Hongo K, Yako T et al: The concept and feasibility of EXPERT: intelligent armrest using robotics technology. *Neurosurgery* 2013; **72**: 39.

II-3.4 Réponses aux questions

- Il n'y a pas assez d'experts dans chapitre IV.
 - 48 novices ont progressé à un niveau d'expert.

- Est-ce que l'entraînement sur simulateur peut aider à améliorer le score ARL?
 - Oui. 15 heures d'entraînement ont significativement amélioré le score ARL des novices

- Combien de temps faut-il passer sur dVT pour atteindre un score ARL professionnel ?
 - 15 heures ne sont pas suffisantes, le score ARL progressant moins vite que la performance.

- Est-ce que un score ARL acquis au dVT peut se transférer au vrai robot ?
 - Oui, il n'y pas de différence du score ARL entre dVT et dVSS à la fin de la formation.

Question qui se pose à l'issue de ce chapitre :

Est-ce que l'on peut ajouter de nouvelles fonctions à SSP permettant d'améliorer son efficacité?

Bilan de la partie II

Nous avons proposé le SSP et son score ARL pour évaluer l'utilisation ergonomique des appui-bras par les opérateurs sur simulateur ou console du robot et vérifié sa validité de construction.

Nous avons confirmé que le score ARL peut être amélioré par l'entraînement, mais qu'il progresse moins vite que la performance.

Nous avons prouvé l'efficacité de l'ARL pour suivre l'ergonomie de l'opérateur pendant la chirurgie robotique.

Questions qui se posent :

SSP peut-il soulager la charge de l'encadrant au simulateur ?

l'ergonomie de la position peut-elle être suivie automatiquement ?

est-ce que l'on peut aller plus loin ?

PARTIE III

Fonctions supplémentaires

*Dans la partie III-1, nous ajoutons une alarme pour corriger
les erreurs ergonomiques.*

*Dans la partie III-2, nous ajoutons des caméras et
développons le CESIR en complément du SSP.*

Dans la partie III-3, nous validons le CESIR.

Chapitre III-1 - Ajout de l'alarme à SSP

III-1. 1 - Introduction

L'étude du chapitre II-3 a montré que les progrès du score ARL sont moins rapides que ceux de « l'overall score » ou du « workspace range ». Il est plus difficile d'enseigner aux novices comment profiter des appui-bras comme le font les experts que d'améliorer leur technique opératoire. Le temps de formation pour les novices étant limité, nous nous sommes posé la question : comment accélérer la formation pour arriver à un score ARL professionnel ?

III-1. 2 - Solution pour la question

Pour répondre à cette question, il a été ajouté une alarme audible, qui sonne quand les avant-bras sont soulevés au SSP. Notre hypothèse est que l'alarme peut créer un réflexe conditionnel et ainsi accélérer l'atteinte d'un score ARL professionnel; cette maîtrise de l'ergonomie peut aussi améliorer la performance sur les exercices.

III-1. 3 - Publication

Article **soumis** à la revue« Surgery Endoscopy»

“Alarm-corrected” ergonomic armrest use could improve learning curves of novices on robotic simulator

Authors:

Kun YANG MD^{1,2,4}, Manuela PEREZ PhD^{1,3}, Gabriela HOSSU PhD¹, Nicolas HUBERT MD^{1,4}, Cyril PERRENOT MD^{1,3}, Jacques HUBERT MD^{1,4}

Affiliations:

1. IADI / Inserm U947, Lorraine University, Nancy, F-54000, France
2. Wuhan University, Department of Urology, Zhongnan Hospital, Wuhan, 430071, China
3. Department of Emergency and General Surgery, CHU Nancy, Nancy, F-54000, France
4. Department of Urology, CHU Nancy, Nancy, F-54000, France

Abstract

Background: In robotic surgery, the professional ergonomic habit of using an armrest reduces operator fatigue and increases the precision of motion. We designed and validated a pressure surveillance system (PSS) based on force sensors to investigate armrest use. The objective was to evaluate whether adding an alarm to the PSS system could shorten ergonomic training and improve performance.

Study Design: Twenty robot and simulator-naïve participants were recruited and randomized in two groups (A and B). The PSS was installed on a robotic simulator, the dV-Trainer, to detect contact with the armrest. The Group A members completed three tasks on the dV-Trainer without the alarm, making 15 attempts at each task. The Group B members practiced the first two tasks with the alarm and then completed the final tasks without the alarm. The simulator provided an overall score reflecting the trainees' performance. We used the new concept of an "armrest load" (ARL) score to describe the ergonomic habit of using the armrest.

Results: Group B had a significantly higher performance score ($p < 0.001$) and armrest load score ($p < 0.001$) than Group A from the fifth attempt of the first task to the end of the experiment.

Conclusions: Based on the conditioned reflex effect, the alarm associated with the PSS rectified ergonomic errors and accelerated professional ergonomic habit acquisition. The combination of the PSS and alarm is effective in significantly shortening the learning curve in the robotic training process.

Key words: Ergonomic, conditioned reflex, dV-Trainer, simulation, learning curve, robotic surgery

Introduction

Ergonomics is the study of the efficient movement of people in working environments. The da Vinci operating system offers surgeons ergonomic advantages compared to laparoscopy. The use of an armrest during robotic surgery decreases operator fatigue by reducing the forearms' workloads [1]. Resting the forearms on the armrest using a clutch pedal (or finger clutch) economizes the motion required to perform highly complex procedures in a limited workspace [2,3]. Studies have employed magnetic tracking systems or electromyography to study surgeons' movements [2,3]. However, placing sensors on an operator's body increases the operator's burden and influences forearm motion, which limits the application of sensors in real operating rooms. We designed a pressure surveillance system (PSS) based on force sensors (Fig. 1) to monitor operators' movements. We created an "armrest load" (ARL) score to assess the degree to which an operator adopted the ergonomic habit of using the armrest.

In a previous study, the validity of the PSS was confirmed, and a significant difference between experts' and novices' ARL scores was detected (see the supplementary information file). With training time on the dV-Trainer robotic simulator (dVT, Mimic Technologies Inc., Seattle, WA, USA, Fig. 1), novices were able to improve their use of the armrest, although their ergonomic progress was slower than their performance improvement. Practicing on the dVT can improve task performance in a dry laboratory environment [4], but ergonomic training is easily ignored, and it is fundamental to demonstrate the importance and value of expert ergonomic movement in the robotic skill training procedure. We therefore sought in this study to accelerate the acquisition of a "professional" ergonomic movement habit in robotic novices.

For this purpose, we added an alarm to the PSS that sounded when a user's

forearms lost contact with the armrest. The conditioned reflex effect led novices to keep their forearms on the armrest to complete tasks in an “alarm-corrected” ergonomic posture.

We hypothesized that appropriate armrest use would decrease operator fatigue and increase motion precision. The PSS combined with the alarm forced trainees in this study to stabilize their forearms on the armrest.

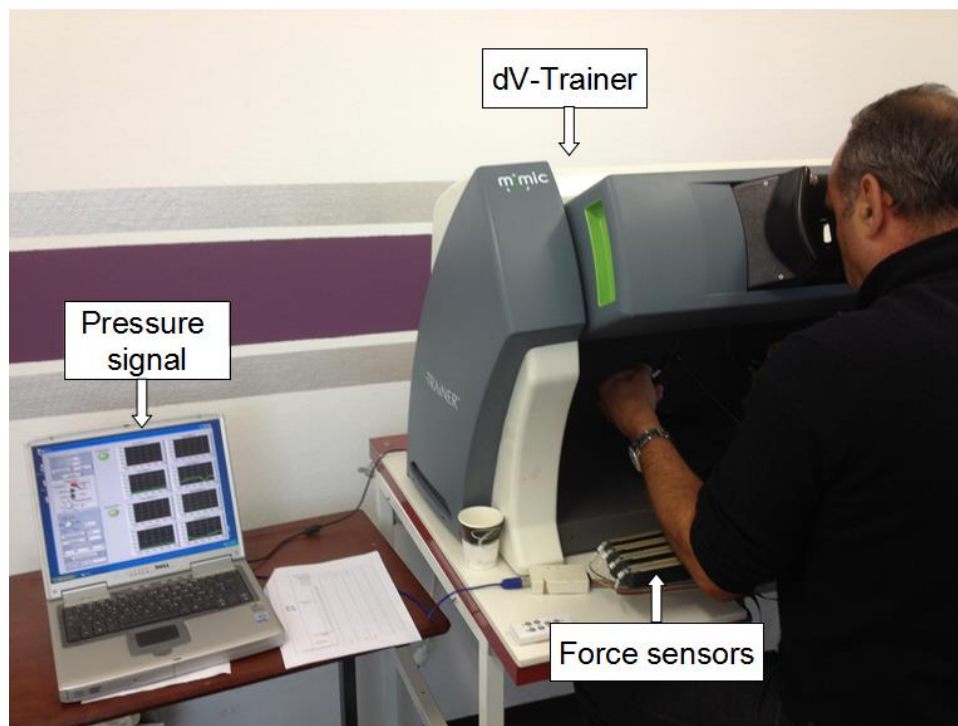


Fig. 1 dV-Trainer with pressure surveillance system (PSS).

Methods

Simulator

The dV-Trainer is a validated robotic simulator [5,6,7,8]. It has an automated scoring system that evaluates an operator's performance in seven categories (time to complete an exercise, economy of motion, instrument collisions, excessive instrument force, instrument out of view, master workspace range, and drops) and produces an overall score for use in global evaluation. The overall score was used to evaluate the robotic skill levels of the participants in this study.

PSS recording system

- Hardware

The pressure surveillance system (PSS) was designed to register an operator's forearm pressure on the dVT's armrest (Fig. 2). The PSS is composed of three main components: a set of eight force-sensing resistors (FSR 408®, Interlink Electronics®, Camarillo, CA, USA) located on the armrests, an analog circuit, and LabWindows-based software.

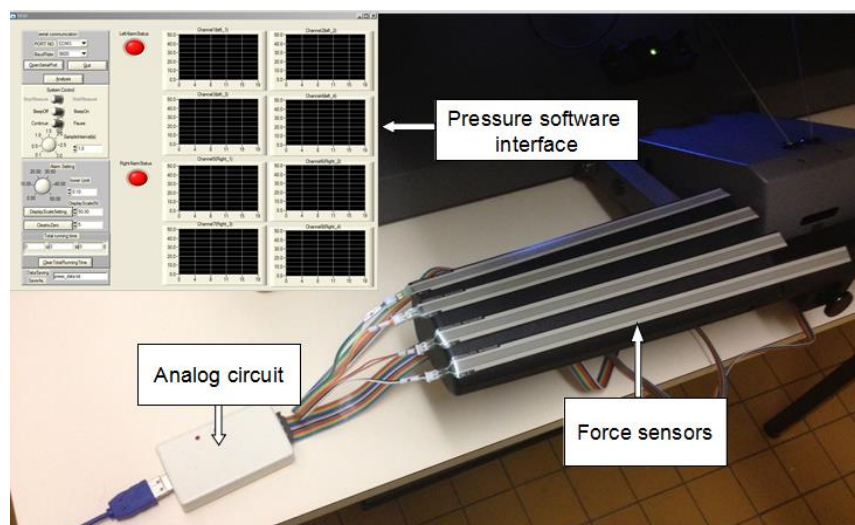


Fig. 2 Hardware and software for pressure surveillance system used with dVT.

- Selection of criteria

We considered three metrics for defining an ARL score. Physically, fatigue in an operator's arm muscles increases with the amount of time that the operator's forearms are not in contact with the armrest. The longer the operator's forearms remain in the air, the more energy he consumes. We therefore selected T, the maximum time (hereinafter referred to as "max time") that a subject's arm is not in contact with the armrest, as the first metric.

For the same reason, the total number of times that the operator's arms lost contact with the armrest ("F" or "frequency") was selected as the second metric.

T and F can be used together to express the "absolute time" during which the forearms are out of contact with the armrest, but the total amount of time required to complete an exercise also has to be taken into consideration. The time in contact with the armrest ("R" or "touching rate"), expressed as a percentage of the total time of the exercise, was therefore selected as the third metric. The use of this metric makes tasks that require different amounts of time (some require only seconds and others up to ten minutes) comparable.

Using the above metrics, the PPS automatically determines the values of T (in seconds), F (in number of times), and R (%) for each exercise and stores these as key data to be used in the ergonomic evaluations. The data are available in a TXT file.

- Definition of Armrest Load (ARL)

We developed the following formula to calculate the ARL:

$$\text{ARL} = 100 \times 0.995 \text{ EIH}$$

where EIH = the Ergonomic Index of Habit, given by the following formula:

$$EIH = \frac{T_{Lmax}^{12} \times F_{Lmax} + T_{Lmax-1}^{12} \times F_{Lmax-1} + T_{Lmax-2}^{12} \times F_{Lmax-2}}{R_{left}} + \frac{T_{Rmax}^{12} \times F_{Rmax} + T_{Rmax-1}^{12} \times F_{Rmax-1} + T_{Rmax-2}^{12} \times F_{Rmax-2}}{R_{right}}$$

EIH is defined as an index that increases in value with increasing severity of ergonomic errors, within the range of $[0, +\infty]$. EIH increases with increasing T and F and decreases with increasing R.

The ARL score was used to evaluate the use of the armrest. For the same absolute time, a shorter T and greater F is less tiring than a longer T and smaller F.

We prefer to obtain scores in the range of $[0, 100]$ from ergonomic examinations. The formula for ARL as a function of EIH meets this requirement. A perfect ARL is 100, which occurs when $R = 100\%$, $T = 0$, and $F = 0$. An ARL of 100 implies that the forearms remain in contact with the armrest throughout an exercise.

Details of the derivation of the ARL formula are provided in the supplementary information file.

Participants

Twenty medical students who were novices in robotic surgery and in the use of simulators were recruited and randomly assigned to two groups, A and B. Group A consisted of five males and five females with an average age of 22.53 ± 2.46 years. Group B consisted of three males and seven females with an average age of 23.21 ± 2.72 years. Informed consent was obtained from each of the participants. The participants received standard instruction on the use of the dV-Trainer during a familiarization session. The participants were told of the importance and value of using the armrest after the first exercise trial. The trainer

also made verbal suggestions to the members of Group A to correct their ergonomic errors.

