

Роль тактильной чувствительности в практическом обучении лапароскопической хирургии

М. Жу, С. Че, А. Деревьянко, Д.В. Джоунс, С.Д. Швайцберг и К.Л. Као

Отдел технического проектирования, Университет Тафтс, Медфорд, Массачусетс
 Отдел минимально-инвазивной хирургии, Медицинский центр Бет Израэль Деаконесс, Бостон, Массачусетс
 Отделение хирургии, Больница Кембриджского Альянса здравоохранения, Кембридж, Массачусетс

Реферат

Преимущества обратной тактильной связи в симуляторах лапароскопического тренинга обсуждаются в литературе. Существует гипотеза, что начинающий хирург не получает преимуществ от тактильной информации, особенно на начальных фазах освоения новых задач. Для исследования были взяты симуляторы ProMIS и MIST-VR, обеспечивающие тренинг в виртуальной реальности с обратной связью и без таковой соответственно. 20 студентов (по 10 на каждом симуляторе) в течение 3 недель отрабатывали навыки эндохирургического шва. Сравнение результатов показало, что на симуляторе с обратной тактильной связью студенты осваивают навык и достигают плато чуть быстрее, чем без тактильной функции. В целом, обучение с тактильной обратной связью лапароскопическому наложению шва значительно превосходит освоение навыка без осязательных ощущений, но только в первые пять часов тренинга.

Ключевые слова: обратная тактильная связь, симуляционный тренинг эндохирургии, виртуальный симулятор

Лапароскопическая хирургия имеет ряд важных преимуществ перед открытой хирургией. Они включают минимизацию травматических повреждений тканей, сокращение периода реабилитации пациента и срока его пребывания в больнице, и, следовательно, уменьшение затрат на лечение. Во многих случаях предпочтение отдается данному методу, а не открытой хирургии.

Вместе с тем применение данного метода сопряжено со значительными трудностями для хирургов, такими как ограниченный обзор зоны оперативного вмешательства, потеря восприятия глубины, обусловленная применением двухмерного дисплея, фулькрум-эффект (влияние точки опоры при манипуляции инструментом), искажение тактильной чувствительности, объясняемое опосредованной манипуляцией с помощью длинного инструмента, а также маскирующий эффект резиновых уплотнений трюкаров [1, 2]. Необходимо много тренироваться для того, чтобы адаптироваться к данным ограничениям в лапароскопической хирургии.

Effect of Haptic Feedback in Laparoscopic Surgery Skill Acquisition

M. Zhou*, S. Tse*, A. Dereviako[^], D.B. Jones[^], S.D. Schwartzberg[#], and C. G. L. Cao*

*Mechanical Engineering Dept, Tufts University, Medford, MA

[^]Minimally Invasive Surgery Division, Beth Israel Deaconess Medical Center, Boston, MA

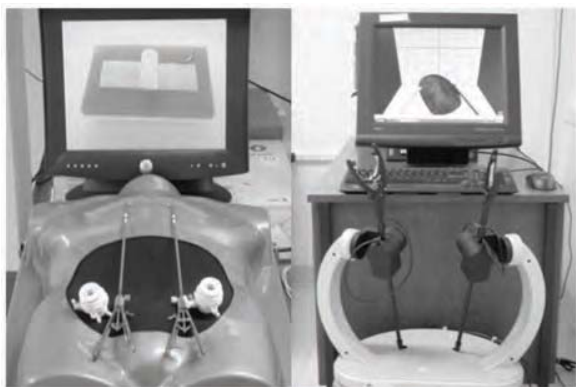
[#]Surgery, Cambridge Health Alliance Hospital, Cambridge, MA

The benefits of haptic feedback in laparoscopic surgery training simulators is a topic of debate in the literature. It is hypothesized that novice surgeons may not benefit from the haptic information, especially during the initial phase of learning a new task. Therefore, providing haptic feedback to novice trainees in the early stage of training may be distracting and detrimental to learning. The ProMIS and the MIST-VR surgical simulators were used to represent conditions with and without haptic feedback, respectively. Twenty novice subjects (10 per simulator) were trained to perform suturing and knot-tying and practiced the tasks over eighteen one-hour sessions. At the end of the 3-week training period, subjects performed equally fast but more consistently with haptics (ProMIS) than without (MIST-VR). Subjects showed slightly higher learning rate and reached the first plateau of the learning curve earlier with haptic feedback. In general, learning with haptic feedback was significantly better than without haptic feedback for a laparoscopic suturing and knot-tying task, but only in the first 5 hours of training.

