УДК 519.688

Автоматическая определение параметров сбития камеры

Антон Овчинкин[1] и Егор Ершов[1]
[1]Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук, 127051, Москва, Россия;

В области современной робототехники и при разработке алгоритмов компьютерного зрения для беспилотных транспортных средств важным источником информации об окружающем мире является видеосенсор. Данные, получаемые с видеосенсора используются для решения задач картирования местности, визуальной одометрии и локализации. Многие из данных задач предполагают, что информация о взаимной ориентации системы координат камеры и транспортного средства известна. На практике это предположение оказывается ошибочным в виду неидеальных условий эксплуатации системы. Таким образом возникает задача определения степени сбития камеры. В данной работе мы будем решать задачу исходя из двух предположений: на протяжении фиксации калибровочного видеоряда положение камеры относительно автомобиля не изменяется, а автомобиль движется преимущественно прямолинейно.

Один из способов решения данной задачи имеет следующий вид. Для каждой пары снимков видеоряда предлагается определить насколько направление движения камеры, которое совпадает с направлением движения автомобиля, отличается от направления ее оптической оси. Таким образом, между двумя положениями камеры, в которых был сделан первый и второй кадр видеоряда соответственно, в пространстве имеется вектор сдвига *t*, определив который мы сможем вычислить искомое сбитие. Далее, под параметрами сбития мы будем понимать два угла Эйлера (повороты вокруг осей *X* и *Y*) в системе координат, связанной с камерой, где ось Z направлена вдоль оптической оси. Для идеально откалиброванной камеры эти углы, очевидно, будут нулевыми. Для вычисления координат вектора сдвига предлагается использовать следующую математическую модель.

Пусть на каждом из кадров имеется как минимум две точки, между которыми определено соответствие. Обозначим координаты проекций *i-ой* наблюдаемой точки пространства на левый и правый кадры как

$$P_i = \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{pmatrix}, Q_i = \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Согласно [1] координаты точек связаны следующим образом:

$$Q_i^T \cdot [t]_\times R \cdot P_i = 0,$$

где t – вектор сдвига,
R – матрица поворота,
$[t]_\times$ – косо-симметричная матрица векторного произведения.

Обратим внимание на структуру матриц t и R. В нашем случае, в силу того, что камера жестко закреплена, можно считать поворот камеры нулевым, а матрицу поворота, следовательно, единичной.

Так как вектор сдвига $t = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}$ можно определить только с точностью до скалирующего множителя, разделим все его компоненты на t_z, получив косо-симметричную матрицу векторного произведения

$$[t]_\times = \begin{pmatrix} 0 & -1 & \frac{t_y}{t_z} \\ 1 & 0 & -\frac{t_x}{t_z} \\ -\frac{t_y}{t_z} & \frac{t_x}{t_z} & 0 \end{pmatrix} = [t]_\times R.$$

Таким образом, система из двух линейных уравнений вида

$$Q_i^T \cdot [t]_\times R \cdot P_i = 0 \;\leftrightarrow\; (x_r \quad y_r \quad 1) \begin{pmatrix} 0 & -1 & \frac{t_y}{t_z} \\ 1 & 0 & -\frac{t_x}{t_z} \\ -\frac{t_y}{t_z} & \frac{t_x}{t_z} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

будет содержать 2 неизвестных – $\frac{t_x}{t_z}$ и $\frac{t_y}{t_z}$:

$$\begin{cases} \frac{t_y}{t_z}(x_{r1} - x_{l1}) + \frac{t_x}{t_z}(y_{l1} - y_{r1}) = x_{r1}y_{l1} - y_{r1}x_{l1}\,, \\ \frac{t_y}{t_z}(x_{r2} - x_{l2}) + \frac{t_x}{t_z}(y_{l2} - y_{r2}) = x_{r2}y_{l2} - y_{r2}x_{l2}. \end{cases}$$

Параметры сбития связаны с решением данной системы линейных уравнений следующим образом $\psi = \mathrm{atan}\left(\frac{t_y}{t_z}\right)$, $\theta = \mathrm{atan}\left(\frac{t_x}{t_z}\right)$, где ψ – угол рысканья (поворот вокруг оси X), θ – угол тангажа (поворот вокруг оси Y).

Путем анализа данной системы было выявлено, при каких исходных точках система будет иметь бесконечное множество решений (не иметь решений она, очевидно, не может). Линейная зависимость строк в системе обусловлена расположением двух точек на одной эпиполярной линии, задаваемой формулой $[t]_\times R \cdot P_i = 0$. Иными словами, вторая точка не может принадлежать эпиполярной линии, соответствующей первой точке, перенесенной со второго кадра обратно на первый. Этот факт доказывает, что для данного вида движения эпиполярные линии на двух кадрах имеют одинаковый вид.

Возвращаясь к вопросу нахождения искомого отклонения, стоит отметить, что в данной задаче, решение которой для двух точек уже подробно рассмотрено выше, может быть использовано и большее количество точек. В таком случае у нас имеется избыточная система, оптимальное решение для которой может быть получено методом линейной регрессии.

На основе данной математической модели был проведен следующий эксперимент на реальных данных. Для видеоряда с прямолинейного проезда автомобиля с известными углами рысканья и тангажа сбития камеры (ψ_0, θ_0) 4.2 и 0.2 градуса соответственно было проведено определение параметров сбития камеры описанным выше алгоритмом. В результате чего были получены следующие статистические характеристики работы алгоритма:

$$M(\psi - \psi_0) = -1.438°,$$

$$stddev(\psi - \psi_0) = 6.273°,$$

$$M(\theta - \theta_0) = -2.165°,$$

$$stddev(\theta\_\theta_0) = 9.107°.$$

Вызванная погрешность может быть обусловлена неточностью при определении особых точек (ORB реализации OpenCV), координаты которых на кадрах были использованы в качестве входных данных.

Литература.

1. *Hartley R., Zisserman A.* Multiple view geometry in computer vision. – Cambridge university press, 2003.