

Стереорентгеновская навигация в хирургии

Аннотация

Представлены результаты разработки аппаратно-программных средств навигации хирургических инструментов во время малоинвазивных операций с использованием стереоскопического рентгеновского изображения.

Разработанная система стереорентгеновской навигации обеспечивает возможность наблюдения трехмерных медицинских изображений прямо во время хирургических операций, при диагностике скрытых по глубине патологий или нарушений структуры органов и тканей пациента, что существенно сокращает время проведения операции.

Автоматическая обработка трехмерного рентгеновского изображения обеспечивает наведение медицинского инструмента внутри тела пациента по глубине, положению и ориентации в режиме реального времени.

Технология стереорентгеновской навигации может быть использована для модернизации стандартного рентгеновского оборудования, в том числе рентгеновских хирургических аппаратов типа С-дуги («Аркоскоп»).

Актуальность стереорентгеновского контроля во время операции

Известные рентгено-телевизионные аппараты типа «Аркоскоп» (С-дуга) позволяют синтезировать компьютерное трехмерное изображение. Такие аппараты существенно расширяют диагностические возможности, однако время компьютерного синтеза трехмерного изображения составляет 15...30 с и более [1].

Компьютерные томографические исследования обычно выполняются до начала хирургического вмешательства. Во время операции трехмерные томографические изображения успешно используются для планирования манипуляций, однако не обеспечивают возможности оперативно корректировать положение инструмента относительно зоны интереса [2].

Для наведения хирургического инструмента при проведении операции используют медицинские навигационные системы, например фирмы «BRAINLAB», позволяющие контролировать положение и ориентацию инструмента по маркерам, закрепленным на внешней стороне инструмента [3]. Однако для точного наведения инструмента в заданную точку приходится использовать различного рода фиксаторы на конечностях и голове пациента [4], [5]. Двухканальные рентгеновские системы с двумя рентгеновскими излучателями для получения стереорентгеновских изображений не нашли широкого применения,

главным образом из-за высокой стоимости, больших габаритов и массы [6]. Одноканальная рентгенотелевизионная аппаратура занимает меньше пространства в зоне операции, не ограничивает возможности доступа врача к пациенту.

Известные технологии не обеспечивают достаточной надежности и точности наведения хирургического инструмента для малоинвазивных операций. Во время манипуляции без прямого визуального наблюдения за положением инструмента приходится рассчитывать только на опыт и ощущения хирурга, что требует от врача высокого напряжения и не всегда приводит к успеху [7].

При использовании традиционных методик двух рентгеновских проекций (прямой и боковой) врач мысленно представляет пространственное положение и ориентацию инструмента относительно зоны интереса, что не всегда обеспечивает требуемую точность манипуляций. Во многих случаях хирург вынужден проводить открытую операцию вместо малоинвазивного малотравматичного вмешательства [8].

Основная задача проекта состояла в том, чтобы на основе современной информационной технологии анализа рентгеновских изображений создать систему трехмерного рентгеновского контроля с широкими диагностическими возможностями, в том числе путем модернизации серийно выпускаемого рентгеновского оборудования.