В последнее время изменился метод отработки навыков в хирургии. По практическим и этическим причинам возрастающую роль начали играть инновационные технологии, такие как хирургические симуляторы и симуляторы виртуальной реальности [3, 4]. Тем не менее, достоверная имитация остается идеалом, к достижению которого стремится инженерное сообщество, а применение симуляторов в качестве инструментов для отработки навыков – эмпирическим вопросом для преподавателей. Несмотря на то, что отработка навыков на симуляторах с базовым уровнем реалистичности привела к существенному повышению уровня подготовки, который был продемонстрирован в операционной [3,5], большинство полагает, что реалистичные симуляции с многосенсорной обратной связью, включающей в себя тактильную чувствительность, могли бы обеспечить более эффективную отработку навыков, и, в итоге, лучшие результаты [6].

Роль тактильной чувствительности представляет особый интерес в хирургии, так как является критическим фактором при распознавании

нормальной и патологической ткани, идентификации органов, а также регуляции моторики. В лапароскопической хирургии тактильная чувствительность значительно снижена, так как исследование выполняется при помощи ригидного эндоскопа [7-13]. Специалисты в области хирургии пришли к единому мнению о том, что тактильная чувствительность необходима при оперативных вмешательствах, поэтому учебно-тренировочный лапароскопический коробочный тренажер имеет преимущество перед системами виртуальной симуляции реальности при отработке навыков наложения лапароскопических швов, так как виртуальные симуляторы недостаточно реалистичны и не обеспечивают тактильную чувствительность в полной мере [14]. Обратная связь по усилию может улучшить качество роботизированного завязывания узлов при наложении тонкого шва [15], уменьшить прилагаемые усилия и количество случайных захватов деликатных структур, а также сократить срок выполнения задания, сделать шов более прямым [16]. Однако обратная связь не оказала положительного результата на скорость и аккуратность диссекции [17].



Лапароскопические хирургические симуляторы: ProMIS (слева) и MIST-VR (справа).

Ряд исследований, проведенных с целью изучения роли тактильной чувствительности в обучении хирургическим навыкам, привел к неоднозначным результатам. Одно из исследований показало, что внедрение тактильной чувствительности на раннем этапе привело к улучшению показателей при выполнении диатермических операций [18].

Другие исследования показали, что кривая освоения навыков, демонстрирующая скорость выполнения задачи, достигла стабильно максимальной высоты после трех упражнений, однако показатели точности не стабилизировались и после десяти упражнений на лапароскопическом коробочном тренажере [19]. Значительное улучшение качества выполнения интракорпоральных узлов наблюдалось после

первого упражнения, а последующие десять упражнений привели к дальнейшему усовершенствованию [20]. Анализ двух других кривых, отображающих результаты отработки навыков, где курсанты использовали виртуальный симулятор MIST-VR, показал, что отработка навыков на протяжении 5-дневного периода привела к значительному улучшению качественных показателей [21], а переменные показатели качества достигли максимального значения и стабилизировались к пятой тренировочной сессии [22]. Однако, что касается завязывания узлов, различия между качественными показателями их выполнения на симуляторе MIST-VR и лапароскопическом коробочном тренажере были незначительными во всех сессиях [23].

В обзорной статье из авиационной учебно-тренировочной литературы [24] говорится о том, что незначительные раздражители, исходящие от максимально точно имитирующего реальность симулятора, могут затруднить выполнение задачи, и курсант должен был учиться игнорировать эти раздражители. Так как обучающие хирургические симуляторы, используемые в настоящее время, характеризуются низкой степенью визуальной и ситуационной реалистичности (т.е. использование графических сфер для имитации ткани), внедрение тактильной чувствительности может стать отвлекающим фактором для начинающего курсанта [25]. Данные кривой обучения показали, что симуляторы оказались наиболее эффективным средством обучения на раннем этапе [27], поэтому начинающие курсанты - хирурги представляют основную целевую группу обучения с использованием симуляторов [26]. Именно по этой причине необходимо выяснить, какие преимущества несет с собой раннее внедрение тактильной чувствительности.

