

Киракосян Степан Айрапетович – Южный федеральный университет; e-mail: ksa_say@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79526039071; аспирант.

Галалу Валентин Гаврилович – e-mail: v.galalu@mail.ru; тел.: +79281496612; кафедра ИИТиС; к.т.н.; доцент.

Kirakosyan Stepan Ajrapetovich – Southern Federal University; e-mail: ksa_say@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79526039071; postgraduate student.

Galalu Valentin Gavrilovich – e-mail: v.galalu@mail.ru; phone: +79281496612; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 51-7

**Е.А. Шестова, Е.Д. Синявская, В.И. Финаев, О.В. Косенко, Ю.Ю. Близнюк,
В.В. Шадрин**

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И СЛЕЖЕНИЯ ЗА ХИРУРГИЧЕСКИМИ ИНСТРУМЕНТАМИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАПАРОСКОПИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ*

Рассматривается задача, связанная с обеспечением оптимальной области визуализации хирургического вмешательства при проведении малоинвазивных операций. Предлагается метод позиционирования и слежения за хирургическими инструментами при проведении лапароскопических операций. Существенным отличием метода является использование маркеров и опорных точек, располагающихся в видимой области (вне брюшной области), что позволяет вычислить координаты лапароскопа и хирургических инструментов внутри оперируемой области на основе методов векторной алгебры и геометрических преобразований без применения распознавания образов. На основе предложенного метода было определено положение хирургических инструментов и лапароскопа внутри оперируемой области за счет вычисления координат видимых частей инструментов снаружи. Для этой задачи использовалась оптическая система локализации на основе метода триангуляции. Задача автоматического слежения сводится к изменению положения и ориентации лапароскопа в соответствии с положением хирургического инструмента в области визуализации. Для определения оптимальной визуализации оперируемой области находится положение кончика инструмента, расположенного в центре видео изображения эндоскопа. Предложен алгоритм определения требуемого положения лапароскопа в зависимости от координат и ориентации хирургического инструмента, на основе которого генерируется ошибка позиционирования. Также указаны условия для достижения оптимальной визуализации оперируемой области. Определена область допустимого расположения лапароскопа относительно хирургического инструмента. Выполнена программная апробация предложенного метода позиционирования и слежения за хирургическими инструментами, подтверждающая состоятельность разработанного метода. Предложенный метод позиционирования и слежения является универсальным для разных типов роботизированных держателей с разным числом степеней свободы.

Метод позиционирования и слежения за хирургическими инструментами; роботизированный держатель; малоинвазивная хирургия; оптимальная визуализация; векторная алгебра ошибка позиционирования.

* НИР 213.01-07-2014/02ПЧВГ Разработка методов многокритериальной оптимизации параметров гибридных адаптивных интеллектуальных регуляторов плохо формализованных технических объектов.

E.A. Shestova, E.D. Sinyavskaya, V.I. Finaev, O.V. Kosenko, Ju.Ju. Bliznjuk,
V.V. Shadrina

**DESIGN OF THE METHOD OF POSITIONING AND TRACKING
THE SURGICAL INSTRUMENTS BY THE FULFILLMENT
OF THE LAPAROSCOPIC OPERATIONS**

The article discusses the problem related to ensuring optimal visualization during minimally invasive surgery operations. A method of positioning and tracking of surgical instruments during laparoscopic surgery is offered. A significant difference of this method is the use of markers and reference points, which are located in the visible area (outside the abdominal region), which allows to calculate the coordinates of a laparoscope and surgical instruments inside the treated area on the basis of methods of vector algebra and geometric conversions without the use of pattern recognition. Based on the proposed method the position of surgical instruments and the laparoscope inside the treated area is determined by calculating the coordinates of the visible part of the instruments outside. For this task, we use an optical localization system based on triangulation method. The goal of automatic tracking is to change the position and orientation of the laparoscope in accordance with the position of the surgical tool in the field of visualization. To determine the optimal visualization of the operated area you identify the position of the tool tip located in the center of a video image of the endoscope. The algorithm for determining the desired position of the laparoscope, which depends on the coordinates and orientation of a surgical tool and generates a positioning error, is offered. In addition, conditions for optimal visualization of the operated area are listed. The feasible region of the location of the laparoscope relative to the surgical instrument is defined. A software testing of the method of positioning and tracking surgical instruments is performed, confirming the validity of the developed method. The proposed method of positioning and tracking is universal for different types of robotic holders with different number of freedom degrees.

Method of positioning and tracking the surgical instruments; robotic holder; minimally invasive surgery; optimal visualization; vector algebra; positioning error.

