

## Трехмерные сканирующие системы на основе бинокулярного стереовидения для медицинской диагностики

### Аннотация

Рассмотрены недостатки монокулярных сканирующих систем при построении моделей объектов. Приведена математическая модель лазерной сканирующей системы, основанной на бинокулярном стереовидении. Показано влияние неидеальности системы на параметры получаемых моделей объектов.

Построение компьютерных моделей объектов сложных геометрических форм является важной прикладной задачей в различных областях науки, техники и медицины, в частности в стоматологии. Наиболее перспективными методами построения таких моделей в современной медицинской диагностической технике являются микрофокусная рентгенография для внутренних форм [1]-[7] и трехмерное сканирование для внешних поверхностей. Совмещение этих двух технологий дает наиболее информативную модель исследуемой структуры.

### Недостатки монокулярных сканирующих систем

Среди различных технологий трехмерного сканирования наиболее компромиссной в плане отношения точности измерения к геометрическому размеру системы является технология лазерного сканирования. Минимальный комплект элементов, необходимый для построения лазерных сканирующих систем, состоит из камеры  $C$ , лазерного модуля  $L$  и механизма перемещения сканирующей головки либо объекта сканирования. Различные вариации сканирующих систем, основанные на таком наборе элементов, представлены на *рис. 1*.

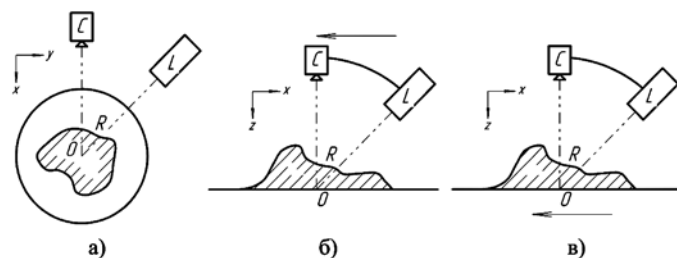


Рис. 1. Схематичные модели лазерных сканирующих систем: а) с вращающейся платформой; б) с подвижной сканирующей головкой; в) с подвижной платформой

Независимо от конструктивных особенностей сканирующей системы общие алгоритмы программной обработки базируются на триангуляции пространственных точек с учетом известных геометрических параметров и вводимой идеальной точечной модели камеры. Допущение о бесконечно малой толщине лазерного луча позволяет свести математические выкладки к простым выражениям. Рассмотрим одно из возможных решений задачи лазерного сканирования для произвольного монокулярного сканера (*рис. 2*).

Основная задача сканирования заключается в вычислении локальных координат точки проецирования лазерного луча на объект  $R$  с последующей привязкой к глобальной системе координат (ограничимся вычислением координаты точки только в локальной системе координат). За начало отсчета удобно выбрать точку калибров-

ки камеры и лазерного модуля  $O$ , далее определим расстояние между началом координат и точкой проецирования лазерного луча.

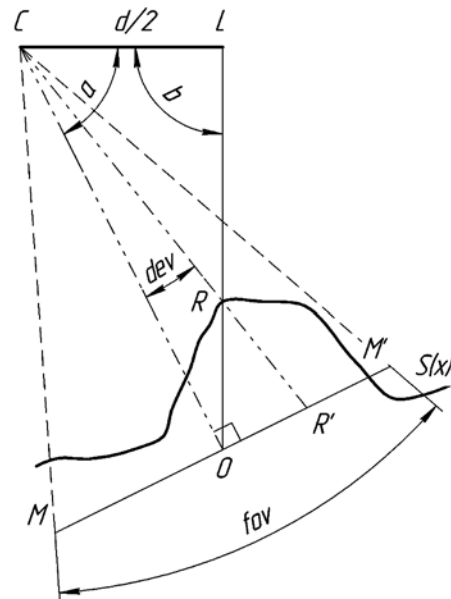


Рис. 2. Графическое изображение монокулярной сканирующей системы в продольном разрезе

