

# 抛物线运动点目标的单目测量

吕耀文<sup>1,2</sup> 王建立<sup>1</sup> 曹景太<sup>1</sup> 王昊京<sup>1</sup> 刘 维<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049  
<sup>3</sup> 吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130033

**摘要** 针对点目标的抛物线运动,提出了一种使用已标定单目摄像机测量点目标三维坐标的新方法。算法分三个步骤:通过计算悬垂直线在摄像机平面上投影直线的交点得到重力方向的消失点;使用 Sampson 近似计算抛物线运动轨迹的投影二次曲线,并利用抛物线的射影几何性质计算抛物线支撑平面的旋转矩阵;通过地平面的单应矩阵计算世界坐标系和摄像机坐标系之间的平移矢量,以得到抛物线支撑平面的单应矩阵,并确定抛物线运动点目标的三维坐标。通过仿真实验和真实实验证明了算法的正确性和可行性。实验结果表明:所给出的方法对点目标的抛物线运动测量具有易于实现、测量简便的优点。

**关键词** 机器视觉;单目测量;点目标;抛物线运动

**中图分类号** TP242.6; TP391 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0615001

## Monocular Measurement for Point Target with Parabolic Motion

Lü Yaowen<sup>1,2</sup> Wang Jianli<sup>1</sup> Cao Jingtai<sup>1</sup> Wang Haojing<sup>1</sup> Liu Wei<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup> Department of Communication Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Under the assumption of known intrinsic parameters, a novel monocular measurement method consisting of three stages is proposed for point target with parabolic motion. The gravity direction vanishing point is gained by computing the intersection of lines obtained by projecting the hanging lines in the image plane. The conic obtained by projecting the parabolic trajectories is computed using Sampson approximation and the rotation matrix could be evaluated by using parabolic projective geometry properties. By computing the translation vector from world coordinate to camera coordinate using ground planar homography, the parabolic supporting planar homography is established and the three-dimensional (3D) coordinate of point target is determined. Experiments with simulated data as well as with real images show that the method is valid and feasible. The experimental results indicate that the proposed novel approaches are practical and simple.

**Key words** machine vision; monocular measurement; point target; parabolic motion

**OCIS codes** 150.0155; 080.1753; 150.6910

## 1 引 言

视觉测量作为计算机视觉的重要组成部分而受到广泛的关注,被广泛应用于机器视觉定位、目标跟踪和视觉导航等方面。受地球重力的影响,抛物线

运动是一种较为常见的运动,对这类运动的测量可以应用于足球比赛中足球的跟踪、无动力炮弹运动落点轨迹的测量等。本文提出了一种仅使用单目摄像机测量抛物线运动点目标三维坐标的新方法。

**收稿日期:** 2012-10-12; **收到修改稿日期:** 2012-12-05

**基金项目:** 国家 863 计划 (2011AA8082035) 资助课题。

**作者简介:** 吕耀文(1987—),男,博士研究生,主要从事高速图像存储与计算机视觉测量等方面的研究。

E-mail: lvyaowen2005@163.com

**导师简介:** 王建立(1971—),男,博士,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

标定的单目摄像机等效为测角器,只能确定目标的方向,无法确定目标的位置,需要辅助约束条件完成三维测量。目前,单目测量的方法主要有:1)利用体目标上的多个特征点求解目标的位置和姿态,即著名的  $n$  点透视(PnP)问题<sup>[1]</sup>,该方法对点目标无效。2)通过光路设计的虚拟立体视觉测量系统<sup>[2,3]</sup>,该方法测量范围减小了一半且在成像质量最好的镜头中心处图像不可用。3)在测量平台上移动摄像机形成双目交汇完成三维测量的主动视觉测量方法<sup>[4]</sup>。该方法需要控制摄像机做精确的运动,测量成本较高,且在测量运动目标时,需要摄像机运动轨迹的复杂度高于被测目标<sup>[5]</sup>。4)改造摄像机结构通过离散和聚焦图像恢复目标的深度信息,该方法需要对探测器进行特需加工且需要知道加工参数如探测器倾角、探测器与镜头的距离等信息<sup>[6]</sup>。5)先假定测量目标平面与摄像机平面平行,然后平行移动测量目标平面进行修正的测量方法<sup>[7]</sup>,该方法也需要控制相机或者目标平面做单一方向的已知平移。