Введение. В настоящее время, как правило, при проведении малоинвазивной хирургии, способной минимизировать послеоперационную травму для пациента, манипуляции выполняются через небольшие разрезы на коже с использованием троакаров и микроинструментов. Визуализация оперируемой области обеспечивается за счет действий ассистента хирурга на основе выполнения голосовых команд хирурга. Подобный подход имеет ряд недостатков, которые заключаются в снижении хирургом восприятия глубины манипуляций, (что осложняет зрительно-моторную координацию), увеличение тремора рук за счет различных размеров инструментов (например, троакаров с эндоскопической камерой), ограничении диапазона движения и степеней свободы, повышенной утомляемости и тактильной ограниченности. Также существует ряд трудностей, связанных с осуществлением контроля над положением эндоскопической камеры, которой во время операции управляет ассистент хирурга, пытающийся совместить обзор оперируемой области с рекомендациями врача, что не всегда обеспечивает безопасное перемещение лапароскопа в требуемое положение.

Более прогрессивное использование автоматизированных робототехнических комплексов для контроля и управления лапароскопом, таких как Aesop, EndoAssist или Naviot [1–4], преодолевают некоторые из указанных недостатков, позволяя хирургу контролировать камеру напрямую через интерфейс управления посредством педали или джойстика, или через более сложные средства: голосовое управление или движения головы хирурга [5–7]. Однако такие системы не исключают влияния человеческого фактора, что может приводить к ошибкам хирурга как оператора [8].

Разработка новых систем на основе автоматического позиционирования и слежения эндоскопической камеры за хирургическими инструментами в оперируемой области с заданной точностью позволит снять с ассистента или хирурга задачу управления лапароскопом, уменьшить количество медицинского персонала и расширить функциональные возможности хирурга при проведении операции.

Постановка задачи. В рамках проводимого исследования предполагается разработка метода позиционирования и слежения за хирургическими инструментами при проведении лапароскопических операций, обеспечивающего получение более точных данных о координатах и положении лапароскопа и хирургического инструмента в реальном режиме времени [10]. Данный подход основывается на использовании опорных маркеров [11].

Таким образом, разработка и внедрение методов автоматического позиционирования и слежения за хирургическими инструментами во время проведения лапароскопических операций является **актуальной задачей**.

Система автоматического позиционирования и слежения за хирургическими инструментами. Проведение лапароскопической операции при помощи роботизированных держателей можно представить в виде системы, состоящей из совокупности взаимосвязанных блоков. На рис. 1 показана структурная схема автоматической системы позиционирования и слежения за хирургическими инструментами при лапароскопической операции [9]. Рассмотрим на первоначальном этапе позиционирование одного хирургического инструмента, поскольку положение второго (вспомогательного) инструмента будет определяться аналогично первому, тогда как изменение положения лапароскопа внутри оперируемой области выполняется относительно ведущего инструмента (как правило, хирургического инструмента, находящегося в правой руке хирурга) [3–7, 9].

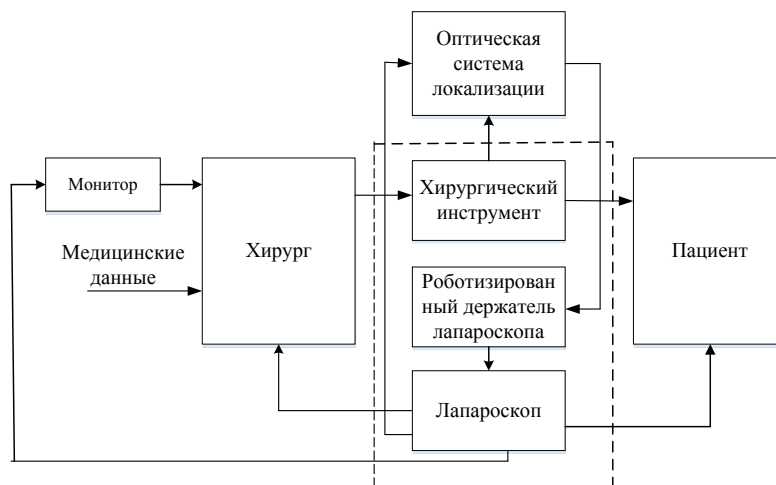


Рис. 1. Структурная схема автоматической системы позиционирования и слежения

С помощью оптической системы локализации определяются координаты местоположения лапароскопических инструментов, которыми управляет хирург: инфракрасные лучи направляются в сторону операционного поля, отражаясь от маркеров, находящихся на троакарах, возвращаются в оптическую систему. По углу отражения определяется местоположение и угол наклона инструмента. Полученные координаты поступают на контроллер, который формирует управляющее воздействие на держатель лапароскопа, передающий в свою очередь местоположение лапароскопа, которое должно соответствовать области хирургического вмешательства с допустимой точностью. Далее от камеры изображение оперируемой области передается на монитор, что позволяет хирургу, с учетом поступающей информации, принимать решения.

