

КАЛИБРОВКА ПОЛОЖЕНИЯ ВИДЕОКАМЕРЫ В ЗАДАЧЕ ОПТИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ

Давыденко Е.В., главный специалист ОАО «Промсвязьбанк», egordv@gmail.com

Приоров А.Л., к.т.н., доцент Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова, andcat@yandex.ru

Ключевые слова: лазерная триангуляция, калибровка видеокамеры, оптическая система, обработка изображений, цифровая модель, сканирование объекта, вычисление положения, алгоритм преобразования.

Введение

Оптическая лазерная триангуляция – один из самых точных и быстрых способов получения цифровых трехмерных моделей реальных объектов [1, 2]. Метод основан на освещении объекта лазерным лучом и регистрации отраженного от объекта излучения с помощью ПЗС-матрицы или иного регистрирующего оборудования (рис. 1).

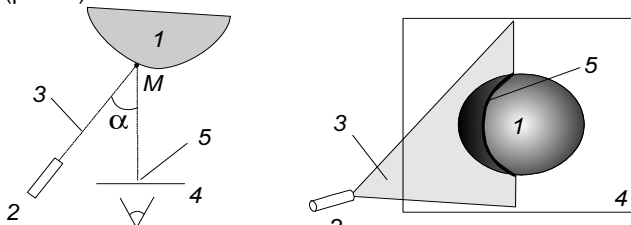


Рис. 1. Принцип работы системы оптической лазерной триангуляции: 1) сканируемый объект; 2) лазер с цилиндрической линзой; 3) лазерный луч; 4) экранная плоскость камеры; 5) проекция лазерного луча на экранную плоскость камеры, повторяющая форму объекта

Принцип действия системы оптической лазерной триангуляции состоит в следующем. Источник лазерного излучения под определенным углом освещает объект лазерным лучом. Изображение объекта с лазерным лу-

Дано описание автоматического метода калибровки видеокамеры для задачи лазерной триангуляции, использующего только изображения, снимаемые видеокамерой. Рассмотрены этапы построения данного метода и анализ его работы в различных условиях. Приведены экспериментально полученные результаты, указаны методы повышения точности калибровки.

чом на его поверхности регистрируется цифровой видеокамерой. Путем анализа данного цифрового изображения вычисляются трехмерные координаты точек его поверхности, на которых присутствует лазерный луч. Сканирование всего объекта возможно путем смещения лазерного луча вдоль всей его поверхности. Примеры моделей, полученных на выходе такой системы, приведены на рис. 2.

Задача калибровки положения видеокамеры

Для корректного вычисления трехмерных координат поверхности сканируемого объекта необходимо знать взаимное расположение лазера и видеокамеры в пространстве. В данной работе предлагается метод вычисления трехмерных координат видеокамеры и лазера без применения специализированных технических средств, с использованием в качестве входных данных только изображений, снимаемых самой видеокамерой. Для позиционирования видеокамеры в сканируемую сцену помещается калибровочный шаблон определенной структуры с нанесенными метками (рис. 3).