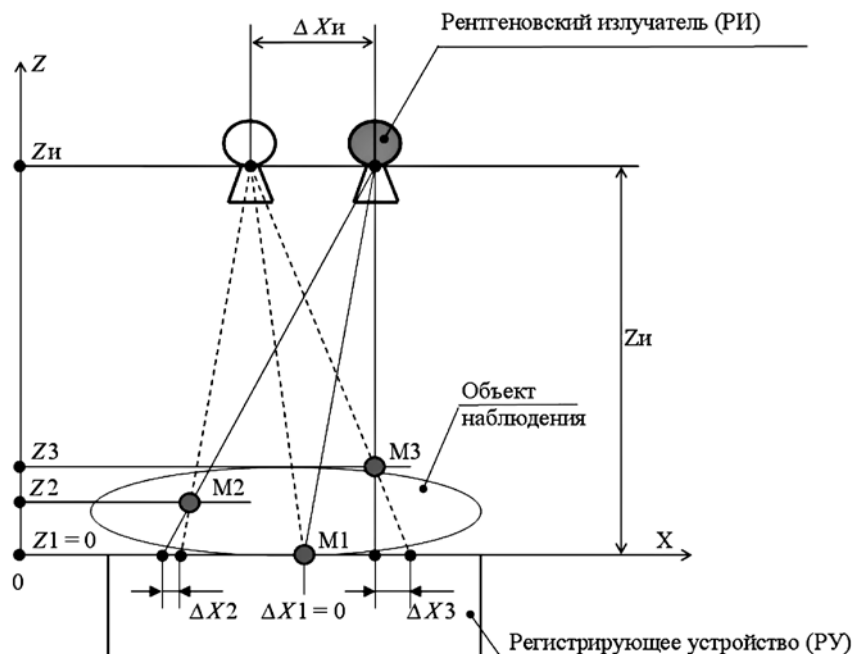


Рис. 1. Общая схема расчета трехмерных координат навигации по стереорентгеновским изображениям

Автоматическая стереорентгеновская навигация в хирургии

Технология стереорентгеновской навигации, реализованная в аппаратно-программных средствах системы стереорентгеновской навигации, основана на автоматическом анализе рентгеновских изображений, получаемых в скопическом режиме в режиме реального времени. Стереорентгеновское изображение формируется по двум рентгеновским изображениям, получаемым для двух позиций рентгеновского аппарата; автоматически выполняется точный расчет положения и ориентации инструмента относительно заданной точки в зоне интереса внутри тела пациента. Время синтеза стереорентгеновского изображения составляет 0,1...0,2 с [9].

Общая схема автоматического получения и расчета трехмерных координат хирургического инструмента, используемая при рентгеновской навигации, показана ниже на *рис. 1*. При смещении рентгеновского излучателя (РИ) на расстояние ΔX и рентгеновские изображения точек M1, M2, M3 объекта контроля (О), находящихся на разной дальности от регистрирующего устройства (РУ), смещаются на расстояния ΔX_1 , ΔX_2 , ΔX_3 , соответственно [10].

Были исследованы различные способы автоматического измерения взаимного положения и ориентации хирургического инструмента, в том числе с использованием специальных маркеров или реперов, селекцией характерных точек (признаков), а также при использовании поля векторов движения без распознавания каких-либо признаков формы объекта.

В последнем случае параметры движения (скорость, направление) и пространственные градиенты распределения векторов скорости определяются, например, с использованием пространственного спектра изображения объекта, в данном случае рентгеновского, обрабатываемого с помощью специализированного процессора и программного обеспечения (см. *рис. 2*).

Погрешность автоматического измерения положения инструмента относительно зоны интереса, как показали предварительные исследования, определяется главным образом смещением органов пациента во время хирургических манипуляций.

Поэтому для точного определения положения и ориентации инструмента предложен алгоритм автоматического анализа рентгеновских изображений искусственных и естествен-



Рис. 2. Обработка и визуализация стереорентгеновских изображений во время операции

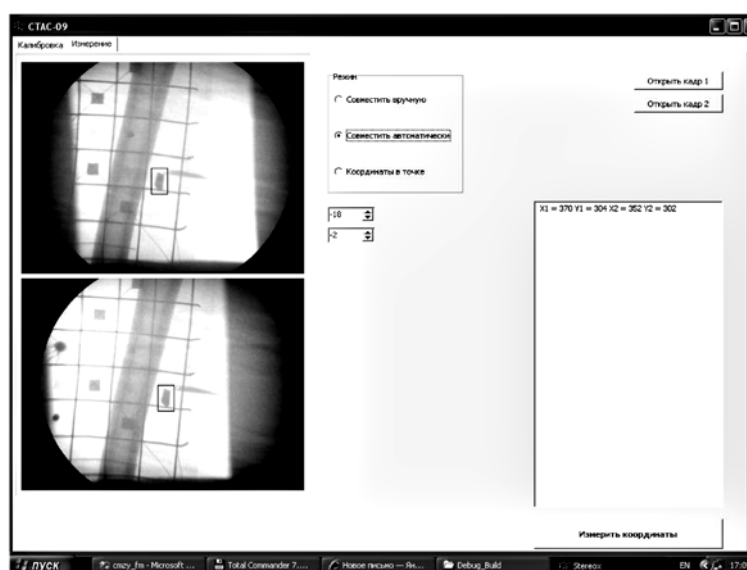


Рис. 3. Экранное «меню» программы расчета координат по стереорентгеновским изображениям

ных маркеров (характерных признаков) инструмента и зоны интереса.