Метод позиционирования и слежения за хирургическим инструментом на основе опорных маркеров. Суть разрабатываемого метода заключается в определении положений хирургического инструмента и лапароскопа внутри оперируемой области на основе координат видимых частей инструментов снаружи [12]. Зная заранее размеры хирургического инструмента и лапароскопа можно определить их положение и ориентацию внутри брюшной полости с применением математических методов без анализа и распознавания изображений.

Схематическое представление лапароскопической операции для предлагаемого метода представлено на рис. 2.

Принятые обозначения по рис. 2:

O_1 – место надреза для лапароскопа; O_2 – место надреза для хирургического инструмента; A – положение кончика хирургического инструмента; B – окончание лапароскопа; C – положение вершины хирургического инструмента; D – положение вершины лапароскопа; ρ – длина видимой части лапароскопа; Θ – угол наклона (между валом лапароскопа и вертикальной осью); φ – угол вращения (ориентация вала в горизонтальной плоскости).

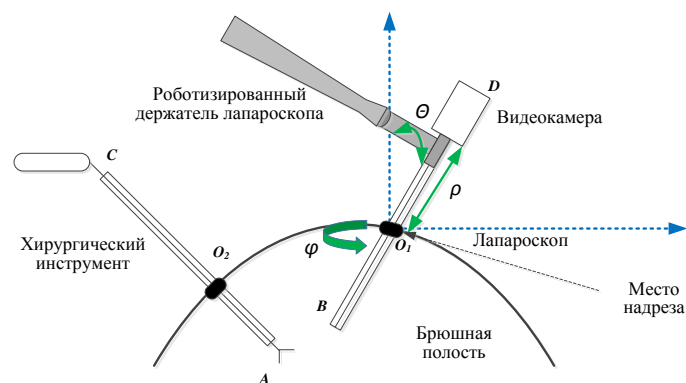


Рис. 2. Схематическое представление лапароскопической операции

Оба угла рассматриваются относительно точки вращения (места надреза). Точка надреза O_1 определяется как начало отсчета.

Задача позиционирования и слежения за хирургическим инструментом сводится к определению координат точек A и B в каждый такт времени. Положения точек A и B вычисляются на основе позиций и ориентации жестко закрепленных маркеров с использованием множества светодиодов, прикрепленных снаружи к эндоскопу и хирургическому инструменту. Используются три маркера, далее называемые, как опорные: стационарный опорный маркер (M_1), маркер, прикрепленный к головке эндоскопа (M_2) и маркер, прикрепленный к ручке хирургического инструмента (M_3).

Рассмотрим задачу позиционирования и локализации лапароскопа и хирургического инструмента, которая сводится к определению их текущего положения и ориентации в оперируемой области. Положение хирургического инструмента и лапароскопа определяется на основе метода триангуляции по средствам оптической системы, такой как Polaris [13] (рис. 3), которая использует светодиодные датчики на лапароскопе и хирургическом инструменте для определения координат точек C_b , D_b , O_1 , O_2 и их ориентации в пространстве.

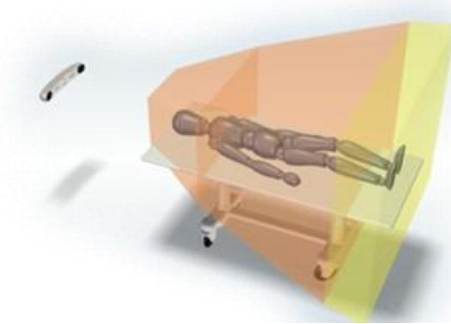


Рис. 3. Определение положения хирургических инструментов и лапароскопа на основе оптической системы локализации

После определения координат точек C_i , D_i , O_1 , O_2 и их ориентации в пространстве, используя сферическую систему координат можно найти значения координат A и B [14]:

$$x = \rho \sin \Theta \cos \varphi, \quad (1)$$

$$y = \rho \sin \Theta \sin \varphi, \quad (2)$$

$$z = \rho \cos \Theta, \quad (3)$$

где $\rho \geq 0$, $-\pi \leq \varphi \leq \pi$, $0 \leq \Theta \leq \pi$.