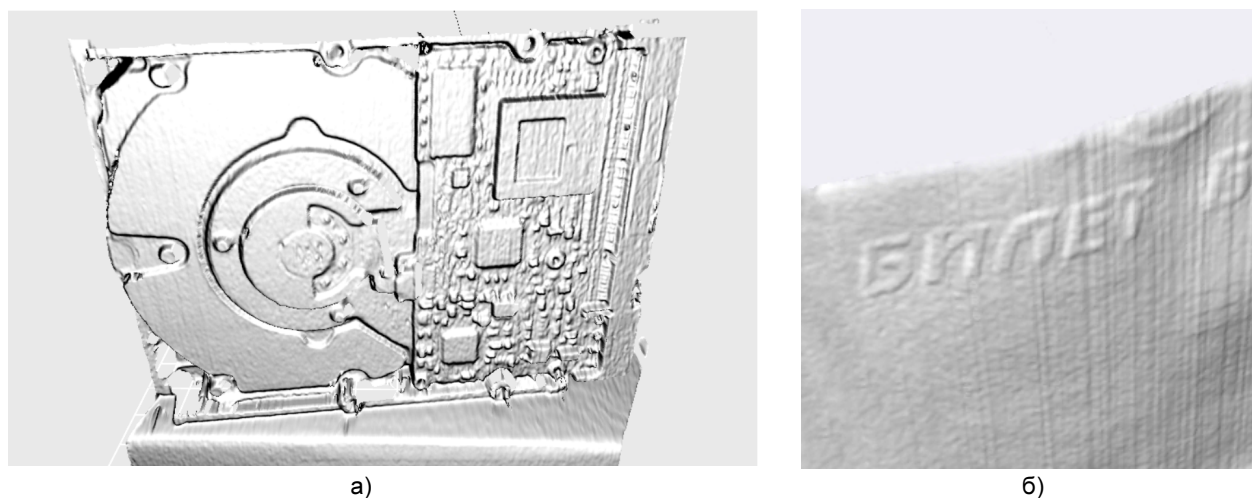


Рис. 2. Пример трехмерных моделей, полученных с применением описываемого алгоритма калибровки: а) модель жесткого диска IBM PC; б) фрагмент трехмерной модели купюры достоинством 500 рублей (тиснение шрифта корректно отсканировано)

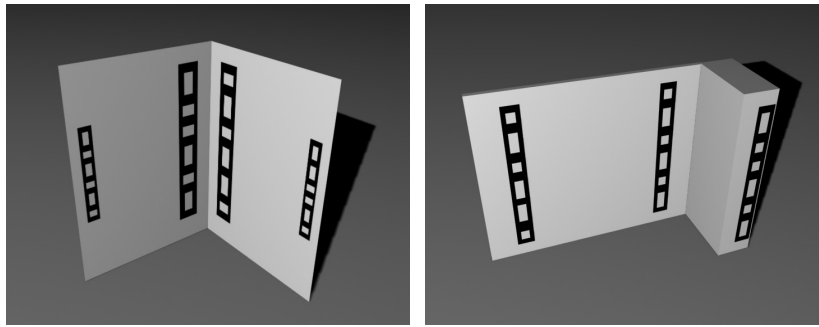


Рис. 3. Модели различных калибровочных шаблонов, используемых в системе, с нанесенными калибровочными полосами

Взаимное расположение меток на калибровочном шаблоне заранее известно, и, автоматически определив положение меток на анализируемом изображении, можно вычислить соответствие между их двумерными координатами на плоскости изображения и трехмерными – на калибровочном шаблоне. Положение лазера также определяется путем автоматического анализа полученного видеокamerой изображения луча лазера на поверхности шаблона.

В качестве калибровочных меток в описываемом алгоритме использованы контрастные калибровочные полосы специальной структуры, показанные на рис. 3. Задача автоматизированного обнаружения калибровочных полос может быть эффективно решена с использованием преобразования Хафа [3] после проведения процедуры детектирования краев в изображении.

На первом этапе работы алгоритма производится детектирование краев в изображении. Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что наибольшей эффективностью в рассматриваемой задаче обладают операторы Собеля и Превитта. Детектор краев Кэнни в силу ряда его особенностей показал меньшую эффективность.

После выполнения операции детектирования краев на выходе получается приближенное изображение модуля градиента на изображении. Каждая калибровочная полоса преобразуется в четыре линии, соответствующие ее краям. Данные линии могут быть обнаружены с помощью преобразования Хафа.

Преобразование Хафа представляет собой метод обнаружения особенностей в изображении. В качестве искомой особенности может выступать определенная геометрическая фигура или фрагмент изображения, заданный набором точек. Преобразование заключается в переводе информации из координатного пространства анализируемого изображения в пространство так называемого аккумулятора (аккумуляторного массива). Аккумулятор – некоторое накопительное пространство с размерностью, равной числу параметров для однозначного задания искомой особенности.

Любая прямая на изображении может быть параметризована с помощью двух параметров – удалением от начала координат R и углом наклона θ . В таком случае прямая задается уравнением $R = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)$. Следует отметить, что под прямой в данном случае понимается линия неограниченной длины, проходящая через все изображение.