На основе известных технических параметров камеры, таких как угол обзора  $fov$  и разрешение матрицы  $MM'_p$ , найдем эквивалентное значение расстояния между камерой и точкой калибровки. Индекс  $p$  означает, что величина берется в системе счисления с базисным значением в один пиксел:

$$CO_p = \frac{OM'_p}{\text{tg}(fov/2)}$$

Определим коэффициент преобразования между выбранной системой счисления на основе пикселей и метрической системой:

$$k = CO / CO_p$$

Вычислим угол отклонения от центра матрицы камеры проецируемой точки:

$$dev = \arctg\left(\frac{OR'_p}{CO_p}\right)$$

Далее по теореме синусов находим искомую величину:

$$OR = \frac{k \cdot OR'_p \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - dev\right)}{\sin\left(\beta + \alpha + dev - \frac{\pi}{2}\right)}$$

Найденная величина является длиной радиус-вектора точки  $R$ , угол наклона которого совпадает с углом калибровки лазерного модуля. Таким образом, координаты точки  $R$  однозначно определены в локальной системе координат. Перевод в глобальную систему координат осуществляется в соответствии с правилами аналитической геометрии.

Основным недостатком монокулярных сканеров является наличие обширных «слепых зон». Протяженность областей, недоступных для обработки сканирующей системой, зависит от углов калибровки камеры и лазерного модуля:

$$\beta < \arctg \left[ \frac{S(x)}{x} \right] < \frac{\pi}{2} + \alpha.$$

Применение двухпроходной схемы сканирования или использование датчика позиционирования в конструкции сканирующей головки позволяет увеличить гибкость системы в процессе использования, снимая тем самым ограничения на углы калибровки [8]. Однако вместе с тем происходит двукратное увеличение времени сканирования либо снижение точности за счет внесения погрешностей датчиком позиционирования. Компромиссным вариантом в данном случае является применение дополнительной камеры в конструкции сканирующей головки.

### Математическая модель лазерной сканирующей системы, основанной на бинокулярном стереовидении

Графическое представление бинокулярной сканирующей системы показано на рис. 3. Основой для такой системы являются две ПЗС-камеры  $C_1$  и  $C_2$  и лазерный модуль  $L$ .

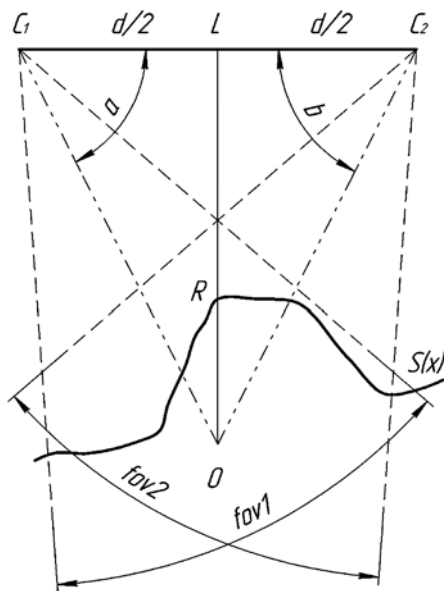


Рис. 3. Графическое изображение сканирующей системы, основанной на бинокулярном стереовидении, в продольном разрезе

Увеличение числа камер в целом не влияет на математические алгоритмы обработки данных. Так же как и для монокулярных сканирующих систем, в их основе лежит триангуляция с использованием известных геометрических параметров. Рассмотрим обобщенное решение

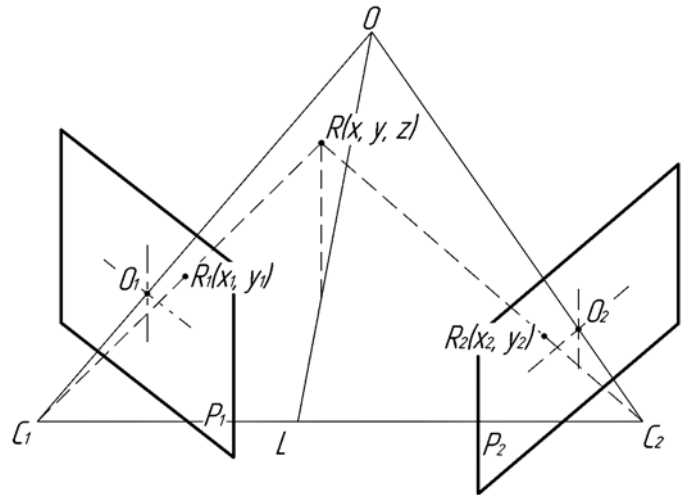


Рис. 4. Модель сканирующей системы, основанной на бинокулярном стереовидении

задачи нахождения координаты точки в пространстве для сканирующей системы на основе бинокулярного стереовидения в трехмерном пространстве (рис. 4).

