

文章编号 1004-924X(2014)04-1078-08

应用抛物线运动估计摄像机姿态

吕耀文^{1,2*}, 王建立¹, 王昊京¹, 刘 维³, 吴 量^{1,2}, 曹景太¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039; 3. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130033)

摘要: 根据抛物线运动特有的射影几何性质, 提出了一种应用抛物线运动估计摄像机姿态的新方法。首先, 计算不同位置自由落体运动轨迹在摄像机图像平面上投影直线的交点, 并证明该交点即为地球重力方向的灭点。其次, 使用 Sampson 近似计算抛物线运动轨迹在摄像机平面上的投影二次曲线方程。最后, 在摄像机内参数已知的条件下, 利用抛物线投影二次曲线中隐含的关于灭点和灭线的射影几何性质, 完成摄像机姿态的估计。通过数值模拟和实际实验验证了提出算法的正确性和可行性。结果表明: 与传统的棋盘估计方法比较, 本文算法估计旋转矢量的轴平均误差为 0.017 rad, 角平均误差为 0.007 rad, 平移矢量方向的平均误差为 0.071 rad。得到的结果显示该方法可以应用于计算机视觉中摄像机的姿态估计。

关键词: 计算机视觉; 摄像机; 姿态估计; 抛物线运动; 射影几何

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142204.1078

Estimation of camera poses by parabolic motion

LÜ Yao-wen^{1,2*}, WANG Jian-li¹, WANG Hao-jing¹,
LIU Wei³, WU Liang^{1,2}, CAO Jing-tai¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *Department of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130033, China*)
* *Corresponding author, E-mail: lvyawen2005@163.com*

Abstract: A new method was proposed for the camera pose estimation based on specific geometric properties of parabolic motion. The intersection of lines which was the projections of trajectories of a free falling subject from different locations was first calculated. According to the nature of the vanishing point, the intersection was proved to be the vanishing point of the Earth's gravity direction. Then, the equation of conic obtained by projecting parabolic trajectory on the image plane was solved using Sampson approximation. Finally, under the condition of known intrinsic parameters, the camera pose was evaluated by using the geometric properties of vanishing point and vanishing line hidden in the projective conic. The experiments with numerical simulation as well as with real images indicate

收稿日期: 2013-04-04; 修订日期: 2013-05-28.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2011AA8082035)

that the method is correct and feasible. By the proposed method, experimental results show that the mean error of evaluated rotation axis is 0.017 rad, and the rotation angle is 0.007 rad, and the mean error of translation direction is 0.071 rad as compared to the traditional checkerboard method. Results indicate that the proposed method can be used for camera pose estimation in computer vision.

Key words: computer vision; camera; pose estimation; parabolic motion; projective geometry

1 引言

摄像机的姿态估计,即摄像机的定位,目的是通过摄像机获取的图像来确定自身姿态和位置。确定摄像机的位置和姿态是计算机视觉中基本而又重要的问题。应用前景包括视觉导航,机器人定位,目标识别,摄影测量等。在过去的30年中,这个问题得到了广泛而深入的研究,同时学者们也提出了很多方法。

摄像机姿态的估计方法可以分为两大类:未知摄像机内参数的姿态估计和已知摄像机内参数的姿态估计。摄像机内参数求解也称为摄像机标定。经过多年的深入研究,摄像机标定问题已基本解决。本文的姿态估计属于已知摄像机内参数的姿态求解,因此在本文的以下讨论中都假设内参数已知。目前,针对已标定相机姿态测量的研究主要集中在两个方向:第一类是由Fischler和Bolles提出的PnP问题^[1]。该问题描述为在目标由三维关系确定的 n 个点已知的情况下,求解摄像机的姿态。该问题提出后,很多学者经过深入研究,取得了一些成就。PnP问题的核心是在 $n < 6$ 的多解中如何通过已有的约束条件确定唯一解^[2-3];另一类方法是利用场景的几何约束如共面、平行和正交性质估计摄像机的姿态。如Hartly和Zisserman使用矩形和正交平行线估计摄像机的姿态^[4],文献^[5]中使用圆和平行直线对摄像机姿态进行估计等。