Tasks

Based on expert opinion and a literature review [9], we selected three exercises of varying difficulty on the dVT: Peg Board 2 (PB), Match Board 2 (MB), and Thread the Ring 1 (TR). These exercises are illustrated in Fig. 3. PB involves picking up rings and passing them between the two operating instruments. MB requires the operator to put the letters and numbers in a drawer. TR is a simulation of a horizontal running suture that involves passing a needle through a series of rings.

Each group performed 15 trials of the PB, MB, and TR exercises under PSS control. Group A completed all three sets of tasks without the alarm being used with the PSS. Group B practiced PB and MB with the alarm and then completed TR without the alarm (Fig. 4). The ARL and overall scores for the first trial of the PB exercise represented the baseline performance of the participants.

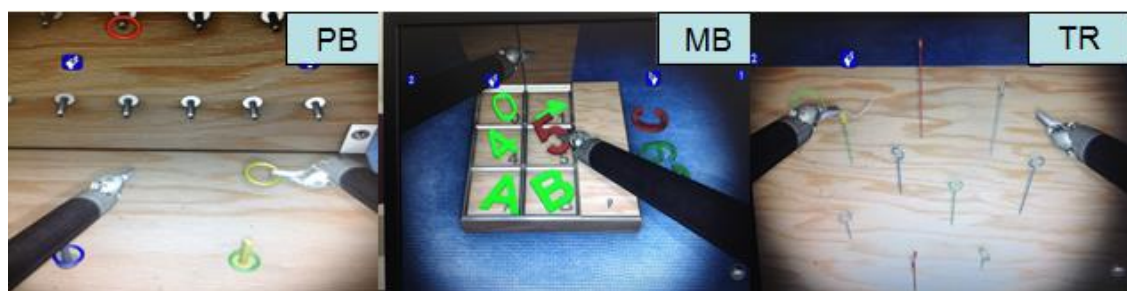


Fig. 3 dV-Trainer exercises: Peg board 2 (PB), Match Board 2 (MB), and Thread the Ring 1 (TR).

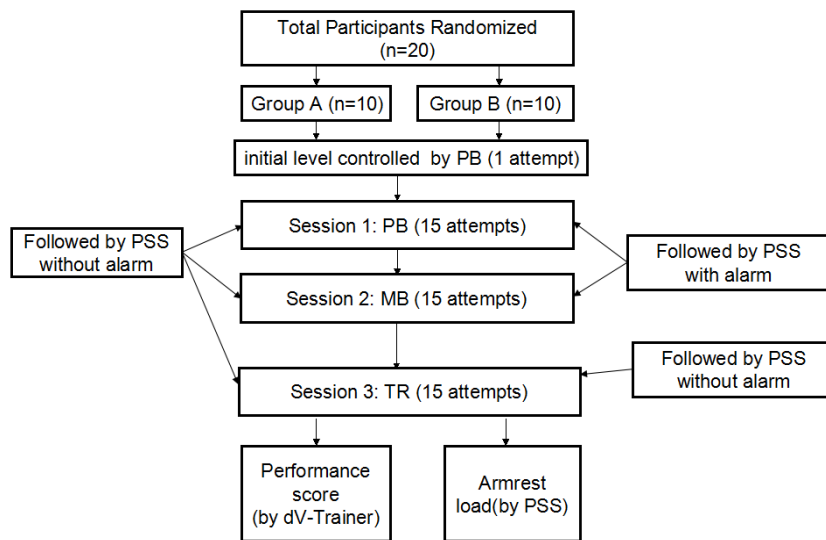


Fig. 4 Study organization.

Data collection

Each participant received a unique identification number under which all his/her data were collected. The notation N_x was used for the x^{th} attempt at a given task. For example, TR_5 denotes the fifth attempt at the TR task. The T, F, and R obtained from the PSS were recorded for each group to calculate the ARL score, according to the formula given above.

Statistical analysis

The performance scores and ARLs of the groups were compared using paired t tests and analyses of variance (ANOVA). The Kolmogorov–Smirnov (K–S) test was used to compare the distributions. For data that did not follow a normal distribution, we used the Wilcoxon test. The statistical analyses were conducted using SPSS ver. 19 (SPSS, Inc., Chicago, IL, USA).

Results

- *Baseline performance*

As Fig. 5 shows, there was no significant difference ($p = 0.068$) in the baseline scores of the two groups (Group A = 63.99 ± 4.61 and Group B = 68.46 ± 4.70). There was also no significant difference ($p = 0.475$) in the initial ergonomic habits of the two groups (Group A = 78.77 ± 11.67 and Group B = 75.96 ± 7.66).

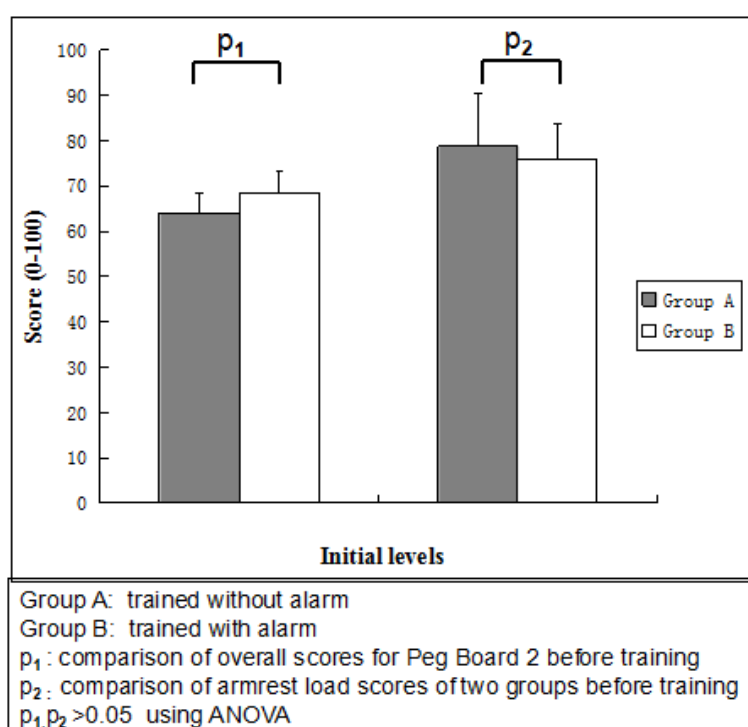


Fig. 5 Initial levels of overall scores and armrest loads for Peg Board 2.

- *ARL score learning curve*

As Fig. 6 shows, with the help of the alarm, Group B exhibited significantly higher ARLs than Group A for the first thirty attempts (all $p < 0.05$). Even for the third series (TR without alarm), the ARLs of the two groups from TR₁ to TR₁₅ were significantly different (all $p < 0.05$).

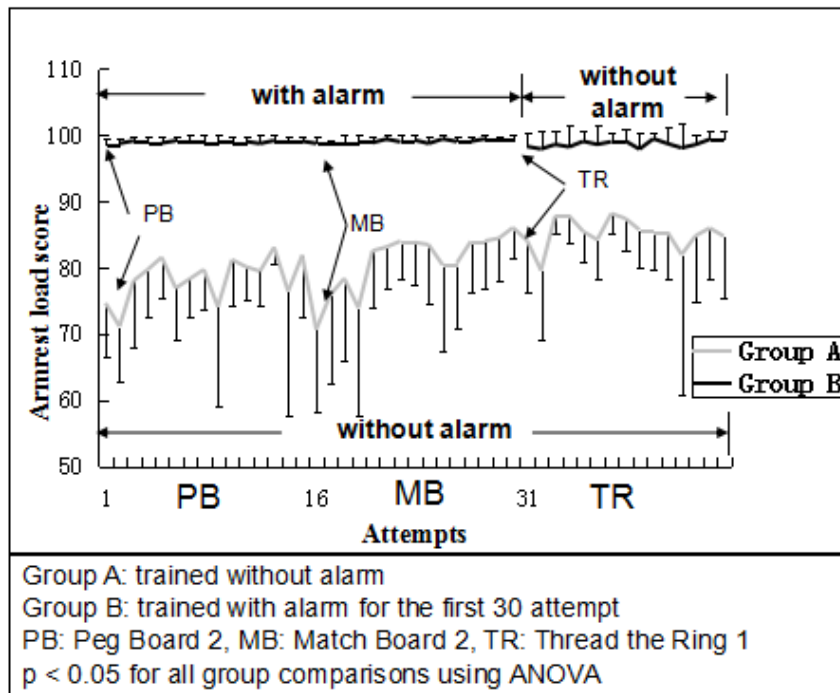


Fig. 6 Armrest load score learning curves of two groups.

- Overall score learning curve

As Fig. 7 shows, the overall scores of the groups were not significantly different for the first four attempts at PB ($p = 0.348$ for PB₁, $p = 0.138$ for PB₂, $p = 0.188$ for PB₃, and $p = 0.068$ for PB₄). From PB₅ to TR₁₅, there were significant differences ($p < 0.05$) between the two groups in the performance scores for each attempt.

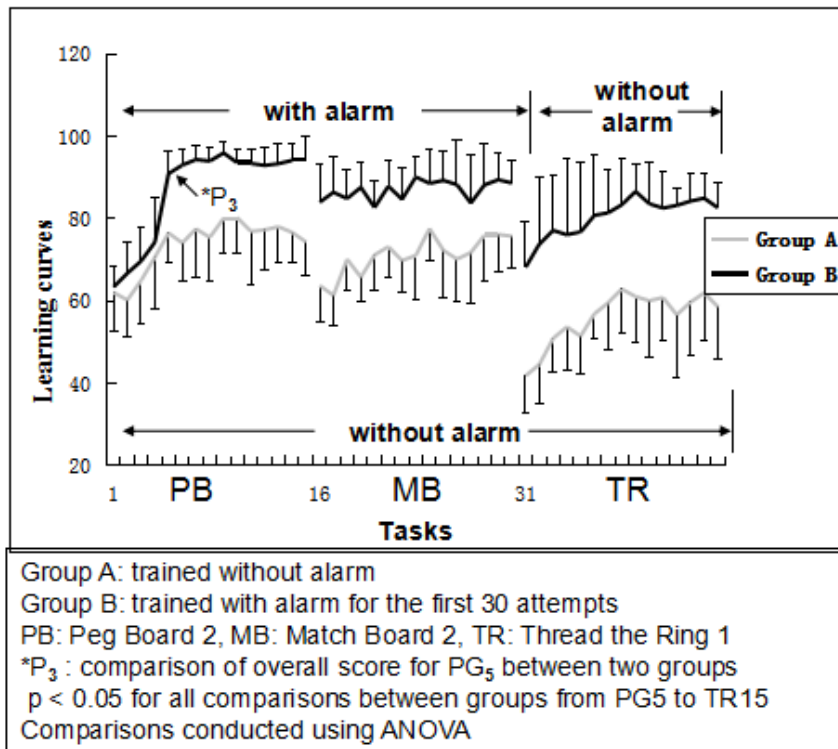


Fig. 7 Overall score learning curves of two groups.

- ARL score progress of the two groups

As Fig. 8 shows, Group A trainees, who only received ergonomic suggestions, improved their ARL scores significantly through training ($*p_4 < 0.05$). The ARL scores for Group B did not change significantly ($p_5 < 0.05$) between the first attempt (with the alarm) and the last attempt (without the alarm); they systematically corrected their positions as soon as the alarm sounded.

After training, the ARL scores of Group A were significantly lower ($*p_6 < 0.05$) than the ARL scores of Group B.

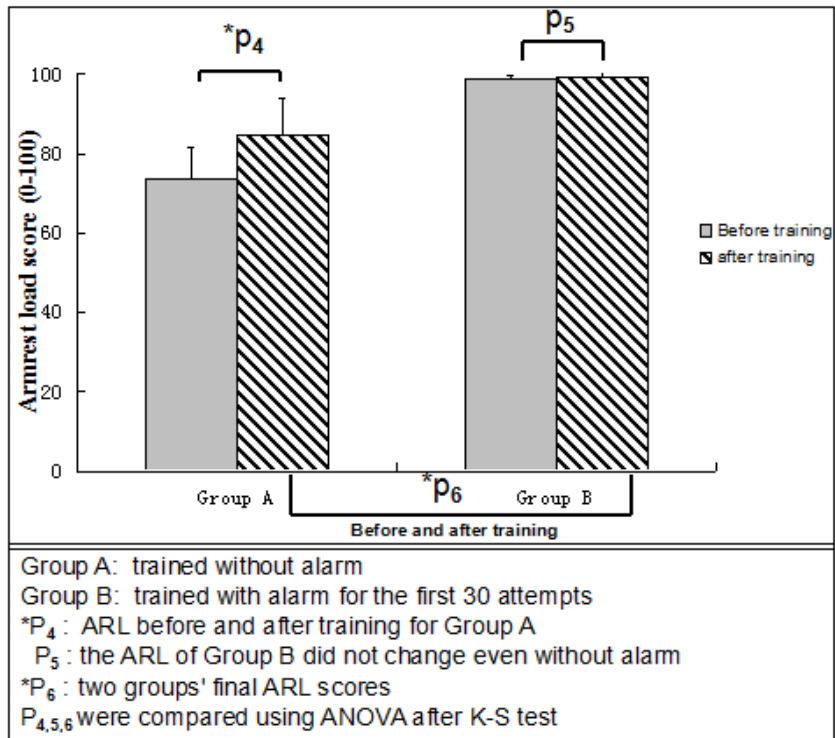


Fig. 8 Changes in ARL scores of the two groups.

Discussion

The results of our study show that the PSS operated with an alarm can accelerate the acquisition of a good ergonomic habit. Once this habit is acquired, trainees can maintain their adapted ergonomic motion with procedural memory and without the alarm. After thirty “alarm-assisted” exercises, the participants in this study developed a conditioned reflex and maintained their arms in contact with the armrest during the last fifteen last attempts without the alarm, although these were more difficult exercises that required more concentration. The results confirmed that a good ergonomic habit (using the armrest with the dVT) improves trainees’ overall scores and shortens the learning curve.

