Оценка параметров движения монокулярной камеры как задача минимизации косинусного расстояния

Е.В. Гошин[1,2], А.В. Куклева[1]

[1]Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086
[2]Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В статье представлен метод оценки параметров движения камеры по набору соответствующих точек посредством решения задачи нелинейной оптимизации. Параметры поворота камеры представляются в виде параметров Эйлера, что позволяет избежать избыточности и необходимости дальнейшей коррекции ответа. Кроме того, использование угла в качестве меры близости позволяет свести поставленную задачу к безусловной минимизации, что расширяет выбор методов для её решения.

1. Введение

При решении практических задач, связанных с использованием мобильных устройств технического зрения, возникает задача определения неизвестных параметров движения по изображениям, полученным с этих устройств [1]. В общем случае считается, что объекты сцены статичны.

Описанная задача значительно упрощается в случае, когда сама камера предоставляет возможности для формирования трёхмерной модели сцены. Для этого могут использоваться RGB-d камеры [2] и стереокамеры [3]. RGB-d камеры оснащены устройствами измерения расстояния до объектов. В этом случае задача сводится к сопоставлению двух облаков точек и вычислению соответствующего трёхмерного преобразования. На стереокамерах в каждый момент времени формируется два изображения, что позволяет оценить расстояние до объектов и свести задачу к предыдущей. В настоящей работе рассматривается одна из наиболее сложных и актуальных задач – оценка параметров движения устройства с монокулярной камерой.

2. Задача и метод оценки параметров движения

Пусть 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 $\mathbf{K}$ [4] координаты пикселов 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 единственным образом с использованием следующего преобразования:

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

Далее в работе будут использоваться координаты (x_i, y_i) и (x_i', y_i').Кроме этого, в работе будет использоваться следующая модель преобразования координат[5]:

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}\mathbf{M}_G + \mathbf{t},$$

где $\mathbf{M}_G$ – координаты точки в глобальной системе координат, $\mathbf{M}$ – координат точки в системе координат, связанной с камерой, $\mathbf{R}$ – матрица поворота, $\mathbf{t}$ – вектор сдвига.

В качестве параметров поворота будут использоваться параметры Эйлера [6], представляющие собой четвёрку чисел (a,b,c,d). Матрица поворота может быть представлена с использованием этих параметров следующим образом [7]:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^2+b^2-c^2-d^2 & 2(bc-ad) & 2(bd+ac) \\ 2(bc+ad) & a^2+c^2-b^2-d^2 & 2(cd-ab) \\ 2(bd-ac) & 2(cd+ab) & a^2+d^2-b^2-c^2 \end{pmatrix}$$

Обозначим точки в системе координат первой и второй камер как $\mathbf{M}$ и $\mathbf{M}'$, а параметры этих камер, соответственно, (a,b,c,d,t_x,t_y,t_z) и $(a',b',c',d',t_x',t_y',t_z')$Без потери общности предположим, что система координат первой камеры совпадает с глобальной системой координат и, следовательно, имеетследующие параметры:

$$a=1,\quad b=0,\quad c=0,\quad d=0,\quad t_x=0,\quad t_y=0,\quad t_z=0.$$

С учётом того, что изображение представляет собой проекцию точек сцены на плоскость камеры, связь координат соответствующих точек и параметров движения может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} x = \dfrac{X}{Z}, \\ y = \dfrac{Y}{Z}, \end{cases} \qquad \begin{cases} x' = \dfrac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + t_x'}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z'}, \\ y' = \dfrac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + t_y'}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z'}, \end{cases}$$

Пусть $k = \dfrac{1}{Z}$, тогда

$$X = \frac{x}{k},\quad Y = \frac{y}{k},\quad Z = \frac{1}{k},$$

и

$$\begin{cases} x' = \dfrac{R_{11}x + R_{12}y + R_{13} + kt_x}{R_{31}x + R_{32}y + R_{33} + kt_z}, \\ y' = \dfrac{R_{21}x + R_{22}y + R_{23} + kt_y}{R_{31}x + R_{32}y + R_{33} + kt_z}, \end{cases}$$

Введём вспомогательные переменные

$$x_r = R_{11}x + R_{12}y + R_{13},$$

$$y_r = R_{21}x + R_{22}y + R_{23},$$

$$z_r = R_{31}x + R_{32}y + R_{33},$$

тогда

$$\begin{cases} x' = \dfrac{x_r + kt_x'}{z_r + kt_z'}, \\ y' = \dfrac{y_r + kt_y'}{z_r + kt_z'}, \end{cases} \tag{1}$$

Рассмотрим два вектора направления на плоскости. Первый $\mathbf{d}^{\mathbf{I}} = \left(d_x^I, d_y^I\right)$ связывает проекцию точки $\left(x_r, y_r, z_r\right)$ – $\left(\dfrac{x_r}{z_r}, \dfrac{y_r}{z_r}\right)$ с точкой $\left(x', y_r'\right)$:

$$\left(d_x^I, d_y^I\right) = \left(x' - \frac{x_r}{z_r}, y' - \frac{y_r}{z_r}\right).$$