Зависимость между координатами точки в пространстве и проекцией этой точки на плоскости описывается выражением

$$R_n = P \cdot R,$$

где  $P = K[R \mid t]$  – матрица камеры;  $R$  и  $R_n$  – координатные матрицы точки в пространстве и проекции этой точки на плоскости соответственно. Матрица  $K$ , в свою очередь, является матрицей внутренних параметров камеры и для идеальных квадратных пикселей имеет вид

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & x_0 \\ 0 & f & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $f$  – приписанное фокусное расстояние;  $x_0, y_0$  – координаты центра матрицы. Решение системы уравнений, где  $R_1$  и  $R_2$  – координаты проекций искомой точки  $R$ , а  $P_1$  и  $P_2$  – математические матрицы камер  $C_1$  и  $C_2$ , позволяет восстановить трехмерные координаты точки  $R$ :

$$\begin{cases} R_1 = P_1 \cdot R; \\ R_2 = P_2 \cdot R. \end{cases}$$

Кроме того, бинокулярный сканер можно рассматривать как два монокулярных трехмерных сканера, независимо обрабатывающие данные с ПЗС-камер по приведенному выше алгоритму.

### Преимущества бинокулярных сканирующих систем

Построение реальных трехмерных сканеров, в отличие от их математических моделей, сопряжено с рядом трудностей, вызванных неидеальностью параметров компонентов, таких как камера, механическая система и проектирующая система.

Неидеальность матрицы камеры заключается в неидеальности геометрии составляющих ее пикселей. Пиксели матрицы реальных ПЗС-камер [9]-[11] отличаются от квадратных и обычно имеют форму параллелограмма. Учет неидеальности производится посредством введения модифицированной математической матрицы внутренних параметров камеры

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $f_x, f_y$  – индивидуальные приписанные фокусные расстояния для каждой из осей.

Кроме того, из-за аберрации оптической системы происходят нелинейные искажения изображений, снимаемых с камер, – дисторсии. Данные искажения не зависят от расстояния до объекта и определяются однозначно для каждой камеры с помощью процедуры калибровки. Основной задачей в процессе калибровки является нахождение коэффициентов дисторсии. Для калибровки камер сканирующих систем обычно используются изображения фигур простых форм с известными геометрическими параметрами.

Погрешности позиционирования в зависимости от прецизионности оборудования могут варьироваться в широких пределах, начиная от десятков метров для построения трехмерных моделей карты по топографической съемке до единиц микрометров для миниатюрных объектов. При применении датчиков позиционирования данная погрешность часто имеет тенденцию к накоплению. Кроме того, возможен случайный характер погрешностей внутри определенного диапазона значений в зависимости от применяемых компонентов, программных и технических решений, что в итоге может дать различные результаты при прохождении одного и того же участка поверхности при сканировании.

Неидеальность проецирующей системы, в частности наличие ненулевой ширины луча для лазерных сканеров, также оказывает влияние на точность снимаемых трехмерных моделей. На рис. 5 представлено изменение отклонения  $dif$  вычисляемых значений  $R_{calc}$  от реальных  $R_{real}$  для монокулярной сканирующей системы при относительном линейном перемещении в процессе обработки простой геометрической формы.

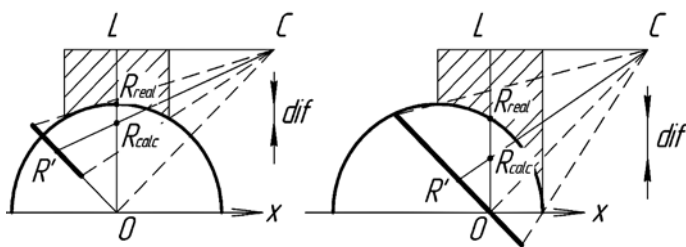


Рис. 5. Графическое построение отклонений реальной точки от расчетной для монокулярного сканера

В случае бинокулярной сканирующей системы за счет большего объема данных, получаемых с разных углов обзора, возможно использование различных подходов к анализу этих данных. Наиболее простой способ заключается в усреднении значений, полученных с различных камер, что в итоге приводит к снижению абсолютной погрешности измерения. Пример использования такого подхода показан на рис. 6а, для сравнения также представлена модель (рис. 6б), полученная с помощью монокулярного трехмерного сканера.