以上方法需要已知目标特征点的位置关系或者场景中特殊的几何结构关系才能估计摄像机的姿态。由于地球重力的影响,任意投掷的物体都具有抛物线运动的规律。本文在研究了抛物线的射影几何性质后,针对摄像机姿态估计问题提出了一种新的估计方法。首先,让物体在不同点做自由落体运动,提取自由落体运动在图像平面上

的轨迹,获得重力方向的灭点。然后,利用抛物线中隐含的射影几何性质,获得抛物线支撑平面的灭线。最后从灭点和灭线中获取摄像机的姿态信息。该方法不需要目标的任何信息,也不需要场景中的任何几何元素,是一种相当简便的姿态估计方法。同时,由于该方法只需要获取抛物线运动轨迹中的一段,因此,对于不能交汇的多摄像机姿态测量问题,本方法同样适用。

本文结构安排如下:第二部分给出本文姿态估计方法的相关理论背景。第三部分给出详细的姿态估计算法。第四部分对本文方法使用合成数据仿真并给出仿真结果。第五部分使用本文算法估计双目测量系统的结构参数,并和传统的棋盘标定算法做比较。最后,在第六部分对全文进行归纳和总结。

2 背景知识

2.1 摄像机模型

图1为经典的摄像机小孔投影模型^[6-7]。其中: $O_c-X_c Y_c Z_c$ 为摄像机坐标系, O_c 为摄像机的光心,坐标轴 $O_c X_c$ 与 $O_c Y_c$ 分别与图像平面的行和列平行, $O_c Z_c$ 是摄像机的光轴。3个坐标轴的单位矢量分别为: i, j, k 。 $O_w-X_w Y_w Z_w$ 为建立的世界坐标系, u, v, w 为世界坐标系坐标轴的单位矢量。若世界坐标系向摄像机坐标系的平移矢量为 t ,旋转矩阵为 R 。则 t 为世界坐标系的中心 O_w 在摄像机坐标系中坐标表示;旋转矩阵 R 可以表示为:

$$R = \begin{bmatrix} u_i & v_i & w_i \\ u_j & v_j & w_j \\ u_k & v_k & w_k \end{bmatrix} = [{}^c u \quad {}^c v \quad {}^c w], \quad (1)$$

其中: ${}^c u, {}^c v, {}^c w$ 分别为世界坐标系坐标轴的单位矢量在摄像机坐标系中的坐标表示^[8-9]。

在该模型中,空间中一点 P 与其在摄像机图

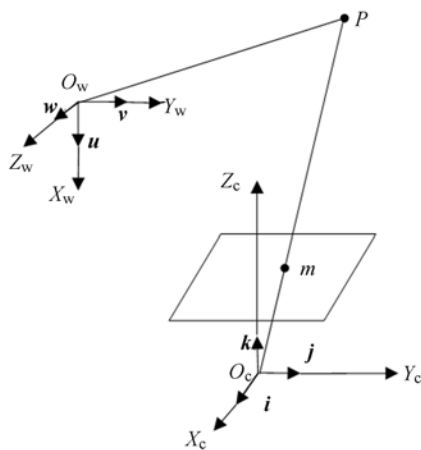


图 1 小孔成像模型

Fig. 1 Pinhole imaging model

像平面上的投影 m 满足如下投影方程:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \mathbf{t}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: (u, v) 为投影点 m 的图像坐标, (x, y, z) 为点 P 在世界坐标系下三维坐标。 \mathbf{K} 为摄像机的内参数矩阵。

2.2 标定摄像机给出的结果^[4]