本文在研究了抛物线射影几何的性质后发现,对已标定的摄像机可以利用抛物线图像中隐含的消失点与消隐线的性质计算世界坐标系与相机坐标系之间的旋转矩阵  $\mathbf{R}$ ,利用棋盘标定目标落点的单应矩阵计算平移矢量  $\mathbf{t}$ ,通过抛物线平面与相机平面之间的单应完成对抛物线点目标的测量。和以前的方法比较,不需要精密的移动控制平台,也不需要图像之间对应点的匹配,针对抛物线运动的测量具有很大的优势。

## 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<sup>[5,8,9]</sup>。 $O_c-X_cY_cZ_c$  为摄像机坐标系, $O_c$  为摄像机的光心,坐标轴  $O_cX_c$  与  $O_cY_c$  分别平行于图像平面的行和列, $O_cZ_c$  是摄像机的光轴。三个坐标轴的单位矢量分别为  $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 。 $O_w-X_wY_wZ_w$  为建立的世界坐标系, $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$  为世界坐标系坐标轴的单位矢量。世界坐标系向摄像机坐标系的平移矢量为  $\mathbf{t}$ ,旋转矩阵为  $\mathbf{R}$ 。 $\mathbf{t}$  为世界坐标系的中心  $O_w$  在摄像机坐标系中的坐标表示。旋转矩阵  $\mathbf{R}$  可以表示为

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

式中 ${}^c\mathbf{u}, {}^c\mathbf{v}, {}^c\mathbf{w}$  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<sup>[10]</sup>。

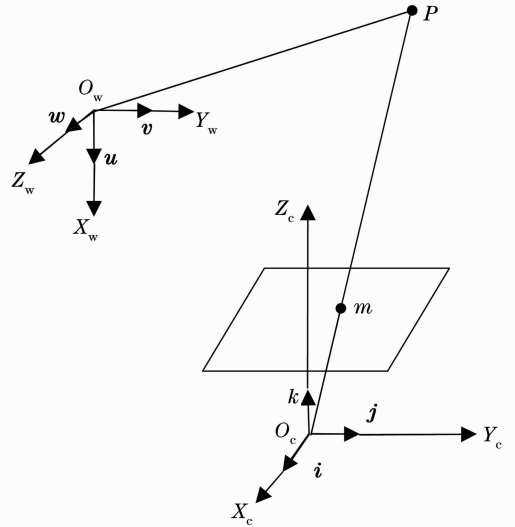


图 1 小孔成像模型

Fig. 1 Pinhole camera model

在该模型中,空间中一点  $P$  与其在摄像机图像平面上的投影  $m$  满足如下投影方程:

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

式中 $(u, v)$  为投影点  $m$  的图像坐标, $(x, y, z)$  为点  $P$  在世界坐标系下的三维坐标。 $\mathbf{K}$  为摄像机的内参数矩阵, $\mathbf{R}, \mathbf{t}$  为世界坐标系向摄像机坐标系转换的旋转矩阵和平移矢量。

### 2.2 标定摄像机给出的结果

1) 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<sup>[11]</sup>

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

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<sup>[11]</sup>

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

### 2.3 二次抛物线的射影几何

消失点和消隐线的性质在摄像机自标定中使用广泛<sup>[12]</sup>。直线上无穷远点的图像称为该直线的消失点。由于平行直线与无穷远平面相交于同一个无穷远点,因此平行直线有一个相同的消失点,消失点只与直线的方向有关,与直线的位置无关<sup>[8,11]</sup>。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消失点。由 2.2 节可知,在相机内

参数已知的情况下,消失点可以确定直线的方向。

三维空间平行平面与无穷远平面交于一条公共的直线,这条直线的图像称为该平面的消隐线。消隐线只与景物平面的法线方向有关,与平面的位置无关<sup>[8,11]</sup>。由 2.2 节可知,在摄像机内参数已知的情况下,消隐线确定该平面的法线。