При сравнении двух моделей, показанных на рис. 6, отчетливо видно, что бинокулярная модель точнее передает форму сканируемых объектов. Поверхность объек-

тов и особенно границы перехода от зубов к десне имеют гораздо больше координатных точек и выглядят достаточно гладко по сравнению с монокулярной моделью.

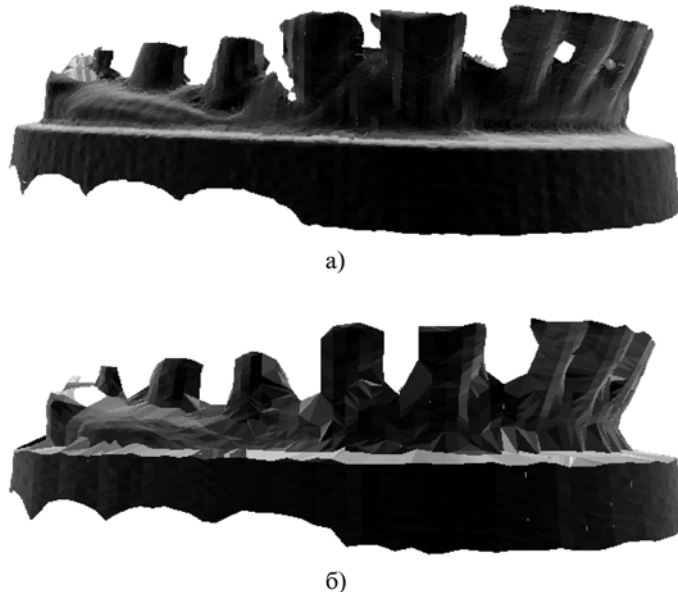


Рис. 6. Трехмерная модель слепка нижней челюсти, полученная с помощью: а) трехмерного бинокулярного сканера; б) трехмерного монокулярного сканера

Кроме того, возможно применение более совершенных адаптивных алгоритмов определения формы объекта на основе комплексного подхода к решению задачи. Использование алгоритма Хафа [12] для поиска линий и основные уравнения эпиполярной геометрии позволяют увеличить точность построения трехмерных моделей бинокулярных сканирующих систем.

На основании всего вышесказанного можно сделать вывод, что несмотря на увеличение габаритов сканирующей головки за счет добавления дополнительной камеры, использование бинокулярных систем представляется по совокупности параметров более выгодным, в том числе и в медицинской диагностике.

#### Список литературы:

1. Потрахов Н.Н. Интраоральная панорамная рентгенография // Медицинская техника. 2001. № 6. С. 38.
2. Блинов Н.Н., Васильев А.Ю., Серова Н.С., Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю. Микрофокусный способ получения фазоконтрастных рентгеновских изображений // Медицинская техника. 2009. № 4. С. 5-9.
3. Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю. Метод оценки информативности визуализированных дентальных рентгеновских изображений // Медицинская техника. 2009. № 1. С. 16-18.
4. Потрахов Н.Н., Мазуров А.И. Особенности микрофокусной рентгенографии в медицинской диагностике // Медицинская техника. 2005. № 6. С. 12.
5. Грязнов А.Ю., Жамова К.К., Бессонов В.Б. Метод формирования псевдообъемных изображений в микрофокусной рентгенографии // Биотехносфера. 2013. № 4. С. 51-55.
6. Смирнова Л.М., Юлдашев З.М. Измерительно-информационные системы для протезно-ортопедической отрасли // Биотехносфера. 2012. № 2. С. 17-23.
7. Юлдашев З.М. Обработка медицинских малококонтрастных изображений // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. № 1. С. 39-41.
8. Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 607 p.