(1) 根据摄像机图像平面上的一点 m , 给出了一条过摄像机光心的直线, 在摄像机坐标系下测量的射线方向为:

$$\mathbf{d} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{m}. \quad (3)$$

(2) 图像平面中的一条直线 l 与摄像机光心确定空间中一个平面, 在摄像机坐标系下, 该平面的法线方向为:

$$\mathbf{n} = \mathbf{K}^T \mathbf{l}. \quad (4)$$

2.3 二次抛物线的射影几何

直线上无穷远点的图像称为该直线的灭点。由于所有平行直线与无穷远平面都相交于同一个无穷远点, 因此, 平行直线有一个相同的灭点, 灭点只与直线的方向有关, 与直线的位置无关。平行直线在图像平面上的投影直线相交于同一点, 该点即为平行直线方向的灭点。根据公式(3), 在相机内参数已知的情况下, 通过灭点可以确定直线的方向。

三维空间所有平行平面与无穷远平面都交于一条公共的直线, 这条直线的图像称为该平面的灭线。灭线只与景物平面的法线方向有关, 与平

面的位置无关。根据公式(4), 在摄像机内参数已知的情况下, 通过灭线可以确定该平面的法线。

根据以上灭点与灭线的性质^[10], 针对二次抛物线固有的射影几何特性, 可以得到以下 2 个结论:

结论 1: 二次抛物线在图像平面上的投影曲线有一个公共的交点, 并且这个交点为地球重力方向的灭点。

结论 2: 二次抛物线的投影曲线在公共交点处的切线为二次抛物线支撑平面的灭线。

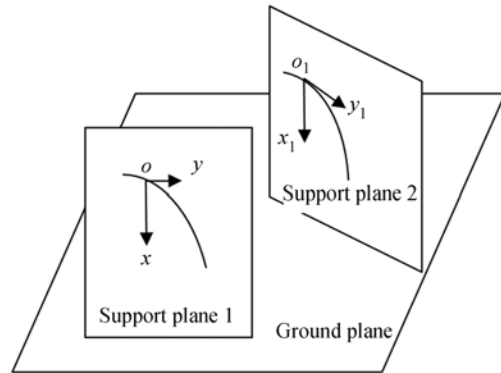


图 2 抛物线几何

Fig. 2 Parabolic geometry

证明: 在二次抛物线支撑平面上建立如下坐标系: 取抛物线上任意一点为坐标原点, 地球重力方向为 x 轴方向, 平面内垂直于 x 的方向定义为 y 方向, 如图 2 所示。先考虑支撑平面 1 上的抛物线, 抛物线的射影几何表示为:

$$[x \ y \ t] \begin{bmatrix} 0 & 0 & d \\ 0 & b & e \\ d & e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ t \end{bmatrix} = 0. \quad (5)$$

显然, 无穷远上的一点 $p(1, 0, 0)$ 在该抛物线上。抛物线在该点的切线为:

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d \\ 0 & b & e \\ d & e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d \end{bmatrix}. \quad (6)$$

\mathbf{l} 为该平面的无穷远直线。因为投影变换中极点、极线关系保持不变, 所以该抛物线在摄像机平面上的投影二次曲线必过 p 点的投影点 p_1 , 且投影二次曲线在 p_1 点的切线为支撑平面的灭线。显然 p_1 为直线 ox 的灭点。同理, 在支撑平面 2 上抛物线的投影二次曲线必过投影点 p_2 , p_2 为直线 $o_1 x_1$ 的灭点。因为 $ox, o_1 x_1$ 同为地球重力方向, 所以 $ox // o_1 x_1$, 点 p_1 和 p_2 重合。又因为这里

选取的是任意 2 对抛物线,所以结论 1,结论 2 成立。

3 摄像机姿态的估计

摄像机姿态估计中选择抛物线上的任意一点 o_w 作为世界坐标系的原点,地球重力方向为 x_w 轴方向,抛物线所在支撑平面为 $o_w-x_w y_w$ 平面,其中: y_w 轴以抛物线的运动方向为正方向。使用右手坐标系确定世界坐标系的 z_w 轴方向。摄像机坐标系的确定与图 1 中小孔成像模型相同。摄像机的姿态估计模型如图 3 所示。