Второй $\mathbf{d}^{\mathbf{II}} = \left(d_x^{II}, d_y^{II}\right)$ связывает эту же проекцию с проекцией вектора сдвига $\left(\dfrac{t_x}{t_z}, \dfrac{t_y}{t_z}\right)$:

$$\left(d_x^{II}, d_y^{II}\right) = \left(\frac{t_x}{t_z} - \frac{x_r}{z_r}, \frac{t_y}{t_z} - \frac{y_r}{z_r}\right).$$

В соответствии с выражением (1)и геометрией съёмкиэти вектора должны совпадать по направлению.

Введём косинусное расстояние [8] $f\left(\mathbf{d}^{\mathbf{I}}, \mathbf{d}^{\mathbf{II}}\right)$ между векторами:

$$f\left(a', b', c', d', t_x', t_y', t_z'\right) = f\left(\mathbf{d}^{\mathbf{I}}, \mathbf{d}^{\mathbf{II}}\right) = 1 - \frac{\left\langle \mathbf{d}^{\mathbf{I}}, \mathbf{d}^{\mathbf{II}} \right\rangle}{\left\|\mathbf{d}^{\mathbf{I}}\right\| \cdot \left\|\mathbf{d}^{\mathbf{II}}\right\|}.$$

Тогда задача поиска параметров сводится к задаче безусловной минимизации следующей суммы:

$$\min_{a', b', c', d', t_x', t_y', t_z'} \sum_i \left[f\left(a', b', c', d', t_x', t_y', t'\right)\right]^2 = \min_{a', b', c', d', t_x', t_y', t_z'} \sum_i \left[1 - \frac{\left\langle \mathbf{d}^{\mathbf{I}}, \mathbf{d}^{\mathbf{II}} \right\rangle}{\left\|\mathbf{d}^{\mathbf{I}}\right\| \cdot \left\|\mathbf{d}^{\mathbf{II}}\right\|}\right]^2.$$

В ходе работы было проведено экспериментальное исследованиеработоспособности предложенного метода с использованием алгоритма безусловной нелинейной оптимизации BOBYQA[9].

3. Заключение

В работе предложен метод определения параметров движения камеры без использования фундаментальной матрицы, основанный на минимизации углового расстояния между векторами. Предложенный метод учитывает направление смещения камеры, что повышает его устойчивость кошибкам входных данных.

4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 17-29-03112 офи_м, 16-07-00729а).

5. Литература

[1] Aqel, M.O.A. Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications / M.O.A. Aqel et al. // Springer Plus. – 2016. – Vol. 5(1). – P. 1897.

[2] Kerl, C. Robust odometry estimation for RGB-D cameras / C. Kerl, J. Sturm, D. Cremers // Robotics and Automation (ICRA), IEEE International Conference on, 2013. – P. 3748-3754.

[3] Howard, A. Real-time stereo visual odometry for autonomous ground vehicles / A. Howard // Intelligent Robots and Systems. IEEE/RSJ International Conference on, 2008. – P. 3946-3952.

[4] Zhang, Z. A flexible new technique for camera calibration / Z. Zhang // EEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2000. – Vol. 22(11). – P. 1330-1334.

[5] Hartley, R. Multiple view geometry in computer vision / R. Hartley, A. Zisserman // Cambridge university press, 2003.

[6] Schwab, A.L. Quaternions, finite rotation and euler parameters / A.L. Schwab // Cornell University Notes, Ithaca NY, 2002.

[7] Dai, J.S. Euler–Rodrigues formula variations, quaternion conjugation and intrinsic connections / J.S. Dai // Mechanism and Machine Theory. – 2015. – Vol. 92. – P. 144-152.

[8] Zhang, D. Evaluation of similarity measurement for image retrieval / D. Zhang, G. Lu // Neural Networks and Signal Processing, IEEE International Conference on. – 2003. – Vol. 2. – P. 928-931.

[9] Powell, M.J.D. The BOBYQA algorithm for bound constrained optimization without derivatives / M.J.D. Powell // Cambridge NA Report NA2009/06, University of Cambridge, Cambridge, 2009. – P. 26-46.

Estimation of monocular camera motion parameters as the cosine distance minimization problem

Ye.V. Goshin[1,2], A.V. Kukleva[1]

[1]Samara National Research University, Moskovskoye shosse, 34, Samara, Russia, 443086
[2]Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. This paper presents a method for camera motion parameters estimation from a set of corresponding pointsby non-linear optimization. Camera rotation parameters are presented in the form of Euler-Rodrigues coefficients in order to avoid redundancy and the subsequent error correction. An angular proximity measure allows us to solve unconstrained minimization problem.

Keywords: stereo, estimation, parameters, Euler-Rogrigues.