Пусть $I(x, y)$ – входное полутоновое изображение размера M на N точек, и T – некоторый порог. Обозначим аккумуляторный массив преобразования как $A(R, \theta)$. Тогда алгоритм преобразования будет иметь вид:

Для y от 1 до N

Для x от 1 до M

Если $I(x, y) > T$ то

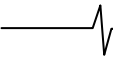
Для θ от 0 до 360

$$\left\{ \begin{array}{l} R = x \cos(\theta) + y \sin(\theta); \\ A(R, \theta) = A(R, \theta) + 1; \end{array} \right.$$

Данное преобразование представляет собой последовательный перебор всех точек изображения с проверкой их интенсивности. Если интенсивность точки исходного изображения с координатами (x, y) выше определенного порога, то необходимо увеличить значения тех точек аккумулятора, соответствующие параметрам (R, θ) которых описывают прямые, проходящие через данную точку (x, y) . После преобразования каждая относительно яркая прямая в исходном изображении преобразуется в локальный максимум в координатах аккумулятора, а амплитуда максимума пропорциональна яркости исходной линии.

Далее для поиска прямых в исходном изображении необходимо провести анализ пространства аккумулятора на наличие локальных максимумов достаточной амплитуды. Для поиска локальных максимумов используется следующий итерационный алгоритм.

На первой итерации выбирается начальная точка (x_0, y_0) . В круговой окрестности этой точки радиуса R ищется точка, большая по яркости. Если такая точка найдена, то центр текущей области поиска переносится в эту точку, и алгоритм повторяет свою работу уже в ее окрестности. Если текущая точка является самой яркой в своей окрестности, то алгоритм прекращает свою работу. Первоначально области поиска располагаются через равные промежутки по всей поверхности аккумулятора. После выполнения необходимого числа итераций алгоритм сходится к локальным максимумам в аккумуляторе. Далее составляется список из наиболее ярких максимумов, отсортированный по убыванию амплитуды. В терминах исходного изображения этот список представляет собой список параметров (R, θ) наиболее ярких прямых в исходном изображении.



Далее производится анализ этого списка для нахождения непрерывных прямых с длиной, не меньше заданной. Этот шаг необходим, так как преобразование Хафа дает информацию только о положении и наклоне прямой, и лишь косвенно содержит информацию о ее протяженности, и, кроме того, оно не учитывает разрывы в прямых.

Следующим этапом в анализе результатов преобразования Хафа является отбор пар прямых, которые потенциально могут составлять края одной калибровочной полосы. Для соответствия краям производится проверка каждой возможной пары прямых на выполнение следующих условий:

1. Прямые должны быть расположены близко друг к другу: $|R_2 - R_1| < \Delta R$.

2. Прямые должны быть близки к параллельности: $|\theta_2 - \theta_1| < \Delta \theta$.

3. Длина прямых должна быть примерно одинакова: $|(t_1^E - t_1^S) - (t_2^E - t_2^S)| < \Delta t$.

4. Градиенты прямых должны быть близки к перпендикулярности: $|G_2 - G_1| - 180 < \Delta G$.

5. Параметры начал прямых, так же как и параметры их концов, должны быть примерно равными: $|(t_1^S - t_2^S)| < \Delta t$, $|(t_1^E - t_2^E)| < \Delta t$.

6. Градиенты прямых должны быть направлены не в одну сторону: $|\theta_1 - 90 - G_1| < \Delta \theta^G$.

В данном списке нижние индексы обозначают первую и вторую прямую из пары. Здесь использованы следующие переменные: θ_1, θ_2 – параметры θ (угла наклона) прямых, R_1, R_2 – параметры R (расстояния от начала координат) прямых, G_1, G_2 – средняя величина направления градиента на прямой, t_1^S – параметры начальной точки непрерывного отрезка, t_1^E – параметры конечной точки непрерывного отрезка.

