doi:10.3788/gzxb20154412.1212003

基于单应性矩阵的线结构光参量标定法

洪磊[1],田啟良[2],嵇保健[3]
(1 南京工程学院 汽车与轨道交通学院,南京 211167)
(2 南京中建化工设备制造有限公司,南京 210034)
(3 南京工业大学 电气工程与控制科学学院,南京 211800)

摘 要:利用矩形角点计算了成像平面与靶标平面之间的单应性矩阵,获取了结构光中心线在靶标平面的直线方程,结合消失点原理获取了直线上任意多个标定点的三维坐标;通过多幅图像标定点的拟合得出了光平面方程.实验表明,该算法可实现光平面参量的快速准确标定,标定结果达到的定位准确度为±0.437 mm,符合工业现场的实际需求.与交比不变法相比,该方法获取标定点的效率高,靶标设计简单、通用性强.

关键词:标定;线结构光;单应性矩阵;平面靶标;拟合;消失点
中图分类号:TP212.6; TP242 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-4213(2015)12-1212003-6

Calibration Method for Line Structured-light Parameters Based on Homography Matrix

HONG Lei[1], TIAN Qi-liang[2], JI Bao-jian[3]
(1 *School of Automotive and Rail Transit, Nanjing Institute of Technology, Nanjing* 211167, *China*)
(2 *Nanjing China Construction Chemical Equipment Manufacturing Co. Ltd, Nanjing* 210034, *China*)
(3 *Electrical Engineering and Control Science, Nanjing University of Technology, Nanjing*, 211180, *China*)

Abstract: The mapping relationship of homography matrix between the image plane and the target plane was calculated by the rectangular corner points, the linear equation of the center line of the structured-light in the target plane was obtained. Based on the vanishing point theory, the coordinates of arbitrary points on structured-light in target line in camera coordinate system was obtained. The light plane equation was fitted by calibration points extracted from multiple images. Experiments show that the method can achieve a fast and an accurate calibration of structured-light plane parameters with the positioning accuracy at 0.437 mm, and suitable for the requirements on industrial field. Compared with the methods based on invariance of cross ratio, the proposed method is more universal which has a higher efficiency to extract calibration points and the target design is more simple.

Key words: Calibration; Line structured-light; Homography matrix; Planar target; Fitting; Vanishing point
OCIS Codes: 120.4820; 150.1488; 120.6650; 150.6910; 150.3040

0 引言

在主动视觉测量技术中,线结构光传感器具有非接触、准确度高、测速快等优点.它主要由激光投射器和摄像机构成,通过激光三角法原理计算物体表面的三维信息.激光器与摄像机之间的位置关系是测量模型的关键参量,确定该参量的过程称为结构光的参量标定,包括摄像机内参量标定和光平面方程标定两部分.其中,摄像机内参量标定方法众多且较为成熟,因此,光平面方程的标定是线结构光标定的核心问题.

传统光平面标定方法主要有拉丝标定法[1]、锯齿靶标标定法[2]和机械调整法[3],这类方法需借助外部

基金项目:江苏省产学研联合创新基金-前瞻性联合研究项目(No. BY2014005-09)和南京工程学院科研基金项目(No. YKJ201333)资助
第一作者:洪磊(1982—),男,讲师,博士,主要研究方向为机器视觉与三维测量、结构光视觉和机器人运动控制. Email:njithl@163.com
收稿日期:2015-07-21;**录用日期**:2015-09-30