根据以上消失点与消隐线的性质,针对二次抛物线固有的射影几何特性,可以得到以下两个结论: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消失点;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消隐线。

在二次抛物线支撑平面上取抛物线上任意一点为坐标原点,以地球重力方向为  $x$  轴方向,以平面内垂直于  $x$  轴的方向为  $y$  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

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

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

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

式中  $l$  为该平面的无穷远直线。因为投影变换保持极点、极线关系不变,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消隐线。显然  $p_1$  为直线  $l_{oc}$  的消失点。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  $o_1x_1$  的消失点。因为  $l_{oc}, l_{o_1x_1}$  同为地球重力方向,所以  $ox \parallel o_1x_1$ ,

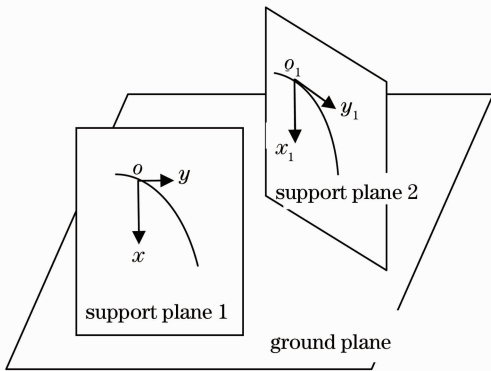


图 2 抛物线几何

Fig. 2 Parabolic geometry

点  $p_1$  和  $p_2$  重合。又因为这里选取的是任意两条抛物线,所以结论 1 和结论 2 均成立。

### 3 抛物线点目标的单目测量

不失一般性,令抛物线平面在世界坐标系中的平面方程为  $z=0$ ,且世界坐标系的  $x$  方向为地球重力方向,则由(2)式有

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $r_1, r_2$  为两个坐标系之间的旋转矩阵的前两行,该方程也称为平面单应方程。由该方程可知若抛物线支撑平面与摄像机平面之间的单应确定,则摄像机平面上的一点可以唯一确定空间一点的三维坐标。

#### 3.1 旋转矩阵 $R$ 的求解

将  $R$  分成三列( $r_1, r_2, r_3$ ),则  $r_1$  为单位向量  $u_1$  (地球重力方向的单位向量)在摄像机坐标系的坐标表示。由(3)式可知若确定该方向的消失点  $u_1$ ,则有

$$r_1 = \frac{\mathbf{K}^{-1}u_1}{\text{norm}(\mathbf{K}^{-1}u_1)}, \quad (8)$$

其中消失点  $u_1$  为不重合自由落体运动在摄像机平面投影直线的交点,  $\text{norm}$  表示向量的 2 范数。由 2.3 节结论可知,抛物线投影曲线在  $u_1$  点的切线为该抛物线支撑平面的消隐线,结合(4)式有

$$r_3 = \frac{\mathbf{K}^T(Cu_1)}{\text{norm}[\mathbf{K}^T(Cu_1)]}, \quad (9)$$

式中  $C$  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  $r_1, r_3$  可能并不能完全正交。可以通过奇异值分解(SVD)重新估计  $r_1, r_3$ 。对  $r_2$  有<sup>[13]</sup>

$$r_2 = r_1 \times r_3. \quad (10)$$

这里需要说明的是通过以上方式确定的矢量  $r_1, r_2, r_3$  与真实的方向可能会相差一个正负号,但是由于最后会把测量点的三维坐标转化到摄像机坐标系下,因此外部坐标系的方向不影响最后的测量结果。

#### 3.2 平移矢量 $t$ 的求解

根据平面景物的分层重构理论<sup>[8]</sup>,已知  $\mathbf{K}, R$  就可以完成平面景物的相似重构,此时与测量的绝对欧式重构相差一个相似变换,需要景物的绝对欧式信息,如平面上两点的欧式距离、平面某点在摄像机欧式坐标系下的坐标等,才能将相似重构上升到欧式重构。因为抛物线所在支撑平面为虚拟的景物平

