

# Реализация метода определения внешних параметров камеры с использованием кватернионов на платформе NVIDIA Jetson

Е.В. Гошин<sup>1,2</sup>, А.П. Котов<sup>2</sup>, А.В. Куклева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

**Аннотация.** Определение положения и ориентации движущегося объекта в пространстве – актуальная задача в робототехнике. Часто для этой задачи используются системы компьютерного зрения без радиолокационных сенсоров, чтобы обеспечить «невидимость». К таким системам компьютерного зрения также предъявляются требования малогабаритности и энергоэффективности. Для решения задачи предлагается использовать метод определения внешних параметров камеры с использованием кватернионов. В предыдущих работах авторы исследовали точность и надежность метода. Данная статья посвящена реализации алгоритма на платформе Jetson. Выполнены эксперименты по оценке времени выполнения предложенной реализации.

## 1. Введение

В роботехнике целый класс задач посвящен движущимся системам компьютерного зрения. Такие системы присутствуют как в смартфонах [1], так и на борту беспилотного летательного аппарата [2]. Предполагается что камера статично закреплена на поверхности аппарата. При таком условии возможно решение следующих задач: определение траектории движения объекта, прокладывание маршрутов, выбор оптимального маршрута, изменение положение объекта в пространстве, построение трехмерных моделей местности [3], формирование трехмерный моделей объектов. При возникновении чрезвычайных климатических ситуаций, например, наводнений, оползней, ураганов часто применяются беспилотные летательные аппараты.

Нахождение внешних параметров является необходимым для определения точных координат в выбранной глобальной системе координат. Например, без внешних параметров съемки невозможно построить трехмерную модель с реальными высотами, а только с относительными.

В статье рассматриваются вопросы, связанные с определением внешних параметров съёмки для устройств, к которым предъявляются требования малогабаритности и энергоэффективности. В данной работе используется модель преобразования координат разноракурсных изображений, основанная на представлении трёхмерных изображений и параметров съёмки в виде дуальных кватернионов, и предлагается метод поиска параметров

камер, основанный на использовании плюккеровых координат для описания прямых в трёхмерном пространстве.

## 2. Определение параметров движения камеры

Схема технологии определения параметров движения аппарата (камеры) в пространстве по последовательности кадров приведена на рисунке 1. Технология состоит из трех основных этапов.



**Рисунок 1.** Схема основных этапов технологии определения параметров движения аппарата (камеры) в пространстве по последовательности кадров.

Первый этап технологии – загрузка последовательности кадров. На данном этапе осуществляется регистрация сцены камерой и сохранение данных в память вычислительного устройства для дальнейших расчетов. Последовательность кадров используется в качестве исходных данных.

Второй этап – поиск соответствующих точек на соседних кадрах. Следует отметить, что соседние кадры представляют собой пару разноракурсных изображения, которые будем называть первое и второе изображение. На данном этапе не обязательно искать для каждой точки на первом изображении соответствующую точку на втором изображении. Достаточно выбрать 100 – 1000 равномерно распределенных соответствующих точек по полю первого изображения.

Третий этап – определение внешних параметров. Данная работа посвящена реализации этого этапа на платформе Jetson [4]. Идея этапа состоит в том, чтобы определить параметры поворота и сдвига камер в глобальной системе координат непосредственно по заданным соответствующим точкам видов, используя дуальные кватернионы в качестве инструмента описания этих параметров.

## 3. Описание метода определения внешних параметров

Для третьего этапа использовался метод определения внешних параметров камеры с использованием кватернионов, который исследовался авторами в статье [5]. Далее приводится краткое описание этого метода. Даны два набора соответствующих точек на изображениях  $P = (u_i, v_i)$ ,  $P' = (u'_i, v'_i)$ , где  $(u_i, v_i)$  и  $(u'_i, v'_i)$  – координаты этих точек на первом и втором изображениях, соответственно.

При известной матрице внутренних параметров камеры  $\mathbf{K}$  координаты пикселей изображений  $(u_i, v_i)$ ,  $(u'_i, v'_i)$  могут быть преобразованы в координаты  $(x_i, y_i)$  и  $(x'_i, y'_i)$  на плоскости проекции первой и второй камеры соответственно с использованием следующего преобразования:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{K}^{-1} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Чтобы избежать неоднозначности, связанной с обозначением дуального кватерниона в виде восьмёрки чисел (5), скалярное произведение в данной работе будет обозначаться  $\langle a, b \rangle$ .