测量设备，成本高，且获取标定特征点的数目相对较少，准确度有限. 魏振忠等[4]提出了基于双重交比不变原理获取标定点的方法，通过至少 3 个已知坐标的共线特征点生成标定结构光参量所需的标定点坐标，使标定准确度大幅提升，但所使用的三维立体靶标造价较高，且平面间互相遮挡也降低了图像质量. 后来，周富强等[5]提出了基于交比不变原理的二维平面靶标标定方法，该方法操作简单，准确度较高，但只能计算与靶标特征点所在行列相交的标定点，获得标定点的效率较低. 张广军等[6]发明了一种基于二维交比不变的结构光传感器结构参量标定方法，进一步提高了标定效率. 陈新禹等[7]提出了基于单个同心圆靶标的标定方法，该方法可任意计算多个标定点，但通过椭圆拟合求取圆心坐标的计算较复杂. 陈天飞等[8]根据光平面方程的几何意义提出了基于主动视觉的两步光平面标定法，该方法标定快速灵活，但仍需通过交比不变计算标定点距离来约束结构参量，且传感器平台平移运动误差会影响标定结果的准确度.

综上所述，平面靶标由于低成本、操作灵活的特点已成为目前主要标定方法，其中，标定点的检测主要依据交比不变原理. 交比不变方法可获得较高的准确度，但该方法求取标定点的效率较低，且如果要提高效率需要增加标定靶上已知特征点的数量，这不仅增加了靶标制作的成本和复杂度，而且增大了结构光条纹中心线提取难度，使准确度降低. 因此，在不降低准确度的前提下，采用设计简单、低成本的靶标，同时可以高效率提取标定点的方法是目前研究的主要方向.

交比不变原理只反映了靶标平面与成像平面上共线点间的一维映射关系，单应性矩阵表示了两平面点之间的二维映射关系，因此，基于单应性矩阵的方法效率更高，更适合快速标定. 本文受此启发，提出了一种基于单应性矩阵的光平面参量标定方法. 该方法采用平面矩形靶标，以矩形的 4 个角点作为特征点计算单应性矩阵，建立激光条纹中心线在成像平面和靶标平面之间的单应性映射关系，得到激光条纹在靶标面内的直线方程，自由选取满足直线方程的任意多个点作为标定点，再结合消失点原理获得标定点的三维坐标并通过拟合最终得到光平面参量.

1 线结构光传感器的数学模型

图 1 为线结构光传感器的测量原理图. $\{O_w-X_wY_wZ_w\}$、$\{O_c-X_cY_cZ_c\}$、$\{O-uv\}$和$\{O_n-X_nY_n\}$分别表示世界坐标系、摄像机坐标系、CCD 像面坐标系和归一化成像坐标系. 其中，$O_nX_n//O_cX_c$、$O_nY_n//O_cY_c$、O_cZ_c 为摄像机光轴. 点 P 为结构光条纹上一点. P'、m 分别是点 P 在$\{O_n-X_nY_n\}$和$\{O-uv\}$上的成像点.

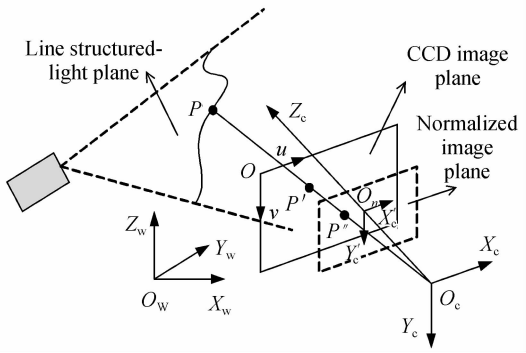

图 1 线结构光传感器的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of line structured-light sensor

设点 P 在世界坐标系和摄像机坐标系下坐标分别为 $\widetilde{P}_w=(x_w,y_w,z_w,1)^T$ 和 $\widetilde{P}_c=(x_c,y_c,z_c,1)^T$，像点坐标 $\widetilde{m}=(u,v,1)^T$，$\widetilde{P}'=(x_c',y_c',1)^T$. 根据摄像机的成像模型[9]，则有

$$\lambda\widetilde{m}=\boldsymbol{K}[\boldsymbol{R}\quad \boldsymbol{t}]\widetilde{P}_w \tag{1}$$

$$\widetilde{P}'=\boldsymbol{K}^{-1}\widetilde{m} \tag{2}$$

$$\widetilde{P}_c=\lambda\widetilde{P}' \tag{3}$$

式中，λ 为非零常量因子，$\boldsymbol{K}$ 为摄像机内参量矩阵，$\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{t}$ 分别表示世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量，即摄像机外参量.