面,很难获得在这个平面上任意两点的欧式距离,所以选择支撑平面某点在摄像机坐标系下的坐标作为欧式重构的要素。

平移矢量  $t$  为世界坐标系坐标原点在摄像机坐标系下的三维坐标,可以将支撑平面上任意一点作为世界坐标系的原点完成欧式重构。一般选取起点和落点作为原点,本文选择目标落点作为世界坐标系的原点,使用棋盘标定地平面与相机平面的单应矩阵<sup>[13,14]</sup>  $H$ ,则落点在摄像机坐标系下的三维坐标计算公式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{M} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{H} \\ \mathbf{M}_1 = \mathbf{M} / \text{norm}[\mathbf{M}(:, 1)] \\ \mathbf{A} = \mathbf{H}^{-1} b \\ \mathbf{A}_1 = \mathbf{A} / \mathbf{A}(3) \\ t = \mathbf{M}_1 \mathbf{A}_1 \end{cases}, \quad (11)$$

式中  $b$  为落点图像的齐次坐标,  $\text{norm}[\mathbf{M}(:, 1)]$  为  $\mathbf{M}$  矩阵第一列的 2 范数。 $t$  即为所求的三维坐标。

测量算法总结如下。

1) 拍照细线悬垂物体,使用 Hough 变换得到细线在图像平面上的投影直线  $L_i$ ,求投影直线  $L_i$  的交点,由于测量误差的存在,投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,得到消失点  $u_1$ :

$$E = \min \sum_i d^2(u_1, L_i), \quad (12)$$

式中  $d(u_1, L_i)$  表示  $u_1$  到直线  $L_i$  的距离。

2) 获取抛物线点目标在各个时刻的图像坐标,使用 Sampson 近似<sup>[8]</sup> 估计投影二次曲线  $C$ 。用(8)~(10)式求解  $r_1, r_2, r_3$ 。

3) 在目标落点处,使用棋盘标定目标落点地平面的单应矩阵。用(11)式求解平移矢量  $t$ 。

4) 根据以上结果获得支撑平面的单应矩阵。用(11)式求抛物线各个时刻在摄像机坐标系下的三维坐标。

### 3.3 算法退化情况

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。此时无法求取支撑平面的旋转矩阵,进而无法求解抛物线在各个时刻的三维坐标。

## 4 仿真与实验

### 4.1 合成数据仿真

仿真时设置摄像机的内参数为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 659 & 0 & 309 \\ 0 & 661 & 240 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

镜头畸变参数为 0。摄像机分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。抛物线在世界坐标系中的方程及世界坐标系到摄像机坐标系之间旋转矩阵的 Rodrigues 表示  $\mathbf{R}_c$ , 平移矢量  $t$  分别为

$$\begin{cases} x = 5000t_m + 5000t_m^2 \\ y = 5000t_m \\ z = 0 \\ \mathbf{R}_c = [-1.7937, -2.0695, -0.4908] \\ t = [-158.02, -232.71, 705.91] \end{cases}, \quad (14)$$

式中  $t_m$  为运动时间。

在测量的过程中,影响测量精度的主要有 4 个因素:1)抛物线上的测量点数;2)测量距离;3)平移矢量  $t$  的测量误差;4)消隐点的测量误差。图 3 为以上 4 个因素对测量结果的影响。图 3(a)为图像噪声为  $0.9 \text{ pixel}$  时,测量点数与测量误差之间的关系。从结果可以看出,测量点数在  $5 \sim 12$  之间时测量误差变化较大,14 以后测量误差趋于平缓,测量点的增加对测量结果的影响很小。所以在后面的仿真实验中选择测量点数为 14。图 3(b)为不同噪声下测量距离与相对误差之间的关系。图 3(c)为平移矢量各个分量与测量误差之间的关系。图 3(d)为消失点在  $x$  方向和  $y$  方向的图像坐标与相对误差之间的关系。其中相对误差采用如下公式计算:

$$e_r = \frac{d(m', m)}{d(m)} \times 100\%, \quad (15)$$

式中  $m$  为真值,  $m'$  为测量值,  $d(m', m)$  表示测量点与真值的欧式距离,  $d(m)$  表示  $m$  点到摄像机原点的距离,以上结果都是相对于摄像机坐标系得到的。