Величины ΔR , Δt , ΔG и $\Delta \theta^G$ – пороговые величины, задающие возможные допуски выполнения требований из приведенного списка. Данные допуски адаптивно снижаются в случае невозможности обнаружить необходимое количество калибровочных полос, и анализ списка производится заново. При невозможности найти прямые после нескольких итераций алгоритм

делает вывод об отсутствии необходимого числа калибровочных полос на изображении или недостаточно высоком его качестве.

После нахождения необходимого количества корректных пар прямых производится считывание кода, нанесенного на центр полосы, составленной найденными прямыми. Код представляет собой чередование черных и белых областей переменной ширины (рис. 4, рис. 5). Для кодирования в двоичном базисе области могут быть единичной и двойной ширины. Единичная ширина принимается за двоичный ноль, двойная ширина – за двоичную единицу.

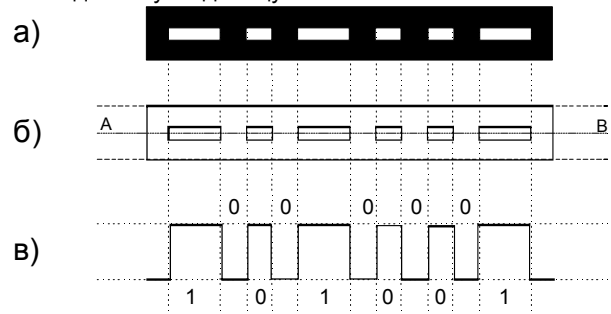


Рис. 4. Процедура считывания кода на калибровочной полосе: а) исходная калибровочная полоса; б) изображение полосы после применения оператора Собеля (изображение инвертировано); в) развертка кода, считанного вдоль прямой АВ

Для считывания кода, пример которого показан на рис. 4а, на первом этапе определяются параметры прямой, лежащей вдоль оси калибровочной полосы (прямая АВ на рис. 4б), и составляется зависимость интенсивности точек изображения от смещения вдоль этой прямой (рис. 4в). Данная зависимость анализируется, и составляется последовательность, представляющая собой зависимость ширины импульса от его порядкового номера. Полученная зависимость передается на алгоритм дискриминации импульсов. В результате составляется двоичная последовательность, в которой импульс единичной ширины принимается за 0, а импульс двойной ширины за 1.

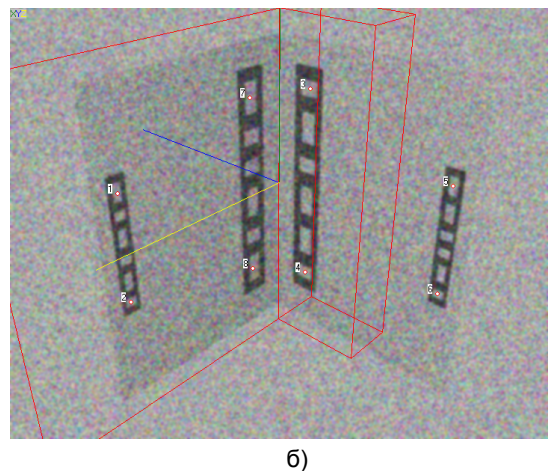
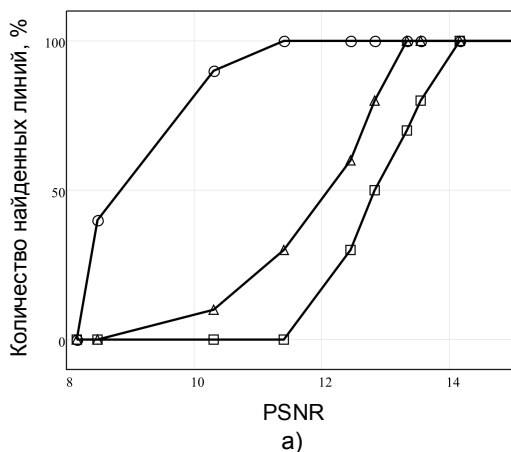


Рис. 5. а) количество найденных линий в процентах от максимально возможного в зависимости от отношения сигнал/шум (PSNR) анализируемого изображения; б) результат калибровки по искаженному изображению (изображение искажалось аддитивным гауссовым шумом с последующим размытием)