Измерение координат рентгеновского изображения маркеров выполняется с повышенной, «субпиксельной» точностью. В результате по контрастному рентгеновскому изображению вычисляются координаты характерных точек естественных и искусственных маркеров с погрешностью порядка 0,1 от размера элемента изображения (пикселя).

Общий вид экранного «меню» программы для автоматического расчета координат и углов ориентации медицинского инструмента относительно зоны интереса показан на *рис. 3*. Выполняется расчет координат и углов поворота (φ_z и φ_y) по изображению, а также расчет углов конвергенции (φ_x) для двух позиций рентгеновского аппарата на основе соотношений, изложенных в [11].

Автоматическое слежение за положением объекта компенсирует изменение дистанции до объекта и возможные смещения относительно центра зоны интереса во время операции. Выделение зоны интереса при слежении за изображением выполняется с использованием предикции по трехмерной модели, особенно в случае смещения или потери изображения во время произвольного движения пациента.

Малоинвазивные операции с применением стереорентгеновской навигации

Система стереорентгеновской навигации позволяет точно позиционировать медицинский инструмент по глубине относительно локальной зоны органа пациента, при этом снижает-

ся степень риска операционного вмешательства, расширяются возможности и перечень проводимых современных операций.

Применение стереорентгеновской навигации целесообразно во всех случаях проведения операций, когда положение медицинского инструмента, например кончика иглы, является определяющим моментом для воздействия на патологический очаг – там, где необходима четкая координация по времени и пространству тонких движений рук хирурга под контролем зрения, причем как в плоскости, так и в глубину.

Наглядными примерами эффективного применения системы являются следующие малоинвазивные вмешательства [12]–[16]:

- транскutánная литонезфрoлапаксия, где пусковым моментом эффективного удаления камней является чрескожная пункция контрастированной чашечно-лоханочной системы;
- пункционная декомпрессия и лазерная вапоризация грыж межпозвонковых дисков, где обязательной является точная локализация кончика иглы в центре пульпозного ядра, а затем, по показаниям, установка иглы таким образом, чтобы кончик ее находился ровно между задним краем замыкательных пластин позвонков и секвестром;
- пункционная цементная вертебропластика, когда эффективное и безопасное цементирование патологической зоны в первую очередь зависит от точности расположения кончика иглы в ее центре;
- военно-полевая хирургия, удаление инородных тел (*рис. 4*).

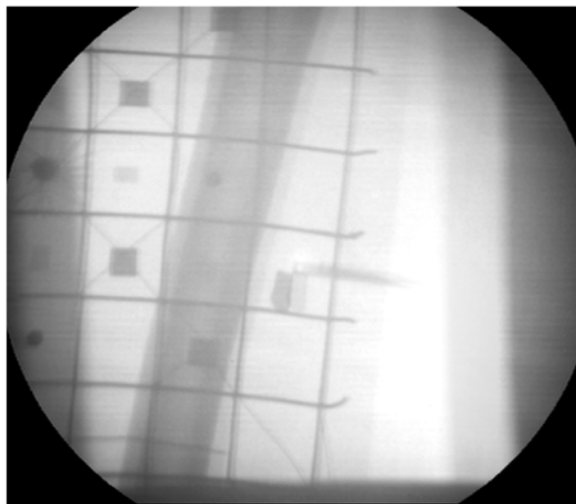


Рис. 4. Пример стереорентгеновского изображения (анаглическая пара) во время малоинвазивной операции извлечения инородного тела