从以上仿真结果得到以下结论:1)测量点数目低于 12 时,测量误差较大,大于 14 时对测量精度的提高很小;2)在噪声水平一定时,测量点离世界坐标系原点越远,误差越大,即近距离测量有利于提高测量精度;3)对于某一个测量点,噪声的增加对测量误差的影响基本成线性关系;4)平移矢量对测量误差的影响成线性对称关系(这与在 3.2 节中的平面景物重构理论一致),同时,平移矢量三个分量对测量误差的影响程度不一样,  $z$  方向的误差对测量精度的影响最大;5)消失点在  $y$  方向的误差对测量精度的影响比  $x$  方向大。

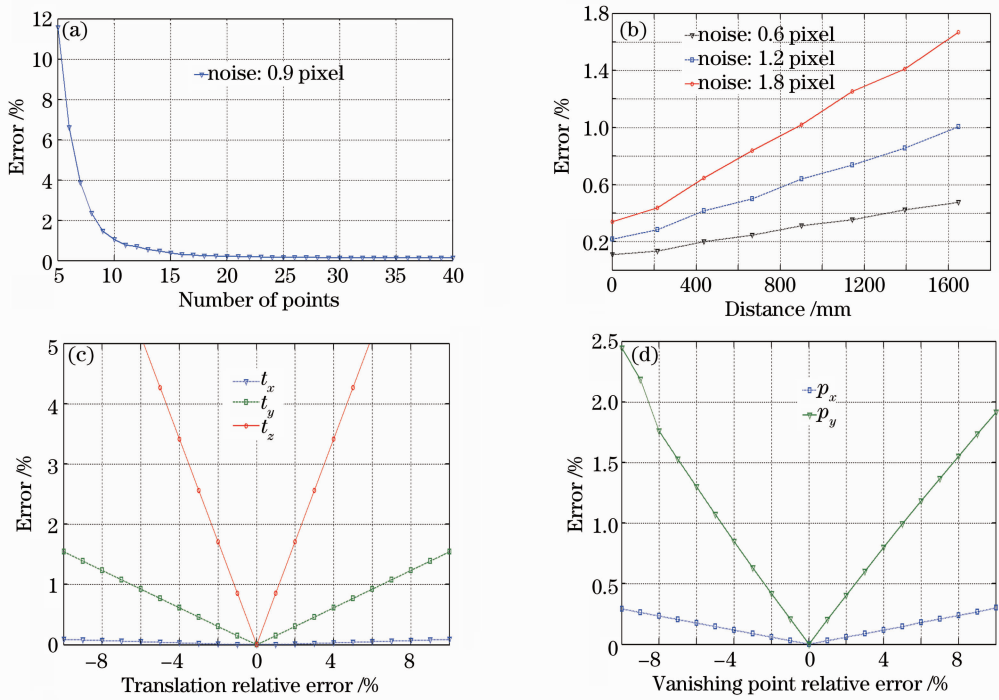


图 3 不同因素与测量相对误差之间的关系。(a)测量点数与相对误差之间的关系；(b)距离与相对误差之间的关系；(c)平移矢量  $t$  对测量误差的影响；(d)消失点与相对误差之间的关系

Fig. 3 Relation between different factors and relative error. (a) Relation between the number of points and relative error; (b) relation between distance and relative error; (c) relation between translation and relative error; (d) relation between vanishing point and relative error

## 4.2 真实实验

### 4.2.1 实际模拟实验

以典型桌面应用系统(DVS)搭建实验平台。摄像机的分辨率为  $720 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$ , 像元尺寸为  $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$ , 镜头焦距约为  $10 \text{ mm}$ , 内参数采用 Matlab 软件工具箱标定<sup>[14]</sup>。如果直接投掷某个物体, 测量物体在摄像机坐标系下各个时刻的三维坐标, 由于不知道物体在摄像机坐标系下的真实值, 因此不能对本文算法进行评价, 所以设计了如下实