Задача автоматического слежения за хирургическим инструментом сводится к определению координат (x_1, y_1, z_1) точки A , на основе которых определяется требуемое положение и ориентация лапароскопа (видеокамеры) (x_2, y_2, z_2) точки B для обеспечения оптимальной визуализации оперируемой области (рис. 4).

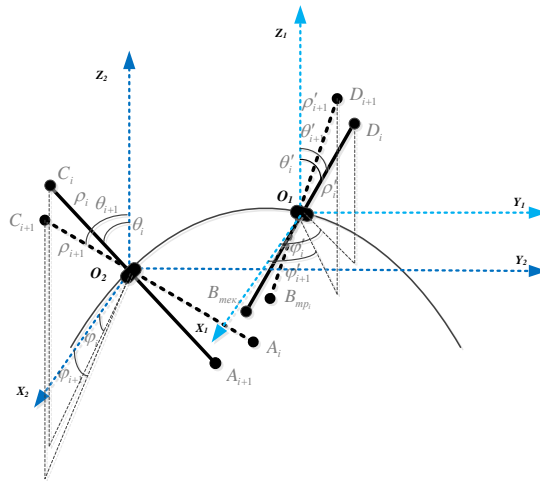


Рис. 4. Схематическое представление задачи слежения за хирургическим инструментом

Принятые обозначения по рис. 4:

A_i – текущее положение кончика хирургического инструмента, $i = \overline{1; N}$;
 C_i – текущее положение вершины хирургического инструмента, $i = \overline{1; N}$; $B_{\text{мек}_i}$ –
 текущее положение кончика лапароскопа, $i = \overline{1; N}$; $B_{\text{мп}_i}$ – требуемое положение

кончика лапароскопа, $i = \overline{1; N}$; D_i – текущее положение вершины лапароскопа, $i = \overline{1; N}$; ρ_i – текущая длина видимой части хирургического инструмента, $i = \overline{1; N}$; θ_i – текущий угол наклона хирургического инструмента, $i = \overline{1; N}$; φ_i – текущий угол вращения хирургического инструмента, $i = \overline{1; N}$; ρ'_i – текущая длина видимой части лапароскопа, $i = \overline{1; N}$; θ'_i – текущий угол наклона лапароскопа, $i = \overline{1; N}$; φ'_i – текущий угол вращения лапароскопа, $i = \overline{1; N}$.

Оптимальная визуализация определяется положением кончика инструмента, находящегося в центре видео изображения эндоскопа, передаваемого на монитор.

Для достижения оптимальной визуализации оперируемой области, необходимо чтобы выполнялось два условия:

- ♦ прямые, на которых расположены векторы \overrightarrow{CA} и \overrightarrow{DB} должны быть пересекающимися, т.е. $(\overrightarrow{CA} \cdot \overrightarrow{DB}) = 0$;
- ♦ векторы \overrightarrow{CA} и \overrightarrow{DB} должны быть не коллинеарными, а точка A_i – является центром пересечения прямых, на которых расположены векторы \overrightarrow{CA} и \overrightarrow{DB} .

Алгоритм слежения за хирургическим инструментом включает в себя следующие шаги.

1. Определяются координаты (x_5, y_5, z_5) точки O_1 – место надреза для лапароскопа и (x_6, y_6, z_6) точки O_2 – место надреза для хирургического инструмента.

2. Определяются координаты (x_i, y_i, z_i) точки A_i , $i = \overline{1; N}$ – текущего положения кончика хирургического инструмента в момент времени $t=i$.

3. По координатам точек A_i и O_2 строится уравнение прямой, проходящей через эти две точки. Хирургический инструмент будет лежать на этой прямой. Каноническое уравнение прямой, на которой располагается хирургический инструмент, имеет следующий вид [14, 15]:

$$\frac{x - x_6}{x_i - x_6} = \frac{y - y_6}{y_i - y_6} = \frac{z - z_6}{z_i - z_6}.$$

4. Строится уравнение прямой, на которой располагается лапароскоп в момент времени $t=i$. Уравнения прямых для хирургического инструмента и лапароскопа пересекаются в точке A_i . По координатам точек A_i и O_1 строится уравнение прямой, проходящей через эти две точки. Лапароскоп будет лежать на этой прямой. Каноническое уравнение прямой, на которой располагается лапароскоп имеет следующий вид:

$$\frac{x - x_5}{x_1 - x_5} = \frac{y - y_5}{y_1 - y_5} = \frac{z - z_5}{z_1 - z_5}.$$

5. Определяются координаты точки B_{mpi} $(x_{B_{mpi}}, y_{B_{mpi}}, z_{B_{mpi}})$ в момент времени $t=i$. Оптимальная визуализация определяется положением кончика инструмента, находящегося в центре видео изображения эндоскопа (рис. 5), следовательно, ограничение на длину предельно допустимой области положения кончика лапароскопа по отношению к положению кончика хирургического инструмента зависит от параметров безопасности и визуализации:

$$k_{min} \leq |B_{max} B_{min}| \leq k_{max}, \quad (4)$$

где k_{min} – минимальное и k_{max} – максимальное значения длины отрезка $B_{max}B_{min}$.

