

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
SUMY STATE UNIVERSITY
UKRAINIAN FEDERATION OF INFORMATICS**

PROCEEDINGS

**OF THE IV INTERNATIONAL SCIENTIFIC
CONFERENCE**

**ADVANCED INFORMATION
SYSTEMS AND TECHNOLOGIES**

AIST-2016



**May 25 –27, 2016
Sumy, Ukraine**

The Algorithm for Determining the TOE and Camber Parameters in the 3D Vision System

M. S. Babiy

Sumy State University, Ukraine, mbabiy@id.sumdu.edu.ua

Abstract. *The process of calculating exterior camera parameters is described according to the theory of machine vision. To calculate the toe and camber angles, an algorithm for obtaining the direction vector of wheel axle was developed. Algorithm can be used as well, when the lift plane is not horizontal.*

Keywords. *TOE, Camber, 3D Vision System.*

ВСТУПЛЕНИЕ

На автомобилях должна выполняться периодическая диагностика, которую необходимо осуществлять через 20 тыс. км пробега, а на автомобилях зарубежных марок – через каждые 30 тыс. км пробега.

Автомобиль диагностируется на стенде. Результатом диагностики являются выведенные на экран или принтер значения параметров ходовой части автомобиля и допустимые пределы этих значений относительно данного типа автомобиля. В случае отклонений параметров от номинального значения происходит их регулирование.

Основными регулируемыми параметрами являются сходжение и развал.

Сходжение (toe) – это угол между плоскостью вращения колеса и продольной осью автомобиля. Сходжение способствует правильному положению передних колес при разных скоростях движения и углах поворота автомобиля. При отклонении сходжения от нормы наблюдаются сильный пилообразный износ шин, треск шин при повороте, повышенный расход топлива из-за большого сопротивления передних колес.

Развал (camber) – угол между вертикалью и плоскостью вращения колеса при прямолинейном движении. В случае отклонения развала от нормы также возможно

отклонение автомобиля от прямолинейного движения и односторонний износ протектора.

При использовании инфракрасных датчиков или аналогичной гибридной измерительной системы на колеса навешиваются сложные электронные компоненты. Каждый раз механик должен взять такой датчик из места хранения, установить на колесо, провести необходимые измерения и регулировки, снять и вернуть на место. Кроме того, к инфракрасным датчикам нужно подавать питание и передавать результаты на компьютерную консоль. В одном случае это реализуется с помощью проводов, которые каждый раз нужно подключать, а в другом нужно следить за уровнем заряда и состоянием аккумуляторов, а также бороться с радиопомехами, которые могут возникать от соседних устройств и мешать работе стенда.

Стенды на основе 3D технологии лишены этих недостатков, так как в них на колеса устанавливаются пассивные мишени-отражатели, которые не содержат никаких электронных компонентов.

Компьютерный стенд Техновектор 7 содержит систему технического зрения, которая состоит из 4 видеокамер, расположенных в специальном корпусе, установленном перед автомобилем, а также плоских мишеней с градиентным рисунком.

Работа стенда возможна на подъемнике или на ремонтной яме при обязательном выполнении условий по горизонтальности. Данное условие заключается в том, что различие уровней передних поворотных платформ и задних площадок не должно превышать 2 мм.

Целью данной работы является разработка алгоритма, включающего калибровку камеры и расчет углов развала-схождения с учетом негоризонтальности плоскости подъемника.

КАЛИБРОВКА ВИДЕОКАМЕРЫ

Необходимым этапом при наладке компьютерного стенда, используемого для диагностики состояния ходовой автомобиля, является калибровка видеокамер стенда. В контексте трехмерного машинного зрения калибровка представляет собой процесс определения внутренних геометрических и оптических параметров камеры, а также положения и ориентации камеры в пространстве по изображению калибровочного объекта.

Одним из способов калибрования камеры является использование трехмерного калибровочного объекта с точно заданными размерами [1, 2]. Как правило, этот объект состоит из двух или трех ортогональных плоскостей. Иногда над этими плоскостями выполняются точно определенные трансляции. Этот способ требует дорогой аппаратуры и скрупулезного настраивания.

Второй способ – автокалибровка [3, 4]. В этом случае не используются никакие калибровочные объекты, а отслеживается движение камеры в статической сцене. Если изображения берутся от одних и тех же камер с фиксированными внутренними параметрами, то соответствия между тремя изображениями достаточно для получения внутренних и внешних параметров камеры, и для реконструкции 3D сцены.

Существуют также и другие виды техник, в том числе по точкам схода (vanishing points) для ортогональных направлений [5, 6] и по чистому повороту (pure rotation).

В нашем исследовании мы будем использовать способ, который вытекает из самой структуры стенда – калибровка по плоскому шаблону, показанному в нескольких разных ориентациях [7]. Такой шаблон легко напечатать на принтере, а тестовую калибровку можно провести даже в домашних условиях.

Наиболее часто используют шаблоны с шахматным рисунком, или с изображением кругов на контрастном фоне.

Модель камеры показана на рис. 1.

