

Методика позиционирования хирургической системы смешанной реальности

А. Мадалиев¹, В.М. Иванов¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, 195251, Россия

Аннотация

Целью работы является представление особенностей собственной новой методики позиционирования хирургической системы смешанной реальности. В статье описан процесс работы с системой от этапа предоперационного сканирования до послеоперационного сканирования пациента. Выделены потенциальные источники ошибок позиционирования, описаны конструкторские и программные подходы по уменьшению их влияния: реализация единства расположения маркеров, исполнения маркеров. Описан применяемый способ оценки величины совокупной ошибки позиционирования. В результате реализации этих подходов на практике обеспечена величина совокупной ошибки позиционирования менее 2 мм, выполнено более 80 успешных операций. Данная величина ошибки позиционирования является достаточной для большинства хирургических операций, но неприемлема в нейрохирургии. Исследование может быть полезно для совершенствования подобных систем, а также при проектировании систем смешанной реальности в других областях науки.

Ключевые слова

Позиционирование, ошибки позиционирования, дополненная реальность, смешанная реальность, маркер, хирургия.

Mixed Reality Surgical Navigation Method

A. Madaliev¹, V.M. Ivanov¹

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya, 29, St.Petersburg, 195251, Russia

Abstract

The aim of the study is to present the features of our own new mixed reality surgical navigation method. The paper describes the workflow from the stage of preoperative patient scanning to postoperative patient scanning. Potential sources of positioning errors are identified, design and software approaches to reduce their impact are described: the implementation of the unity of the location of markers, the execution of markers. The applied approach for estimating the cumulative positioning error is described. As a result of the implementation of these approaches in practice, the value of the total navigation error was less than 2 mm, and more than 80 successful operations were performed in this way. This value of navigation error is sufficient for most surgical operations, but is unacceptable in neurosurgery. The study can be useful for improving similar systems, as well as for designing mixed reality systems in other scientific fields.

Keywords

Navigation, navigation errors, augmented reality, mixed reality, marker, surgery.

ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

EMAIL: madaa258@mail.ru (А. Мадалиев); voliva@rambler.ru (В.М. Иванов)

ORCID: 0000-0002-1512-3746 (А. Мадалиев); 0000-0001-8194-2718 (В.М. Иванов)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

1. Введение

В настоящее время наблюдается экспоненциальный рост научных исследований, касающихся применения систем дополненной и смешанной реальности в медицине [1]. Наиболее многообещающим является применение смешанной реальности в точных хирургических операциях [2]. Продолжающийся рост числа исследований научных групп в России (Medgital Vision, Autoplan) и за рубежом (Brainlab, Medtronic, Stryker, Augmedics xvision) свидетельствует о продолжающемся поиске оптимальных подходов к решению практических задач хирургии.

Целью данной работы является презентация методики позиционирования хирургической системы смешанной реальности Medgital Vision, основанной на собственных разработках и опыте научных конкурентов.

Представляемая методика позволяет обеспечить точность позиционирования до 2 мм, аналогичную системам основных научных конкурентов Autoplan и Brainlab, и сопоставимую с точностью манипуляций хирурга без использования систем смешанной реальности (0,5...3 мм по собственным оценкам). При этом основным преимуществом системы Medgital Vision является вывод виртуальных изображений непосредственно в операционную зону через очки дополненной реальности с привязкой к объектам реального мира, а не на экран. В результате этого сокращается вероятность рассеивания внимания хирурга во время операции, отсутствует необходимость в дополнительном крупногабаритном оборудовании в ограниченном пространстве операционной комнаты, сокращается время подготовки к операции, снижается стоимость системы. Данные преимущества позволили успешно выполнить уже более 80 различных операций с применением смешанной реальности [3].

Ожидается, что представленные здесь решения и подходы повысят доверие к разрабатываемой системе, а также внесут вклад в ускорение внедрения систем смешанной реальности в хирургическую практику в целом. Кроме того, это исследование может быть полезно при проектировании систем смешанной реальности в других областях науки.

2. Методика позиционирования

В данной работе под позиционированием системы смешанной реальности подразумевается процесс сопряжения виртуальных объектов, воспроизводимых системой, с объектами реального мира. При этом для работы с системой смешанной реальности необходимо не только предварительное позиционирование с достаточной точностью, но и адекватное непрерывное позиционирование во время всей операции [4].

Под методикой позиционирования подразумевается совокупность способов и приёмов проведения полного цикла работ с системой, а также решения конкретных задач обеспечения точности позиционирования.

