УДК 004.94

**Контроль точности позиционирования стоматологического**

**наконечника методом анализа потокового видео**

К.В. Киченко, Н.В. Носов

Самарский государственный технический университет

В статье приведены результаты контроля точности позиционирования стоматологического наконечника. Разработана методика оценки точности детектирования ключевых точек и оценки точности восстановления пространственных координат.

**Ключевые слова:** ключевые точки маркера, положение маркера, калибровка, оценка точности.

Одна из важных задач, решаемых в системах контроля стоматологического лечения и планирования имплантатов, − высокоточное определение положения стоматологических инструментовв пространстве. Эта задача актуальна для минимизации ошибок, улучшения качества в области зубопротезирования, а также для удаленного контроля за ходом операций. Одно из решений данной задачи представленное в системе RoboDent включает в себя использование инфракрасных стереокамер и активных маркеров с ИК-светодиодами. Данное решение обеспечивает точность позиционирования стоматологического инструмента в пределах ± 0, 1 мм.

В данной работе представлено решение данной задачи на основе системы из пассивных цветовых маркеров и видеокамер, работающих в видимом диапазоне. На основе изображений, полученных с видеокамер, в результате работы системы определяется положение маркеров в пространстве.

Технология пространственного определения положения маркера состоит из двух основных стадий.

На первой стадии, на изображениях с видеокамер выполняется поиск и локализация маркера с помощью пороговой обработки в цветовом пространстве, контурного анализа и определения центральной оси элементов маркера методом наименьших квадратов. Затем определяются точки пересечения осей элементов маркера, в результате, на первой стадии технологии определяется положение ключевых точек маркера с субпиксельной точностью.

На второй стадии по полученным координатам ключевых точек восстанавливаются их пространственные координаты. Для корректных результатов обработки на стадии восстановления, необходимо знать актуальную информацию о внутренних и внешних параметрах камеры, которая может быть получена с помощью предварительной калибровки системы из камер.

*Детектирование маркеров.* Одна из важных подзадач, сопутствующая задачи восстановлению положения в пространстве заключается в детектировании ключевых точек на изображении. В данной задаче вид и конфигурация ключевых точек непосредственно зависят от устройства маркера. Предлагается использовать треугольный маркер. Над исходным цветным изображением, поступившим с видеокамеры, проводится пороговая обработка в цветовом пространстве для выделения сторон треугольника

Далее выполняется контурный анализ по критерию соотношения длины контура к корню квадрату от его площади, из найденных контуров выбираются удовлетворяющие условию:

, (1)

где  − априорно заданные пороговые значения критерия, выражение для каждого отдельного контура имеет вид:

, (2)

где S - площадь, L - периметр контура.

Для оставшихся контуров методом наименьших квадратов определяется главная центральная ось контура.

, (3)

где и  − коэффициенты уравнения оси (вида ),  − количество точек контура, − координаты i-той точки контура.

Соответственно для трех сторон треугольника маркера формируется три уравнения прямых для главных центральных осей:

. (4)

Находим точки пересечения полученных прямых , координаты которых определяются по формуле 6 (для точки ):

. (5)

Точки  будем называть *ключевыми точками.* По найденным ключевым точкам восстанавливается пространственное положение маркера.

Используя информацию о внутренних и внешних параметрах видеокамер и о координатах ключевых точек маркера, можно определить для каждой из камер положения маркера в пространстве.

Данный процесс включает два этапа:

Этап 1. Калибровка видеокамер и определение внутренних и внешних параметров видеокамер. Выполняется один раз и в дальнейшем используются только результаты калибровки, до тех пор, пока не изменятся параметры системы из видеокамер.

 Калибровка камер осуществляется в 5 шагов:

1. Создание калибровочной доски с известным пространственным расположением особых точек.

2. Получение нескольких изображений калибровочной доски с разных ракурсов.

3. Извлечение особых точек с изображений.

4. Определение соответствия между координатами особых точек в двумерном виде и известным пространственным расположением.

В качестве калибровочной доски использовалась плоская шахматная доска, описанной в работах [3, 4, 6].

Данная технология калибровки позволяет находить особые точки доски с субпиксельной точностью, что позволяет выполнить высокоточную калибровку.