Мы предположили, что 1) курсанты, которые выполняли упражнения с использованием тактильной чувствительности, будут более успешными на всем этапе обучения, чем те, которые отработывали навыки, не имея тактильной чувствительности, и 2) курсанты, обладавшие тактильной чувствительностью во время тренировок, первыми продемонстрируют стабильно высокие результаты на кривой обучения, а также будут более успешными в обучении, чем те, которые были лишены тактильной чувствительности во время тренировок.

Методы

Участники

В данном эксперименте принимали участие двадцать выпускников и курсантов (6 участников женского пола и 14 участников мужского пола), не имеющие опыта выполнения лапаро-

скопических вмешательств. Из них девятнадцать испытуемых были правшами, и один – амбидекстр. Возраст испытуемых составил от 21 до 34 лет.

Оборудование

Данное исследование проводилось на базе двух хирургических симуляторов, MIST-VR и ProMIS. MIST-VR - это виртуальный тренажер, не обеспечивающий тактильную чувствительность, а ProMIS – это тренажер с технологией виртуально дополненной реальности, обеспечивающей тактильную чувствительность, похожую на ту, что присутствует в реальных хирургических вмешательствах. Тренажер MIST-VR состоит из следующих компонентов: компьютер, монитор, набор лапароскопических инструментов, а также фантом торса натуральной величины с осветительным элементом и тремя встроенными камерами.

Процедура эксперимента

На тренажерах MIST-VR и ProMIS выполнялось наложение лапароскопических швов и завязывание узлов. Упражнение включало в себя выполнение при помощи двух иглодержателей двух морских полу-узлов с одной петлей, образующих полноценный морской узел. На тренажере MIST-VR наложение швов на органе проводилось в условиях отсутствия тактильной чувствительности. На тренажере ProMIS испытуемые накладывали шов на дренаж Пенроуза, прикрепленный к блоку системы ProMIS, в условиях тактильной чувствительности. И виртуальный орган, и дренаж Пенроуза имели заранее отмеченные точки для входа и выхода иглы.

Перед началом исследования все испытуемые прошли вводный курс продолжительностью в один час, который включал в себя краткий обзор лапароскопической хирургии, а также демонстрацию открытого и лапароскопического хирургических вмешательств в исполнении профессионального хирурга. После окончания вводного курса испытуемые отрабатывали навыки в течение одного часа в день, шесть дней в неделю, на протяжении трех недель подряд, что в сумме составило 18 тренировочных сессий. Во время сессий продолжительностью в один час испытуемые попытались завязать столько узлов, сколько возможно. Испытуемые, которые справлялись с заданием, получали дальнейшие инструкции. В конце каждого испытания испытуемым сообщались результаты. На тренажере ProMIS параметры оценки включали в себя время, затраченное на выполнение задачи, траекторию хода и плавность движения инструмента; на тренажере MIST-VR параметры оценки включали в себя время, затраченное на выполнение задания, допущенные ошибки, а также общий балл.

План эксперимента и полученные данные

Испытуемых разделили на две группы: тех, кто выполнял задания в условиях тактильной чувствительности, и тех, кто выполнял задания в условиях отсутствия тактильной чувствительности. Каждая группа состояла из десяти испытуемых. Испытуемые, выполняющие задание в условиях тактильной чувствительности, использовали тренажер ProMIS, вторая группа испытуемых, работающая в условиях отсутствия тактильной чувствительности, работала на тренажере MIST-VR. Узел на шве считался успешно выполненным, если он представлял собой полный узел (два морских полу-узла, завязанных в разных направлениях) и находился в обозначенных точках начала и окончания шва.

Анализ полученных результатов

Индивидуальная кривая обучения зафиксировала время, затраченное каждым их испытуемых на выполнение задания. Каждая группа испытуемых подверглась однофакторному дисперсионному анализу с целью исследования эффекта проведения тренировочных сессий. Кроме того, на основе полученных результатов был проведен сравнительный анализ различий между первой и всеми последующими сессиями, а также между последней и предыдущими сессиями с использованием критерия Шеффе.

