

## Способ бесконтактного измерения размеров крупногабаритных объектов

А.А. Михайличенко<sup>1</sup>, А.Б. Клещенко<sup>2,3</sup>  
alexey.a.mikh@gmail.com|aktech@inbox.ru

<sup>1</sup>Институт математики, механики и комп. наук, Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия;

<sup>2</sup>Физический факультет, Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия;

<sup>3</sup>ООО «ИЗОСКАН», г. Ростов-на-Дону, Россия

*В работе представлен метод бесконтактного измерения размеров крупных объектов на принципе лазерной триангуляции. Предложенный метод отличается возможностью применения в условиях сильной посторонней за- светки, высокой скоростью измерений и низкой стоимостью оборудования.*

**Ключевые слова:** Компьютерное зрение, Бесконтактное измерение, Лазерное сканирование, Трехмерная рекон- струкция.

## An Approach to Non-Contact Measurement of Large-Sized Objects

A.A. Mikhaylichenko<sup>1</sup>, A.B. Kleschenkov<sup>2,3</sup>  
alexey.a.mikh@gmail.com|aktech@inbox.ru

<sup>1</sup>Institute of Mathematics, Mechanics and Computer Science, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia;

<sup>2</sup>Faculty of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia; <sup>3</sup>ISOSCAN, Ltd, Rostov-on-Don, Russia

*In this paper we present an approach to non-contact measurement of large-sized objects based on laser triangulation principle. The proposed method is characterized by application in conditions of strong external illumination, high measurement rate and low hardware cost.*

**Keywords:** Computer Vision, Non-Contact Measurement, Laser Scanning, 3D Reconstruction.

### 1. Введение

Во многих задачах промышленной автоматизации, логистики и управления движением требуется измере- ние размеров крупногабаритных объектов бесконтакт- ным способом. Одним из распространенных подходов является построение пространственной модели объек- та с последующим определением геометрических па- раметров. Для пространственной реконструкции мож- но использовать технологии с применением сканирую- щих лазерных дальномеров [1], лидаров, различные ал- горитмы пассивного и активного стереовидения [2, 3] и т.п.

В работе предлагается метод построения трехмер- ного облака точек измеряемого объекта методом лазер- ной триангуляции. Суть метода заключается в высо- коскоростном измерении профилей объекта с одновре- менным движением объекта. Новизна метода заклю- чается в применении в качестве подсветки линии из точек, в отличии о классического подхода, при кото- ром используется непрерывная линия. Это позволяет поднять отношение сигнал/шум без увеличения мощ- ности подсветки, а также за счет дополнительной об- работки данных уменьшить вероятность ошибок из- мерений при возникновении бликов. Полученный на- бор профилей и измеренная скорость движения объек- та в моменты измерения профилей позволяют постро- ить пространственную модель объекта.

### 2. Обзор

В настоящее время существуют различные подходы и технические решения для реконструкции трехмер- ных моделей объектов. У каждой из технологий свои условия применения, требования к оборудованию, пре- имущества и недостатки.

3D сенсоры вроде Microsoft Kinect или Intel RealSense имеют ограниченную область применения. Устройства, использующие инфракрасную подсветку или инфракрасные датчики глубины и показывающие хорошие результаты в помещении, в уличных услови- ях из-за солнечного света неприменимы. Современные версии RealSense, которые помимо инфракрасных дат- чиков используют алгоритмы стереозрения, в уличных условиях демонстрируют лучшие результаты, однако в случае бликов, тени или просто обширных однотонных участков на изображении зачастую дают неверные ре- зультаты.