Далее эта последовательность проверяется на присутствие в ней заранее заданных возможных кодовых последовательностей. Они выбираются по специализированному базису и различны для различных реализаций калибровочного шаблона. Система анализирует количество найденных калибровочных полос, их расположение и нанесенный штриховой код. Исходя из этой информации, делается вывод о том, какой шаблон в текущий момент используется. Далее информация о положении полос на изображении и тип шаблона передаются в систему вычисления трехмерного положения видеокамеры. Данный метод обнаружения калибровочных полос в силу их протяженности обладает достаточно высокой надежностью и низкой чувствительностью к шумам. Пример калибровки по зашумленным изображениям показан на рис. 5.

Однако одной из основных проблем такого подхода является присутствие перспективных искажений. При наблюдении калибровочной полосы под углом к оптической оси видеокамеры ее форма искажается. Первоначально прямоугольная полоса в таком случае выглядит как трапеция (рис. 6).

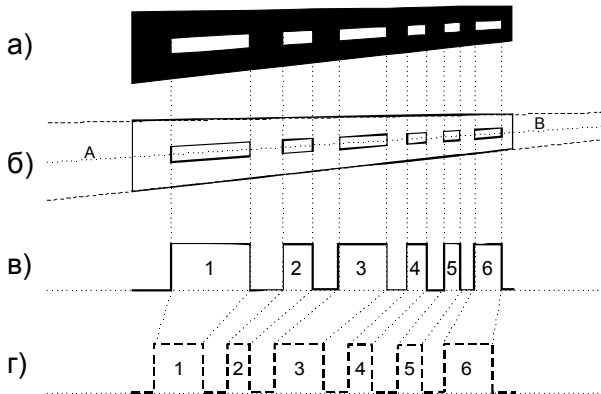


Рис. 6. Пример перспективных искажений кода на калибровочной полосе: а) калибровочная полоса, наблюдаемая с перспективной проекцией; б) результат применения оператора Собеля; в) развертка кода, прямую считанного по прямой АВ; г) код, первоначально содержащийся на неискаженной полосе

Такое искажение не только меняет форму калибровочной полосы, но и в значительной степени искажает код, нанесенный на ней.

В рассматриваемой системе данный тип искажений в необходимой степени минимизируется путем использования специального алгоритма автоматического изменения интервала дискретизации считывания кода (рис. 7).

На первом этапе данный алгоритм анализирует степень отклонения формы калибровочной полосы от идеального прямоугольника и по этим данным определяет величину перспективных искажений. В случае, когда перспективные искажения отсутствуют, интервал дискретизации на всем протяжении калибровочной полосы равен 1, и чтение кода на калибровочной полосе производится с шагом в 1 пиксель. В случае, когда линии не параллельны, единичный интервал дискретизации выбирается на широком конце полосы и уменьшается при приближении к узкому концу. Интервал дискретизации меньше 1 пикселя соответствует переходу на субпиксельное разрешение. Для реализации такой выборки точек на изображении с нецелой координатой алгоритм использует взвешенное окно 2x2 пикселя.

В результате применения данного алгоритма искажения, обусловленные эффектом перспективы, минимизируются и практически не влияют на надежность работы алгоритма считывания кода.

Вычисление положения видеокамеры

После определения положения меток на исходном изображении необходимо вычислить вектор $X = (x_0, y_0, z_0, \omega, \varphi, \kappa, c, s)$ параметров видеокамеры в соответствии с моделью перспективной проекции. Данный вектор включает в себя не только координаты видеокамеры x_0, y_0, z_0 и углы Эйлера ω, φ, κ ее ориентации, но и фокусное расстояние видеокамеры c и коэффициент диспропорции изображения s . При необходимости в данный вектор также могут быть добавлены параметры, описывающие радиальную и другие виды дисторсии изображения. Таким образом, используя только одно изображение на входе блока калибровки, можно определить не только требуемые внешние, но и внутренние параметры видеокамеры. Определение данного набора параметров с помощью более простых методов калибровки, например путем однократной калибровки по плоскому регулярному шаблону, в общем случае невозможно.