将 2 个坐标系之间的旋转矢量 \mathbf{R} 分成 3 列 $(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3)$,则 \mathbf{r}_1 为单位向量 \mathbf{u}_1 (地球重力方向的单位向量)在摄像机坐标系的坐标表示。由公式(3)可知,若该方向的灭点 \mathbf{u}_1 确定,则有:

$$\mathbf{r}_1 = \pm \frac{\mathbf{K}^{-1} \mathbf{u}_1}{\text{norm}(\mathbf{K}^{-1} \mathbf{u}_1)}, \quad (7)$$

其中:灭点 \mathbf{u}_1 为不重合自由落体运动在摄像机平面投影直线的交点, norm 表示向量的 2 范数。由 2.3 结论可知,抛物线投影曲线在 \mathbf{u}_1 点的切线为该抛物线支撑平面的灭线,结合公式(4)有:

$$\mathbf{r}_3 = \pm \frac{\mathbf{K}^T (\mathbf{C} \mathbf{u}_1)}{\text{norm}(\mathbf{K}^T (\mathbf{C} \mathbf{u}_1))}, \quad (8)$$

其中: \mathbf{C} 为抛物线在摄像机图像平面上的二次投影曲线矩阵。在实际测量中 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3$ 可能并不能完全正交。若不正交,可以通过 SVD 分解,重新估计 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3$ 。由旋转矩阵的正交性质可得:

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_3 \times \mathbf{r}_1. \quad (9)$$

以上方法求解的 \mathbf{R} 有 4 组解,其中只有 2 组解能保证重构的三维点位于摄像机的前方^[3]。同时,根据自由落体的方向性可以唯一确定 2 组解中的 1 组解。

因为在整个姿态估计中并没有场景的绝对欧式度量信息,因此,对于 2 个坐标系之间的平移矢量,只能确定其方向,即:

$$\mathbf{t} \simeq \mathbf{K}^{-1} \mathbf{v}_0, \quad (10)$$

其中: \mathbf{v}_0 为世界坐标系原点 o_w 在摄像机平面上的投影点。

摄像机姿态估计的算法总结如下:

(1)让物体在不同地点做自由落体运动,得到自由落体轨迹在摄像机平面上的投影直线 L_i ,求取各投影直线的交点。由于测量误差的存在,投

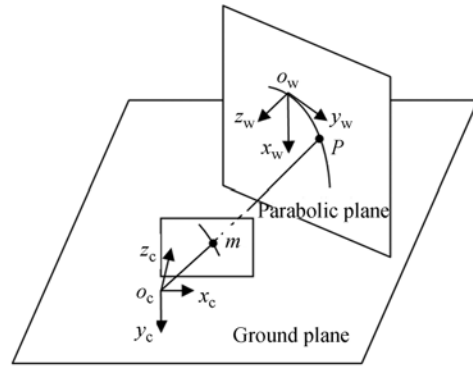


图 3 姿态估计模型
Fig. 3 Model of pose estimation

影直线不会相交于一点,采用如下代价函数求解直线的交点,得到灭点 \mathbf{u}_1 :

$$E = \min \sum_i d^2(\mathbf{u}_1, L_i), \quad (11)$$

其中: $d(\mathbf{u}_1, L_i)$ 表示 \mathbf{u}_1 到直线 L_i 的距离。

(2)投掷物体,获取物体在各个时刻的图像坐标,使用 Sampson 近似^[10]估计投影二次曲线 \mathbf{C} 。用公式(7),(8),(9)求解 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$,另外,由于重构点位于摄像机的前方,且根据自由落体运动重构点的方向性,可确定旋转矩阵 \mathbf{R} 的唯一解。