Скорость обучения была рассчитана с помощью следующего уравнения:

$$Y_x = KX^N$$

Скорость обучения: 2N

Y_x: время выполнения следующего экспериментального модуля X

K: время, затраченное на первый экспериментальный модуль

N: экспонент, показывающий степень скорости обучения (2N)

X: количество экспериментальных модулей

Сравнение скорости обучения в двух группах было выполнено с помощью однофакторного дисперсионного анализа. Были выполнены тесты на основе двустороннего критерия Стьюдента, сравнивающие время выполнения заданий, колебания в скорости выполнения заданий в каждой сессии, а также выявляющие лучший скоростной результат по двум группам за одну сессию. Время, затраченное на выполнение каждого шва, а также различия по времени выполнения заданий во время сессии также подверглись анализу в ходе теста Стьюдента.

Результаты

Кривая обучения

Каждая индивидуальная кривая обучения была построена с учетом среднего времени выполнения задания каждым испытуемым, вычисленного на основе сессий с 1 до 18. Среднее значение времени, затраченного на наложение шва и завязывание узла, вычислено на основе сессий 1-18. Сессия показала, что значительный эффект был достигнут в обеих группах (Группа с тактильной чувствительностью, $F(17, 1226) = 38,8$, $p < .001$; группа без тактильной чувствительности, $F(17, 2737) = 65,2$, $p < .001$). Значительные различия были замечены между показателями сессии 1 и показателями всех последующих сессий в каждой группе ($p < .001$), что свидетельствует о том, что освоение навыков имело место в первой сессии.

В группе, работавшей без тактильной чувствительности, существенные различия в показателях имели место между сессиями 1-5 и последней сессией (сессия 18), тогда как в группе, работавшей в условиях тактильной чувствительности, существенные различия в показателях имели место между сессиями 1-4 и последней сессией. Таким образом, в группе испытуемых, лишенных тактильной чувствительности, стабильно высокие показатели были достигнуты к шестой сессии, в то время, как в группе испытуемых с тактильной чувствительностью, такие показатели были достигнуты к пятой сессии, то есть ранее.

При сравнении скорости обучения группы испытуемых без тактильной чувствительности и группы с тактильной чувствительностью, однофакторный дисперсионный анализ показал отсутствие существенных различий в целом, $F(1, 18) = 4,02$, $p < .061$. Группа с тактильной чувствительностью продемонстрировала несколько более высокую скорость обучения (70% против 64% в группе без тактильной чувствительности), которая была зафиксирована соответствующей кривой, а также меньшим количеством сессий, которые потребовались для достижения стабильно высоких результатов. На графике показано временное процентное соотношение (сессия 1 представляет собой 100%) каждой сессии в группе с тактильной чувствительностью и в группе без тактильной чувствительности.

Время, затраченное на выполнение задания

Парное сравнение индивидуальных кривых показало значительно более быстрое выполнение задания в условиях тактильной чувствительности на протяжении 18 сессий, $t(179) = -2,1$, $p < .04$.

Каждый узел, выполненный во время тренировки (618 – максимальное количество узлов, выполненных испытуемым, 200 – среднее значение), требовал от испытуемых примерно одинакового количества времени и в тех, и в других условиях, $F(1, 4165) = 0,20$, $p < .653$ (на графике показаны первые 182 узла). В каждой сессии лучший результат в группе испытуемых с тактильной чувствительностью был выше, чем в группе без тактильной чувствительности, $t(179) = -2,8$, $p < .006$.

Колебания показателей

Колебания во времени, затраченном на выполнение заданий в каждой сессии, в группе без тактильной чувствительности отмечались значительно чаще, чем в группе с тактильной чувствительностью, $F(1, 341) = -8,31$, $p < .004$. Однако не наблюдалось существенных различий между временем, затраченным отдельными испытуемыми на выполнение каждого узла, в группе без тактильной чувствительности от испытуемых в группе с тактильной чувствительностью, $F(1, 611)$, $p < .457$.