2.1. Рабочий процесс

Системы смешанной реальности в общем, и хирургические системы смешанной реальности в частности, должны обладать совокупностью компонентов, выполняющих следующие функции: передача информации о расположении реальных объектов, приём этой информации, обработка этой информации, визуализация объектов дополненной реальности в сопряжении с реальными объектами. В настоящее время в хирургических системах смешанной реальности наиболее перспективен подход, при котором приём информации, её обработка и визуализация выполняются с помощью очков дополненной реальности, включающих в себя различные датчики (инфракрасные датчики, камеры глубины, и т.п.), встроенный процессор и полупрозрачный дисплей [5]. Визуализация трёхмерных моделей анатомических структур выполняется через очки дополненной реальности в виде голограмм, сопряжённых с объектами реального мира. Передача информации о расположении объектов реального мира

осуществляется с помощью различных маркеров - искусственных (в основном, оптических), закрепляемых на теле пациента, или анатомических [6].

Разработанная хирургическая система смешанной реальности Medgital Vision также использует очки дополненной реальности и оптические маркеры, закрепляемые с помощью специальных вспомогательных устройств на теле пациента (рисунок 1).



Рисунок 1 – Компоненты хирургической системы смешанной реальности Medgital Vision: очки дополненной реальности и оптический маркер, закрепленный на теле пациента с помощью специального вспомогательного устройства

Процесс работы с данной системой состоит из следующих этапов:

1. Предоперационное сканирование пациента с использованием рентгеноконтрастных меток.
2. Обработка полученных медицинских изображений стандарта DICOM и построение виртуальных объектов на их основе: объемная реконструкция анатомии пациента, построение сечений и интеграция в специализированную программную среду 3D Slicer, назначение маркеров.
3. Передача данных на очки дополненной реальности.
4. Предоперационное позиционирование системы смешанной реальности.
5. Непрерывное позиционирование во время всей операции.
6. Послеоперационное сканирование и контроль.

2.2. Обеспечение точности позиционирования

Исходя из области применения, наиболее острой проблемой является обеспечение точности позиционирования рассматриваемой системы. При этом существует большое количество потенциальных источников ошибок позиционирования:

- Ошибки предоперационного расположения маркеров;
- Ошибки предоперационного совмещения объектов по маркерам;
- Ошибки из-за перемещения маркеров во время операции;
- Ошибки распознавания маркеров датчиками и др.

Для оценки величины совокупной ошибки позиционирования при работе с системой и без неё использовались: собственный калибровочный стенд, имеющий 3 плоскости с масштабной сеткой, образующие координатный угол; виртуальная трёхмерная модель головы и реальный макет головы, изготовленный по этой же трёхмерной модели с помощью аддитивных технологий (рисунок 2). Отслеживание положения испытательной модели и инструмента выполнялось с помощью оптических маркеров инфракрасного света в виде сфер диаметром 11 мм и оптических инфракрасных камер OptiTrack Flex 3 с разрешением сенсора 640x480 пкс и с частотой 100 кадр/с. Первоначальной установкой инструмента в заданную точку проводилась калибровка систем координат. После чего на каждой из трёх координатных плоскостей в дополненной реальности визуализировались точки в предварительно заданном положении относительно виртуальной модели головы. Используя очки дополненной реальности определялось расстояние между действительными точками на макете и виртуальными, для удобства обозначенными разными цветами. Устанавливая инструмент в эти точки, проводилось сравнение смещения заданного положения от полученного в очках дополненной реальности, и вычислялось усреднённое значение отклонения по серии измерений. Величина расчётной ошибки позиционирования корректировалась с учётом влияния ошибок измерения.