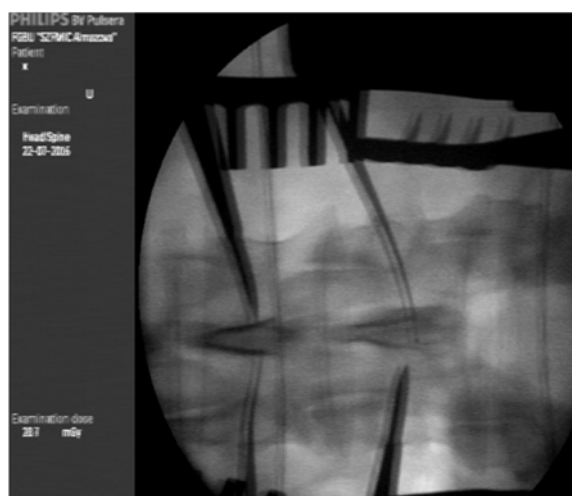


Рис. 5. Пример стереорентгеновской визуализации дужек позвонка

Разработанная медицинская методика может применяться, как показали предварительные исследования, в частности, при остеосинтезе и репозиции костных отломков, при стабилизирующих операциях на позвоночнике с использованием металлоконструкций (рис. 5), а также при других малоинвазивных вмешательствах [17].

Возможно эффективное сочетание медицинских систем навигации инструмента (например, фирмы «BRAINLAB») со стереорентгеновской навигацией, например для исключения использования фиксаторов на голове и теле пациента.

Метод стереорентгеновского контроля хирургических манипуляций за счет наглядного и естественного восприятия зоны интереса имеет ряд преимуществ:

- сокращается время операции, повышается шанс успешного ее выполнения;
- одновременно снижается лучевая нагрузка на пациента и персонал;
- расширяются возможности выполнения малоинвазивных операций во многих клиниках;
- облегчается процесс обучения сложным операциям для молодых врачей-хирургов.

Состав оборудования стереорентгеновской навигационной системы

Предусмотрена возможность использования системы стереорентгеновской навигации для модернизации имеющегося в медицинских учреждениях отечественного и импортного оборудования, в том числе с применением современной техноло-

гии телемедицины. Общая схема модернизации стандартного палатного рентгеновского аппарата типа «С-дуга» показана на рис. 6.

В состав базового комплекта системы стереорентгеновской навигации входят следующие устройства:

- блок обработки трехмерных изображений (БОИ);
- стереопроекционная система (СПС) для наблюдения трехмерных рентгеновских изображений;
- речевое командное устройство (РКУ) и пульт дистанционного управления (ПДУ);
- блок сопряжения с рентгенотелевизионной аппаратурой (С-дугой);
- специализированное программное обеспечение (СПО).

Наблюдение стереорентгеновских изображений может выполняться на мониторе компьютера с использованием очковых анаглифов для наблюдения левым и правым глазами в двух цветах (рис. 7) или поляризационных очков с поочередной коммутацией изображений для двух глаз.

Возможно использование различных стереоскопических дисплеев для наблюдения стереорентгеновских изображений, однако следует учитывать, что любые 3D-очки на голове мешают хирургу во время операции (рис. 8).

Использование комфортной безочковой стереопроекционной системы (СПС), создающей высококачественное и яркое изображение в условиях операционной, является, на наш взгляд, наиболее перспективным. Реализованная инновационная технология обеспечивает уникальную возможность точного восприятия глубины пространства изображения (рис. 9).

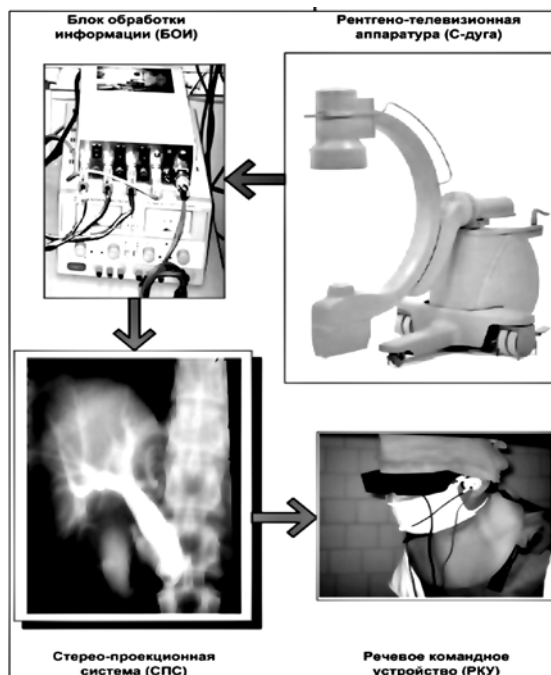


Рис. 6. Общая схема модернизации рентгеновского аппарата типа «С-дуга»