(3)由公式(10)确定平移矢量的方向 \mathbf{t} 。

算法特殊情况:当抛物线支撑平面过摄像机光心时,二次抛物线在图像平面上的投影退化为一 条直线。该直线即为支撑平面的灭线。此时通过公式(4)并归一化可得到 \mathbf{r}_3 。

4 合成数据仿真

数值模拟时,将摄像机的内参数设置为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 659 & 0 & 309 \\ 0 & 661 & 240 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

镜头畸变参数为零。摄像机分辨率为 $1\ 024 \times 1\ 024$ 。抛物线在世界坐标系中的方程、世界坐标系到摄像机坐标系之间旋转矩阵的 Rodrigues 表示 $\mathbf{R}\mathbf{v}$, 平移矢量 \mathbf{t} 分别为:

$$\begin{aligned} x &= 5\ 000 \times tm + 5\ 000 \times tm^2; \\ y &= 5\ 000 \times tm; \\ z &= 0; \\ \mathbf{R}\mathbf{v} &= [-1.793\ 7, -2.069\ 5, -0.490\ 8]; \\ \mathbf{t} &= [-158.02, -232.71, 705.91]; \end{aligned} \quad (13)$$

其中: tm 为运动时间。在投影点上增加 0.9 pixel 的高斯噪声时, 图像点数对轴角误差的影响曲线如图 4 所示。图 5 为投影点个数为 12 时, 噪声对轴角误差的影响曲线。其中: 旋转矩阵 \mathbf{R} 的计算结果为 100 次的平均值。由于重力方向的灭点也在抛物线的投影二次曲线上, 故本文提到的投影点个数包含重力方向的灭点。旋转轴的误差采用轴角式计算。即:

$$\begin{aligned} E_{\text{axis}} &= \arccos(\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}_i) \\ E_{\text{angle}} &= \text{abs}(\theta - \theta_i) \end{aligned} \quad (14)$$

其中: E_{axis} 表示旋转轴的误差, 单位为弧度(rad); E_{angle} 表示旋转角的误差, 单位也是弧度(rad); \mathbf{n}, θ 分别为旋转矢量的单位旋转轴和旋转角, 其与旋转矢量的关系如下式:

$$\theta = \text{norm}(\mathbf{R}\mathbf{v}), \mathbf{n} = \mathbf{R}\mathbf{v} / \text{norm}(\mathbf{R}\mathbf{v}), \quad (15)$$

其中: $\mathbf{R}\mathbf{v}$ 为旋转矩阵的 Rodrigues 表示法。

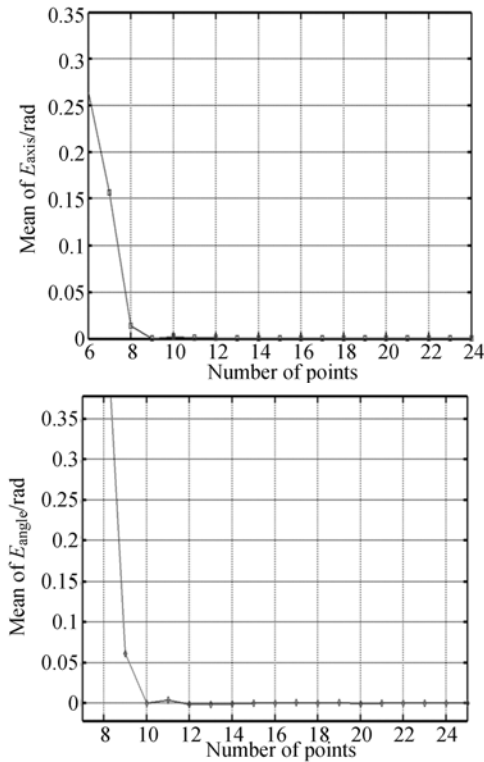


图 4 计算点数与旋转轴角误差之间的关系

Fig. 4 E_{axis} and E_{angle} vary with the number of points

从仿真结果可以得到以下结论:(1)虽然确定抛物线在图像平面上的投影二次曲线只需要 5 个投影点,但是由于误差的影响,采用 5 个点计算的结果误差很大。利用更多的点可以减小计算误差,建议实际中采用 10 个以上的投影点。(2)当投影点噪声增加到一定程度时,计算误差急剧增