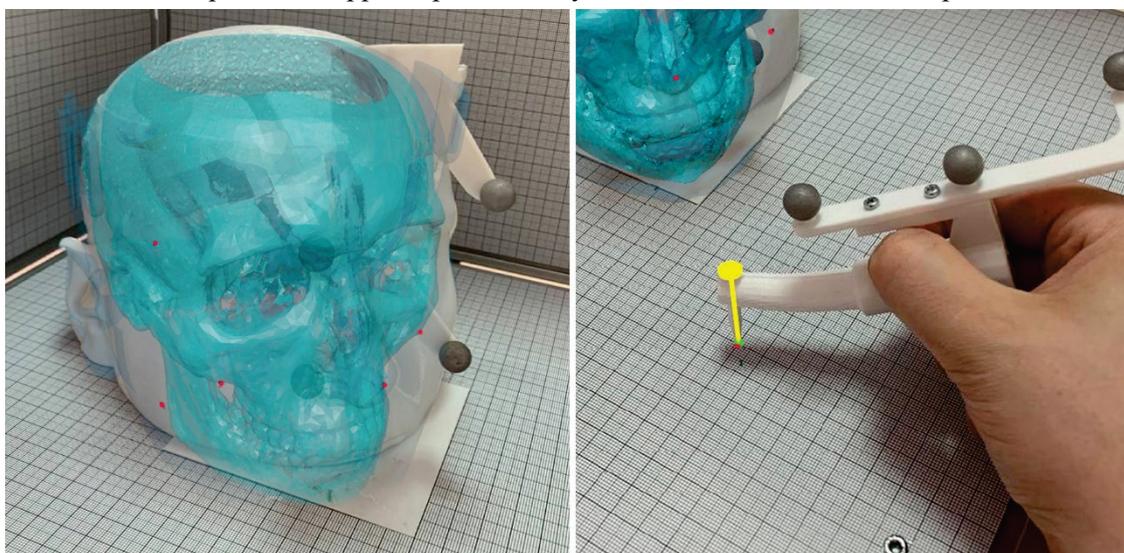


Рисунок 2 – Определение величины совокупной ошибки позиционирования

Для уменьшения влияния потенциальных источников ошибок был разработан ряд конструкторских и программных решений. Например, для обеспечения единства расположения маркеров на теле пациента во время сканирования, предоперационного позиционирования, позиционирования во время всей операции и послеоперационного сканирования реализован один и тот же способ базирования на теле пациента - с помощью неподвижных анатомических ориентиров (таких как совокупность переносицы и ушных отверстий во время операций челюстно-лицевой хирургии) [7] или же с помощью неподвижно закреплённых постоянных магнитов, когда предыдущий вариант нереализуем. Во втором варианте магниты с клеевым слоем устанавливаются на теле пациента с помощью специальной ориентирующей рамки и неподвижно закрепляются с помощью тонкой полимерной плёнки. Специальные сменные рамки с рентгеноконтрастными метками или оптическими маркерами устанавливаются по этим же магнитам на всех последующих этапах работы (предоперационное сканирование, предоперационное позиционирование, позиционирование во время операции, послеоперационное сканирование), обеспечивая постоянство расположения маркеров с отклонениями менее 1 мм (рисунок 3). В случае применения системы в абдоминальных операциях, когда подвижность мягких тканей приводит к перемещению закреплённых на них маркеров в процессе операции, реализован вариант закрепления маркера с помощью костного штифта на кости.

Рисунок 3 – Установка сменной рамки системы Medgital Vision на теле пациента:

- 1 - жёсткий полимерный корпус; 2 - встроенный в корпус магнит;
3 - закреплённый на теле пациента магнит с клеевым слоем; 4 - полимерная плёнка

Более того, благодаря реализованной унификации, предоставляется возможность использования оптических маркеров как видимого спектра, так и инфракрасного света. При этом при использовании оптических маркеров инфракрасного света сокращается номенклатура необходимых вспомогательных устройств - поскольку инфракрасные маркеры являются рентгеноконтрастными и могут применяться и при сканировании. Таким образом, в зависимости от требований точности и условий эксплуатации можно реализовать преимущества обоих оптических методов позиционирования [8].

Программные решения направлены на сокращение ошибок распознавания маркеров датчиками, стабильного позиционирования изображений виртуальных объектов в условиях существующих аппаратных ограничений. Для определения положения оптических маркеров видимого спектра в пространстве на них имеется рисунок в виде контрастного изображения асимметричной формы, легко различимый на фоне любых окружающих объектов. Рисунок выполнен на плоской поверхности 80x80 мм, поскольку именно такая форма позволяет ему находиться в поле зрения хирурга на протяжении всей операции. Варианты выполнения рисунка на трёхмерных объектах (таких как куб и т.п.) или на более маленьких площадках приводили к потере изображения датчиками при больших углах наклона изображения относительно датчиков очков дополненной реальности.

Кроме того, выбранные очки дополненной реальности Microsoft HoloLens 2 позволяют отслеживать положение маркера даже при потере части характеристических точек изображения. Это реализовано благодаря встроенному программному обеспечению Vuforia Engine [9]. С помощью него было реализовано сопоставление воспроизводимого текущего виртуального изображения с предыдущими кадрами, и в случае потери видимости части характеристических точек - достраивание изображения по фрагментам предыдущих кадров. Трансляция при этом происходит непрерывно и объекты виртуальной реальности плавно вращаются и перемещаются в пространстве, даже в случае резких поворотов головы хирурга. Однако после таких движений необходимо убедиться в стабилизации изображения, потому что алгоритмы сглаживания в динамическом процессе вносят дополнительную ошибку позиционирования.

На основе Vuforia Engine также создавалось изображение на маркере. Подобные изображения можно разместить на различных сменных рамках и использовать как маркеры для позиционирования системы относительно пациента во время операции и для отслеживания положения хирургического инструмента (рисунок 4).

Реализация же оптического метода инфракрасного спектра демонстрировала более высокую точность позиционирования, но при этом была более требовательна к оборудованию из-за использования внешних камер. При этом процесс программирования системы был усложнён из-за более низкого уровня программирования, а сама система оказалась очень чувствительной к освещению и помехам от отражающих глянцевых поверхностей в рабочей зоне.