Use of an armrest during a simulated laparoscopic training procedure reduces energy consumption [10] and improves comfort and task performance [11]. Microsurgery requires a position similar to the one required in robotic surgery, and in this specialty, it has also been proven that positioning the forearm on a support significantly reduces tremors and increases accuracy [12]. Goto developed an intelligent armrest that followed a surgeon's arm automatically and improved the precision of microsurgical procedures [13]. Using electromyography (EMG), Gyusung et al. demonstrated that experts exhibited less trapezius activity than novices during a robotic simulated training procedure [1]. These research findings indicate that using an armrest during robotic surgery is an important skill to master.

In contrast to previous studies, our study did not involve the use of EMG [1,14] or a magnetic tracking system [3,15], because we wanted to avoid inducing operator discomfort and limiting arm mobility.

The main advantage of our system is its ease of use in ergonomic training

and assessment. The simple design of the system facilitates its installation on both the dVT and the da Vinci Robot console without adversely affecting the operator's mobility.

The conditioned reflex [16] is widely used in training athletes [17], and our study is the first to assess the pedagogical effect of the conditioned reflex for ergonomic teaching in robotic surgery.

In addition to the main results, we observed some interesting phenomena.

First, the ARL learning curve (see Fig. 6) for Group A was lower and more irregular than that for Group B, even though the ARL curve showed that Group A's ergonomic armrest use improved with training. This confirms the role of experience in the ARL score. Training on a simulator can improve not only performance scores but also ergonomic use of the armrest.

Second, both groups had lower performance scores (see Fig. 7) for TR than for MB and PB, which were easier tasks ($TR > MB > PB$). PB involved grasping and passing rings. MB involved putting numbers and letters in a drawer by raising its cover. TR involved passing a needle through several rings. When Group A members began a more difficult task (switching from PB to MB and then from MB to TR), their ARL scores decreased significantly. The reason for this is that they had not yet formed the habit of using the armrest. When they had to face a new challenge, they naturally focused on the challenging technical task at first and ignored the ergonomic use of the armrest. Their ARLs subsequently increased with experience and mastery of each task.

Third, we showed that a link exists between the armrest load score and the overall score. A good ergonomic habit leads to a better overall score and quicker learning. From PB₁ to PB₄, there was no significant difference in the performance scores of the two groups. As novices with no simulator experience, the

participants had to become familiar with the robotic procedure, which is quite different from open surgery or laparoscopy. To mute the alarm, Group B was forced to use a clutch pedal to lower their forearms to the armrest and the force sensors. As a result, Group B had significantly higher performances score than Group A. Stabilizing the forearms on the armrest prevents large movements and improves precision. Adoption of good ergonomic habits has also been shown to be a key factor in differentiating between the motion efficiency of experts and that of novices [2,3,18]. Robotic training with an alarm-equipped PSS creates a restrictive environment that forces the operator to master the desired ergonomics quickly, which leads to faster use of the clutch pedal and better efficiency. The alarm was more effective in encouraging adoption of the good ergonomic habit of armrest use than the verbal suggestions provided to Group A.

Finally, in a traditional training procedure, the trainer has the job of following the trainees' forearm movements. In doing so, he has to switch focus frequently between the control screen and the armrest. The alarm used in this study reduced the trainer's workload by correcting ergonomic errors without drawing the trainer's attention from the target.

Our results have practical implications for robotic training. The PSS is a simple and robust system that does not hinder the movements of the operator. Combined with automatic calculation of the armrest load, the PSS can be an efficient tool for monitoring ergonomic improvement. Surgeons may suffer from poor ergonomics and musculoskeletal disorders while their patients benefit from the advantages of minimally invasive surgery [19]. Good ergonomic habits are essential to preventing such musculoskeletal disorders [14]. Furthermore, the use of real-time ARL evaluation together with the alarm-assisted PSS can help to improve teaching accuracy, which is critical to reducing the overall training time in robotic simulation.

Our study had some limitations. First, obviously, using a loud alarm can cause trainees stress and adversely affect their performance, so the alarm could be replaced by a prerecorded verbal message. Second, Group B performed the TR test without the alarm immediately after training with the alarm. Thus, we did not explore the training duration effect on the acquisition of the ergonomic habit. As a conditioned reflex is involved, the follow-up effect of the training must be investigated. Third, the use of the alarm during the 30 attempts made by Group B was chosen arbitrarily. As shown in Fig 7, a plateau may be reached sooner, and the alarm could possibly shut off earlier in the learning process. We therefore plan to design a study to assess the shortest amount of training time required with the alarm to reach a plateau and ensure long-term ergonomic habit memory.

In conclusion, use of the PSS described in this paper in combination with an alarm can significantly shorten the training period for development of a professional ergonomic habit and significantly improve overall scores in robotic simulation. The ARL curve is a simple, effective, and reproducible method of continuous ergonomic monitoring that would be helpful in robotic training and establishment of ergonomic guidelines.

Disclosures:

Drs. Kun YANG, Manuela PEREZ, Gabriela HOSSU, Nicolas HUBERT, Cyril PERRENOT and Jacques HUBERT have no conflicts of interest or financial ties to disclose.

References:

1. Lee GI, Lee MR, et al. (2014) Comparative assessment of physical and cognitive ergonomics associated with robotic and traditional laparoscopic surgeries. *Surg Endosc* 28:456-465.
2. Uemura M, Tomikawa M, et al. (2014) Analysis of hand motion differentiates expert and novice surgeons. *J Surg Res* 188:8-13.
3. Nisky I, Allison M, et al. (2014) Effect of robotic manipulators on movements of novices and surgeons. *Surg Endosc* 28:2145-2158.
4. Lendvay TS, Brand TC, et al. (2013) Virtual reality robotic surgery warm-up improves task performance in a dry laboratory environment: A prospective randomized controlled study. *J Am Coll Surg* 216:1181-92.
5. Rehman S, Raza SJ, et al. (2013) Simulation-based robot-assisted surgical training: A health economic evaluation. *Int J Surg* 11:841-6.
6. Perrenot C, Perez M, et al. (2012) The virtual reality simulator dV-Trainer (®) is a valid assessment tool for robotic surgical skills. *Surg Endosc* 26:2587-93.
7. Abboudi H, Khan MS, et al. (2013) Current status of validation for robotic surgery simulators—A systematic review. *BJU International* 111:194-205.
8. Patel A, Patel M, et al. (2014) Can we become better robot surgeons through simulator practice? *Surg Endosc* 28:847-53.
9. Foell K, Furse A, et al. (2013) Multidisciplinary validation study of the da Vinci Skills Simulator: Educational tool and assessment device. *J Robotic Surg* 7:365-369.
10. Mansoor J, Stuart B, et al. (2013) Energy consumption during simulated minimal access surgery with and without using an armrest. *Surg Endosc* 27:971-977.
11. Galleano R, Carter F, et al. (2006) Can armrests improve comfort and task performance in laparoscopic surgery? *Ann Surg* 243:329-33.

12. Safwat B, Su EL, et al. (2009) The role of posture, magnification, and grip force on microscopic accuracy. *Ann Biomed Eng* 37:997-1006.
13. Goto T, Hongo K, et al. (2013) The concept and feasibility of EXPERT: Intelligent armrest using robotics technology. *Neurosurgery* 72 Suppl 1:39-42.
14. Hubert N, Gilles M, et al. (2013) Ergonomic assessment of the surgeon's physical workload during standard and robotic assisted laparoscopic procedures. *Int J Med Robotics Comput Assist Surg* 142-147.
15. Tausch T J, Kowalewski T M, et al. (2012) Content and construct validation of a robotic surgery curriculum using an electromagnetic instrument tracker. *J Urology* 188:919-923.
16. Windholz G. (1996) Pavlov's conceptualization of the dynamic stereotype in the theory of higher nervous activity. *Am J Psychol* 109:287-95.
17. Karafantis DM (2011) The effects of ethnocultural empathy on level of stereotyping toward college athletes. *J Evid Based Soc Work* 8:426-44.
18. Zihni AM, Ohu I, et al. (2014) Ergonomic analysis of robot-assisted and traditional laparoscopic procedures. *Surg Endosc* 28:3379-84.
19. Park A, Lee G, et al. (2010) Patients benefit while surgeons suffer: An impending epidemic. *J Am Coll Surg* 210:06-13.

Bilan du chapitre III-1

L'ajout d'une alarme qui sonne lorsque les avant-bras sont soulevés est une solution efficace qui crée un réflexe conditionné, accélère l'utilisation ergonomique des appui-bras du simulateur de robot, mais également améliore le score global.

Chapitre III-2: Mise en place de CESIR

III-2. 1 - Introduction

Nous avons trouvé une solution pour la détection et la correction automatique de l'utilisation ergonomique des appui-bras, qui de plus peut soulager le travail de l'encadrant pendant la formation robotique.

Comme indiqué sur la [Fig.3-1](#), l'encadrant a pour rôle de suivre le champ opératoire et les gestes des mains et des pieds du stagiaire. Par ailleurs il doit régulièrement prendre la place du stagiaire pour faire une démonstration technique, répondre à ses questions. L'expérience montre que pour une formation optimale un encadrant prend en charge un maximum de 2-3 étudiants et que son efficacité pédagogique diminue quand il doit s'occuper d'un plus grand nombre.

Ceci demande des ressources humaines non négligeables en termes d'encadrement et cette surveillance permanente peut également être mal vécue par le stagiaire.

Si les exercices proposés sur les différents simulateurs sont améliorés en permanence pour aider à maîtriser les habiletés de base en robotique, la méthode pédagogique reste à améliorer, tant pour réduire le temps enseignant que pour donner plus d'autonomie au chirurgien stagiaire.

Les équipements utilisés dans le domaine sportif, et notamment les enregistrements vidéos pour améliorer les performances [32 , 33] qui commencent à être appliqués en médecine [34] nous ont amenés à développer un système de surveillance vidéo utilisable en robotique .



Figure 3-1 : Trainer's check points on the trainee: 1. operation procedure on the monitor ; 2. the position of joysticks ; 3. the position of forearms ; 4. the pedal using .

III-2. 2 - Design du système

Le CESIR (Controler of Evenements on Simulator and Robot), adaptable sur les simulateurs ou le robot da Vinci[®] lui-même, est un système combinant (**Figure 3-2**):

- une duplication de la vue endoscopique
- deux caméras extérieures enregistrant les mouvements des mains et des pieds
- un système de capteurs de pression au niveau du repose-bras permettant le contrôle continu de la position des avant-bras de l'opérateur, pour le contrôle de position des avant-bras (SSP précédemment décrit).
- une interface informatique permettant l'enregistrement et leur revisionnage à volonté, en vitesse variable

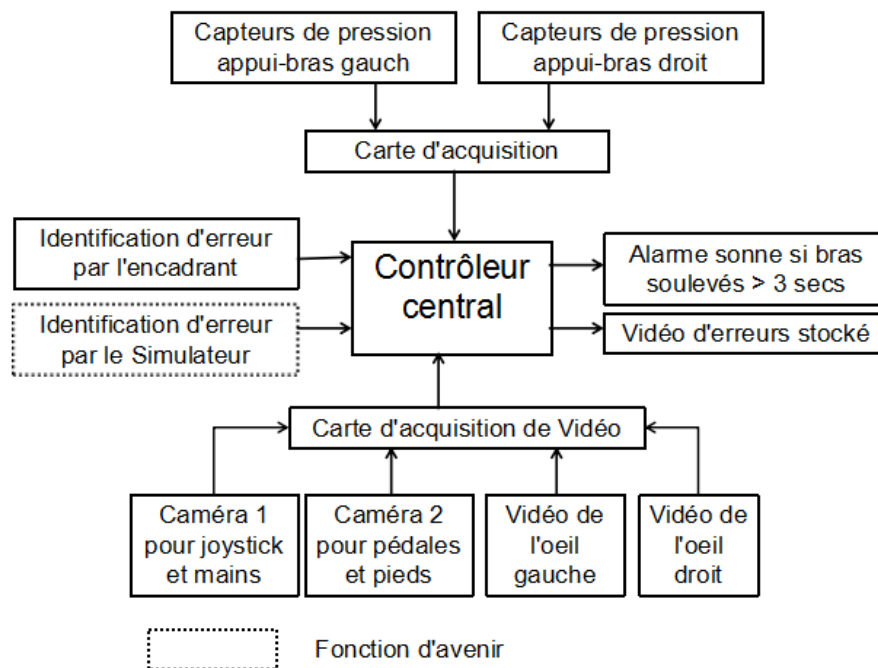


Figure 3-2: composition du CESIR

III-2. 3 - Fonctions du CESIR

Comme indiqué sur la **Figure 3-3**, le CESIR propose deux fonctions principales pour répondre aux besoins de l'encadrant.

- Pour la surveillance : une intégration de tous les checkpoints du stagiaire sur un seul écran.
- Pour l'enseignement / debriefing : une base de données comportant des films parfaits, des films avec un florilège des erreurs ainsi que l'enregistrement de chaque essai du stagiaire. Ces films peuvent être visionnés à volonté, et à vitesse variable.