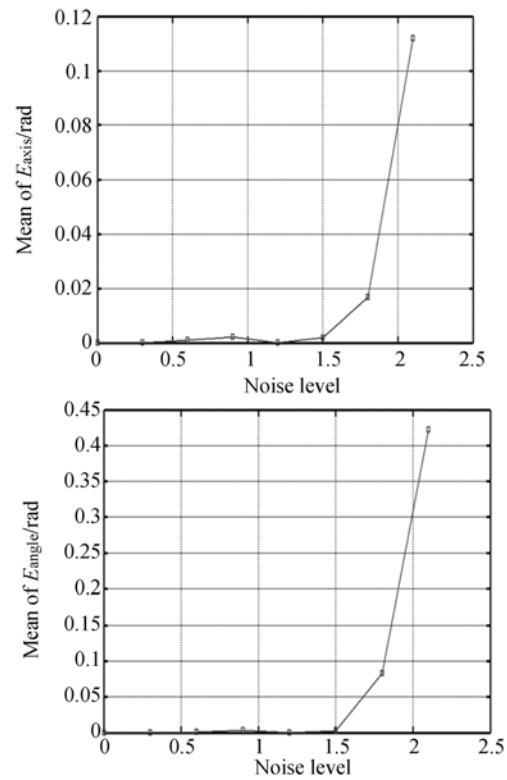


图 5 噪声水平与旋转轴角之间误差的关系

Fig. 5 E_{axis} and E_{angle} vary with noise levels

大。此时,应提高投影点的测量精度,或者增加投影点的个数。

5 实际实验

双目视觉传感器广泛应用于视觉测量和三维测量^[11]。本实验使用双目摄像机,摄像机内参数采用 Matlab 工具箱^[12]标定。首先让小球分别做 6 次自由落体运动,采用公式(11)计算重力方向在左右摄像机图像平面上的灭点,然后投掷小球使小球做抛物线运动,并采用本文算法估计左右摄像机相对于抛物线世界坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R}_l 和 \mathbf{R}_r ,平移矢量为 \mathbf{T}_l 和 \mathbf{T}_r ,则双目摄像机的结构参数为^[13]:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_l \mathbf{R}_r^{-1}, \mathbf{t} = \mathbf{T}_r - \mathbf{R} \mathbf{T}_l, \quad (16)$$

其中: \mathbf{R} 为右摄像机坐标系相对于左摄像机坐标系的旋转矩阵, \mathbf{t} 为 2 个摄像机坐标系之间的平移矢量。由于缺少场景的绝对欧式度量,因此这里计算得到的 \mathbf{t} 只代表平移方向。实验中重复抛掷小球 6 次,分别计算双目摄像机的结构参数,并采用传统的棋盘方法^[13]计算双目摄像机的旋转