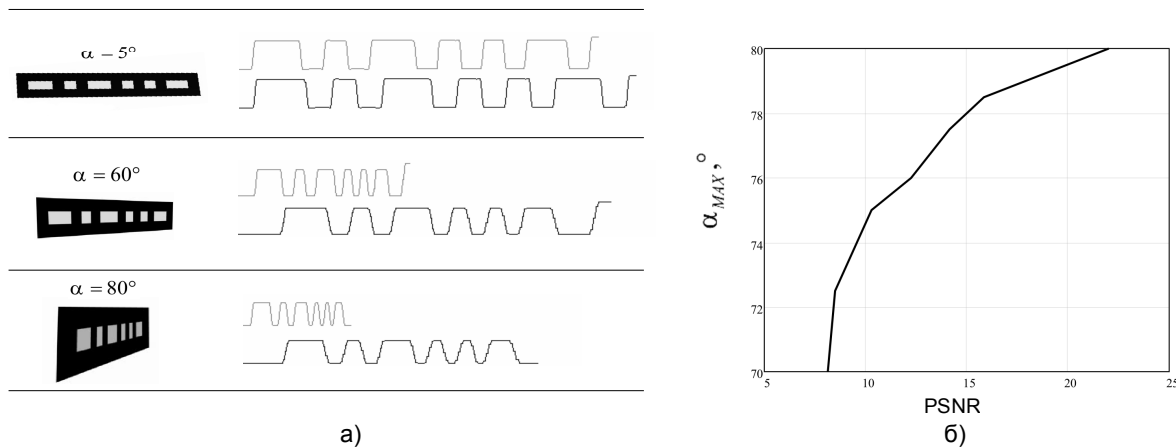


Рис. 7. а) результаты работы алгоритма автоматической коррекция интервала дискретизации считывания кодовой последовательности в зависимости от угла наблюдения полосы α . Развертка кода на линии без коррекции обозначена серым цветом (вверху), после коррекции – черным (внизу); б) зависимость максимально возможного угла наблюдения полосы α_{MAX} от отношения сигнал/шум анализируемого изображения

Для вычисления элементов вектора \mathbf{X} необходимо определить соответствие между двумерными координатами (ξ, η) положения меток на экранной плоскости видеокамеры и их трехмерными координатами (x, y, z) на шаблоне [4, 5]. В качестве калибровочных меток выбираются центры областей, составляющих код на калибровочной полосе.

Для нахождения элементов вектора \mathbf{X} необходимо минимизировать модули расстояний между координатами меток на изображении и их расчетными значениями. Данная минимизация эффективно выполняется с помощью итерационного алгоритма Левенберга-Марквардта [6]. Он представляет собой алгоритм нелинейной оптимизации и эффективно работает в случае больших невязок, обладая быстрой сходимостью. Для решения задачи минимизации вводится функция невязок вида:

$$f(\mathbf{X}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \mathbf{r}_j^2(\mathbf{X}). \quad (1)$$

Вектор невязок \mathbf{r} отклонений полученных положений маркеров $\xi(x_i)$ и $\eta(x_i)$ от их расчетных значений $\xi'(x_i)$ и $\eta'(x_i)$ в (1) равен $r_j = |\xi(x_i) - \xi'(x_i)|$, $r_{j+1} = |\eta(x_i) - \eta'(x_i)|$. Задача нахождения минимума функции $f(\mathbf{X})$ методом Левенберга-Марквардта может быть решена итерационно, используя следующее выражение для нахождения величины шага на каждой итерации:

$$\mathbf{X}_{i+1} = \mathbf{X}_i - (\mathbf{H} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \nabla f(\mathbf{X}_i). \quad (2)$$

В этом выражении \mathbf{H} – матрица Гессе, вычисленная в точке \mathbf{X}_i . Выражение (2) является ключевым в методе Левенберга-Марквардта и представляет собой комбинацию метода градиентного спуска и метода Гаусса-Ньютона. При малом значении λ алгоритм стремится к методу Гаусса-Ньютона, при большом – к методу градиентного спуска, позволяя, таким образом, одновременно использовать достоинства обоих методов.