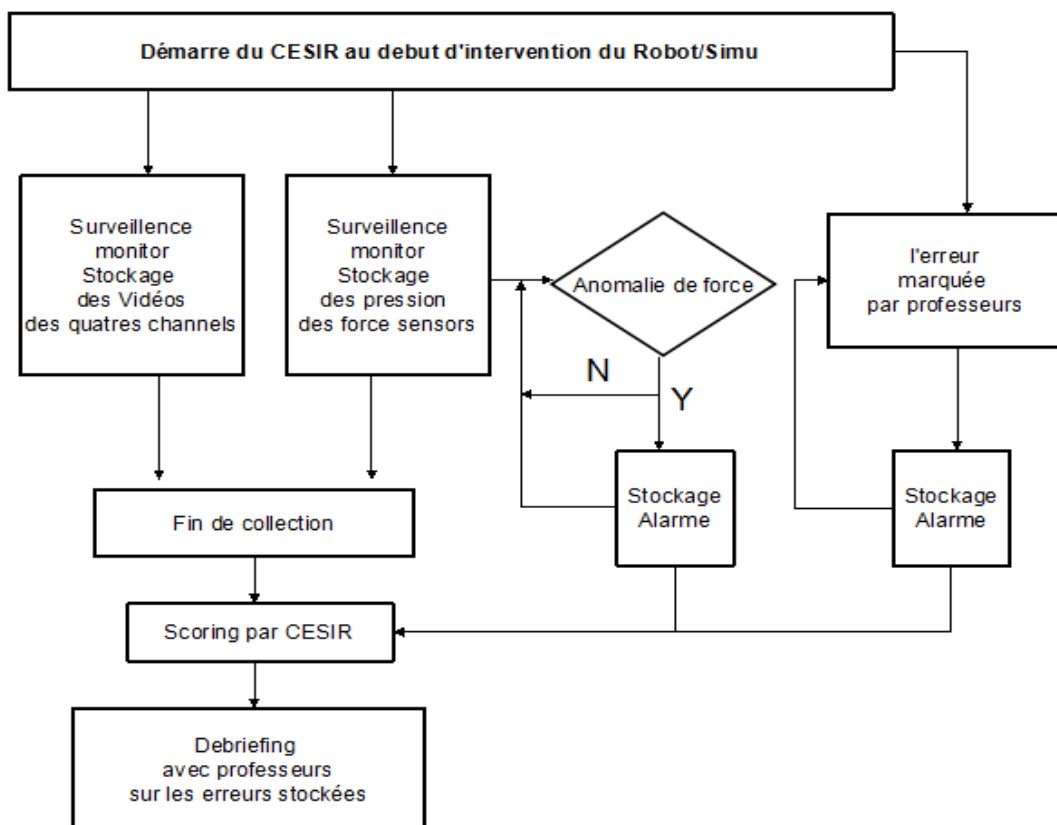


Figure 3-3 : Fonctionnement du CESIR

III-2. 4 - Mise en place de CESIR

L'interface du CESIR (**Figure 3-4**) est basée sur Visuel Studio 2010, logiciel ouvert (Microsoft Corporation, Redmond, USA).

L'écran de contrôle comporte 6 zones:

- la 1^{ère} zone est une duplication de la vision endoscopique;
- la 2^{ème} zone correspond à la vision des mains manipulant les joysticks de la console;
- la 3^{ème} zone correspond à l'enregistrement des pressions au niveau des appui-bras. 4 capteurs de pression (FSR 408®, Interlink Electronics Inc., Camarillo, CA, USA) sont installés de chaque côté, Si aucun capteur n'est touché, le tracé correspondant sera rouge, alors qu'il restera vert si l'appui des avant-bras est correct;
- la 4^{ème} zone correspond à la vision des pieds commandant les pédales de la console. Les caméras sont connectées physiquement à la carte d'acquisition de HDMI.
- la 5^{ème} zone est l'espace principal de surveillance. On peut y sélectionner et y agrandir les images des zones 1, 2 ou 4
- la 6^{ème} zone en haut de l'écran correspond au contrôle de la vidéo : mode surveillance simple, mode enregistrement ou mode replay avec une vitesse allant de 0,1x à 2x la vitesse d'enregistrement.

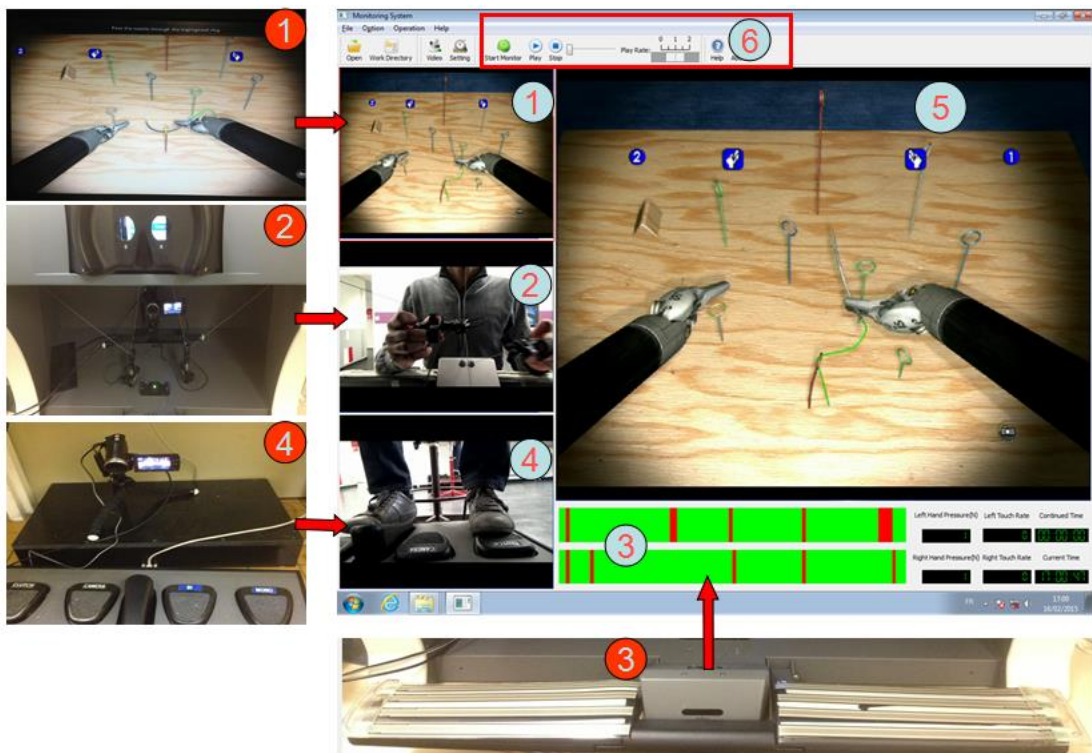


Figure 3-4 Organisation de l'interface de CESIR: les checkpoints sont intégrés sur le même écran

Bilan du chapitre III-2

Nous avons mise en place le système original baptisé CESIR offrant une interface synthétique permettant à l'encadrant de suivre les étudiants pendant la formation de chirurgie robotique. Cette interface permet également une plus grande autonomie du stagiaire en lui offrant la possibilité de visionner à volonté ses propres exercices, ceux réalisés par des experts et ceux comportant les erreurs à éviter.

Question qui se pose :

Est-ce que le CESIR est utile ?

Chapitre III-3: Validation du CESIR

III-3.1 - Introduction

Jusqu'ici il n'y avait pas encore d'outil pour l'encadrant permettant de suivre ses élèves sur simulateurs/robots. Puisque nous avons mis en place le système CESIR au Chapitre III-2, il paraît nécessaire d'évaluer son efficacité sur la formation de chirurgie robotique. Une étude randomisée a été mise en place, comparant l'efficacité de l'entraînement de stagiaires bénéficiant soit d'une formation classique, soit d'une formation assistée par CESIR sur simulateur dVT.

III-3.2 - Solution envisagée pour la question

Est-ce que le CESIR est utile ?

Une étude randomisée de deux groupes (avec et sans CESIR) va comparer l'efficacité de l'entraînement entre les deux groupes.

III-3.3 - Publication

Article **accepté** dans la revue « *Annals of Surgery* »

Effectiveness of an integrated video recording and replaying system in robotic surgical training

Authors:

Kun YANG MD^{1,2,4}, Manuela PEREZ PhD^{1,3}, Nicolas HUBERT MD^{1,4}, Gabriela HOSSU PhD¹, Cyril PERRENOT MD^{1,3}, Jacques HUBERT MD^{1,4}

Affiliations:

1. IADI / Inserm U947, Lorraine University, Nancy, F-54000, France
2. Wuhan University, Department of Urology, Zhongnan Hospital, Wuhan, 430071, China
3. Department of Emergency and General Surgery, CHU Nancy, Nancy, F-54000, France
4. Department of Urology, CHU Nancy, Nancy, F-54000, France

Running Head : Video usage in robotic surgical training

Integrated video recording and replaying systems are widely used in various fields such as sports. This study applied such a system in robotic surgical training and demonstrated its effectiveness.

Objective: This study evaluated the effectiveness of using a video recording and replaying system in robotic surgical training.

Summary Background Data: Robotic surgical videos are reviewed to accelerate the acquisition of robotic surgical skills. However, few professional recording and replaying systems have been utilized during robotic surgical training. The effectiveness of these professional video systems should be investigated and validated.

Methods: A randomized study was conducted to analyze the performance of 60 participants, who were unfamiliar with robotics, in a robotic simulator. Participants were enrolled in two groups to perform two exercises on a Mimic® dV-Trainer®. One group was trained with the new protocol based on a recording and replaying system (CESIR) and the other group was trained with the conventional method. The overall scores were automatically evaluated by the simulator. The number of additional requests for reviewing the videos or watching the trainer's demonstration and the learning curves based on the overall score were compared between the two groups.

Results: The group trained with CESIR presented a significantly improved learning curve in both exercises ($p < 0.001$) with more additional requests ($p < 0.001$) in comparison with the group trained with the conventional method.

Conclusion: In robotic skills training, the use of a recording and replay system is beneficial and more efficient than the conventional training method.

Keywords: Robotic training, learning curve, robotic simulator, video review, recording and replaying system

INTRODUCTION

New technological developments in the field of minimal invasive surgery have allowed the clinical proliferation of surgical robots such as the da Vinci operation system (intuitive Surgical, Sunnyvale, CA, USA). With the increased use of robotics, adverse events related to the use of robotic surgical systems have increased[1,2]. Patients have complained about the hospitals' lack of control over the operators skills or insufficient information on the operators' robotic skills level, which has highlighted the importance of systematic robotic skills training[3].

Video recording and playback systems are widely used as an efficient method for surgical education[4,5,6]. In robotic surgery, video-based peer feedback is provided to accelerate the acquisition of robotic skills[7]. On the other hand, even though the efficacy of virtual simulation for acquisition competence for clinical robotic-assisted surgery may require additional studies[8], training on robotic simulators is still considered a necessary and important step in robotic skill acquisition[9]. Moreover, a recording of the intervention procedure is more easily accessible on a robotic simulator through duplication of the virtual reality signal on the screen. The use of a video recording and replaying system in a robotic simulator might facilitate and improve robotic skill training.

We developed a new system, which is called controller of events on simulator and robot (CESIR), based on digital cameras and force sensors, and we investigated its efficacy in robotic skill training. Furthermore, we validated its training efficiency with a randomized controlled study including 60 volunteers using a dV-Trainer simulator (dVT; Mimic Technologies Inc., Seattle, WA, USA).

METHODS

Simulator

The dVT is a validated robotic simulator for robotic training[10,11] with an automatic scoring system (M-scores) for evaluating the operator's performance with respect to seven categories (time to complete the exercise, economy of motion, instrument collisions, excessive instrument force, instrument out of view, master work space range, and drops) and an overall score for global evaluation.

Exercise

Based on a literature review, we selected the pick and place (PP), Match Board 2 (MB), and Thread the Rings 1 (TR) exercises for this study.

The PP exercise is a simple exercise aimed at familiarizing the user with dVT. The MB exercise is a task in which the user places targets in a closed drawer using the endowrist technique involving two needle holders. Finally, the TR exercise is a simulation of a horizontal running suture in which the user drives a needle through a series of rings. Among these exercises, MB and TR inspect the basic techniques involving the co-ordination of both hands and sutures in real robotic surgery.

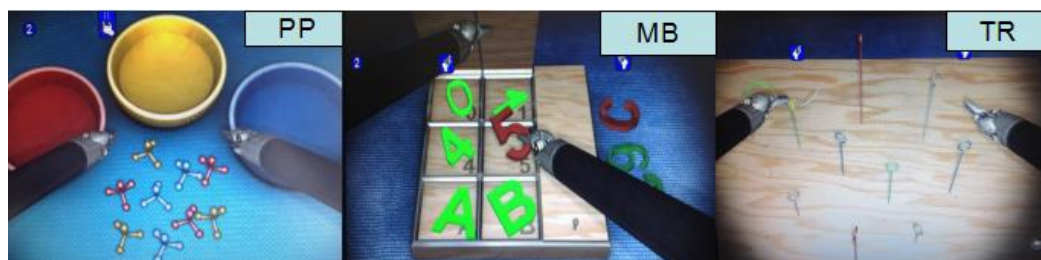


Figure 1. Tasks selected: Pick and Place (PP, for warm-up), Match Board 2 (MB, for testing) and Thread the Rings 1 (TR, for testing).

Recording and replaying system

In the conventional training procedure, the trainer stands behind or beside the trainee and verifies the following points: 1. the operation procedure on the monitor, 2. the use of joysticks, 3. the ergonomic position, and 4. the use of pedals.

We developed the CESIR system using the same principles (Figure 2). The core of CESIR is a high-definition multimedia interface (HDMI) video card installed in the monitoring computer, the interface of which was based on Visual Studio 2010 open software (Microsoft Corporation, Redmond, USA). One video signal was a duplication of the operation view from the simulator. The other two signals were obtained from the digital cameras in the console and in front of the pedals. Eight force-sensing resistors (FSR 408®, Interlink Electronics Inc., Camarillo, CA, USA) were separated into two groups on the left and right sides of the armrest. The pressure signal was transmitted to the monitoring computer through a universal serial bus (USB) connection.