矩阵和平移矢量,将它们作为真值与本文算法计算的结构参数进行比较。

本实验采用2台ImagingSource公司的DMK31BG03.H型号CCD^[14]摄像机搭建实验平



图6 实验现场
Fig.6 Experiment field

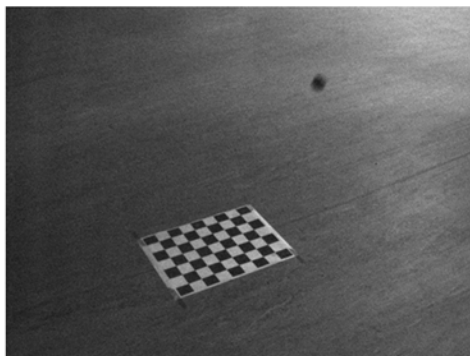
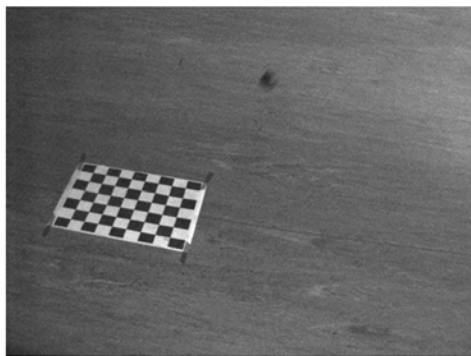
台。摄像机的分辨率为 $1\,024 \times 768$,像元尺寸为 $4.65\ \mu\text{m} \times 4.65\ \mu\text{m}$,帧频为60 frame/s,传输接口为千兆网^[15],搭建的实验平台如图6所示。

图7为左右摄像机采集的棋盘图像和抛物线小球图像。测量的结构参数如表1所示,其中:平移矢量误差为抛物线计算矢量与棋盘计算矢量之间的夹角值。

从实验数据可以看到,平移矢量方向的估计误差偏大。这可能是由于2个摄像机的同步曝光是通过软件控制的,使得同步曝光时序不够严格,从而导致采用运动小球质心估计2个摄像机之间的平移矢量方向时,误差偏大。因此,在得到旋转矢量后,应该选择静止目标估计平移矢量方向。实验结果表明,使用本文方法计算出的结构参数与Mablab工具箱棋盘计算得到的结构参数相差很小,其能够较好地估计摄像机的姿态参数。



(a)左右摄像机棋盘图像样张
(a)Chessboard sample images acquired by two cameras



(b)左右摄像机抛物线图像样张
(b)Parabolic ball sample images acquired by two cameras

图7 实验采集部分图像

Fig.7 Sample images acquired in experiment

表 1 2 种算法的测量结果比较

Tab. 1 Comparison results of two methods

Methods	Rotation vector			$E_{\text{axis}}/E_{\text{angle}}/(\text{rad})$	Translation direction			Error/rad
Chessboard	0.169	-0.749	-0.397	—	0.949	-0.157	0.272	—
experiment 1	0.197	-0.751	-0.401	0.031/0.009	0.932	-0.145	0.332	0.064
experiment 2	0.160	-0.759	-0.393	0.015/0.005	0.964	-0.140	0.226	0.051
experiment 3	0.161	-0.743	-0.402	0.012/0.004	0.938	-0.234	0.257	0.079
experiment 4	0.159	-0.758	-0.393	0.015/0.004	0.961	-0.171	0.217	0.058
experiment 5	0.178	-0.736	-0.399	0.016/0.008	0.929	-0.261	0.262	0.106
experiment 6	0.171	-0.742	-0.379	0.015/0.014	0.968	-0.127	0.213	0.069
Mean	—			0.017/0.007	—			0.071

6 结 论

本文根据抛物线运动特有的射影几何性质,提出了一种使用抛物线运动估计摄像机姿态的新方法。在摄像机内参数已知的条件下,该方法不需要场景的任何结构信息和几何信息,只需让物体做自由落体运动和抛物线运动,就可以完成摄像机的姿态估计。文章首先介绍了摄像机的小孔成像模型和已标定摄像机的重要结论,给出并证

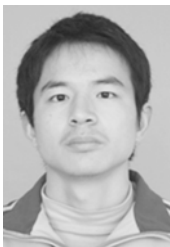
明了抛物线运动中隐含的关于灭点和灭线的性质。其次,给出了利用这些性质估计摄像机姿态参数的具体方法。最后,通过仿真实验和估计双目摄像机姿态参数的实际实验,证明了本文算法的正确性和可行性。实验结果表明,和传统的棋盘姿态估计方法相比,使用本文算法估计旋转矢量的轴平均误差为 0.017 rad;角平均误差为 0.007 rad;平移矢量方向的平均误差为 0.071 rad。这说明其可以应用于计算机视觉中摄像机的姿态估计。