Ограничение на допустимое расстояние от кончика инструмента до кончика лапароскопа имеет вид:

$$r_{min} \leq |r| \leq r_{max}, \quad (5)$$

где r_{min} – минимальное и r_{max} – максимальное допустимое расстояние от кончика инструмента до кончика лапароскопа.

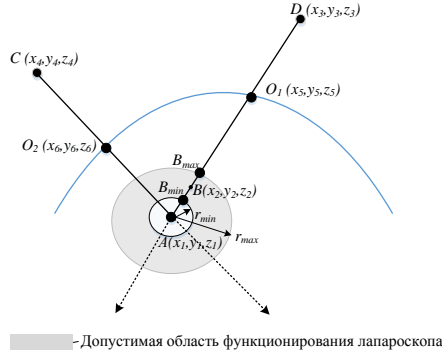


Рис. 5. Определение оптимальной визуализации

Параметр r_{min} характеризует предельно минимальное расстояние от кончика лапароскопа до хирургического инструмента (либо приближение видеокamеры), тогда как r_{max} определяет максимальную удаленность лапароскопа от хирургического инструмента.

Координаты точки B_{mp_i} определяются следующим образом. Точка B_{mp_i} должна находиться в середине отрезка $B_{max}B_{min}$. Координаты точки B_{mp_i} примут вид [14, 15] $\left(\frac{x_{B_{max}} + x_{B_{min}}}{2}, \frac{y_{B_{max}} + y_{B_{min}}}{2}, \frac{z_{B_{max}} + z_{B_{min}}}{2} \right)$.

6. В результате процесса слежения на основе множества реальных и требуемых значений положения лапароскопа можно определить ошибку позиционирования. Ошибка позиционирования представляет собой отклонение текущего положения лапароскопа от требуемого:

$$e_i = \sqrt{(x_{B_{mp}} - x_{B_{тек}})^2 + (y_{B_{mp}} - y_{B_{тек}})^2 + (z_{B_{mp}} - z_{B_{тек}})^2} \leq 2 \text{ мм}, \quad (6)$$

где $(x_{B_{mp}}, y_{B_{mp}}, z_{B_{mp}})$ – координаты требуемого положения лапароскопа; $(x_{B_{тек}}, y_{B_{тек}}, z_{B_{тек}})$ – координаты текущего положения лапароскопа.

7. В следующий момент времени полагаем, что $t=i+1$ и переходим к шагу 2.

8. Выполнение алгоритма продолжается до завершения операции или прекращения работы в автоматическом режиме.

9. После завершения работы алгоритма вычисляется среднее квадратическое отклонение ошибки позиционирования:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2}, \quad (7)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение ошибки позиционирования; e_i – текущее значение ошибки; \bar{e} – среднее значение ошибки.

Универсальность метода автоматического слежения за хирургическими инструментами. Существующие роботизированные держатели лапароскопа или хирургических инструментов имеют различное число степеней свободы, размеры звеньев и соединений. Однако можно сделать вывод, что использование предложенного метода позиционирования и слежения не зависит от конфигурации робота.

С точки зрения кинематики манипуляционный робот может рассматриваться как незамкнутая цепь твёрдых звеньев, соединённых последовательно. Один конец этой цепи соединён с основанием манипулятора, другой её конец, снабжён захватным устройством. Число степеней свободы робота - это число возможных перемещений системы [16–19].

Каждое звено робота описывается локальной системой координат, помимо этого всю систему робота можно определить по средствам внешней системы координат. Внешняя система координат размещается у основания робота [20]. Следовательно, число степеней свободы определяет количество локальных систем координат и влияет на кинематическую модель робота, но не на метод позиционирования.

Результаты экспериментов. Для апробации предложенного метода позиционирования и слежения за хирургическим инструментом было выполнено 10 тестов моделирования в среде Matlab, соответствующих различным траекториям движения. На основе полученных результатов моделирования был сделан вывод об эффективности и точности предложенного метода.

Проанализируем результаты первого теста. На рис. 6 показан график траектории следования, соответствующий первому тесту, на котором изображена требуемая траектория движения лапароскопа и реальная. На основании полученных данных можно сделать вывод, что реальная траектория движения лапароскопа приближается к требуемой характеристике.