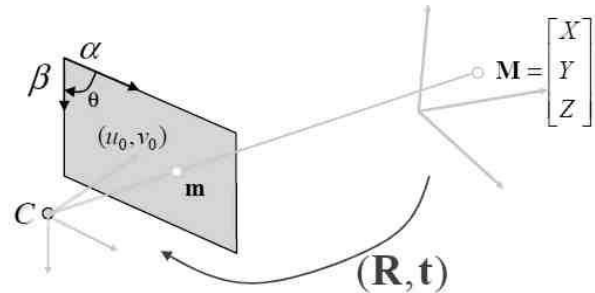


Рисунок 1 – Модель камеры

Точку на изображении обозначим через $\mathbf{m} = [u, v]^T$, а точку в пространстве через $\mathbf{M} = [X, Y, Z]^T$. Соответственно в однородных (гомогенных) координатах $\tilde{\mathbf{m}} = [u, v, 1]^T$, а $\tilde{\mathbf{M}} = [X, Y, Z, 1]^T$. Точка \mathbf{m} формируется лучом, который проходит через точку \mathbf{M} и оптический центр камеры C .

Проективное преобразование (перспективная проекция), отображающее точку сцены в точку изображения, имеет вид

$$s \tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \ \mathbf{t}]\tilde{\mathbf{M}}, \text{ где } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

s – произвольный масштабный коэффициент. Внешние параметры представлены матрицей поворота \mathbf{R} и вектором переноса \mathbf{t} , внутренние параметры – матрицей \mathbf{A} , главная точка – координатами u_0, v_0 . Элементы α и β – масштабные коэффициенты по осям u и v , параметр γ – скос между осями.

В нашем случае калибровка проводится по плоскому шаблону, поэтому мы можем взять координату $Z = 0$. Обозначим i -й столбец матрицы \mathbf{R} через \mathbf{r}_i , тогда

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{r}_3 & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_2 & \mathbf{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, связь между $\tilde{\mathbf{m}}$ и $\tilde{\mathbf{M}}$ можно описать гомографией

$$\mathbf{s}\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{H}\tilde{\mathbf{M}}, \text{ где } \mathbf{H} = \mathbf{A} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{t}]. \quad (1)$$

Запишем \mathbf{H} в виде $[\mathbf{h}_1 \ \mathbf{h}_2 \ \mathbf{h}_3]$. На основе (1) имеем

$$\begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 & \mathbf{h}_2 & \mathbf{h}_3 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{m}} = \lambda \mathbf{A} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 & \mathbf{r}_2 & \mathbf{t} \end{bmatrix},$$

где λ есть произвольный скаляр. Векторы \mathbf{r}_1 и \mathbf{r}_2 являются ортонормированными, отсюда имеем

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1 &= 0; \\ \mathbf{h}_1^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_2 &= \mathbf{h}_2^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, мы получили два основных ограничения на внутренние параметры гомографии. Всего же гомография имеет восемь степеней свободы, в том числе для шести внешних параметров (трех для поворота и трех для переноса).

Решение (2) позволяет вычислить матрицу внутренних параметров \mathbf{A} .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗВАЛА-СХОЖДЕНИЯ

Примем, что точка \mathbf{m}_i получена при наличии гауссова шума с математическим ожиданием 0 и соответствующей матрицей ковариации. Будем считать распределение Гаусса изотропным, другими словами вместо метрики Махаланобиса будем использовать метрику Эвклида.

Тогда оценка максимального правдоподобия для матрицы \mathbf{H} может быть получена минимизацией функционала

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\| \mathbf{m}_{ij} - \hat{\mathbf{m}}(\mathbf{A}, \mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{M}_j) \right\|^2,$$

где i представляет номер изображения, а j – номер точки.

На следующем этапе может быть учтена также радиальная дисторсия изображения.

В соответствии с данным алгоритмом написана программа на языке Visual C++. Для облегчения работы с изображениями дополнительно использована библиотека компьютерного зрения OpenCV v2.0, скомпилированная для среды Visual Studio. Библиотека имеет открытый код и может

свободно использоваться в академических и коммерческих целях. Функция FindChessboardCorners этой библиотеки позволяет с высокой точностью на основе градиентного поиска найти и уточнить точки пересечения линий шахматного шаблона (рис. 2).

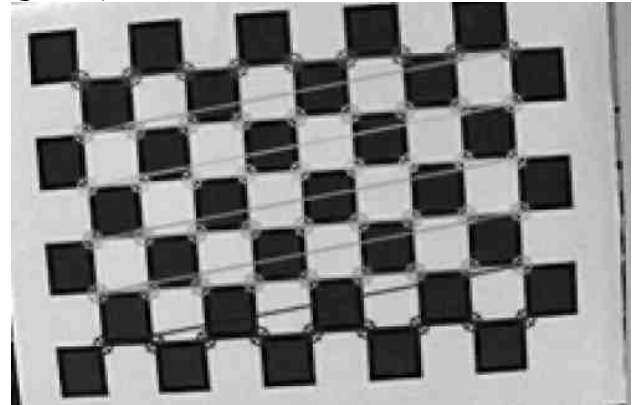


Рисунок 2 – Точки пересечения линий шахматного шаблона

Минимизация функционала проводится методом Левенберга-Марквардта. Для решения задачи о наименьших квадратах вида

$$F(\mathbf{x}) = \|\mathbf{f}(\mathbf{x})\|^2 = \sum_{i=1}^m f_i^2(\mathbf{x}) \rightarrow \min$$