同时，点 P 满足光平面方程的约束，即

$$\boldsymbol{w}\cdot\widetilde{P}_c=0 \tag{4}$$

式中，系数向量 $\boldsymbol{w}=[w_1,w_2,w_3,w_4]$为光平面参量. 若 $\boldsymbol{K}$ 和 $\boldsymbol{w}$ 已知，根据式(2)～(4)，便可确定光平面上点 P 在摄像机坐标下的三维坐标.

2 线结构光参量的标定

在标定线结构光平面参量之前，首先采用张正友[10]提出的方法进行摄像机内参量矩阵 $\boldsymbol{K}$ 的标定.

2.1 线结构光条纹直线方程的建立

在摄像机的视场范围之内，采用矩形靶标对光平面进行调制，以获得结构光条纹的图像.

如图 2，靶标平面内的矩形四条边分别记为 L_1～L_4，四个顶点分别记为 P_1～P_4，经透视投影后，在图像平面内对应像点记为 P_1^u～P_4^u.

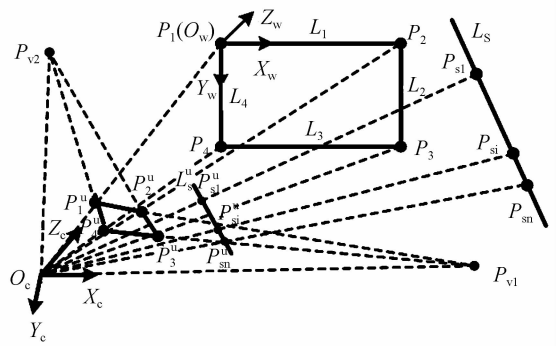

图 2 线结构光参量标定原理

Fig. 2 Calibration Principle of line structured-light parameters

选取世界坐标系的 XY 平面与靶标平面重合，重新设定世界坐标系，点 P_1 为原点 O_w，P_1 到 P_2 的方向为 X_w 轴正向，P_1 到 P_4 的方向为 Y_w 轴的正向，则平面靶标点 $z_w=0$. 若旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的第 i 列元素由 r_i 表示，则式(1)可表示为

$$\lambda\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{K}\begin{bmatrix}r_1 & r_2 & r_3 & t\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\0\\1\end{bmatrix}=$$

$$\boldsymbol{K}\begin{bmatrix}r_1 & r_2 & t\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_w\\y_w\\1\end{bmatrix} \tag{5}$$

仍以 $\widetilde{P}_w$ 表示平面靶标上任意一点 P 的齐次坐标，则 $\widetilde{P}_w=(x_w,y_w,1)^T$. 因此，有

$$\lambda\widetilde{m}=\boldsymbol{H}\widetilde{P}_w \tag{6}$$

其中

$$\boldsymbol{H}=\frac{1}{\lambda}\boldsymbol{K}\begin{bmatrix}r_1 & r_2 & t\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}h_{11} & h_{12} & h_{13}\\h_{21} & h_{22} & h_{23}\\h_{31} & h_{23} & h_{33}\end{bmatrix}$$

为靶标平面与像平面间的单应性矩阵，通过 4 个或 4 个以上位置已知的对应点(如矩形靶标的 4 个顶点)，在相差比例因子 λ 条件下，采用归一化的正交直接线性变换(Nomalized Direct Linear Transfomation, NDLT)算法可精确实现 $\boldsymbol{H}$ 的计算，具体过程参考文献[11].