Число  $Q = p + q\epsilon$  называется дуальным кватернионом, если  $p$  и  $q$  – кватернионы [6].

Для любой точки пространства вектор, связывающий начало координат и эту точку, может быть описан с помощью дуального кватерниона:  $v = ((1, 0, 0, 0), (0, X, Y, Z))$ , где  $(X, Y, Z)$  – координаты точки в трехмерном пространстве.

Тогда, для того чтобы выполнить поворот вектора  $(X, Y, Z)$ , описываемого кватернионом  $v$  на угол  $\theta \in [0, \pi]$  вокруг оси, направление которой задает единичный вектор  $\underline{u} = (u_x, u_y, u_z)$ , и сдвиг данной точки на вектор  $(t_x, t_y, t_z)$ , необходимо выполнить следующую операцию:

$$v' = \sigma v \sigma^\circ,$$

где  $\sigma = \left( Q_R, \frac{1}{2} Q_T \cdot Q_R \right)$ .

Здесь действительная часть представляет собой кватернион поворота  $Q_R = \left( \cos \frac{\theta}{2}, u_x \sin \frac{\theta}{2}, u_y \sin \frac{\theta}{2}, u_z \sin \frac{\theta}{2} \right)$ , а дуальная – произведение кватернионов поворота  $Q_R$  и сдвига  $Q_T = (0, t_x, t_y, t_z)$ .

Уравнения прямых для пары соседних кадров рассматриваются в плюккеровых координатах [7]. Одна из прямых задается в системе координат второй камеры, которые соответствуют

$$L'' = \sigma L \sigma^* = \sigma((0, x, y, 1), (0, 0, 0, 0)) \sigma^*,$$

где  $\sigma$  – искомый дуальный кватернион поворота и сдвига  $\sigma = ((a, b, c, d), (\alpha, \beta, \gamma, \delta))$ .

Поскольку в координатах второй камеры прямые  $L'$  и  $L''$  должны пересекаться, зададим функцию  $f(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta)$  и применим условие пересечения прямых:

$$\langle l, m' \rangle + \langle m, l' \rangle = 0.$$

После упрощения:

$$f(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = \langle pvq^* + qvp^*, (0, x', y', 1) \rangle = 0$$

Для  $N$  пар соответствующих точек формируется  $N + 1$  уравнений:

$$\begin{cases} f_1(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0 \\ f_2(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0 \\ \dots \\ f_N(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0 \\ f_{N+1}(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0 \end{cases}$$

Чтобы избежать ситуации, когда сдвиг оказывается нулевым, добавляется  $N + 1$  уравнение  $f_{N+1}(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0$ , удовлетворяющее условию  $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 + \delta^2 = 1$ .

В итоге, задача определения параметров сдвига и поворота сводится к решению полученной системы нелинейных уравнений. Для решения системы уравнений использовался метод Ньютона для многомерного случая. Подробное описание вычислительной процедуры описано в работе [5].

#### 4. Результаты экспериментов

Технология реализовывалась на платформе Jetson. Эксперимент состоял в том, чтобы выполнить два требования для третьего этапа: сохранить точность и надежность метода, а также обеспечить приемлемое время выполнения. Моделировался эксперимент, в котором вычисляется изменение местоположения одной камеры. Предполагается, что соседние кадры получены одной камерой в разные моменты времени. Были выбраны следующие внутренние параметры камеры.

$$K_1 = K_2 = K = \begin{bmatrix} 960 & 0 & 960 \\ 0 & 960 & 540 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Значения координат соответствующих точек на соседних кадрах моделировались, исходя из заданных трехмерных координат  $(X, Y, Z)$ . Параметры поворота и сдвига камеры в глобальной системе координат вычислялись по заданным соответствующим точкам путем решения системы нелинейных уравнений (). Эксперимент был проведен для 100, 300 и 1000 исходных точек  $(X, Y, Z)$ .

Для решения системы уравнений использовались процедуры библиотеки OpenCV [8]. Выбор библиотеки OpenCV продиктован ограниченным набором библиотек совместимых с платформой Jetson TK1. В зависимости от числа пар соответствующих точек формировалась система нелинейных уравнений. Решение находилось итеративно, на каждой итерации выполнялось сингулярное разложение. Например, в случае 300 исходных точек формировалась матрица  $301 \times 7$ .