В процессе калибровки выполняется вычисление следующих параметров: фокусное расстояние, угол наклона пикселей, принципиальная точка для каждой камеры, а также матрица переноса и поворота одной камеры относительно другой [7, 8, 9]. Внутренние параметры камеры представлены в виде матрицы 3x3:

, (6)

где  и  соответствуют фокусному расстоянию, измеренному в ширине и высоте пикселя,  и  — координатам принципиальной точки, а ,

где  — угол наклона пикселя.

 Внешние параметры представлены матрицей поворота R размером 3x3 и вектором переноса T размером 3x1.

. (7)

Этап 2. Используя проективные матрицы камер, полученные на первом этапе, методом триангуляции из двумерных координат маркера восстанавливаются трехмерные.

Проективная матрица 8 связывает плоские и пространственные координаты следующим равенством:

, (8)

где для представления 2D-координат точки на плоскости используется вектор-столбец вида , а для задания положения 3D-точки в мировых координатах — .

 Таким образом, получив на этапе калибровки параметры видеокамер, можно восстановить пространственное положение точек, зная их плоские координаты.

Точность детектирования ключевых точек является определяющей для решения поставленной задачи. Для оценки точности предложенного алгоритма использовалась программно-аппаратная технология верификации.

Маркер помещается в прецизионные станочные тиски с возможностью перемещения образца с точностью 0.05 мм. Тестирование выполняется в двух режимах: статическом и динамическом.

Такая технология оценки точности позволяет получить погрешность определения координат маркера возникающую от шумов и искажений на исходных изображениях, так и погрешность самого алгоритма детектирования.

Для верификации восстановленных пространственных координат используется следующая методика. Маркер также помещается в прецизионные станочные тиски с возможностью перемещения образца с точностью 0.05 мм. Алгоритмом восстановления координат устанавливаются начальные пространственные координаты маркера . С помощью тисков осуществляется сдвиг на определенное расстояние . Находятся новые пространственные координаты маркера , таким образом, измеренный сдвиг маркера равен:

. (9)

Среднеквадратичное отклонение сдвига маркера будет равно:

. (10)

В процессе исследования использовались следующие аппаратные компоненты: две веб-камеры Logitech C910, осветительный короб (рис. 1) для фиксирования камер и для обеспечения равномерного освещения маркера, прецизионные станочные тиски с возможностью перемещения образца с точностью 0.05 мм.

** **

Рис.1. Осветительный короб

и прецизионные станочные тиски.

В результате проверки в статическом режиме получены следующие значения точности для алгоритма локализации ключевых точек маркера:  пикселя и  пикселя, таким образом, для разрешения видеокамеры 640x480 и ширины рабочей области в 20 см среднеквадратичное отклонение будет равно 0,1 мм.

Максимальное значение среднеквадратичного отклонения в динамическом режиме равно  пикселей, что соответствует отклонению в 0,17 мм.

Результаты исследований показывают, что отклонение полученных пространственных координат от фактических составляет менее 0,2 мм.

*Заключение.* В работе предложена технология определения положения ключевых точек маркера с субпиксельной точностью для задачи восстановления пространственного положения маркера. Разработана методика оценки точности детектирования ключевых точек и оценки точности восстановления пространственных координат.

В результате проведенных экспериментов получено, что ключевые точки детектируются с субпиксельной точностью в 0,3 пикселя для статического режима и с точностью 0,57 пикселя в динамическом режиме. Это позволяет восстанавливать трехмерные координаты маркера с точностью в 0,2 мм.

Проведено сравнение с методом Хафа, точность предложенного алгоритма в среднем в 3 раза выше, производительность в среднем лучше на 30%.

**CONTROL OF ACCURACY OF POSITIONING STOMATOLOGIC**

**TIP BY METHOD OF THE ANALYSIS OF STREAM VIDEO**

K.V. Kichenko, N.V. Nosov

Samara State Technical University

The results of control of accuracy of positioning of a stomatologic tip are given in article. The technique of an assessment of accuracy of detecting of key points and an assessment of accuracy of restoration of spatial coordinates is developed.

Keywords: key points of a marker, provision of a marker, calibration, accuracy assessment.