验模拟对抛物线点目标的测量。标定液晶显示器平面的单应矩阵, 如图 4(a) 所示, 在液晶显示器上显示多条平行于世界坐标系  $x$  轴的直线用于计算消失点的位置[图 4(b)], 再刷新显示器, 获得各个时刻抛物线轨迹上点的图像坐标, 如图 4(c) 所示, 以标定的单应求解这些点的三维坐标, 并以这些值作为真值, 取单应计算原点作为平移矢量  $t$ , 使用本文描述的算法获得测量值。测量结果如表 1 所示。

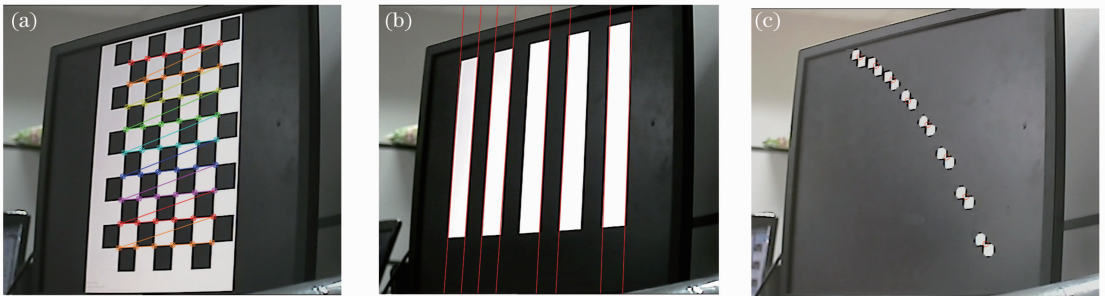


图 4 抛物线测量点。(a)单应矩阵的标定;(b) $x$  方向消失点的计算;(c)抛物线测量点

Fig. 4 Measurement experiment for parabola. (a) Calibration for homograph; (b) computing vanishing point of  $x$ -direction; (c) measurement points of parabola



表 1 单应算法与本文算法比较

Table 1 Comparison of the homography method and the proposed method

Method	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	
Homography method	$x / \text{mm}$	-65.53	-41.37	-17.48	5.60	28.57	51.22	73.40	95.10
	$y / \text{mm}$	-149.87	-135.81	-114.9	-88.12	-54.96	-15.59	30.05	82.07
	$z / \text{mm}$	1265.0	1241.1	1215.5	1189.0	1160.7	1131.1	1100.	1067.7
Proposed method	$x / \text{mm}$	-65.80	-41.42	-17.45	5.57	28.34	50.66	72.38	93.50
	$y / \text{mm}$	-150.50	-135.95	-114.67	-87.68	-54.52	-15.41	29.63	80.69
	$z / \text{mm}$	1270.3	1242.4	1213.1	1183.0	1151.5	1118.7	1084.8	1049.8
Relative error / %	0.42	0.11	0.20	0.50	0.80	1.09	1.39	1.67	

从实验结果看,本算法对抛物线运动目标测量的最大误差为 1.67%。在本实验中使用的平移矢量  $t$  是由显示器平面的单应计算得到的。但该方法与使用地平单应计算  $t$  的原理一样。因此该实验检验和肯定了本文算法的以下两个方面:1) 平移矢量  $t$  可以选择抛物线支撑平面上的任意一点。2) 通过本文算法计算旋转矢量  $R$  在实际上是可行的。

#### 4.2.2 投掷小球测量实验

如果直接使用本文的单目测量算法测量小球抛物线的运动轨迹,由于小球相对于摄像机坐标系的真实值未知,无法对测量结果给出评价。因此本实验中使用两台摄像机,在使用左相机采用本文算法对小球抛物线运动轨迹进行测量的同时,采用左右两个相机基于双目三角测量原理<sup>[15~17]</sup>测量小球抛物线运动轨迹,并且将小球抛物线运动轨迹在左相机坐标系下的三维坐标与本文算法所测的三维坐标进行对比。本实验采用两台 ImagingSource 公司的 DMK31BG03. H 型号 CCD 摄像机搭建实验平台。