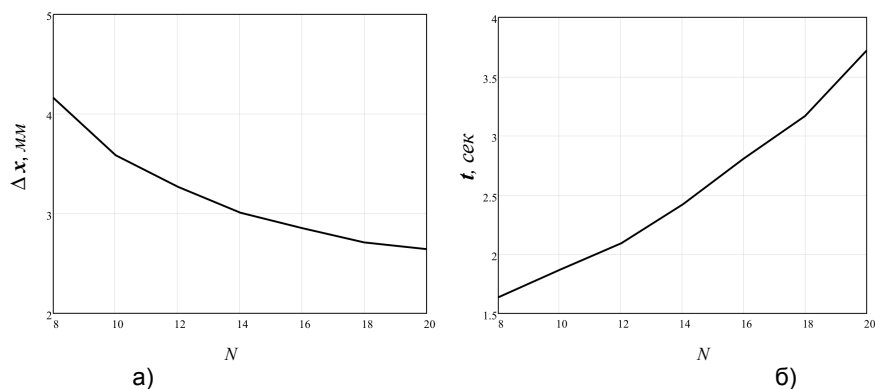


Рис. 8. а) ошибка определения положения видеокамеры Δx в зависимости от количества калибровочных точек N ; б) время калибровки t в зависимости от N

Литература

1. Твердохлеб П.Е., Коронкевич В.П., Косцов Э.Г. и др. 3D лазерные информационные технологии. – Новосибирск: Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т автоматки и электротрии, 2003.
2. Дунин-Барковский И.И. Построение системы контроля размеров крупногабаритных деталей на основе 3D-системы технического зрения // Измерительная техника. – 2004. № 12. С. 19.
3. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман; Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.
4. Demirdjian D., Zisserman A., Horaud R. Stereo autocalibration from

Заключение

Погрешность предлагаемого метода калибровки положения видеокамеры составляет в среднем менее 1% от поперечника калибровочного шаблона (при условии, что шаблон занимает около 80% площади изображения) и в первую очередь зависит от точности изготовления шаблона.

При неточном расположении калибровочных полос ошибку можно снизить, увеличив количество точек, по которым производится калибровка. При увеличении количества точек растет и время, необходимое на вычисление положения видеокамеры. Данные зависимости показаны на рис. 8. Система лазерной триангуляции, построенная с применением описанной процедуры калибровки, требует минимального набора компонентов (лазера, видеокамеры и ЭВМ общего назначения) и позволяет отказаться от дополнительного дорогостоящего оборудования (координатно-измерительных машин и т.п.). Форма калибровочного шаблона может быть изменена для учета различных пропорций сканируемых объектов без необходимости перестройки системы. Применение меток для определения положения видеокамеры в свою очередь облегчает процедуру построения полного трехмерного образа объекта методом совмещения информации, полученной сканированием с нескольких ракурсов, а так же позволяет упростить процедуры ее последующей обработки.

Предлагаемый метод калибровки положения видеокамеры применим не только для задачи лазерной триангуляции, но и для других задач, в которых необходимо определение положения и ориентации видеокамеры с использованием только изображений, снимаемых ею. Метод эффективно работает в условиях низкого качества изображений (которые можно улучшить методами, описанными в [7]), значительных перспективных искажений и присутствия естественного фона позади калибровочного шаблона.

one plane // In proc. of 6th european conference on computer vision (ECCV), Dublin, Ireland, 2000. Part 2, P. 625-639.

5. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration // IEEE Trans. on pattern analysis and machine intelligence. 2000. V. 22, Is. 11. P. 1330-1334.
6. Vetterling W.T. Numerical Recipes in C. – New York: Cambridge University Press (Massachusetts), 1992.
7. Цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений / А.В. Дворкович, В.П. Дворкович, Ю.Б. Зубарев и др. – М.: МЦНТИ, 1997.