Одними из наиболее популярных для промышлен- ных применений являются системы на основе сканиру- ющих лазерных дальномеров. Во многих приложениях измеряемый объект движется (например, груз на кон- вейере или автомобиль на дороге). Если скорость дви- жения известна, применяется система из двух скани- рующих дальномеров, которые используются для из- мерения поперечного профиля объекта одновременно с его движением через измерительную зону. Если же скорость движения объекта неизвестна, то для ее из- мерения система дополняется третьим сканирующим дальномером. Такой подход позволяет получить вы-

сокую точность измерений при низкой скорости движения объекта. Однако, при увеличении скорости до 10 – 15 м/с из-за ограниченной скорости сканирования (как правило, 50–100 изм./сек) возрастает ошибка измерения длины. Другим важным недостатком является высокая стоимость оборудования, которая доходит до 15–20 тыс. долл. США.

Снизить стоимость решения можно с помощью технологии стереовидения [2, 3], которая позволяет получить трехмерную модель объекта по данным с двух и более камер. Технология реконструкции трехмерной сцены методом стереовидения в настоящее время набирает популярность в различных приложениях, однако существующие методы либо обладают большой вычислительной сложностью, что усложняет их применение в задачах реального времени, либо имеют низкую точность реконструкции. Более того, точность реконструкции снижается для объектов с хорошо отражающими поверхностями из-за бликов на изображении.

Еще одна технология трехмерного сканирования заключается в измерении расстояний до точек на поверхности объекта методом лазерной триангуляции [4, 5]. Лазерная триангуляция основана на способности лазерного луча распространяться в хорошо коллимированной форме на большие расстояния. Для измерения расстояния до определенной точки происходит подсветка этой точки лазером. Отраженный свет от этой точки контролируется детектором, который устанавливается на некотором расстоянии источника от лазерной подсветки, таким, что источник излучения, объект и детектор образуют треугольник. Положение яркого пятна на фоточувствительной матрице детектора показывает направление входящего света, т.е. угол между лазерным лучом и отраженным светом, откуда может быть рассчитано расстояние.

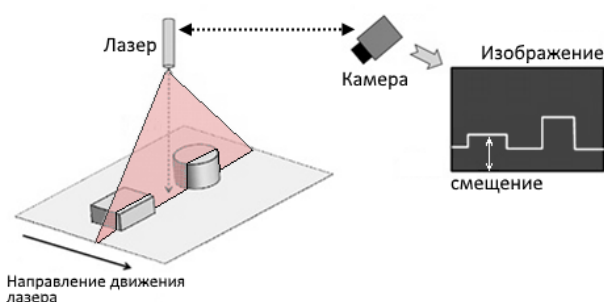


Рис. 1. Измерение профиля объекта методом лазерной триангуляции.

Для измерения профиля объекта вместо одного луча используют линию [6]. Эту линию, как правило, получают из луча с помощью призмы. В этом случае, на приемной матрице фоточувствительного элемента формируется уже не одна точка, а отраженное от объекта изображение линии на его поверхности. Форма изображения кривой позволяет получить профиль объекта (рис. 1). В работе предложен способ измерения

профиля на основе лазерной триангуляции и включающий ряд решений для повышения точности измерений.

### 3. Описание

Исходя из условий применения к системе измерения профилей предъявляются противоречивые требования — эксплуатация на открытом пространстве при наличии прямых солнечных лучей и соблюдение требований по лазерной безопасности, что накладывает ограничения на мощность лазерного излучения. В [5] показано, что без применения специальных приемов метод активной лазерной триангуляции в условиях прямого солнечного света практически не работает. Поэтому было применено несколько технических решений, позволяющих максимизировать отношение полезного сигнала к уровню естественного освещения.

Во-первых, в качестве профиля лазерной подсветки используется не сплошная линия, а линия, состоящая из отдельных точек — для формирования такой структурированной подсветки применены специализированные дифракционные оптические элементы. Такой прием позволяет снизить мощность источника подсветки пропорционально увеличению расстояния между изображением точек на поверхности объекта при сохранении яркости в самой точке. Во-вторых, для оптической фильтрации сигнала подсветки и минимизации уровня шумовой фоновой засветки, возникающей от посторонних источников света, солнечного света и бликов, применены узкополосные оптические фильтры на длину волны лазерной подсветки. И в-третьих, используется минимально возможное время экспозиции измерительной камеры, при этом момент экспозиции синхронизирован с моментом включения подсветки. Эти три приема позволили существенно увеличить отношение сигнал/фон не превышая предельно допустимую разрешенную интегральную энергию лазерного излучения.