Обсуждение

Результаты исследования подтвердили гипотезу о том, что тактильная чувствительность может способствовать ускорению наложения шва и завязывания узлов во время обучения лапароскопическим вмешательствам, однако этот эффект имеет место только на протяжении первых пяти часов обучения. Стандартной мерой освоения навыков является степень изменчивости показателей в период обучения; уменьшение степени изменчивости показателей во время сессий свидетельствует о стабилизации отрабатываемых навыков по мере того, как показатели становятся более устойчивыми. В данном эксперименте тактильная чувствительность позволяет курсантам стабилизировать свои навыки в ранние этапы обучения, немного быстрее обучаться, что показывает более короткая кривая обучения.

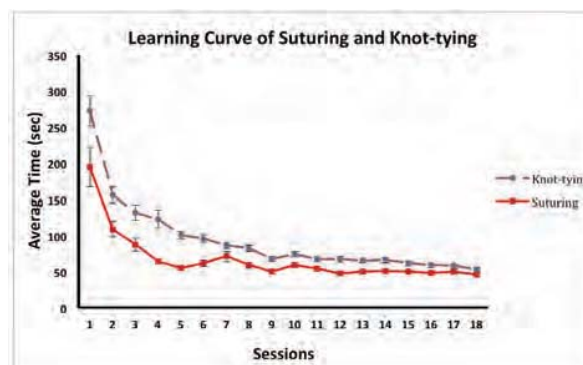
Испытуемые демонстрировали преимущества тактильной чувствительности на раннем этапе обучения, особенно во время первых двух тренировочных сессий. Во время последующих сессий, кривые обучения в группе с тактильной чувствительностью и группе без тактильной чувствительности совпадают. Предположительно, это результат того, что впервые ознакомившись с инструментом, а затем с заданием, при выполнении которого наличие тактильной чувствительности обеспечивает дополнительное преимущество, испытуемые концентрировались на отработке моторики во время наложения шва и завязывания узлов, заданиях, которые в первую очередь требуют

координации движений рук и перемещений инструмента. Наложение шва и завязывание узла являются сложными хирургическими манипуляциями, требующими точной ориентации и контроля инструментов, иглы, нити и ткани. Ряд критических моментов и движений при наложении шва и завязывании узлов включает в себя ориентацию иглы перед протыканием ткани, поворот иглодержателя для формирования петли и затягивание узла. Данный эксперимент показывает, что, для того, чтобы убедиться в надежности узла, испытуемые предпочитали ориентироваться на визуальную обратную связь, а не только на тактильную чувствительность. Более раннее исследование показало, что информация, полученная оператором тактильным путем, может дезориентировать курсанта во время обучения сложным хирургическим задачам, в которых наиболее важное значение имеет точность движений [1].



Среднее время на завершения задачи.

При наложении шва и завязывании узла на первый план выходят такие навыки, как ориентация, позиционирование и точное владение инструментом, а контроль усилия и эластичность тканей отходят на второй план. Становится очевидным, что на качество наложения шва и завязывания узла не оказывает существенного влияния наличие или отсутствие тактильной обратной связи. В действительности, при осмотре швов и узлов, выполненных отдельно в двух фазах в условиях тактильной чувствительности, наблюдались значительные различия между сессиями 1 – 3 и последней сессией (сессия 18) в фазе наложения шва, при этом заметные различия в показателях присутствовали между сессиями 1 - 6 и последней сессией в стадии завязывания узла. В стадии наложения шва качественные показатели достигли стабильно максимального значения к сессии 4, при этом в стадии завязывания узла качественные показатели достигли такой же характеристики к сессии 7. Данное открытие позволяет предположить, что тактильная обратная связь является более важным критерием при наложении шва, чем при завязывании узла, которое требует лучшей координации движений и контроля усилия.



Кривые обучения наложения швов и завязывания узлов. Строки содержат стандартные ошибки.