设靶标平面内线结构光条纹直线为 L_s，经透视投影后，条纹线像点在图像平面内仍形成一条直线，记为 L_s^u. 精确提取条纹中心线上的各像点坐标 $P_{si}^u(u_{si}^u,v_{si}^u)$，$(i=1\sim n)$. 经直线拟合后，可得到图像平面内的结构光条纹直线方程为

$$a_u\cdot u+b_u\cdot v+1=0 \tag{7}$$

式中，a_u，b_u 为图像平面直线方程的系数.

由式(6)消去 λ 后得到

$$\begin{cases}u=\dfrac{h_{11}x_w+h_{12}y_w+h_{13}}{h_{31}x_w+h_{32}y_w+h_{33}}\\[2ex] v=\dfrac{h_{21}x_w+h_{22}y_w+h_{23}}{h_{31}x_w+h_{32}y_w+h_{33}}\end{cases} \tag{8}$$

将式(8)代入式(6)，整理后得

$$a_w\cdot x_w+b_w\cdot y_w+1=0 \tag{9}$$

式中，a_w，b_w 为靶标平面直线方程系数，即

$$a_w=(a_uh_{11}+b_uh_{21}+h_{31})/(a_uh_{13}+b_uh_{23}+h_{33}),$$

$$b_w=(a_uh_{12}+b_uh_{22}+h_{32})/(a_uh_{13}+b_uh_{23}+h_{33}).$$

2.2 光平面标定点摄像机坐标的确定

如图 2，取直线 L_s 上任意 n 个光点 $P_{si}^w(x_{si}^w,y_{si}^w)$ $(i=1\sim n)$作为标定点，然后需标定点的摄像机坐标，其关键是计算外参量 R 和 t.

根据透视投影原理，空间中相互平行的直线在像平面中相交于一点，该点称为消失点，它表示空间中平行直线在摄像机坐标系中的方向[12].

如图 2，点 P_{v1} 和 P_{v2} 分别表示矩形靶标水平和垂直方向平行直线的消失点，可知：$O_cP_{v1}//P_1P_2$，$O_cP_{v2}//P_1P_4$. 消失点的图像坐标可由 $P_1\sim P_4$ 的图像坐标求得，分别表示为 P_{v1}^u 和 P_{v2}^u.

由式(2)可得 $P_{vi}^u(i=1,2)$在摄像机归一化成像平面的坐标为

$$\widetilde{P}_{vi}^{'}=\boldsymbol{K}^{-1}P_{vi}^u\quad(i=1,2) \tag{10}$$

式中，$\widetilde{P}_{vi}^{'}$的齐次坐标$(x_{cvi},y_{cvi},1)^T$ 代表形成消失点 P_{vi} $(i=1,2)$的平行直线方向，故 $(x_{cvi},y_{cvi},1)^T(i=1,2)$分别表示了世界坐标系 X、Y 轴方向. 将 $\widetilde{P}_{vi}^{'}$坐标归一化为单位向量，由此可得外参量旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的前两个分量为

$$\boldsymbol{r}_1=\widetilde{P}_{v1}^{'}/\|\widetilde{P}_{v1}^{'}\|,\boldsymbol{r}_2=\widetilde{P}_{v2}^{'}/\|\widetilde{P}_{v2}^{'}\| \tag{11}$$

设单应性矩阵 $\boldsymbol{H}=(h_1,h_2,h_3)$，$h_i$ 分别代表 $\boldsymbol{H}$ 的第 i 列$(i=1,2,3)$元素. 由式(6)可得

$$\lambda\begin{bmatrix}\boldsymbol{h}_1 & \boldsymbol{h}_2 & \boldsymbol{h}_3\end{bmatrix}=\boldsymbol{K}\begin{bmatrix}\boldsymbol{r}_1 & \boldsymbol{r}_2 & \boldsymbol{t}\end{bmatrix} \tag{12}$$

式(12)消去 λ 可得外参量平移向量 $\boldsymbol{t}$ 为

$$\boldsymbol{t}=\frac{\boldsymbol{h}_1^T\boldsymbol{K}\boldsymbol{r}_1\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{h}_3}{\|\boldsymbol{h}_1\|}\text{或}\ \boldsymbol{t}=\frac{\boldsymbol{h}_2^T\boldsymbol{K}\boldsymbol{r}_2\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{h}_3}{\|\boldsymbol{h}_2\|} \tag{13}$$

由于 $\boldsymbol{H}$ 和 $\boldsymbol{R}$ 存在误差，两式计算结果不相等，可取两者的平均值作为 $\boldsymbol{t}$ 的结果.