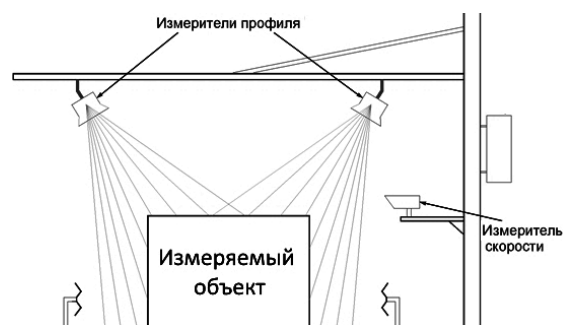


Рис. 2. Схема измерительного комплекса.

В каждый момент времени система получает изображение объекта, подсвеченного подсветкой. Одной из главных задач детектора является задача обнаружении точек, формируемых на поверхности объекта подсветкой. После того, как на кадре найдены необходимые пятна (или подтверждено их отсутствие), по смещению пятна определяется расстояние от камеры до объекта.

На следующем этапе смещение преобразуется в реальные координаты соответствующей точки, набор которых для одного кадра и образует профиль объекта. По набору таких профилей для разных моментов времени, зная мгновенную скорость объекта для каждого профиля, можно получить трехмерную модель объекта.

### 3.1. Поиск пятен на изображении

На рис. 3, представлено типовое изображение, получаемое измерительной камерой. Видно, что точки от лазерной подсветки представлены в виде «пятен» различного радиуса и яркости. В компьютерном зрении существуют различные подходы к обнаружению подобных «пятен» — дифференциальные детекторы, которые основаны на вычислении производных [7], методы, основанные на поиске локального максимума интенсивности [8] или других особенностей изображения (SURF, SIFT) и т.п.

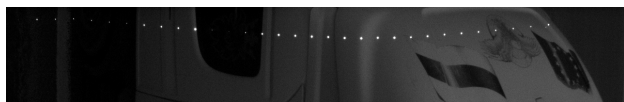


Рис. 3. Пример изображения, полученного с измерительной камеры.

В задачах реального времени важным критерием при выборе алгоритма является быстрдействие, так как это определяет частоту измерений, и, соответственно — степень детализации реконструкции. В качестве основного был выбран алгоритм, основанный на свертке изображения с лапласианом гауссиана (Laplacian of Gaussian, LoG).

Еще одной важной особенностью метода, позволяющей понизить вероятность ложного обнаружения пятен является то, что положение точки на изображении для каждого из лучей при изменении дальности до объекта изменяется вдоль определенной кривой — траектории точки. Для каждого из лучей есть своя траектория (рис. 4), которая не пересекается с траекториями других точек. Таким образом, поиск пятен на изображении достаточно проводить только вдоль заранее известных траекторий, что снижает вероятность обнаружения ложных пятен и существенно ускоряет обработку одного кадра за счет уменьшения областей поиска.

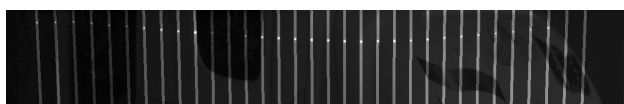


Рис. 4. Траектории точек, формируемых лазерной подсветкой на поверхности объекта.