3. Результаты и обсуждение

Приведённые конструкторские и программные решения и подходы обеспечивают единство расположения маркеров во время всего процесса работы с системой смешанной реальности,

уменьшая отклонения положения маркеров от этапа к этапу; обеспечивают надёжное распознавание и отслеживание маркеров очками дополненной реальности до и во время операции. Адаптивность методики наиболее полно реализует преимущества оптических методов позиционирования инфракрасного и видимого света в зависимости от требований точности и области применения системы.



Рисунок 4 – Маркеры с контрастными асимметричными рисунками системы Medgital Vision, расположенные на теле пациента (слева) и на хирургическом инструменте (справа)

Вышеперечисленные факторы позволяют уменьшить влияние основных источников ошибок позиционирования до величины совокупной ошибки позиционирования менее 2 мм. Данная система благодаря своей гибкости успешно протестирована уже в более чем 80 различных операциях [3].

Несмотря на то, что количественное сопоставление суммарной точности позиционирования рассматриваемой системы с аналогами было бы не корректно из-за различий в способах её оценки, остаётся возможным сопоставление с точностью позиционирования с использованием и без использования системы смешанной реальности (0,5...3 мм по собственным оценкам).

Однако, поскольку точность операции сильно зависит от расположения маркеров, во время операции может потребоваться дополнительная корректировка позиционирования системы, связанная с возможными перемещениями мягких тканей пациента, особенно у пациентов с избыточным весом [2].

При этом интерпретация достаточности точности системы зависит от области её применения: для проведения большинства хирургических операций ошибка позиционирования 2-3 мм является допустимой, но является неприемлемой в нейрохирургии [10].

4. Заключение

Таким образом, в работе представлена методика позиционирования хирургической системы смешанной реальности: описан процесс и особенности работы с данной системой исходя из локализации её применения. Подробно раскрыты факторы, влияющие на точность позиционирования, описан применяемый способ оценки точности позиционирования, используемые конструкторские и программные решения для уменьшения влияния источников ошибок. Оговорены ограничения применения данной методики в текущем состоянии.

5. СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Virtual and augmented reality applications in medicine: Analysis of the scientific literature / A. W. Yeung, A. Tosevska, E. Klager, F. Eibensteiner, D. Laxar, J. Stoyanov, M. Glisic, S. Zeiner, S. T. Kulnik, R. Crutzen, O. Kimberger, M. Kletecka-Pulker, A. G. Atanasov, H. Willschke // *Journal of Medical Internet Research*. 2021. № 2. Vol. 23.
- [2] Augmented reality: Mapping methods and tools for enhancing the human role in Healthcare HMI / C. Innocente, L. Ulrich, S. Moos, E. Vezzetti // *Applied Sciences*. 2022. № 9. Vol. 12. P. 4295.
- [3] Иванов В.М., Кащенко В.А. Технологии дополненной реальности – это будущее хирургии // *Кто есть Кто в медицине*. 2023. №1 (119). С. 28–29.
- [4] Registration Technology of Augmented Reality in Oral Medicine: A Review / J. Jiang, Z. Huang, W. Qian, Y. Zhang, Y. Liu // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. PP. 53566–53584.
- [5] Mixed reality with HoloLens / O. M. Tepper, H. L. Rudy, A. Lefkowitz, K. A. Weimer, S. M. Marks, C. S. Stern, E. S. Garfein // *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2017. № 5. Vol. 140. PP. 1066–1070.
- [6] The application of navigation system based on augmented reality head-mounted devices in spine surgery / P. Zhang, H. Liu, H. Li, J. J. Wang // *Neuroscience Informatics*. 2022. № 2. Vol. 2. P. 100076.
- [7] Designing an adjustable head frame for surgery using mixed reality technology HoloLens 2 / V. Ivanov, A. Krivtsov, S. Strelkov, N. Kalakutskiy, A. Yaremenko // *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*. 2021. № 5. Vol. 38.
- [8] Optical and electromagnetic tracking systems for biomedical applications: A critical review on potentialities and limitations / A. Sorriento, M. B. Porfido, S. Mazzoleni, G. Calvosa, M. Tenucci, G. Ciuti, and P. Dario // *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2020. Vol. 13. PP. 212–232.
- [9] Developing Vuforia Engine Apps for HoloLens [Электронный ресурс]: сайт. – URL: <https://library.vuforia.com/platform-support/developing-vuforia-engine-apps-hololens> (дата обращения: 15.07.2023).
- [10] Registration techniques for clinical applications of three-dimensional augmented reality devices / C. M. Andrews, A. B. Henry, I. M. Soriano, M. K. Southworth, J. R. Silva // *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*. 2021. Vol. 9. PP. 1–14.