Average time (sec) – среднее значение скорости (сек)
 Knot-tying – завязывание узла
 Suturing – наложение шва
 Sessions - сессии

Несмотря на то, что преимущества тактильной обратной связи на раннем этапе обучения не носят выраженного характера, кривая обучения курсантов, обучавшихся в условиях тактильной чувствительности, была более короткой. И наоборот, курсанты, обучавшиеся в условиях отсутствия тактильной чувствительности, демонстрировали значительно более нестабильные качественные показатели на протяжении первых нескольких сессий. Также наблюдалась большая разница ($t(179) = 6.4, p < .001$) в количестве узлов, выполненных в каждой сессии обеими группами. В связи с вышесказанным, представляется целесообразным вложение средств в лапароскопические тренажеры с тактильной обратной связью, в условиях, когда стабильные качественные показатели играют важную роль во время обучения, или ограничено время обучения (если время обучения или рабочие часы курсантов ограничены). Тренажер с тактильной обратной связью обеспечивает большую реалистичность, что делает обучение более комфортным с первых этапов обучения, и приводит к более скорой стабилизации качественных показателей, представленной кривой обучения. Учитывая тот факт, что выраженность преимуществ тактильной чувствительности зависит от характера поставленной задачи, техническое обеспечение и финансовые инвестиции во внедрение тактильной чувствительности в хирургические тренажеры могут быть неоправданными, если курсант проявляет недостаточное усердие в ходе обучения. Настоящий эксперимент показывает, что задачи наложения шва и завязывания узла лапароскопическим инструментом предъявляют более высокие требования к координации моторики, в отличие от более ранних исследований, ставивших задачей взятие проб ткани, в которых более важное значение приобретал контроль усилия.

Одним из факторов, ограничивающих значение настоящего эксперимента, является то, что не проводилась оценка пост-учебного периода на базе независимой хирургической практики. Такая оценка позволила бы сделать выводы относительно эффекта тактильной обратной связи на стабилизацию практических навыков и их перенос в условия операционной.

Выводы

В целом, тактильная чувствительность повышает качественные показатели в лапароскопической хирургии. Кроме того, она способствует освоению сложных хирургических навыков, таких, как наложение шва и завязывание узла на начальном этапе обучения. Результаты данного эксперимента показывают, что тактильная чувствительность не может, безусловно, присутствовать на хирургических тренажерах всех этапов обучения. Преимущества более быстрой стабилизации максимально высоких качественных показателей и достижение более высокого уровня освоения навыков на раннем этапе должны быть сопоставлены с затратами на приобретение тренажеров, оснащенных функцией тактильной чувствительности.

Благодарность

Данное исследование проводилось при поддержке Национального Научного Фонда Карьеры (IIS-038284) и Американского Исследовательского Общества Эндоскопической Хирургии в Гастроэнтерологии (SAGES).