Дополнительно, чтобы избежать срабатывания алгоритма по ложным пятнам (бликам) или по шуму, обнаруженные пятна подвергаются фильтрации по уровню энергии. Критериями здесь являются отношение яркости предполагаемого пятна к следующему по яр-

кости пятну и превышение яркости пятна над среднеквадратичной яркостью остальной области поиска данного пятна. Пороги достаточно подобрать один раз при калибровке всего алгоритма на реальных данных.

### 3.2. Калибровка

Измерение дальности до объекта для каждого луча с учетом известного углового расстояния между лучами позволяет построить профиль объекта, заданный некоторым количеством точек на плоскости. При этом, дальность является функцией пиксельного смещения образа луча на изображении. Таким образом, для точной количественной оценки расстояния необходима информация о соответствии между пиксельным смещением точки на изображении и дальностью до объекта. В идеальных условиях эту зависимость можно определить аналитически, однако, из-за оптических искажений объектива, температурной зависимости размеров оптических элементов и т.п. эта задача сильно усложняется.

Для получения однозначного соответствия между дальностью и смещением проще провести ряд измерений, которые, по сути, являются калибровкой системы. Калибровка позволяет получить требуемые зависимости для всех лучей, и состоит из следующих этапов:

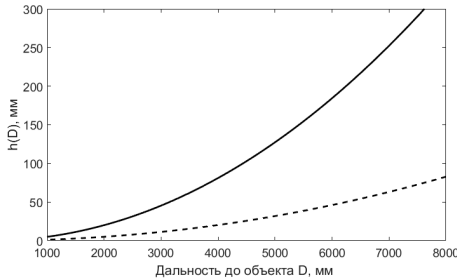
- получение изображений точек (пятен) для каждого из лучей при различных дальностях из рабочего диапазона и локализация этих точек;
  - аппроксимация полученной зависимости дальность/смещение для каждого из лучей — наилучший результат был получен при аппроксимации иррациональным полиномом 2-го порядка вида
- $$y = \frac{a}{x + b};$$
- определение траекторий перемещения изображения точек каждого из лучей при изменении дальности (аппроксимация полиномом 2-го порядка);
  - измерение углов между лучами.

Одной из важнейших характеристик системы является точность реконструкции, которая определяется точностью измерения дальности и угловыми расстояниями между лучами. В свою очередь, точность измерения дальности определяется точностью проведения калибровки и разрешающей способностью по дальности. Разрешающая способность  $h$  измерения дальности методом лазерной триангуляции зависит от дальности до объекта  $D$ , разности между лазером и камерой  $B$ , фокусного расстояния  $f$  и физического размера пикселя  $p$ :

$$h(D) = \frac{D^2 p}{f B} \quad (1)$$

Как видно, разрешение метода квадратично падает с увеличением дальности до объекта. Для повыше-

ния разрешения возможно определение координат пятна с субпиксельной точностью. Для этого используется аппроксимация окрестности пятна гауссианом, с помощью которого и определяется центр этого пятна. На рис. 5 представлена зависимость разрешения метода от дальности до объекта, измеренная экспериментально.



**Рис. 5.** Зависимость разрешающей способности измерения дальности от расстояния до объекта без уточнения (сплошная линия) и с субпиксельным уточнением в 4 раза (пунктирная линия).

Разрабатываемая система предназначена для измерения габаритных размеров транспортных средств (ТС), поэтому для возможности полной реконструкции измеряемых ТС необходимо определение положение измерителей профиля относительно дороги. Для этого рассмотрим систему координат (СК) с центром в точке размещения камеры (рис. 6, а). Ось  $y$  направлена вдоль луча с номером 1. Точки на поверхности земли в этой СК имеют координаты:

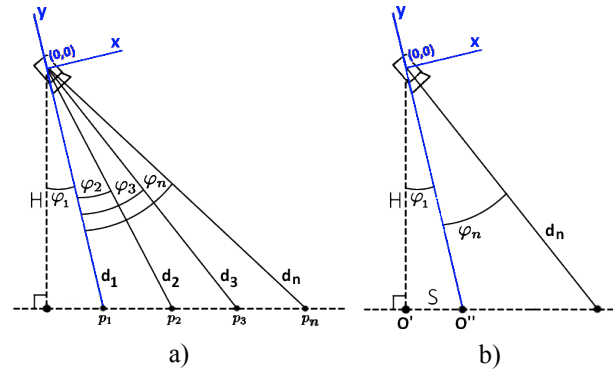
$$\begin{aligned} p_1 &= (0, -d_1), \\ p_2 &= (d_2 \sin \varphi_2, -d_2 \cos \varphi_2), \\ &\dots \\ p_n &= (d_n \sin \varphi_n, -d_n \cos \varphi_n). \end{aligned} \quad (2)$$

Используя координаты этих точек, находим при помощи метода наименьших квадратов уравнение прямой  $L$  в СК  $Ox_y$ . Прямую  $L$  далее будем называть «горизонтом». Чтобы определить высоту расположения камеры  $H$ , достаточно найти расстояние до этой прямой от точки  $(0, 0)$ .

Таким образом, в результате калибровки определяются данные о точной зависимости пиксельного смещения и дальности до поверхности объекта для каждого из лучей, траектории перемещения этих пятен (для оптимизации их поиска), углы между лучами, а также положение измерительной камеры относительно плоскости отсчета. Эта информация позволяет однозначно определить пространственное положение точек профиля объекта в абсолютных координатах.

**Построение пространственной модели объекта.** Рассмотрим рис. 6, б. Если углы лучей заданы относительно первого луча, для дальнейших преобразований координат необходимо определить его угол. К этому моменту уже должны быть известны точки горизонта и его уравнение в виде

$$y = k_H x + b_H. \quad (3)$$



**Рис. 6.** Иллюстрации к преобразованиям координат.

$O'$  — точка пересечения горизонта и нормали, проведенной к горизонту через точку  $(0, 0)$ ,  $O''$  — точка пересечения горизонта и оси  $y$ , где  $O''_x = 0$ , а  $O''_y$  находим из уравнения (3) при  $x = 0$ . Обозначим отрезок  $O'O'' = S$ , и тогда

$$\varphi_1 = \arctg \left( \frac{S}{H} \right). \quad (4)$$

Для перехода из СК центра камеры и первого луча в качестве оси  $y$  к СК с центром в точке  $O'$  можно воспользоваться следующими формулами:

$$\begin{cases} x_n = d_n \sin (\varphi_n + \varphi_1), \\ y_n = H - d_n \cos (\varphi_n + \varphi_1), \end{cases} \quad (5)$$

где  $x_n, y_n$  — координаты точки  $p_n$  в СК с центром в  $O'$ ,  $d_n$  — дальность для  $n$ -го луча.

Реконструкция отдельных поперечных профилей объекта производится при помощи формул (5). Для определения длины объекта достаточно знать временные метки каждого профиля и скорость объекта для каждой такой временной метки.

Несмотря на довольно точную реконструкцию, которая производится описанным выше методом, на завершающей стадии обработки для гарантированного исключения выбросов, возникающих от шума и бликов на поверхности объекта, выполняется фильтрация облака точек, удаляющая такие выбросы. Описание примененного алгоритма фильтрации выбросов можно найти в [9].

#### 4. Эксперимент

Описанный подход был апробирован на задаче измерения габаритных размеров движущихся ТС. Для этого применено два измерителя профиля, размещенных над обочинами полосы движения. Результаты реконструкции представлены на рис. 7.

Измерения мгновенной скорости движения ТС производится оптическим методом с помощью растрового измерителя поперечной скорости, обеспечивающего точность измерения  $0,2 - 0,5\%$ .

Программное обеспечение измерительного комплекса разработано на языке C++. При описанном спо-

собе обработки изображения размером  $200 \times 1280$  с целью поиска на нем пятен от подсветки время обработки одного изображения на процессоре Intel Core i7 не превышает 3–4 мс, при этом одновременно могут обрабатываться изображения от нескольких измерителей профиля.