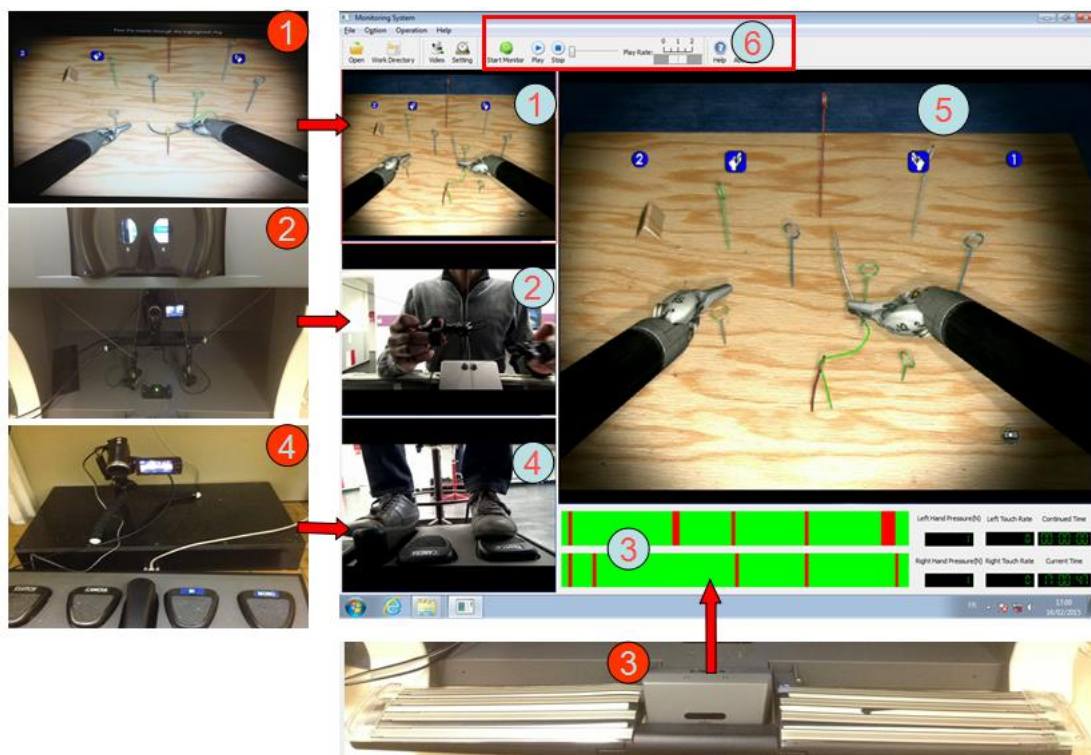


Figure 2. Interface of CESIR, which contains six zones: 1. the operation

procedure on the monitor (a duplication from the simulator), 2. the use of joysticks (a digital camera in the console), 3. the ergonomic position (force-sensor system; red gaps correspond to the time during which the operator's forearms were off the armrest), 4. the use of pedals (a digital camera behind the pedals), 5. main observation zone (image from zones 1, 2, and 4), and 6. recording and replay control zone (replay the operation procedure with 0.1X–2X speed).

Organization

Sixty volunteers (50 surgeons and 10 nurses) were recruited and randomly separated into two groups: group A (intervention group) and group B (control group).

Group A: After the initial level control, CESIR showed a collection of low-scoring films involving critical errors made by novices and a film scoring 100% (standard film) made by an simulator expert to trainees. If needed, the films could be simultaneously shown on the same screen with two windows using CESIR. The trainer could additionally require recording and replaying of the trainee's exercise and/or a comparison with the expert after each attempt. If not, a comparison was systematically conducted every three attempts.

Group B: After the initial level control, the trainer performed a perfect demonstration to show the necessary skills to trainees. This demonstration could be repeated if required. During the training, the trainee could demand an additional demonstration by the trainer after each attempt. If not, a demonstration was systematically realized every three attempts.

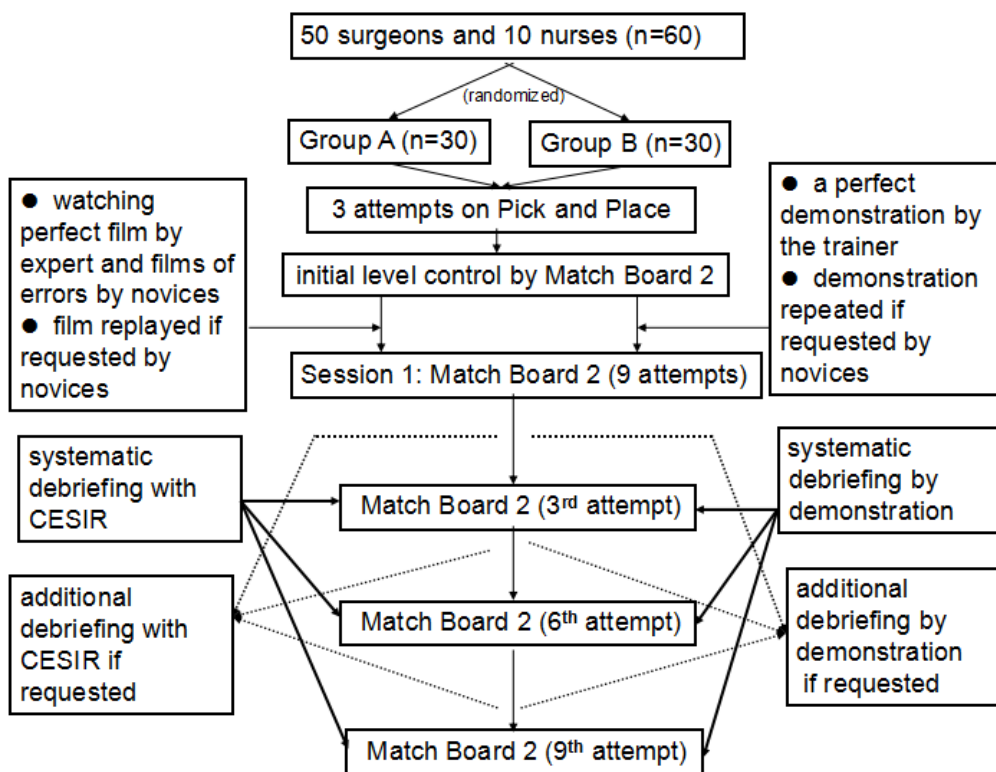


Figure 3: Study organization for Match Board 2.

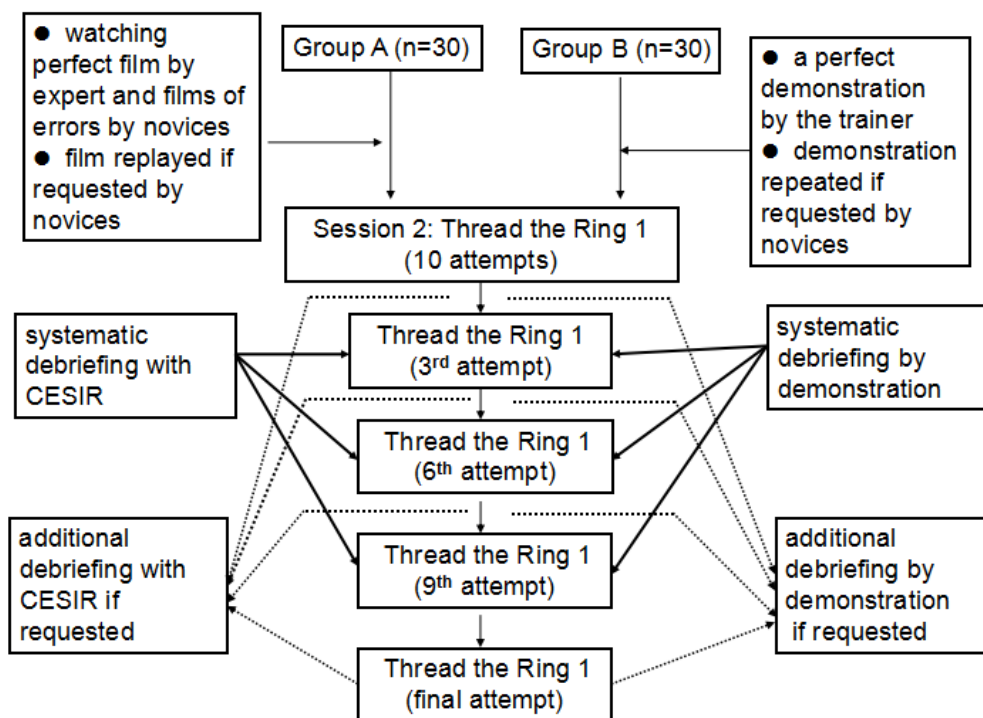


Figure 4: Study organization for Thread the Ring 1.

Data collection

Before training, every trainee finished MB once. The score was noted as the base line of the group. Groups A and B finished MB nine additional times and TR ten times by following their respective protocols. The learning curve of each group was based on the overall score evaluated automatically by dVT. The number of additional requests in each group for reviewing the recording or demonstration was noted.

Statistical analysis

A statistical analysis was performed using SPSS ver. 19 (SPSS, Inc., Chicago, USA). A one-way analysis of variance (ANOVA) or Student's t-test was used to compare the overall score between the two groups. The Kolmogorov–Smirnov test was used for checking the distribution of overall score; if it did not correspond with a normal distribution, the Willcoxon signed-rank test was used. The chi-squared (χ^2) value was used to compare the difference in the number of additional requests between the two groups. The significance level (p) was set at 0.05.

RESULTS

Baseline control (Figure 5)

Group A contained 20 males and 10 females with an age distribution of 32.11 ± 6.22 years; group B contained 22 males and 8 females with an age distribution of 33.6 ± 4.93 years. Group A obtained a similar initial level to that of group B according to the result of the control test (64.09 ± 13.66 and 62.13 ± 11.3 , respectively; $p=0.68$).

MB learning curve (Figure 5)

From the first attempt until the end of the study, after receiving training by the CESIR protocol, group A obtained a significantly higher score than Group B on MB ($p < 0.05$). The variance of group A ranged from 5.73 to 7.81 and that of group B ranged from 10.39 to 14.4.

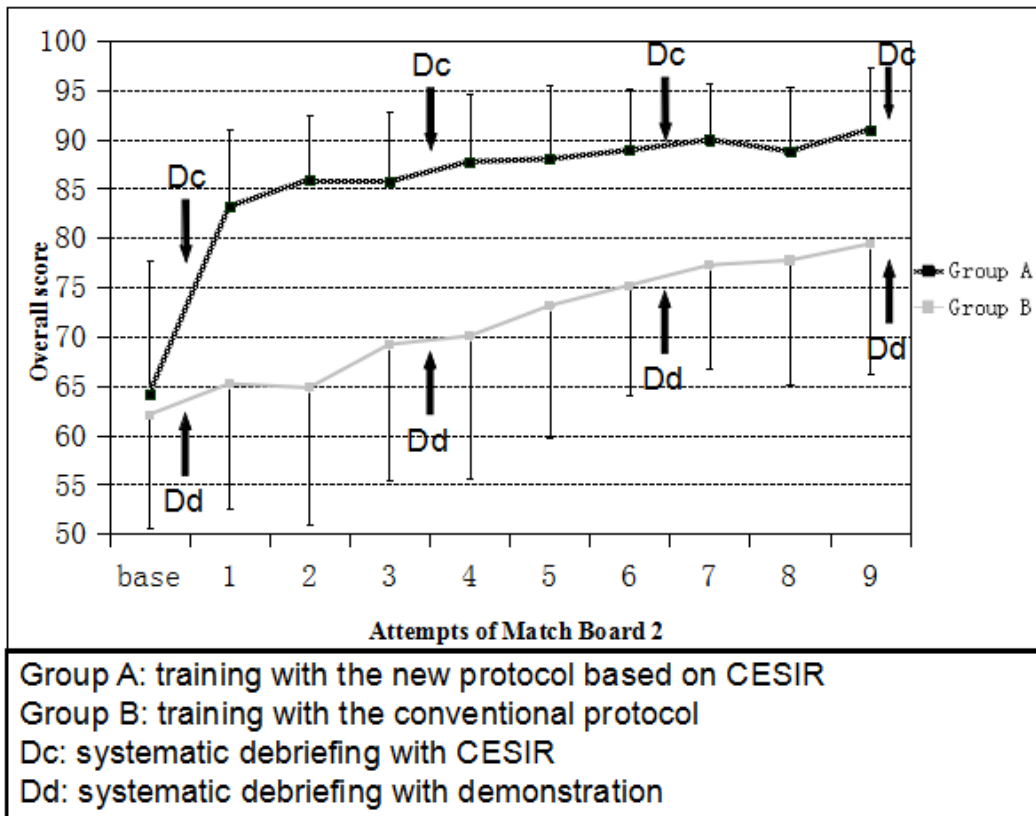


Figure 5. Baseline control and the comparison of the learning curves for the two groups on Match Board 2.

TR learning curve (Figure 6)

From the first attempt until the end of the study, after receiving training by the CESIR protocol, group A obtained a significantly higher score than Group B on TR ($p < 0.05$). The average of the best score of group A was significantly higher than that of group B (92.97 ± 4.16 and 86.09 ± 5.81 , respectively; $p < 0.05$). The variance of group A ranged from 5.16 to 9.54 and that of group B ranged from 12.88 to 18.41.

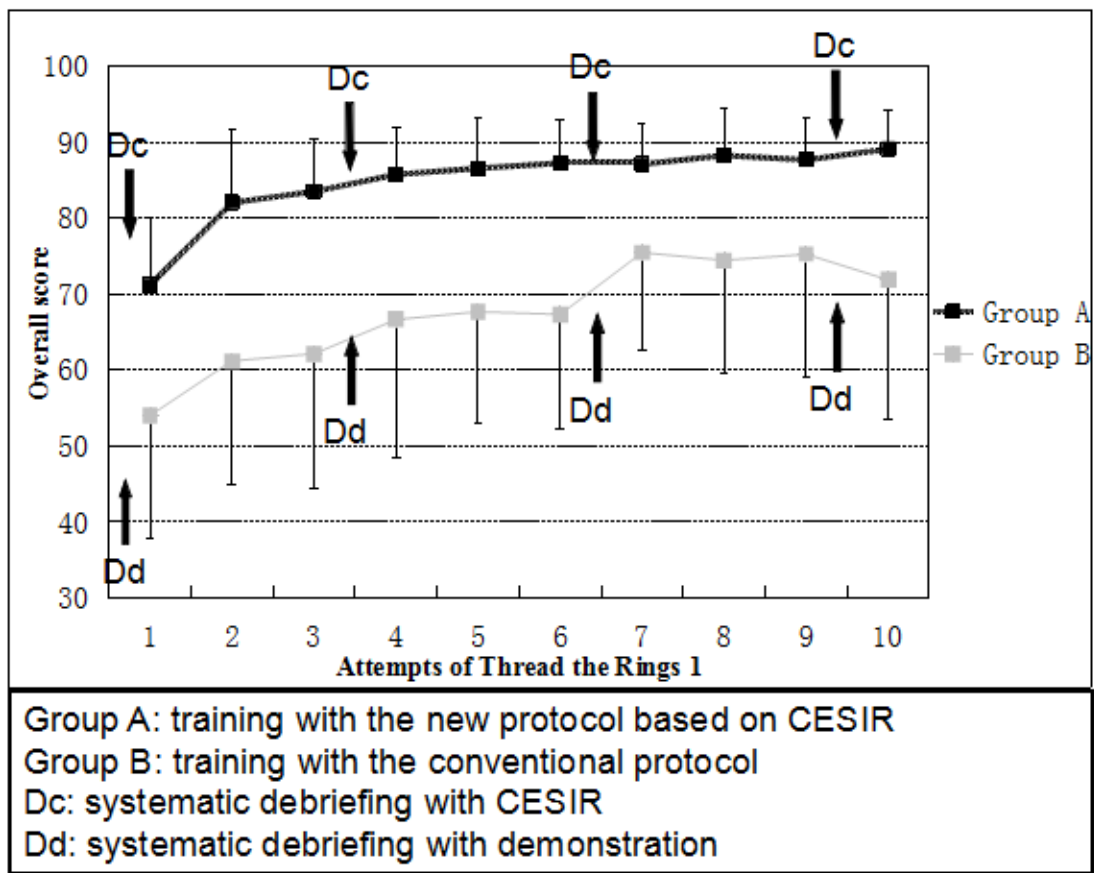


Figure 6. The comparison of the learning curves for the two groups on Thread the Rings 1.