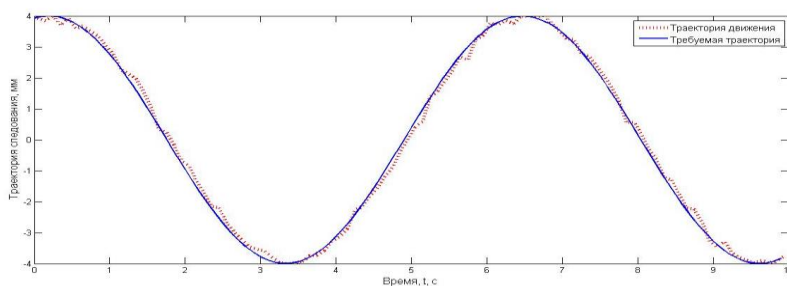


Рис. 6. Траектория следования лапароскопа по первому тесту

На рис. 7 представлен график ошибки позиционирования e_i для первого теста, время моделирования соответствует 100 с.

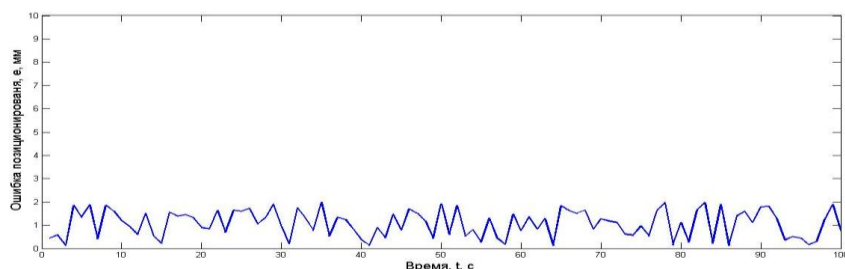


Рис. 7. Ошибка позиционирования для первого теста

На основании результатов эксперимента по первому тесту были получены значения ошибки позиционирования. Максимальное значение ошибки составило 2 мм, тогда как минимальное 0,13 мм, что удовлетворяет условию (6). Среднеквадратическое отклонение ошибки позиционирования составило 0,3781 мм.

По результатам выполнения моделирования было определено среднеквадратическое отклонение ошибки позиционирования для 10 тестов. Значения среднеквадратического отклонения ошибки позиционирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения среднеквадратического отклонения ошибки позиционирования для 10 тестов

№ Теста	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
σ	0,3781	0,4201	0,3822	0,2976	0,2754	0,4238	0,3871	0,4001	0,3362	0,3942

Полученные значения ошибки позиционирования и среднеквадратического отклонения не превышают пороговой величины в 2 мм. Тогда как на основе анализа источников можно сказать, что предельно допустимым значением ошибки позиционирования является 5 мм [9, 11, 21].

Заключение. В статье был предложен метод позиционирования и слежения за хирургическим инструментом при проведении лапароскопических операций. Отличием метода является использование опорных точек и маркеров, находящихся в видимой (наружной) области, что дает возможность определить положение и ориентацию всего инструмента и лапароскопа, тогда как большинство подходов основываются на внутрибрюшном анализе оперируемой области, видимость и неоднородность которой снижают точность получаемых данных.

С применением векторной алгебры и геометрических преобразований разработан алгоритм автоматического слежения за хирургическим инструментом. Было выполнено 10 тестовых экспериментов разработанного метода, отличающихся различной заданной траекторией движения. По результатам моделирования были получены значения экспериментальные траектории движения лапароскопа, ошибки позиционирования и среднеквадратического отклонения ошибки позиционирования для 10-ти тестов. Полученные значения ошибок не превышают 2 мм, что удовлетворяет требованиям по точности хирургических инструментов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Robotics. Режим доступа: http://robotics.com.ua/shows/series_robots_and_humans/3345-your_health_health_robotics_today.
2. Медицинские роботы. Режим доступа: <http://medrobot.ru/744-pechalnye-oshibki-medicinskih-robotov.html>.
3. *Sim H.G., Yip S.K.H., and Cheng C.W.S.* Equipment and technology in surgical robotics // World Journal of Urology. – 2006. – Vol. 24, No. 2. – P. 128-135.
4. *Rane, S. Kommu, B. Eddy, P. Rimington, and C. Anderson,* Initial experience with the endoassist (r) camera holding robot in laparoscopic urological surgery // European Urology Supplements. – 2007. – Vol. 6, No. 2. – P. 186-186.
5. Robot Surgery, edited by Seung Hyuk Baik. 2010 ISBN 978-953-7619-77-0. – 172 p.
6. *Russell H. Taylor, Peter Kazanzides.* Medical Robotics and Computer-Integrated Interventional Medicine. – Elsevier, 2008. – 24 p.
7. *Jason J. Dupert.* Towards Supervised Autonomous Task Completion Using an in vivo Surgical Robot: dissertation. – University of Nebraska – Lincoln, 2009. – 212 p.
8. Потенциал российских инноваций на рынке систем автоматизации и робототехники: Экспертно-аналитический отчет. – М.: ОАО «ПБК», 2014. – 128 с.
9. *Joris Jaspers.* Simple Tools for Surgeons; Design and evaluation of mechanical alternatives for robotic instruments for minimally invasive // Dissertation: Amsterdam. – 2006. – 141 p.