Метод тестировался на платформе Jetson TK1 в операционной системе Ubuntu 14.04 LTS. Технические характеристики указаны в таблице 1.

**Таблица 1.** Технические характеристики платформы NVIDIA Jetson TK1.

Jetson TK1	
<b>GPU</b>	NVIDIA Kepler GPU с 192 ядрами CUDA Четырехъядерный процессор ARM® Cortex™-A15 с архитектурой
<b>Процессор</b>	NVIDIA 4-Plus-1™
<b>Память</b>	2 ГБ памяти x16, 64-битная шина

Проведены эксперименты по оценке времени выполнения предложенного метода. Результаты сравнительных исследований времени реализаций алгоритма приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Время выполнения одной итерации алгоритма на платформе Jetson.

Число пар соответствующих точек	100	300	1000
Время выполнения в микросекундах	135	183	414

Время в таблице указаны для одной итерации, потому что эксперимент проводился на тестовых данных. На тестовых данных алгоритм сходился за 5-7 итераций. Для реальных данных время реализации может отличаться.

### 5. Заключение

Полученные эксперименты показывают, что этап определения внешних параметров камеры выполняется за приемлемое время на платформе Jetson TK1. Дальнейшие исследования будут проведены с реальными данными, полученных с камеры. Такой эксперимент представляет интерес на предмет определения устойчивости алгоритма. Предполагается, что параметры движения необходимо определять в реальном времени, что накладывает ограничения по времени. Однако, необходимо учитывать время получения видеопотока и время сопоставления соседних кадров. Поэтому эти этапы планируется реализовать на платформе Jetson TK1 с применением технологии CUDA.

### 6. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-07-00729 а, 17-29-03112 офи-м).

## 7. Литература

- [1] Caldini, A. Smartphone-based obstacle detection for the visually impaired / A. Caldini, M. Fanfani, C. Colombo // *Image Analysis and Processing – ICIAP*, 2015. – P. 480-488.
- [2] Callow, N. Surface and sub-surface anatomy of the landscape: integrating Unmanned Aerial Vehicle Structure from Motion (UAV-SfM) and Ground Penetrating Radar (GRP) to investigate sedimentary features in the field.-an example from NW Australia / N. Callow, M. Leopold, S.M. May // *EGU General Assembly Conference Abstracts*. – 2017. – Vol. 17. – P. 8621.
- [3] Hesse, R. Combining structure-from-motion with high and intermediate resolution satellite images to document threats to archaeological heritage in arid environments / R. Hesse // *Journal of Cultural Heritage*. – 2015. – Vol. 16(2). – P. 192-201.
- [4] Платформа для разработок NVIDIA Jetson TK1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nvidia.ru/object/jetson-tk1-embedded-dev-kit-ru.html> (01.01.2018).
- [5] Гошин, Е.В. Метод определения внешних параметров камеры по паре изображений / Е.В. Гошин, И.Р. Усеинова // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2017. – Т. 18, № 4. – С. 279–284. DOI: 10.17587/mau.18.279-284.
- [6] Smith, M. Applications of Dual Quaternions in Three Dimensional Transformation and Interpolation / M. Smith. – 2013. – P. 36.
- [7] Schwartz, S.E. Development of the kinematic model for an ultrasound scanning machine by means of dual quaternion transformations of screw coordinates / S.E. Schwartz // *Massachusetts institute of technology*. – 2015. – P. 480-488.
- [8] Библиотека обработки изображений OpenCV [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://opencv.org> (01.01.2018).

# Implementation of quaternion-based method for intrinsic camera parameters estimation using NVIDIA Jetson platform

Ye.V. Goshin<sup>1,2</sup>, A.V. Kukleva<sup>2</sup>, A.P. Kotov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

<sup>2</sup>Samara National Research University, Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086

**Abstract.** Determination of the position and orientation of a moving object in space is an actual task in robotics. Often, computer vision systems without radar sensors are used for this task to ensure "invisibility". Such computer vision systems also require small size and energy efficiency. To solve the problem, it is proposed to use the method of determining the external parameters of the camera using quaternions. In previous works, the authors investigated the accuracy and reliability of the method. In this article, the authors addressed the implementation of the algorithm on the Jetson platform. Experiments were performed to estimate the execution time of the proposed implementation.

**Keywords:** reconstruction, three-dimensional model, quaternions, parallel algorithm.