Number of additional requests (Table 1)

In group A, 93% of the trainees requested an additional replay of the professional video before performing their formal attempt. Among these requests, 43% of the trainees moderated the replay speed. In group B, only 30% of the trainees requested an additional demonstration by the trainer ($p < 0.001$).

In addition to the systematic debriefing in the training procedure, 87% of the trainees of group A had requested an additional debriefing with the recording, including replay and analysis of their movement, and 70% of the trainees requested to view a slow motion video or to perform a comparison with the

professional video on the same screen. Only 30% of the trainees in group B requested an additional debriefing with a demonstration by the trainer ($p < 0.001$).

Table 1. Comparison of the number of additional requests by the two groups

additional request of video/demonstration (≥ 1 time)	Group A (n = 30)		Group B (n = 30)		P
	%	n	%	n	
	Before first attempt	93	28(a)	10	
During the training process	87	26(b)	30	9	<0.001

(a) 13 requested a video replay in slow motion

(b) 21 requested a debrief with a video in slow motion or a comparison with the expert's perfect video

DISCUSSION

Video recording and replay systems are widely used in the training of athletes[12,13] and in medical education[14]. In surgical training, Birkmeyer et al. found that the peer review of a recorded operation was effective for accurately assessing a surgeon's level of proficiency[15]. Carter et al. also reported that video-based peer feedback was an effective paradigm for accelerating the learning curve of robotic surgery during simulation[7]. The first application of the CESIR system during the training on dVT has provided a satisfactory result: the significant difference between groups A and B in both exercises showed the significant advantage and efficiency of the training protocol using the video recording and replay system.

By watching videos of errors made by other novices and comparing these videos with the standard film on the same screen during the training, CESIR allowed students to avoid mistakes such as instrument collisions or excessive instrument force and to learn the correct movements from the standard film. In the conventional training course, the trainer could only demonstrate perfect skills and verbally describe possible errors. The simplicity of use of CESIR allowed a video recording of any attempt, and CESIR allows slow motion playback of the most difficult segments of the procedure and comparison with the movements of the expert, which was important during the debriefing.

In addition to the main results, we obtained several important findings. First, an ideal recording and replay system for robotic skills training should not only include the operation field but also an integrated interface with a full description of the entire procedure. The additional cameras in CESIR could record the positions of the operator's hands and feet. Its force-sensing system (validated in our prior study) could simultaneously reflect the operator's ergonomic position and armrest use. The film could not only show the expert's movement in the

operation field but also the movement of the expert's hands at the console, the expert's frequency in using the pedal, and the fully ergonomic use of the armrest to stabilize the forearms. Moreover, CESIR made ergonomic errors "visible" and associated these errors with the movement of forearms on the console, which simplified the ergonomic training. With an increased amount of information integrated into the system, trainees could quickly and easily identify the differences between the expert and novices, and trainees could more easily correct their errors.

Second, the conventional protocol in group B required the trainer to stay behind the trainee to observe and correct their movements. For the members of group B, the trainee had to learn the skill from the trainer's demonstration or explanation, and they were subjected to an environment of judgment and stress[16]. In group A, the judgment role of the trainer was significantly weakened. Their role was mostly restricted to recording and replaying the video as required, acting more as a helper than as a judge. On the other hand, the price of rescue in group A was significantly lower than in group B. In group B, the trainees needed to leave the console physically and be mentally repudiated by the demonstration of the trainer, while the group A trainees only had to click the record button. The reduction in the mental load or psychological resistance resulted in a different subjective initiative between the two groups. Based on the above observations, trainees in group A required frequent debriefing, which also improved their learning curve.

Third, a video recording and replay system could not only improve the performance of trainees but also decrease the trainer's workload. In the conventional training procedure, the trainer has to frequently switch focus between the control screen and armrest in order to follow the trainee's movement. The CESIR system has integrated all the information onto a single screen, and the ergonomic strip automatically showed a red gap when the forearms were removed from the armrest without drawing the trainer's attention from the target.

The recording and replay videos also reduced the physical load by avoiding a demonstration on the simulator. Finally, CESIR offers special value for robotic training centers, and it is helpful for producing experienced trainers by screening videos of errors, which can help them provide targeted suggestions to students. With the decrease in workload, a centralized station with multiple screens based on CESIR would make it feasible to simultaneously monitor several trainees[17]. With an internet connection, the system has the potential to enable remote-monitoring and remote-education[18,19] across different training centers.

Finally, our study demonstrates the efficacy of an integrated recording and replay system (CESIR) in robotic skill training. Although our study involved two simulated surgical exercises on dVT, prior studies have illustrated that the acquisition of simulated surgical skills are transferable to a live operative setting[20]. The use of a video recording and replay system could reduce the trainees' mental load, accelerate their learning curve, and decrease the trainer's workload, which is advantageous for both trainers and trainees. Future considerations include the validation of a centralized monitoring system based on multiple CESIRs and its application in a real operation room.

The limitations of our study are as follows. First, we did not select the most difficult task on dVT; rather, we selected two tasks of medium and high difficulty. Despite this fact, the consistency in the results between both tasks has confirmed the efficacy of CESIR in improving the training efficiency. Second, we had only one CESIR system for testing. Therefore, our test was a comparison of ideal training modes (one trainer assigned to one trainee for both protocols), which is different from practical situations. Finally, as an independent system, CESIR does not have sufficient data exchange with the simulator. To locate critical errors, the trainer had to watch the entire video from the beginning. The automatic location or identification of critical errors in the video would be helpful to save time.

CONCLUSION

The integrated video recording and replaying system is widely used in fields such as sporting events. In this study, an integrated video system has been applied in robotic surgery training for the first time.

Our randomized control trial demonstrates that the use of this system is a novel and effective paradigm for improving training using robotic simulators, and it may be an effective tool for simplifying robotic skill training.

Acknowledgement

The authors would like to thank all volunteers in this study. Kun YANG is supported by a fellowship provided by the China Scholarship Council for studies at Lorraine University, Nancy, France.

Reference:

1. Alemzadeh HRKI, Raman J. Safety implications of robotic surgery: analysis of recalls and adverse event reports of da Vinci surgical systems. The Society of Thoracic Surgeons 50th Annual Meeting; 2014; Orlando, Florida.
2. Bahler CD, Sundaram CP. Training in Robotic Surgery: Simulators, Surgery, and Credentialing. *Urol Clin North Am.* 2014;41(4):581-589.
3. Lee YL, Kilic GS, Phelps JY. Medicolegal review of liability risks for gynecologists stemming from lack of training in robot-assisted surgery. *J Minim Invasive Gynecol.* 2011;18(4):512-515.
4. Rafiq A, Moore JA, Zhao X, et al. Digital video capture and synchronous consultation in open surgery. *Ann Surg.* 2004;239(4):567-573.
5. Alam M, Nodzenski M, Yoo S, et al. Objective structured assessment of technical skills in elliptical excision repair of senior dermatology residents: a multirater, blinded study of operating room video recordings. *JAMA Dermatol.* 2014;150(6):608-612.
6. Hu Y, Tiemann D, Brunt LM. Video self-assessment of basic suturing and knot tying skills by novice trainees. *J Surg Educ.* 2013;70(2):279-283.
7. Carter SC, Chiang A, Shah G, et al. Video-based peer feedback through social networking for robotic surgery simulation: a multicenter randomized controlled trial. *Ann Surg.* 2015;261(5):870-887
8. Moglia A, Ferrari V, Morelli L, et al. A systematic review of virtual reality simulators for robot-assisted surgery. *Eur Urol.* 2015 Sept 30; [Epub ahead of print]. Accessed on 10/12/2015. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26433570>.

9. Liberman D, Trinh QD, Jeldres C, et al. Training and outcome monitoring in robotic urologic surgery. *Nat Rev Urol*. 2012;9(1):17-22.
10. Perrenot C, Perez M, Tran N, et al. The virtual reality simulator dV-trainer(®) is a valid assessment tool for robotic surgical skills. *Surg Endosc*. 2012;26:2587-2593.
11. Abboudi H, Khan MS, Aboumarzouk O, et al. Current status of validation for robotic surgery simulators—a systematic review. *BJU Int*. 2012;111:194-205.
12. Langhout R, Weber M, Tak I, et al. Timing characteristics of body segments during the maximal instep kick in experienced football players. *J Sports Med Phys Fitness*. 2015 Jul 1; [Epub ahead of print]. Accessed on 10/12/2015. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26129917>.
13. Guadagnoli M, Holcomb W, Davis M. The efficacy of video feedback for learning the golf swing. *J Sports Sci*. 2002;20(8):615-622.
14. Schwerdtfeger K, Wand S, Schmid O, et al. A prospective, blinded evaluation of a video-assisted '4-stage approach' during undergraduate student practical skills training. *BMC Med Educ*. 2014;14(1):104.
15. Birkmeyer JD, Finks JF, O'Reilly A, et al. Surgical skill and complication rates after bariatric surgery. *New Engl J Med*. 2013;369(15):1434-1442.
16. Wetzel CM, Kneebone RL, Woloshynowych M, et al. The effects of stress on surgical performance. *Am J Surg*. 2006;191(1):5-10.
17. Shamim Khan M, Ahmed K, Gavazzi A, et al. Development and implementation of centralized simulation training: evaluation of feasibility, acceptability and construct validity. *BJU Int*. 2013;111(3):518-523.
18. Agarwal R, Levinson AW, Allaf M, et al. The RoboConsultant: telementoring

and remote presence in the operating room during minimally invasive urologic surgeries using a novel mobile robotic interface. *Urology*. 2007;70(5):970-997.

19. Shin DH, Dalag L, Azhar RA, et al. A novel interface for the telementoring of robotic surgery. *BJU Int*. 2015;116(2):302-308.
20. Sturm LP, Windsor JA, Cosman PH, et al. A systematic review of skills transfer after surgical simulation training. *Ann Surg*. 2008;248:166–179.

Bilan de la partie III

Nous avons ajouté une alarme sur le SSP et prouvé qu'elle permet de créer un réflexe conditionné et d'accélérer la formation ergonomique. Cet entraînement permet aussi une meilleure courbe d'apprentissage.

- Nous avons aussi mis en place et validé le CESIR (SSP+Cameras) : Il s'agit d'un outil professionnel pour encadrer les étudiants et accélérer la formation à la technique robotique.

PARTIE IV

CONCLUSION ET FUTUR

*nous présentons les conclusions de toutes les
études et développons les perspectives.*

Chapitre IV: Synthèse des publications et applications potentielles

IV.1 – Synthèse des publications

Du point de vue technique, nous avons réussi à mettre en place le système de monitoring de l'ergonomie « SSP » basé sur les capteurs de pression, et dans un second temps nous avons développé le « CESIR », un outil pédagogique complet d'aide à la formation en chirurgie robotique.

Du point de vue scientifique, nous avons conçu l'algorithme de notation « ARL » spécifiquement développé pour le système « SSP », nous avons confirmé sa validité de construction (chapitre II) et avons testé sa courbe d'apprentissage (chapitre II). Nous avons ensuite démontré que l'ajout d'une alarme a permis d'accélérer la formation ergonomique (chapitre III).

Du point de vue pédagogique, nous avons intégré toutes les innovations ci-dessus « SSP, ALR » auxquelles nous avons associé un système de vidéo-monitoring filmant la gestuelle des mains et des pieds du chirurgien. Nous avons prouvé que la combinaison de toutes ces fonctions (CESIR) rendait la formation aux gestes de base en chirurgie robotique plus efficace qu'un enseignement traditionnel sur simulateur. Ces nouvelles fonctions facilitent également le travail de l'encadrant.

IV.2 – Applications potentielles et perspectives de collaboration franco-chinoise

La collaboration Nancy-Wuhan a débuté en 2001. Chaque année, une vingtaine d'étudiants de la filière francophone de Wuhan et l'hôpital Zhongnan viennent à Nancy pour des stages d'externe, de formation comme FFI ou une thèse de sciences

Comme membre de la première promotion, je dois remercier Monsieur le Professeur Jacques HUBERT, assesseur aux Relations Internationales à la Faculté de Médecine de Nancy et artisan de cette coopération initiée par le Professeur STOLTZ.



Figure 4-1 La première promotion de la filière francophone de Wuhan en septembre 2002 lors de la visite des enseignants nancéiens

IV.2.1 – Développement à venir de la plateforme « CESIR »

IV.2.1.1 – Développements techniques : automatisation de la plateforme « CESIR »

La détection des erreurs par le système de vidéo-monitoring est à l'heure actuelle manuelle. L'encadrant doit cliquer sur la souris pour marquer les erreurs critiques des étudiants et pouvoir les visionner lors du débriefing. On espère que cette procédure de détection des erreurs critiques sera automatisée dans le futur. Pour les étudiants expérimentés, la visualisation automatique des erreurs lors du débriefing permettra de focaliser leurs efforts sur les points à corriger.

De plus, le « CESIR » fonctionne actuellement comme un outil accessoire que l'on doit coupler à un simulateur « dV-Trainer » standard. Il n'y a aucune communication entre les logiciels du CESIR et du dV-Trainer et l'encadrant fait face à deux écrans de données. Une collaboration entre les développeurs du CESIR et les ingénieurs de la société MIMIC Technologies permettra de concevoir une plateforme commune intégrant tous les paramètres sur un seul écran.