Рис. 7. Общий вид автоматизированного рабочего места врача-рентгенолога

Энергосберегающая технология управления яркостью изображения обеспечивает врачу возможность наблюдения трехмерных изображений в условиях интенсивного освещения операционной [18].

Помимо стереорентгеновской навигации можно рекомендовать комфортную безочковую систему СПС для наблюдения стереоэндоскопических, МРТ, ПЭТ, КТ и других трехмерных медицинских изображений.

Основные характеристики системы

Время формирования трехмерного медицинского изображения: 0,2 с.

Погрешность визуального позиционирования инструмента по глубине: 2...3 мм.

Погрешность автоматической навигации инструмента: до 1 мм.

Размер экрана стереопроекционной системы: не менее 900 × 600 мм.

Разрешающая способность трехмерного изображения: не менее 1980 × 1240.

Наблюдение цветных медицинских стереофильмов, частота кадров: 50 Гц.

Потребляемая мощность: не более 500 Вт.

Напряжение питания от сети переменного тока: 220 В.

Габариты блока обработки трехмерных изображений (БОИ): 400 × 400 × 200 мм³.

Масса блока БОИ: не более 5 кг.

Заключение

На основе проведенных исследований разработаны аппаратура и программное обеспечение, позволяющие реализовать стереорентгеновскую навигацию хирургического инструмента во время операции в режиме реального времени.

Разработанная технология наиболее эффективно может применяться при современных малоинвазивных операциях, таких как:

- удаление рентгеноконтрастных инородных тел;
- чрескожно-чреспеченочное дренирование и стентирование желчных протоков;
- остеосинтез и репозиция костных отломков;
- чрескожная пункция и дренирование полостной системы почек;
- хирургические стабилизирующие операции на позвоночнике;
- малоинвазивные вмешательства на межпозвонковых дисках.

На основе аппаратно-программных средств системы может быть проведена модернизация стандартного рентгеновского оборудования, например палатных мобильных рентгеновских установок типа «Аркоскоп» (С-дуга).

Стереорентгеновская навигационная система может дополнять известные медицинские навигационные системы (фирмы «BRAINLAB» и др.), а также использоваться совместно с эндоскопическими системами для оперативного контроля позиции и ориентации медицинских инструментов внутри тела пациента.



Рис. 8. Наблюдение стереорентгеновских изображений во время операции с использованием поляризационных очков и речевого командного устройства



Рис. 9. Комфортная стереопроекционная система (СПС)

В результате применения метода стереорентгеновской навигации существенно сокращается время выполнения операций, снижается дозовая нагрузка рентгеновского излучения на пациентов и обслуживающий персонал, что особенно важно, например, в педиатрии.

Стереорентгеновская навигационная система не имеет аналогов по своим характеристикам в России и за рубежом, является конкурентоспособным изделием, в том числе на мировом рынке; на основные компоненты системы имеются патенты РФ и международные патенты.