摄像机的分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ ,像元尺寸为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ ,帧频为  $60 \text{ frame/s}$ ,搭建的实验平台如图 5 所示。图 6 为实验中采集到的部分图像。实验中设置相机的曝光时间为  $4 \text{ ms}$ ,在左相机的视场中,捕获到的小球帧数为  $7 \text{ frame}$ ,两个相机同时捕获小球的帧数为  $5 \text{ frame}$ 。表 2 为这 5 个点在两种测量算法下的测量结果。

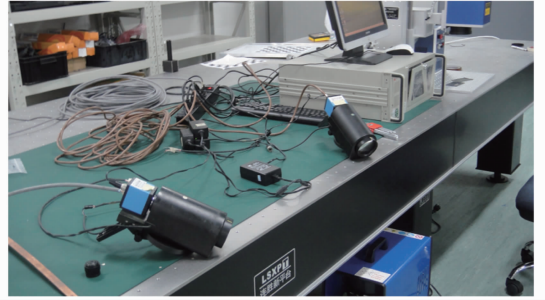


图 5 实验现场

Fig. 5 Scen of experiment

表 2 双目测量算法与本文算法比较

Table 2 Comparison of the binocular triangulation method and the proposed method

Method	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	
Binocular triangulation method	$x / \text{mm}$	57.843	20.64	-16.37	-63.54	-101.10
	$y / \text{mm}$	-93.65	-43.95	0.92	46.85	92.57
	$z / \text{mm}$	844.43	890.56	967.56	1022.67	1092.56
Proposed method	$x / \text{mm}$	66.16	23.28	-19.53	-61.58	-103.55
	$y / \text{mm}$	-90.97	-46.88	-0.45	48.53	99.86
	$z / \text{mm}$	839.56	899.86	961.54	1024.10	1088.10
Relative error / %	1.17	1.13	0.76	0.28	0.81	

从表 2 中的数据看,本文测量算法与双目测量算法相比,测量误差在 1% 左右。因此本文的单目测量算法在实际中也是可行的。

## 5 结 论

针对点目标的抛物线运动,提出了一种使用已标定单目摄像机测量点目标三维坐标的新方法。该

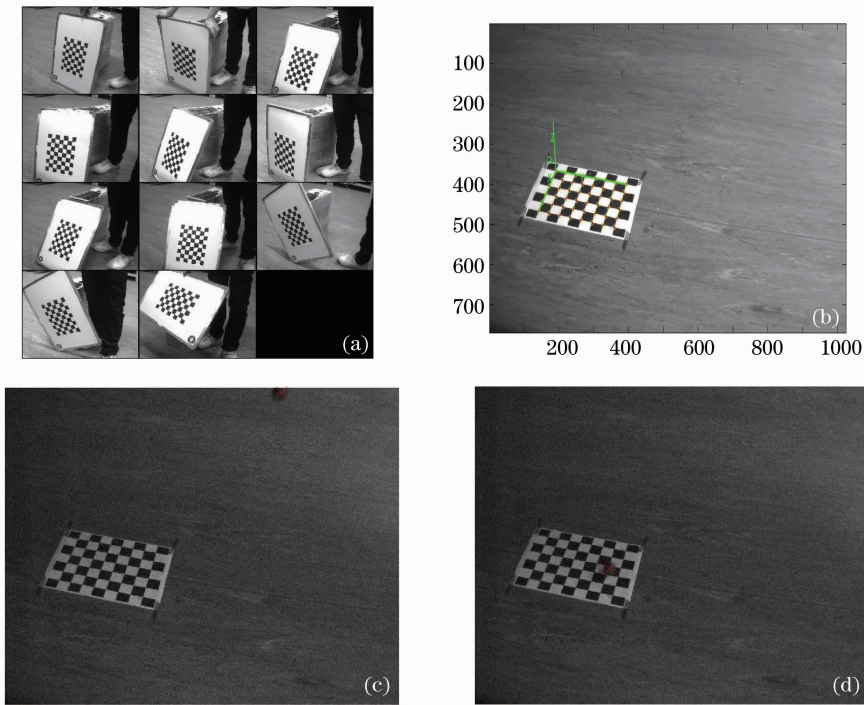


图6 实验采集的部分图像。(a)摄像机标定图像；(b)地平面单应；(c)小球第一帧图像；(d)小球第七帧图像

Fig. 6 Some images acquired from the experiment. (a) Images of camera calibration; (b) homograph of ground plane; (c) the first image of the ball; (d) the seventh image of the ball