IV.2.1.2 – Développements scientifiques : évaluation de l'intérêt pédagogique de la plateforme « CESIR »

Actuellement, il manque encore sur la plateforme « CESIR » un système de notation facile d'utilisation tel que l'algorithme « ARL » conçu pour le système « SSP ». Alors que l'ARL évaluait une seule donnée objective, la pression des avant-bras, le système de notation du CESIR devra inclure les notions d'ergonomie des mains et des pieds ainsi qu'une évaluation vidéo de la qualité du geste. Ce système de notation devra analyser automatiquement ou manuellement des données objectives et subjectives venant de plusieurs sources. Le système de notation « GEARS » (*Global Evaluative Assessment of*

Robotic Skills, (Fig.4-2) pourrait être une solution envisageable[35] et des travaux de recherche vont commencer sur ce sujet .

Depth perception				
1	2	3	4	5
Constantly overshoots target, wide swings, slow to correct		Some overshooting or missing of target, but quick to correct		Accurately directs instruments in the correct plane to target
Bimanual dexterity				
1	2	3	4	5
Uses only one hand, ignores nondominant hand, poor coordination		Uses both hands, but does not optimize interaction between hands		Expertly uses both hands in a complementary way to provide best exposure
Efficiency				
1	2	3	4	5
Inefficient efforts; many uncertain movements; constantly changing focus or persisting without progress		Slow, but planned movements are reasonably organized		Confident, efficient and safe conduct, maintains focus on task, fluid progression
Force sensitivity				
1	2	3	4	5
Rough moves, tears tissue, injures nearby structures, poor control, frequent suture breakage		Handles tissues reasonably well, minor trauma to adjacent tissue, rare suture breakage		Applies appropriate tension, negligible injury to adjacent structures, no suture breakage
Autonomy				
1	2	3	4	5
Unable to complete entire task, even with verbal guidance		Able to complete task safely with moderate guidance		Able to complete task independently without prompting
Robotic control				
1	2	3	4	5
Consistently does not optimize view, hand position, or repeated collisions even with guidance		View is sometimes not optimal. Occasionally needs to relocate arms. Occasional collisions and obstruction of assistant.		Controls camera and hand position optimally and independently. Minimal collisions or obstruction of assistant

GEARS

Fig. 4-2 GEARs : *Global Evaluative Assessment of Robotic Skills*

IV.2.1.3 – Développement pédagogique : mise en réseau de plusieurs CESIR et télé-enseignement dans le cadre d'une collaboration franco-chinoise

L'intérêt du CESIR dans un environnement local avec un encadrant pour un

novice étant démontré et la charge de travail pour l'encadrant étant nettement moins importante, il sera possible d'envisager un allègement de la supervision. Puisque le CESIR intègre toutes les informations nécessaires au novice pour progresser au sein d'un débriefing automatisé, la présence d'un formateur pour 2, 3, 4 ou 5 novices devient envisageable en mettant en réseau plusieurs CESIR.

On peut à terme imaginer l'utilisation à distance d'une plateforme CESIR pour un télé-enseignement sur internet offrant alors un remarquable outil de collaboration pédagogique entre la France et la Chine.



Fig. 4-3 Formation traditionnelle



Fig 4-4 Centre de contrôle de CESIR

IV.2.2– Applications du concept du CESIR à d'autres formations chirurgicales (exemple : coelioscopie, ...)

La chirurgie robotique en est seulement à ses débuts en Chine. Actuellement il y a 25 robots da Vinci® pour une population de 1.4 Milliard d'habitants. La majorité des chirurgiens pratiquent une chirurgie conventionnelle et laparoscopique. Dans mon hôpital, il n'y a pas encore de robot Da Vinci®, mais il est le centre de référence national pour la formation laparoscopique. En attendant l'installation du robot, il est possible de construire un centre de contrôle pour la formation laparoscopique selon le concept et la technologie utilisés pour le CESIR. Cela nécessitera des travaux pour adapter les technologies aux impératifs de la coelioscopie, par exemple les capteurs de pression seront remplacés par des capteurs surveillant la fatigue musculaire des bras, et le système de notation devra être revu et évalué. De nombreux travaux de recherche pourront être menés dans les années à venir autour de cette thématique de recherche pédagogique.

IV.2.3 - Réflexions sur la formation de technique robotique et la coopération franco-chinoise

IV.2.3.1 - Réflexions sur la formation à la technique robotique

La sécurité de patients et chirurgiens souligne l'importance de l'entraînement de chirurgiens robotiques. Jusqu'à maintenant, il n'y a pas encore de protocole standardisé pour la formation en chirurgie robotique : les FRS sont en cours d'élaboration aux USA ; en France, l'Académie Nationale de Chirurgie vient de publier des recommandations sur la formation en chirurgie robotique

http://www.academie-chirurgie.fr/recomm/formation_pratique_robots2015.pdf

La grande majorité des centres robotiques utilisent le protocole imposé par l'entreprise Intuitive Surgical (IS), qui est le fabricant du robot da Vinci®. Son protocole sépare la formation en deux étapes: entraînement pré-clinique (dans le centre de formation) et clinique (dans l'hôpital). L'entraînement pré-clinique inclut de la théorie, des exercices sur simulateur, puis dry lab et wet lab sur vrai robot, qui dure deux journées. Il n'y a pas ou peu d'évaluation des stagiaires. L'étape clinique est de visiter un hôpital utilisant la robotique et de participer à des opérations sous contrôle de professeur expérimenté (mais IS considère comme expérimenté après seulement 20 opérations). Du fait d'un coût extrêmement élevé, le temps d'entraînement est compressé, et le résultat n'est pas satisfaisant : les urologues sont "lâchés" seuls trop rapidement. Ainsi, la moitié des urologues peuvent être amenés à faire une prostatectomie radicale après seulement deux journées d'entraînement. Ceci peut expliquer que certains chirurgiens renoncent à la robotique et qu'en moyenne moins de 4 interventions par semaine soient réalisées sur chaque robot vendu par la société IS

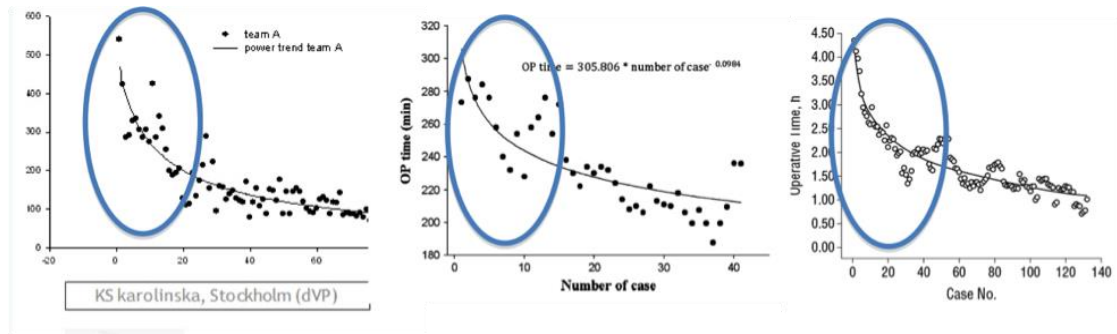


Figure 4-5. Les courbes d'apprentissage publiées en urologie (prostatectomie), chirurgie digestive (rectum), ORL (trans-orale)

Ce n'est pas suffisant pour apprendre à utiliser le robot sans avoir à réfléchir à chaque action : nous avons constaté qu'il faut au moins 20 heures de formation (simulateur, dry & wet lab) pour acquérir les réflexes d'utilisation du robot (c'est la même durée pour apprendre à conduire une voiture ou piloter un petit avion). Même un chirurgien laparoscopiste entraîné a besoin de cette formation. Il a même certains réflexes à "désapprendre" : on reconnaît tout de suite un chirurgien laparoscopiste quand il commence à travailler sur le simulateur dV-Trainer. Il faut une formation de "basic skills" qui a pour objectif de savoir utiliser le robot de façon réflexe, sans avoir à réfléchir et à pouvoir se concentrer sur la conduite d'une opération simple.

D'autre part, le système actuel ne concerne pas la formation de jeunes chirurgiens et étudiants à la faculté; il n'y a aucune formation au rôle de bed-side surgeon, alors qu'en chirurgie robotique l'assistant est beaucoup plus important qu'en chirurgie laparoscopique classique ou en open. Le chirurgien à la console ne communique avec son équipe que par voie "audio", alors qu'en chirurgie classique, 80% des informations passent par voie visuelle.

Enfin, pour les formations spécialisées :

Il y a besoin de formations spécifiques pour des opérations plus complexes. La formation doit être alors adaptée au niveau du chirurgien car un chirurgien qui a déjà effectué des dizaines de néphrectomies ou de prostatectomies en chirurgie ouverte ou laparoscopique va progresser beaucoup plus rapidement qu'un jeune chirurgien qui doit en même temps apprendre les différents temps opératoires.

IV.2.3.2 - Réflexions sur la coopération franco-chinoise

En se basant sur l'expérience du centre robotique de Nancy (depuis 12 ans) et du CESIR qui a été mis en place, une réflexion est en cours pour une nouvelle organisation de la formation de chirurgie robotique : « BUS ». Cet acronyme est composé de la première lettre de trois mots : B basic ; U, ultra ; S, super. Ils correspondent à trois étapes de formation de niveaux différents .

Ce travail a fait l'objet d'une publication, acceptée dans une des premières revues médicales chinoises.

IV.3 - Publication

IV.3.1- Article franco-chinois

Article en chinois, **accepté** le 02/02/2016 dans « *Chinese Medical Journal* »

The introduction of BUS system based on CESIR for robotic skill training

Auteurs:

YANG Kun^{1,2}, ZHANG Lin¹, WANG Xin Huan¹, HUBERT Jacques²

1. Department of Urology, Hopital de Zhong Nan, WuHan University, Wuhan, China

2. Department of Urology, Hopital of Brabois, University of Lorraine. Nancy, France.

Title: introduction of "BUS" method based on its supplementary system for robotic skill training

Abstract:

Objective: To investigate a new method adapted to the situation in china for robotic training.

Method: We presented a new system " BUS" according our experience in Nancy after a comprehensive analysis of actual situation for robotic training in the world.

Result: We had validated the synthetic control system for "BUS", which could significantly improve the training effect and ergonomic formation.

Conclusion: the "BUS" training system was effective and potential to be the standard of robotic training in China.

Key words: robotic training; robotic pedagogy;robotic training system;ergonomics

浅论基于机器人手术辅助培训系统的“BUS”培训体系

杨琨^{1,2} 张林¹ 王行环¹ Jacques HUBERT²(通讯作者)

作者单位: 1. 湖北省武汉大学中南医院泌尿外科(中)

2. 洛林大学附属 Brabois 医院泌尿外科(法)

杨琨受国家留学基金委资助赴法攻读博士学位(高水平大学研究生项目, 证书号 201208420599)

Kun YANG is supported by a fellowship provided by the China Scholarship Council for studies at Lorraine University - Nancy France. (Number: 201208420599)

随着机器人手术在全球范围内迅猛发展, 微创外科逐渐由普通腹腔镜时代过渡到机器人手术时代。由于对操作模式的不熟悉, 大部分的副损伤和手术并发症发生在术者学习曲线的初段。患者的生命安全和术者的职业安全凸显了手术机器人培训工作的重要性^[1,2,3]。但截至目前, 尚无公认的机器人操作培训标准^[4,5,6]。包括我国在内, 目前世界范围内绝大多数培训基地使用的是达芬奇系统生产厂家 Intuitive Surgical 公司的推荐标准, 其将培训分为临床前期培训(培训中心进行)和临床期培训(医院进行)。由于临床前期培训费用高昂, 必须压缩培训时间, 导致培训效果并不令人满意, 2天的模拟培训仅能保证50%的泌尿外科医生完成机器人辅助前列腺癌根治术^[7]。理想的培训体系应保证培训结果量化可控, 各培训阶段高效衔接, 和临床工作联系紧密, 多个机器人培训中心共同协作。同时, 应将低年资医生的培训纳入常规。本文将综合法国洛林大学机器人培训中心和我国机器人培训的现有经验^[8,9,10], 基于开发成功的机器人辅助培训系统, 探讨新的外科手术机器人培训体系。

1 机器人手术的特点

传统的手术布局(开放手术和腹腔镜手术)使主刀医生, 手术助手和器械护士之间可以有效沟通(图1)。手术机器人为“主-仆”系统, 该特点允许主刀医生在较远的地方甚至异地进行手术, 但也切断了主刀医生和患者之间的直接联系(图2)。

Table 4-1 BUS système de formation:

BUS système	Initiation & Bed-side	Ultra skills	Spécialisé
Sujets	internes/infirmières De toutes spécialités	Assistant/Chef Clinique et tous chirurgiens, de toutes spécialités	PH/PU-PH adapté à la spécialité
Objectif	Premier aide compétent Initiation à la console	Premier aide compétent & opérateur compétent / interventions simples sans danger /patient	Opérateur compétent interventions complexes
Contenu de formation	Théorie, exercices difficiles sur simulateur laparoscopique, simples sur dVT & complexes sur XTT	Théorie, Exercices compliqués sur simulateurs dVT & XTT, dry lab et wet lab sur vrai robot Observation de cas	Exercices spécifiques dVT wet lab sur vrai robot/opération complète sur cochon /observation d'opération

IV.3.2 - La coopération franco-chinoise

L'étape de formation "Basique" pourrait être réalisée à l'hôpital Zhongnan de Wuhan en Chine, et contrôlée avec CESIR par le centre de formation à Nancy. Les étapes "ultra" et "super" seraient faites à Nancy. Les deux hôpitaux partagent le même standard de formation.