направление поиска \mathbf{p} по методу Левенберга-Марквардта определяется из системы

$$[\mathbf{J}^T(\mathbf{x}_k) \mathbf{J}(\mathbf{x}_k) + \lambda_k \mathbf{I}] \mathbf{p}_k = -\mathbf{J}^T(\mathbf{x}_k) \mathbf{f}(\mathbf{x}_k),$$

где λ_k – некоторая неотрицательная константа, $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ – матрица Якоби вектор-функции $\mathbf{f}(\mathbf{x})$, \mathbf{I} – единичная матрица, $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{p}_k$, k – номер итерации.

Несложно заметить, что при $\lambda_k = 0$ алгоритм переходит в метод Гаусса-Ньютона, а при достаточно большом λ_k направление \mathbf{p}_k незначительно отличается от направления наискорейшего спуска.

Уравнение (1) можно записать в эквивалентном виде

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \mathbf{t},$$

где x, y, z – координаты относительно неподвижной камеры, X, Y, Z – координаты

относительно поворотной мишени. Смещение точки мишени в системе координат камеры при повороте из положения 1 в положение 2 будет вектором

$$\mathbf{d} = (\mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + (\mathbf{t}_2 - \mathbf{t}_1).$$

Векторное произведение двух неколлинеарных векторов $[\mathbf{d}_i \times \mathbf{d}_j]$ для точек мишени с номерами i и j даст вектор \mathbf{N} в направлении, нормальном к поверхности колеса. Нормализация вектора \mathbf{N} дает координаты n_x, n_y, n_z .

После этого можно найти углы схождения и развала $\Theta_{\text{тое}} = \arccos(n_z)$, $\Theta_{\text{camber}} = \arccos(n_y)$.

УТОЧНЕНИЕ ПРИ НЕГОРИЗОНТАЛЬНОСТИ ПЛОСКОСТИ ПОДЪЕМНИКА

Негоризонтальность плоскости подъемника можно отследить по ориентации шасси автомобиля. Мишени закреплены на всех четырех колесах автомобиля. Это дает возможность реконструировать пространственные координаты точек пересечения плоскостей мишеней с передней и задней осями автомобиля. Учитывая неточность в определении координат, предложено определять плоскость шасси S как равноотстоящую от полученных точек, то есть такую, что проходит через середины ребер тетраэдра $ABCD$ (рис. 3).

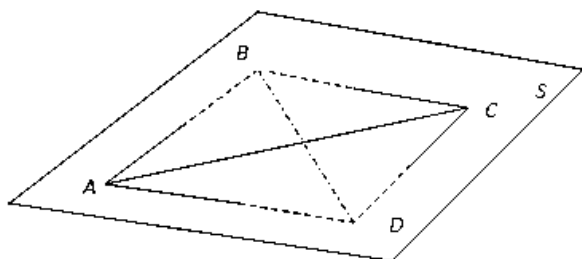


Рисунок 3 – Нахождение равноотстоящей плоскости S

Соответственно координаты нормали \mathbf{n} пересчитываются в координаты нового базиса.

ВЫВОДЫ

Разработаны алгоритм и программа калибровки видеокамеры с помощью мишени с шахматным рисунком. Выполнен расчет внешних параметров видеокамеры.

Рассчитаны векторы ориентации осей колес автомобиля и выполнен расчет параметров развала-схождения автомобиля.

Предложен метод определения ориентации шасси автомобиля при негоризонтальности плоскости подъемника с целью адаптации параметров развала-схождения к новому базису.

REFERENCES

- [1] O. Faugeras. Three-Dimensional Computer Vision: a Geometric Viewpoint. MIT Press, 1993.
- [2] R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. IEEE Journal of Robotics and Automation, 3(4):323–344, Aug. 1987.
- [3] R. I. Hartley. An algorithm for self calibration from several views. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 908–912, Seattle, WA, June 1994. IEEE.
- [4] Q.-T. Luong and O. Faugeras. Self-calibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices. The International Journal of Computer Vision, 22(3):261–289, 1997.
- [5] B. Caprile and V. Torre. Using Vanishing Points for Camera Calibration. The International Journal of Computer Vision, 4(2):127–140, Mar. 1990.
- [6] D. Liebowitz and A. Zisserman. Metric rectification for perspective images of planes. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 482–488, Santa Barbara, California, June 1998. IEEE Computer Society.
- [7] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330–1334, 2000.
- [8] R. Hartley. Self-calibration from multiple views with a rotating camera. In J.-O. Eklundh, editor, Proceedings of the 3rd European Conference on Computer Vision, volume 800-801 of Lecture Notes in Computer Science, pages 471–478, Stockholm, Sweden, May 1994. Springer-Verlag.