参考文献:

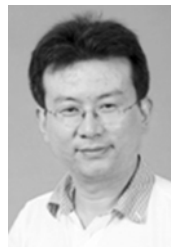
- [1] FISHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: A Paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24 (6): 381-395.
- [2] 吴福朝, 胡占义. PnP 问题的线性求解算法[J]. *软件学报*, 2003, 14(3): 682-688.
WU F CH, HU ZH Y. A linear method for PnP problem [J]. *Journal of Software*, 2003, 14(3): 682-688. (in Chinese)
- [3] 周维, 许海霞. 一种摄像机姿态估计方法[J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(12): 2582-2587.
ZHOU W, XU H X. Method for camera pose estimation [J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(12): 2582-2587. (in Chinese)
- [4] HARTLEY R I, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*[M]. Second edition, Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [5] WANG G H, WU J T, JI ZH Q. Single view based pose estimation from circle or parallel lines [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(7): 977-985.
- [6] 杨博文, 张丽艳, 叶南, 等. 面向大视场视觉测量的摄像机标定技术[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0915001.
YANG B W, ZHANG L Y, YE N, *et al.*. Camera calibration technique of wide-area vision measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0915001. (in Chinese)
- [7] 韩廷祥, 张志胜, 戴敏. 用于目标测距的单目视觉测量方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1110-1116.
HAN Y X, ZHANG ZH SH, DAI M. Monocular vision system for distance measurement based on feature points[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1110-1116. (in Chinese)
- [8] DANIEL F, DEMENTHON, DAVIS L S. Model-based object pose in 25 lines of code [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1995, 15(2): 123-141.
- [9] 向长波, 谢丹, 刘太辉, 等. 估计多视点摄像机姿态的两步法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(10): 1982-1986.
XIANG CH B, XIE D, LIU T H, *et al.*. A two-step algorithm for estimating postures of cameras located in different points of view [J]. *Opt. Precision*

- Eng. , 2008, 16(10):1982-1986. (in Chinese)
- [10] 吴福朝. 计算机视觉中的数学方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011, 77-79, 378-382.
WU F CH. *Mathematical Methods in Computer Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2011, 77-79, 378-382. (in Chinese)
- [11] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10):2244-2253.
TANG ZH Z, LIANG J, XIAO ZH ZH, et al. . Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement[J]. *Opt. Precision Eng.* , 2010, 18(10):2244-2253. (in Chinese)
- [12] BOUGUET J Y. Camera calibration Toolbox for Matlab[EB/OL]. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.
- [13] 侯俊捷, 魏新国, 孙军华. 基于同心圆合成图像匹配的双目视觉标定[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315003-1.
HOU J J, WEI X G, SUN J H. Calibration method for binocular vision based on matching synthetic images of concentric circles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3):0315003-1. (in Chinese)
- [14] 张传胜. 基于FPGA的面阵CCD驱动及快速显示系统的设计实现[J]. 液晶与显示, 2012, 27(6): 789-794.
ZHANG CH SH. Design of driving circuit for area array CCD based on FPGA [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(6): 789-794. (in Chinese)
- [15] 陶宏江, 韩双丽, 张宇, 等. 基于ADV212的远程图像采集系统设计[J]. 液晶与显示, 2013, 28(1): 105-109.
TAO H J, HAN SH L, ZHANG Y, et al. . Design of remote image collection system based on ADV212 [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1):105-109. (in Chinese)

作者简介:



吕耀文(1987—),男,湖北应城人,博士,2009年于陕西科技大学获得学士学位,主要从事高速图像处理 and 视觉测量方面的研究。E-mail: lvyawen2005@163.com



王建立(1971—),男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)