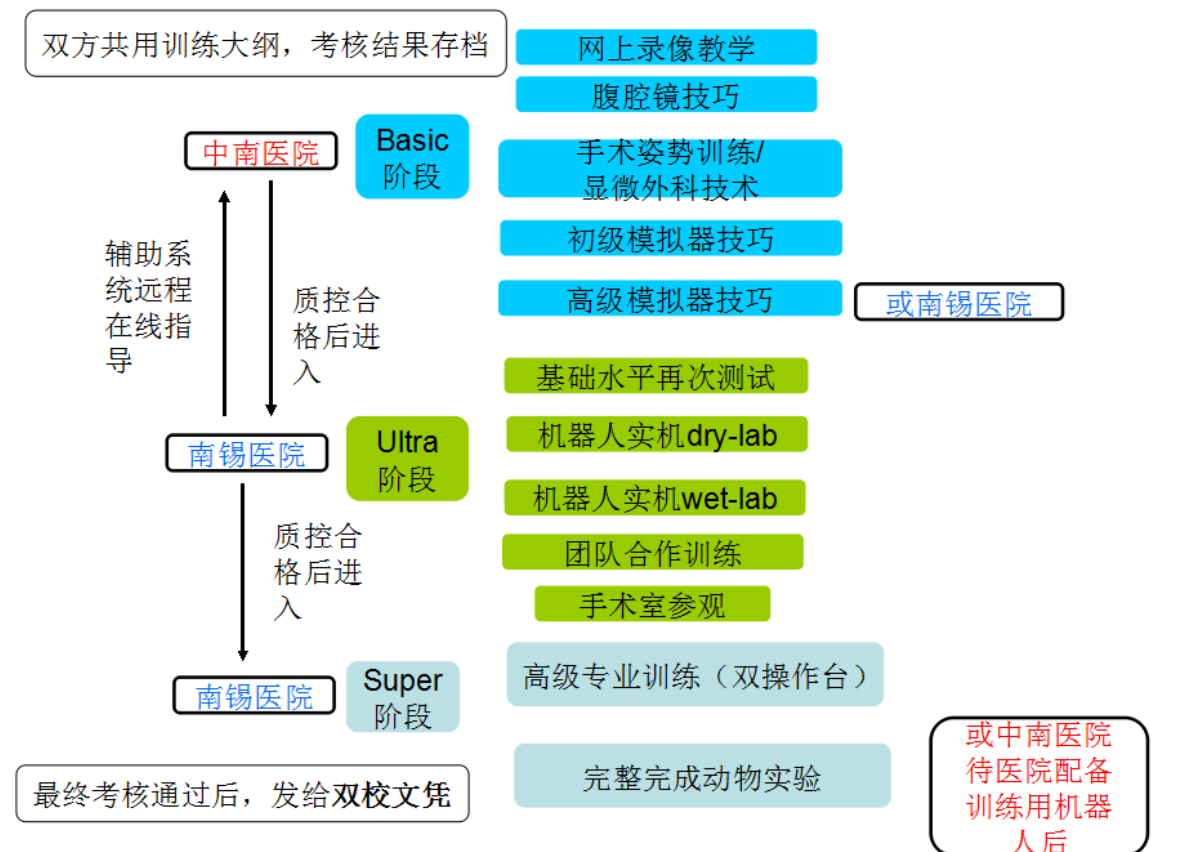


Fig. 4-6 La coopération de formation robotique Wuhan-Nancy

La formation à la chirurgie robotique vient de commencer en Chine. Comme thésard à Nancy, j'ai eu la chance de travailler avec le robot et de faire des recherches sur le simulateur.

C'est un grand honneur pour moi de partager cette expérience avec mes collègues chinois et de mettre en place la coopération pédagogique en chirurgie robotique franco-chinoise.

« la thèse est achevée, la collaboration franco-chinoise se poursuit et l'amitié continue »



Fig. 4-7 La médaille d'or des jeux olympiques de technique robotique Congrès SLS, Las Vegas 2014.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

non citées dans les différents articles

- [1] Oleynikov D. Robotic surgery. *Surg Clin North Am* 2008;88:1121–30, viii. doi:10.1016/j.suc.2008.05.012.
- [2]. Mendivil A, Holloway RW, Boggess JF. Emergence of robotic assisted surgery in gynecologic oncology: American perspective. *Gynecol Oncol* 2009;114:S24–31. doi:10.1016/j.ygyno.2009.02.002.
- [3] Intuitive Surgical - Investors - Investor Relations Home n.d. <http://investor.intuitivesurgical.com/phoenix.zhtml?c=122359&p=irol-irhome> (accessed Feb 11, 2016).
- [4] Diana M, Marescaux J. Robotic surgery. *Br J Surg* 2015;102(2):e15–28. doi:10.1002/bjs.9711.
- [5] Lee Y L, Kilic G S, Phelps J Y. Medicolegal review of liability risks for gynecologists stemming from lack of training in robot-assisted surgery[J]. *Journal of minimally invasive gynecology*, 2011, 18(4): 512-515.
- [6] Amodeo A, Linares Quevedo A, Joseph JV, Belgrano E, Patel HRH. Robotic laparoscopic surgery: cost and training. *Minerva Urol Nefrol.* 2009 61(2):121-128.
- [7] Berguer R, Forkey DL, Smith WD, The effect of laparoscopic instrument working angle on surgeons' upper extremity workload. *Surg Endosc* 2001 15:1027-1029
- [8] Emam TA, Hanna G, Cuschieri A. Ergonomic principles of task alignment, visual display, and direction of execution of laparoscopic bowel suturing. *Surg Endosc* 2002 16:267-271
- [9] Johnston WK, Hollenbeck BK, Wolf JS Jr. Comparison of neuromuscular injuries to the surgeon during hand-assisted and standard laparoscopic urologic surgery. *J Endourol* 2005 19:377-381
- [10] Berguer R, Rab GT et al . A comparison of surgeon's posture during laparoscopic and open surgical procedures. *Surg Endosc.* 1997 Feb; 11(2):139-142
- [11] Kaya OI, Moran M, Ozkardes AB, Taskin EY, Seker GE, Ozmen MM. Ergonomic problems encountered by the surgical team during video endoscopic

- surgery, *Surg Laparosc Endosc Percutan Tech.* 2008 Feb; 18(1):40-4.
doi:10.1097/SLE.0b013e3181569ee2
- [12] Miller K, Benden M, Pickens A, Shipp E, Zheng Q. Ergonomics principles associated with laparoscopic surgeon injury/illness. *Hum Factors.* 2012 Dec; 54(6): 1087-92
- [13] Park A, Lee G et al Patients benefit while surgeons suffer: an impending epidemic. *J Am Coll Surg.* 2010 210 306-313
10.1016/j.jamcollsurg.2009.10.017.Epub 2009 Dec 24
- [14] Jafri M, Brown S, Arnold G, Abboud R, Wang W. Energy consumption during simulated minimal access surgery with and without using an armrest. *Surg Endosc* 2013 27:971-977
- [15] Raffaele G et al. Can Armrests Improve Comfort and Task Performance in Laparoscopic Surgery. *Ann Surg.* 2006 Mar;243(3):329-33
- [16] Stefanidis D, Wang F et al. Robotic assistance improves intracorporeal suturing performance and safety in the operating room while decreasing operator workload. *Surg Endosc* 2010 24:377-382 doi:10.1007/s00464-009-0578-0
- [17] Hubert N, Gilles M, Desbrosses K, Meyer JP, Felblinger J, Hubert J Ergonomic assessment of the surgeon's physical workload during standard and robotic assisted laparoscopic procedures. *Int J Med Robot* 2013; 9: 142–147.
- [18] Lee GI, Lee MR, et al. Comparative assessment of physical and cognitive ergonomics associated with robotic and traditional laparoscopic surgeries *Surg Endosc* 2014 28:456-465 doi:10.1007/s00464-013-3213-z
- [19] Vapenstad C, Buzink SN. Procedural virtual reality simulation in minimally invasive surgery. *Surg Endosc* 2013;27:364–77.
doi:10.1007/s00464-012-2503-1.
- [20] Nagendran M, Gurusamy KS, Aggarwal R, Loizidou M, Davidson BR. Virtual reality training for surgical trainees in laparoscopic surgery. *Cochrane Database Syst Rev* 2013;8:CD006575. doi:10.1002/14651858.CD006575.pub3.
- [21] Abboudi H, Khan MS, Aboumarzouk O, Guru KA, Challacombe B, Dasgupta P, et al. Current status of validation for robotic surgery simulators—a systematic review. *BJU Int* 2013 111 194-205
- [22] RobotiX Mentor | Symbionix n.d.
<http://symbionix.com/simulators/robotix-mentor/> (accessed september 8, 2015).
- [23] Perrenot C, Perez M, Tran N, Jehl JP, Felblinger J, Bresler L, Hubert J. 2013. The virtual reality simulator dV-Trainer(®) is a valid assessment tool for robotic surgical skills. *Surg Endosc.* 26(9):2587-93.

- [24] Kenney PA, Wszolek MF, Gould JJ, Libertino JA, Moinzadeh A. 2009. Face, Content, and Construct Validity of dV-Trainer, a Novel Virtual Reality Simulator for Robotic Surgery. *Urology*. 73(6):1288-1292.
- [25] Sethi AS, Peine WJ, Mohammadi Y, Sundaram CP. 2009. Validation of a novel virtual reality robotic simulator. *J. Endourol*. 23(3):503-508.
- [26] Mimic Simulation Training modules n.d.
<http://www.mimicsimulation.com/products/dv-trainer/training-modules/> (accessed May 4, 2015).
- [27] Nisky I, Okamura AM, Hsieh MH. Effect of robotic manipulators on movements of novices and surgeons, *Surg Endosc* 2014 28 2145-2158 doi.10.1007/s00464-014-3446
- [28] Van der Schatte Olivier RH et al. Ergonomic, user comfort, and performance in standard and robot-assisted laparoscopic surgery., *Surg Endosc* 2009 23:1365-1371 doi 10.1007/s 00464-008-0184-6
- [29] Chandra V et al. A comparison of laparoscopic and robotic assisted suturing performance by experts and novices. *Surgery* 2010;147: 830-839
- [30] Wachs RA et al, Elementary Implantable Force Sensor: For Smart Orthopaedic Implants. *Adv Biosens Bioelectron*. 2013 Dec;2(4). pii: 12477.
- [31] Hou Wen-Sheng, et al, Design of a FSR—based apparatus for finger force measurement. *Transducer and Microsystem Technologie*
- [32] Langhout R, Weber M, Tak I, et al. Timing characteristics of body segments during the maximal instep kick in experienced football players[J]. *J Sports Med Phys Fitness*, 2015
- [33] Guadagnoli M, Holcomb W, Davis M. The efficacy of video feedback for learning the golf swing[J]. *Journal of sports sciences*, 2002, 20(8): 615-622.
- [34] Schwerdtfeger K, Wand S, Schmid O, et al. A prospective, blinded evaluation of a video-assisted '4-stage approach'during undergraduate student practical skills training[J]. *BMC Med Educ*, 2014, 14(1): 104.
- [35] Goh A C, Goldfarb D W, Sander J C, et al. Global evaluative assessment of robotic skills: validation of a clinical assessment tool to measure robotic surgical skills *J Urol*, 2012, 187(1): 247-252.

Développement et validation d'un système de monitoring de l'ergonomie pour la formation en chirurgie robotique

Ce travail de thèse suit une logique exposée dans trois chapitres, pour terminer par un exposé sur des applications futures.

La première partie fait l'inventaire des difficultés de l'apprentissage des habiletés de base de la chirurgie robotique, notamment dans ses aspects de l'exploitation des avantages ergonomiques. Elle se fonde notamment les travaux de master 2 des Docteurs N. Hubert et C.Perrenot auxquels l'auteur a participé. On conclut ainsi à la nécessité de développer un outil de monitoring de l'ergonomie plus efficace que celui existant sur les logiciels du simulateur dV-Trainer®.

La deuxième partie décrit la conception et la validation d'un système de capteurs de pression des avant-bras sur les appuis-bras de la console du robot et/ou des simulateurs (Système de Surveillance de Pression - SSP-). Il est créé le concept d'Armrest Load, formule plus efficace d'évaluation des performances des stagiaires en matière d'ergonomie que l'évaluation automatique par le simulateur.

La troisième partie décrit l'amélioration du système SSP via l'ajout de fonctions supplémentaires et leurs évaluations :

- une alarme informant l'étudiant des mauvaises positions. Ce système crée un réflexe conditionné, accélère l'utilisation ergonomique des appuis-bras du simulateur, mais également améliore les performances globales.
- des caméras et une interface, « Contrôleur d'Événement en Simulation Robotique » (CESIR), permettant au stagiaire de visionner à volonté et pour chaque exercice les vidéos de référence, celles avec les erreurs à éviter et ses propres performances. Ces techniques vidéo, largement répandues dans le milieu sportif sont utilisées pour la première fois en chirurgie et prouvent ici leur efficacité.

La partie « conclusion » synthétise les résultats de tout le travail de thèse et expose des perspectives d'amélioration du système CESIR et de son utilisation dans la poursuite de la collaboration franco-chinoise en formation robotique.

Mots-clés : Robot chirurgical, simulateur, robot da Vinci, dV-trainer, ergonomie, capteur de pression, enregistrement vidéo, pédagogie

Development of a new system for ergonomic evaluation and improvement of robotic surgery learning

This thesis is logically split into three chapters, concluding with a discussion on future applications.

The first part makes an inventory of the difficulties in learning the basic skills in robotic surgery, especially in the aspects of exploiting the ergonomic benefits. It relies in particular on the master degrees of Drs N. Hubert and C.Perrenot to which the author participated. It is concluded that there is a need to develop a more efficient monitoring tool for ergonomics than the existing software on the dV-Trainer® simulator.

The second part describes the design and validation of a system of forearms pressure sensors attached on the robot's console and/or simulator's armrests (SSP- Pressure Surveillance System). The concept of Armrest Load is created, a more effective formula for evaluating the trainees' performance in ergonomics than the automatic evaluation provided by the simulator.

The third part describes the improvement of the SSP system by adding additional functions and their evaluation:

- An alarm informing the student of bad positions. This system creates a conditioned reflex, speeds up the ergonomic use of armrests on the simulator, and also improves the overall performance.
- Cameras and a "Controller of Event in Robotic Simulation " (CESIR) interface, allowing the participant to view at will the reference video, the one with mistakes to avoid and the video of their own performances. This video technique is widely used in sports but is applied for the first time in surgery and proves its effectiveness.

The conclusion part summarizes the results of the whole thesis and outlines the possibilities for CESIR's improvement and its development in the French-Chinese collaboration in robotic training.

Keywords : surgical robot, simulator, da Vinci robot, dV-Trainer, ergonomics, pressure sensor, video recording, pedagogy