Список литературы

1. Picod G, Jambon AC, Vinatier D, Dubois P. What can the operator actually feel when performing a laparoscopy? *Surg Endosc.* 2005; 19:95–100. [PubMed: 15772876]
2. Perreault JO, Cao CGL. Effects of Vision and Friction on Haptic Perception. *Hum Factors.* 2006;48(3):574–86. [PubMed: 17063970]
3. Seymour NE, Gallagher AG, Roman SA, O'Brien MK, Bansal VK, Anderson DK, Satava RM. Virtual reality training improves operating room performance. *Ann Surg.* 2002; 236:458–464. [PubMed: 12368674]
4. Sutherland LM, Middleton PF, Anthony A, Hamdorf J, Cregan P, Scott D, Maddern GJ. Surgical simulation - A systematic review. *Ann Surg.* 2006; 243:291–300. [PubMed: 16495690]
5. Grantcharov TP, Kristiansen VB, Bendix J, Bardram L, Rosenberg J, Funch-Jensen P. Randomized clinical trial of virtual reality simulation for laparoscopic skills training. *Brit J Surg.* 2004; 91:146–150. [PubMed: 14760660]
6. Lathan, CE.; Tracey, MR.; Sebrechts, MM.; Clawson, DM.; Higgins, GA. Using virtual environments as training simulators: measuring transfer. In: Stanney, KM., editor. *Handbook of virtual environments: design, implementation, and applications.* Lawrence Erlbaum Associates; Mahwah, NJ: 2002. p. 414-434.
8. Lederman SJ. The perception of surface roughness by active and passive touch. *B Psychonomic Soc.* 1981; 18:253–255.
9. Lederman SJ. Tactual roughness perception: Spatial and temporal determinants. *Can J Psychology.* 1983; 37:498–511.
10. Srinivasan, M.; LaMotte, R. Tactual discrimination of softness: abilities and mechanisms. In: Franzen, O.; Johansson, R.; Terenius, L., editors. *Somesthesia and the neurobiology of the somatosensory cortex.* Birkhauser Verlag; Berlin: 1996. p. 123-136.
11. Lederman SJ, Klatzky RL. Haptic identification of common objects: Effects of constraining the manual exploration process. *Percept Psychophys.* 2004; 66:618–628. [PubMed: 15311661]
12. Klatzky RL, Lederman SJ, Hamilton CL, Grindley M, Swendsen RH. Feeling textures through a probe: Effects of probe and surface geometry and exploratory factors. *Percept Psychophys.* 2003;65:613–631. [PubMed: 12812283]
13. Brydges R, Carnahan H, Dubrowski A. Surface exploration using laparoscopic surgical instruments: The perception of surface roughness. *Ergonomics.* 2005; 48:874–894. [PubMed:16076743]
14. Botden SMBI, Torab F, Buzink SN, Jakimowicz JJ. The importance of haptic feedback in laparoscopic suturing training and the additive value of virtual reality simulation. *Surg Endosc.* 2007; 22:1214–1222. [PubMed: 17943369]
15. Kitagawa M, Dokko D, Okamura AM, Yuh DD. Effect of sensory substitution on suture manipulation forces for robotic surgical systems. *J Thorac Cardiovasc Sur.* 2005; 129:151–158.
16. Moody L, Baber C, Arvanitis TN. Objective surgical performance evaluation based on haptic feedback. *Stud Health Technol Inform.* 2002; 85:304–310. [PubMed: 15458106]
17. Wagner, CR.; Stylopoulos, N.; Howe, RD. The Role of Force Feedback in Surgery: Analysis of Blunt Dissection. *Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Tele operator System (HAPTICS'02);* 2002. p. 68-74.
18. Strom P, Hedman L, Sarna L, Kjellin A, Wredmark T, Felander-Tsai L. Early exposure to haptic feedback enhances performance in surgical simulator training: a prospective randomized crossover study in surgical residents. *Surg Endosc.* 2006; 20:1383–1388. [PubMed: 16823652]
19. Smith CD, Farrell TM, McNatt SS, Metreveli RE. Assessing laparoscopic manipulative skills. *Am J Surg.* 2001; 181:547–550. [PubMed: 11513783]
20. O'Connor A, Schwaizberg SD, Cao CGL. How much feedback is necessary for learning to suture? *Surg Endosc.* 2007; 22(7):1614–1619. [PubMed: 17973165]
21. Kothari SN, Kaplan BJ, DeMaria EJ, Broderick TJ, Merrell RC. Training in laparoscopic suturing skills using a new computer-based virtual reality simulator (MIST-VR) provides results comparable to those with an established pelvic trainer system. *J Laparoendosc Adv S.* 2002; 12:167–173.
22. Gallagher AG, Satava RM. Virtual reality as a metric for the assessment of laparoscopic psychomotor skills. *Surg Endosc.* 2002; 16:1746–1752. [PubMed: 12140641]
23. Pearson AM, Gallagher AG, Rosser JC, Satava RM. Evaluation of structured and quantitative training methods for teaching intra corporeal knot tying. *Surg Endosc.* 2002; 16:130–137. [PubMed: 11961623]
24. Champion, HR.; Higgins, GA. Meta-analysis and planning for SIMTRAUMA: medical simulation for combat trauma. U.S. Army Medical Research and Materiel Command; Fort Detrick, MD: 2000. Zhou et al. Page 7 *Surg Endosc.*
25. Cao CGL, Zhou M, Jones DB, Schwaizberg SD. Can surgeons think and operate with haptic at the same time? *J Gastrointest Surg.* 2007; 11:1564–1569. [PubMed: 17710503]
26. Hassan I, Maschuw K, Rothmund M, Koller M, Gerdes B. Novices in surgery are the target group of a virtual reality training laboratory. *Eur Surg Res.* 2006; 38:109–113. [PubMed: 16699284]
27. Aggarwal R, Black SA, Hance JR, Darzi A, Cheshire NJW. Virtual reality simulation training can improve inexperienced surgeons' endovascular skills. *Eur J Vasc Endovasc.* 2006; 31:588–593.
28. Konz, S.; Johnson, S. *Work Design Industrial Ergonomics* Holcomb Hathaway. Scottsdale, AZ:2000.