方法既不需要辅助的控制平台和光路系统,也不需要图像之间的立体匹配,在降低测量成本的同时,提高了测量的可靠性。介绍了摄像机的小孔成像模型和标定摄像机的重要结论,并分析了抛物线的射影几何性质,给出了抛物线运动点目标运动测量的理论知识,提出了使用抛物线中隐含的消失点和消隐线的关系,计算旋转矢量 $\mathbf{R}$ ,利用棋盘单应计算平移矢量 $\mathbf{t}$ 的测量方法。针对实际的测量,介绍了具体的测量方法和算法。通过仿真实验和液晶显示器抛物线模拟实验验证了算法的正确性。通过实际的小球投掷实验,验证了算法的可行性。与双目测量结果比较,近距离低速下的小球三维坐标测量误差在1.2%以内,满足一般的测量精度要求。实验中小球运动的速度较小,空气阻力对本算法的影响很小。目标运动速度对本文算法测量精度的影响是下一步需要研究的问题。

### 参 考 文 献

- 1 M. A. Fishler, R. C. Bolles. 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 Zhu Jigui, Li Yanjun, Ye Shenghua *et al.*. Study on single camera simulating stereo vision measurement technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 943~948  
郝继贵, 李艳军, 叶声华等. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研

- 究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 943~948
- 3 Song Zhendong, Jiang Wei. Monocular multi-viewpoints stereo imaging and application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0515001  
宋振东, 姜 伟. 单目多视点立体图像提取与应用[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0515001
- 4 Naoki Yamaguti, Shunichiro Oe, Kenji Terada. A method of distance measurement by using monocular camera[C]. SICE'97. Proceedings of the 36th SICE Annual Conference, 1997. 1255~1260
- 5 Yu Qifen, Shang Yang. *Videometrics: Principles and Researches* [M]. Beijing: Science Press, 2009. 27~32, 244~250  
于起峰, 尚 洋. *摄影测量学原理与应用研究*[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 27~32, 244~250
- 6 Liu Xiaoming, Qin Tian, Chen Wanchun. Real-time distance measurement using a modified camera [C]. IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), 2010. 54~58
- 7 Han Yanxiang, Zhang Zhisheng, Dai Min. Monocular vision system for distance measurement based on feature points [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(5): 1110~1116  
韩延祥, 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
- 8 Wu Fuchao. *Mathematical Methods in Computer Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2011. 77~79, 378~382  
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
- 9 Yang Bowen, Zhang Liyan, Ye Nan *et al.*. Camera calibration technique of wide-area vision measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0915001  
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
- 10 F. Daniel Dementhon, Larry S. Davis. Model-based object pose in 25 lines of code [J]. *International J. Computer Vision*, 1995, **15**(2): 123~141

- 11 R. I. Hartley, A. Zisserman. Multiple View Geometry in Computer Vision (2nd ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 208~209
- 12 Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 465~472  
霍 炬, 杨 卫, 杨 明. 基于消失点几何特征的摄像机自标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 465~472
- 13 Guanghui Wang, Jonathan Wu, Zhengqiao Ji. Single view based pose estimation from circle or parallel lines [J]. *Pattern Recognition Lett.*, 2008, **29**(7): 977~985
- 14 Z. Y. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 15 Jean-Yves Bouguet. Camera Calibration Toolbox for Matlab [EB/OL] [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/)
- 16 Zhang Qiong, Wang Zhiliang, Chi Jiannan *et al.*. Calibration for gaze tracking system based on stereo cameras and plane mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0415002  
张 琼, 王志良, 迟健男等. 基于平面镜面向双摄像机视线追踪系统的标定方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0415002
- 17 Hou Junjie, Wei Xinguo, Sun Junhua. Calibration method for binocular vision based on matching synthetic images of concentric circles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0315003  
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

栏目编辑: 李文喆