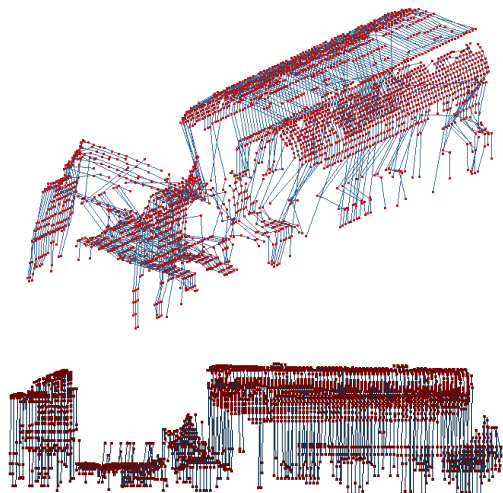


Рис. 7. Пример реконструкции.

Погрешность измерения поперечных размеров зависит от места установки измерителей профиля. При высоте их установке порядка 6 м над уровнем дороги и таком же расстоянии между ними и с применением алгоритма субпиксельной локализации она не превышает 3 – 3,5 см при высоте объекта 1,5 м и уменьшается при увеличении размера ТС (т.к. уменьшается измеряемая дальность). При использовании двух измерителей профиля с частотой 100 изм./сек, разрешающая способность по определению длины ТС, движущегося на скорости 40 км/ч, составляет около 10 см и уменьшается при повышении частоты кадров либо при снижении скорости движения объекта.

## 5. Выводы

В работе представлен метод, позволяющий с высокой точностью проводить реконструкцию крупногабаритных движущихся объектов. Результаты реконструкции могут быть использованы для определения линейных размеров объекта, анализа его формы и т.п. Погрешность измерения ширины и высоты ТС составляет не более 3-3,5 см, а измерения длины — не более 10 см при скорости до 40 км/ч.

Актуальным остается вопрос о методе измерения скорости. В настоящее время для этого применен растровый измеритель скорости, но ведутся исследования по применению альтернативных методов — например, использования оптического потока.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о правильности выбранного подхода для измерения размеров движущихся объектов и целесообразности дальнейших исследований.

## 6. Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект №1639ГС1/24342).

## 7. Литература

- [1] Christie D., Jiang C., Paudel D., Démonceaux C. 3D Reconstruction of Dynamic Vehicles using Sparse 3D-Laser-Scanner and 2D Image // International Conference on Informatics and Computing, 2016.
- [2] Hirschmuller H. Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE transactions on, 2008.
- [3] Hu F.J., Zhao Y. Comparative research of matching algorithms for stereo vision // Journal of Computational Information Systems 9(13).
- [4] Ashok W. R., Panse M. S., Apte H. Laser Triangulation Based Object Height Measurement // International journal for research in emerging science and technology, 2015. – Volume: 2, No.3.
- [5] Ilstrup D., Manduchi R. Active Triangulation in the Outdoors: A Photometric Analysis // Proceedings of the 5th International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, 2010.
- [6] Jiang C., Yang J., Zhang L., Liu Z. Information extraction and three-dimensional reconstruction for a small laser scanning detector // International Conference on Optoelectronics and Microelectronics, 2012.
- [7] Kong H., Akakin H.C., Sarma S.E. A Generalized Laplacian of Gaussian Filter for Blob Detection and Its Applications // IEEE Transactions on Cybernetics, 2013. – Volume: 43, No.6. – pp.1719-1733.
- [8] Vincent L., Soille P. Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 1991. – Volume. 13, No. 6, – pp. 583–598.
- [9] Posio J., Leiviskä K., Ruuska J., Ruha P. Outlier Detection for 2D Temperature Data // Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, July 6–11, 2008.