10. Богданова Ю. В., Гуськов А. М. Численное моделирование задачи позиционирования инструмента хирургического Робота-Манипулятора при движении по заданной траектории // Наука и образование. – 2013. – № 5. – С. 181-210. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/574314.htm>.
11. Agustinos A., Wolf R., Long J.A., Cinquin P., Voros S. Visual Servoing of a robotic endoscope holder based on surgical instrument tracking // 2014 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 2014. Sro Paulo, Brazil. – P. 13-18.
12. Berkelman P., Cinquin P., Boidard E., Troccaz J., Lretoublon C. and Ayoubi J-M. Design, control and testing of a novel compact laparoscopic endoscope manipulator // Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part I: J. Systems and Control Engineering. – P. 329-341.
13. Официальный сайт Polaris. Режим доступа: <http://www.ndigital.com/>.
14. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. – 10-е изд. – М.: Физматлит, 2005. – 304 с.
15. Ильин В.А. Ким Г.Д. Линейная алгебра и аналитическая геометрия. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 320 с.
16. Farbod Fahimi. Autonomous Robots Modeling, Path Planning, and Control. – Springer Science+Business Media, 2009. – 348 p.
17. Зенкевич С., Юценко А. Основы управления манипуляционными роботами. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 480 с.
18. Москвичев А., Кварталов А., Устинов Б. Захватные устройства промышленных роботов и манипуляторов: учебное пособие. – М.: Форум, 2015. – 176 с.
19. Гайдук А.Р., Пищопов В.Х., Медведев М.Ю., Костюков В.А., Медведева Т.Н. Проектирование роботов и робототехнических систем: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013.
20. Bliznyuk Y.Y., Finaev V.I., Kosenko O.V., Shestova E.A., Sinyavskaya E.D. Method of choice of the robot-manipulator of laparoscope controlling in the minimally invasive surgery // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol. 11, No. 9. – P. 6230-6235. ISSN 0973-4562.
21. Финаев В.И., Снявская Е.Д., Шестова Е.А., Косенко Е.Ю. Метод позиционирования роботизированного держателя лапароскопа на основе вычислительной геометрии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 2 (175). – С. 80-89.

REFERENCES

1. Robotics. Режим доступа: http://robotics.com.ua/shows/series_robots_and_humans/3345-your_health_health_robotics_today.
2. Meditsinskie roboty [Medical robots]. Available at: <http://medrobot.ru/744-pechalnye-oshibki-medicinskih-robotov.html>.
3. Sim H.G., Yip S.K.H., and Cheng C.W.S. Equipment and technology in surgical robotics, *World Journal of Urology*, 2006, Vol. 24, No. 2, pp. 128-135.
4. Rane, S. Kommu, B. Eddy, P. Rimington, and C. Anderson, Initial experience with the endoassist (r) camera holding robot in laparoscopic urological surgery, *European Urology Supplements*, 2007, Vol. 6, No. 2, pp. 186-186.
5. Robot Surgery, edited by Seung Hyuk Baik. 2010 ISBN 978-953-7619-77-0, 172 p.
6. Russell H. Taylor, Peter Kazanzides. Medical Robotics and Computer-Integrated Interventional Medicine. Elsevier, 2008, 24 p.
7. Jason J. Dumpert. Towards Supervised Autonomous Task Completion Using an in vivo Surgical Robot: dissertation. University of Nebraska – Lincoln, 2009, 212 p.
8. Potensial rossiyskikh innovatsiy na rynke sistem avtomatizatsii i robototekhniki: Ekspertno-analiticheskiy otchet [The potential of Russian innovations on the market of automation and robotics: analytical report]. Moscow: ОАО «РВК», 2014, 128 p.
9. Joris Jaspers. Simple Tools for Surgeons; Design and evaluation of mechanical alternatives for robotic instruments for minimally invasive, *Dissertation: Amsterdam*, 2006, 141 p.
10. Bogdanova Yu.V., Gus'kov A.M. Chislennoe modelirovanie zadachi pozitsionirovaniya instrumenta khirurgicheskogo Robota-Manipulyatora pri dvizhenii po zadannoy traektorii [Numerical simulation of the task of positioning the surgical tool to the robotic arm when moving along a given trajectory], *Nauka i obrazovanie* [Science and education], 2013, No. 5, pp. 181-210. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/574314.htm>.
11. Agustinos A., Wolf R., Long J.A., Cinquin P., Voros S. Visual Servoing of a robotic endoscope holder based on surgical instrument tracking, *2014 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*, 2014. Szo Paulo, Brazil, pp. 13-18.