Список литературы:

1. Техническое описание стереоскопической рентгеновской системы «Siemens 3D» фирмы «Siemens».
2. Коновалов А.Н., Корниенко В.Н. Компьютерная томография в нейрохирургической клинике. – М.: Медицина, 1985.
3. Навигационные системы для хирургии фирмы «BRAINLAB» / Проспект фирмы «BRAINLAB», 2006.
4. Чернакова С.Э. и др. Информационные технологии и мехатронные устройства для интеллектуальных медицинских систем // Информационно-управляющие системы. Управление в медицине и биологии. 2006. Т. 4 (23). С. 45-49.
5. Uenohara M., Kanade T. Vision-Based Object Registration for Real-Time Image Overlay / Toshiba R&D Center, Kawasaki, Japan. The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213, USA.
6. Двухпроекционная (биплановая) ангиографическая система «Allura Xper FD10/10» / Проспекты фирмы «Philips».
7. Решения компании «Medtronic» для хирургии позвоночника / Информация фирмы «Medtronic», Москва, 2012.
8. Микрохирургическое удаление грыжи диска / Проспект клиники AXIS, НИИ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко, Москва, 2013.
9. Нечаев А.И., Назарук В.П., Чернакова С.Э. Метод регистрации и визуализации трехмерных рентгеновских изображений в режиме реального времени для задач неразрушающего контроля и медицинской диагностики // Информационные технологии. 2005. № 1. С. 28-36.
10. Нечаев А.И., Назарук В.П. и др. Способ получения трехмерных рентгеновских изображений / Патент РФ № 2298887 от 12.04.2004 г.
11. Алферов Г.В., Кулаков Ф.М., Нечаев А.И., Чернакова С.Э. Информационные системы виртуальной реальности в мехатронике и робототехнике / Уч. пособие. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2009. 168 с.
12. Назарук В.П., Мелконян А.Б. Чрескожно-чреспеченочная холангиография / Учебно-методическое пособие. – СПб.: ЦНИОКИ ЦПИ, 2004.
13. Назарук В.П. Особенности стереорентгеновской методики при проведении перкутанной нефролитотомии / Учебно-методическое пособие. – СПб.: ЦНИОКИ ЦПИ, 2005.
14. Назарук В.П., Морозов С.А. Некоторые методические рекомендации выполнения лазерной вапоризации под стереорентгеновским контролем / Учебно-методическое пособие. – СПб.: ЦНИОКИ ЦПИ, 2005.
15. Назарук В.П. Рентгеноанатомический анализ дегенеративных изменений позвоночника и вертебропластика / Учебно-методическое пособие. – СПб.: ЦНИОКИ ЦПИ, 2005.
16. Назарук В.П., Нечаев А.И. Примерный план хирургических манипуляций по удалению инородных тел при использовании стереорентгеновской системы / Учебно-методическое пособие. – СПб.: ЦНИОКИ ЦПИ, 2006.
17. Гуляев Д.А., Годанюк Д.С., Кондюков Д.А., Иванов Д.С., Бирагов Д.В., Назарук В.П. Стереорентгенография – перспективный способ интраоперационной навигации в хирургии позвоночника // Современные проблемы науки и образования. 2018. № 2.
18. Арсенич С.И. Стереопроекционная система / Патент РФ № 2322771 от 25.04.2005 г.

Виктор Петрович Назарук,
врач-рентгенолог,
рентгенологическое отделение,
Санкт-Петербургское ГБУЗ «Городская
Александровская больница»,
г. С.-Петербург,
Александр Иванович Нечаев,
начальник отдела,
ОАО «Научно-испытательный институт
эргатических систем»,
г. Жуковский, Московская область,
Николай Николаевич Потрахов,
д-р техн. наук, зав. кафедрой,
кафедра электронных приборов и устройств,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»,
Светлана Эдуардовна Чернакова,
генеральный директор,
ООО «Стереопроекционные системы
телеуправляемых ассистивных
интеллектуальных роботов»,
г. С.-Петербург,
e-mail: yus87@yandex.ru

**ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ,
РУКОВОДИТЕЛЕЙ СЛУЖБ ИНФОРМАЦИИ И БИБЛИОТЕК!**

**ПРЕДЛАГАЕМ ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ
«МЕДИЦИНСКАЯ ТЕХНИКА»**

НА 2019 ГОД.

Индекс по каталогу «Роспечать» – 72940.

В редакции можно оформить и оплатить льготную подписку с любого месяца.

Стоимость подписки : 1500 руб. – за один номер,

4500 руб. – на первое полугодие 2019 года (3 номера), 9000 руб. – на 2019 год (6 номеров).

Наши тел.: (495) 695-10-70, 695-10-71.