9. Кострин Д.К., Ухов А.А. Светосигнальная характеристика ПЗС-фотоприемника в области больших световых потоков // Контроль. Диагностика. 2013. № 5. С. 40-42.
10. Кострин Д.К. Исследование линейности светосигнальной характеристики ПЗС-фотоприемника // Петербургский журнал электроники. 2008. № 2-3. С. 86-91.
11. Кострин Д.К., Ухов А.А. Интерференция в поверхностном слое и метрологические параметры спектрометров с ПЗС-фотоприемниками // Датчики и системы. 2013. № 5. С. 13-15.
12. Ballard D.H. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes // Pattern recognition. 1981. Vol. 13. № 2. PP. 111-122.

Михаил Валерьевич Лавреев,  
аспирант,  
Андрей Александрович Ухов,  
канд. техн. наук, доцент,  
Николай Николаевич Потрахов,  
д-р техн. наук, зав. кафедрой,  
Виктор Борисович Бессонов,  
ассистент,  
Владимир Александрович Герасимов,  
ассистент,  
Дмитрий Константинович Кострин,  
ассистент,  
Лев Михайлович Селиванов,  
ассистент,  
кафедра электронных приборов и устройств,  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»,  
г. С.-Петербург,  
e-mail: ni\_cr24@mail.ru

А.А. Анисимов, З.М. Юлдашев, Ю.Г. Бибишева

## Безокклюзионная оценка динамики артериального давления по времени распространения пульсовой волны

### Аннотация

В статье предложен метод неинвазивной безокклюзионной оценки артериального давления и прогнозирования гипертонического криза на основе математической модели скорости распространения пульсовой волны. Разработаны структурная схема и алгоритм работы аппаратно-программного комплекса для мониторинга артериального давления, позволяющего в режиме реального времени отслеживать состояние пациента и заранее предупреждать о возникновении опасных изменений артериального давления, что помогает избежать развития гипертонического криза и связанных с ним осложнений.

Артериальная гипертензия (АГ) сегодня – самое распространенное заболевание сердечно-сосудистой системы не только в России, но и во всем мире. На глобальном уровне сердечно-сосудистые заболевания становятся причиной примерно 17 млн. смертельных случаев в год, что составляет почти треть от общего числа смертей. На долю АГ приходится по меньшей мере 45 % смертельных случаев, вызванных заболеваниями сердца, и 51 % случаев смерти, вызванных инсультом [1], [2]. Несмотря на усилия специалистов, АГ в Российской Федерации остается одной из наиболее значимых медико-социальных проблем. Это обусловлено как широким распространением данного заболевания – около 40 % взрослого населения РФ имеют повышенный уровень артериального давления (АД), так и тем, что АГ является основным фактором риска развития целого ряда заболеваний. Для прогнозирования АГ с целью предотвращения развития нежелательных осложнений большое значение приобретает мониторинг артериального давления у лиц, склонных к гипертензии. Однако широко используемая в клинической практике методика косвенной оценки АД не позволяет проводить непрерывные измерения из-за влияния окклюзии на точность измерения, а большинство существующих инструментальных средств основаны на окклюзионном воздействии. В этой связи актуальной становится проблема разработки безокклюзионного метода и инструментальных средств мониторинга АД.

При развитии гипертонического криза на состояние пациента большое влияние оказывает скорость подъема АД. Ее влияние даже превосходит влияние абсолютного

уровня АД, так как при быстром подъеме АД не успевают включиться механизмы ауторегуляции, поэтому система мониторинга должна отслеживать динамику АД.

**Целью** проводимого исследования являлась разработка безокклюзионного инструментального метода мониторинга и прогнозирования резких колебаний артериального давления, приводящих к возникновению гипертонического криза (ГК). Для достижения заявленной цели были поставлены следующие **задачи**:

- разработка математической модели, описывающей безокклюзионную оценку АД, для задач мониторинга АД и прогнозирования ГК;
- разработка метода безокклюзионной оценки динамики АД для задач контроля и мониторинга развития ГК;
- разработка метода прогнозирования ГК по динамике АД;
- разработка системы для прогнозирования ГК.

### Выбор математической модели для безокклюзионного измерения артериального давления по скорости распространения пульсовой волны

Задача построения математической модели гемодинамики, описывающей функционирование всей сердечно-сосудистой системы, сегодня остается нерешенной. Это обусловлено сложностью и нелинейностью рассматриваемой биологической системы, влиянием огромного числа как внутренних, так и внешних факторов на ее функционирование. Такие зависимости сложно форма-