12. *Berkelman P., Cinquin P., Boidard E., Troccaz J., Lretoublon C. and Ayoubi J-M.* Design, control and testing of a novel compact laparoscopic endoscope manipulator, *Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 217 Part I: J. Systems and Control Engineering*, pp. 329-341.
13. Ofitsial'nyy sayt Polaris [Official website of Polaris]. Available at: <http://www.ndigital.com/>.
14. *Beklemishev D.V.* Kurs analiticheskoy geometrii i lineynoy algebrы [Course of analytical geometry and linear algebra]. 10th ed. Moscow: Fizmatlit, 2005, 304 p.
15. *Il'in V.A. Kim G.D.* Lineynaya algebra i analiticheskaya geometriya [Linear algebra and analytical geometry]. Moscow: Izd-vo MGU, 1998, 320 p.
16. *Farbod Fahimi.* Autonomous Robots Modeling, Path Planning, and Control. Springer Science+Business Media, 2009, 348 p.
17. *Zenkevich S., Yushchenko A.* Osnovy upravleniya manipulyatsionnymi robotami [Fundamentals of control robotic manipulator]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 2004, 480 p.
18. *Moskvichev A., Kvartalov A., Ustinov B.* Zakhvatnye ustroystva promyshlennykh robotov i manipulyatorov: uchebnoe posobie [Gripper of industrial robots and manipulators: a tutorial]. Moscow: Forum, 2015, 176 p.
19. *Gayduk A.R., Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Kostyukov V.A., Medvedeva T.N.* Proektirovanie robotov i robototekhnicheskikh sistem: uchebnoe posobie [Designing robots and robotic systems: Tutorial]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013.
20. *Bliznyuk Y.Y., Finaev V.I., Kosenko O.V., Shestova E.A., Sinyavskaya E.D.* Method of choice of the robot-manipulator of laparoscope controlling in the minimally invasive surgery, *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, Vol. 11, No. 9, pp. 6230-6235. ISSN 0973-4562.
21. *Finaev V.I., Sinyavskaya E.D., Shestova E.A., Kosenko E.Yu.* Metod pozitsionirovaniya robotizirovannogo derzhatelya laparoscopa na osnove vychislitel'noy geometrii [Design of the positioning method of the robotic holder of laparoscope basing on computational geometry], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 2 (175), pp. 80-89.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.Ю. Молчанов.

Шестова Елена Александровна – Южный федеральный университет; e-mail: shestovaelena@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; доцент.

Синявская Екатерина Дмитриевна – e-mail: esinyavskaya@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; доцент.

Финаев Валерий Иванович – e-mail: finaev_val_iv@tsure.ru; кафедра систем автоматического управления; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Косенко Олеся Валентиновна – e-mail: o_kosenko@mail.ru; кафедра систем автоматического управления; старший преподаватель.

Близнюк Юлия Юрьевна – e-mail: ulija.bliznuk@gmail.com; кафедра систем автоматического управления; ассистент

Шадрина Валентина Вячеславовна – e-mail: vvshadrina@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; доцент.

Shestova Elena Alexandrovna – Southern Federal University; e-mail: shestovaelena@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; associate professor.

Sinyavskaya Ekaterina Dmitrievna – e-mail: esinyavskaya@sfedu.ru; the department of automatic control systems; associate professor.

Finaev Valeri Ivanovich – e-mail: fin_val_iv@tsure.ru; the department of automatic control systems; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Kosenko Olesya Valentinovna – e-mail: o_kosenko@mail.ru; the department of automatic control systems, senior teacher.

Bliznjuk Julia Jurievna – e-mail: ulija.bliznuk@gmail.com; the department of automatic control systems, assistant

Shadrina Valentina Vaycheslavovna – e-mail: vvshadrina@sfedu.ru; the department of automatic control systems, associate professor.