由此得到标定点的摄像机系坐标 $\boldsymbol{P}_{si}^c$ 为

$$\boldsymbol{P}_{si}^c=\begin{bmatrix}\boldsymbol{r}_1 & \boldsymbol{r}_2 & \boldsymbol{t}\end{bmatrix}\boldsymbol{P}_{si}^w(i=1\sim n) \tag{14}$$

2.3 光平面方程的求解

保持结构光传感器不变，自由移动靶标平面采集 M 幅图像，每幅图像计算 n 个标定点，将求得的标定点代入方程(4)拟合平面，其目标函数为点到平面的欧几里德距离平方和最小，即

$$\min\ f(\boldsymbol{w})=\sum_{i=1}^{M\cdot n}d^2 \tag{15}$$

式中，$d=|\boldsymbol{w}\cdot\widetilde{P}_c|/\|\boldsymbol{w}\|$ 为点 $\widetilde{P}_c$ 到以 $\boldsymbol{w}$ 表示的平面方程的距离.

2.4 算法流程

线结构光参量的具体标定步骤为：

1) 采集图像. 自由移动平面矩形靶标，在不同位置、不同姿态拍摄 M 幅结构光条纹图像；

2) 提取矩形边的四顶点及消失点. 对每幅图像先使用 Canny 算子进行边缘提取，再采用 hough 变换提取矩形四边形直线[13]，由直线求交得到四顶点 $P_1\sim P_4$ 和消失点 P_{v1}、P_{v2}的图像坐标；

3) 计算单应性矩阵. 设定四顶点靶标平面为世界坐标系，由 NDLT 算法计算靶标平面与图像平面之间的单应性矩阵 H；

4) 提取结构光中心线. 采用改进的 Steger 算法实现光条纹中心线的提取[14]，拟合得到直线方程 L_s^u，由

式(9)得到靶标平面内直线方程 L_s；

5) 计算光平面标定点的摄像机坐标. 由式(11)和(13)计算 r_1、r_2 和 t. 在 L_s 上等距离的取 n 个光点 P_s^w 作为标定点，由式(13)计算标定点的摄像机坐标 P_s^c；

6) 求解光平面方程. 将各幅图像的多个标定点代入式(15)，拟合光平面方程，完成标定.

3 实验研究

实验采用的线结构光传感器由 1/3in XC-ES50CE CCD 工业摄像机和 650 nm 的线性激光器组成，摄像机配置 8 mm Computar 镜头，图像采集采用大恒 DH CG410 图像采集卡，图像大小为 768×576 像素. 将线结构光传感器固定安装在 ABB1410 工业机器人末端，构成线结构光手眼视觉系统. 下文首先进行线结构光参量标定实验，然后利用标定结果完成空间平板位置检测实验.

3.1 线结构光参量标定实验

为准确标定摄像机内参量，实验采用自制棋盘格标定板，靶标规格为 22×11 格，各方格边长为 10 mm，取棋盘格四极点连线构成矩形靶标，即矩形尺寸为 220×110 mm，用于结构光参量标定.

首先采用张正友法完成摄像机内参量 $\boldsymbol{K}$(畸变系数较小，可忽略不计)的标定，结果为

$$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}1008.0221 & 0 & 380.0235\\ 0 & 1005.3855 & 310.6811\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

然后采集不同姿态下的 12 幅线结构光图像，每幅图像等距离取 30 个标定点，按照 2.4 节步骤完成标定，所获标定点相对摄像机的空间位置如图 3.

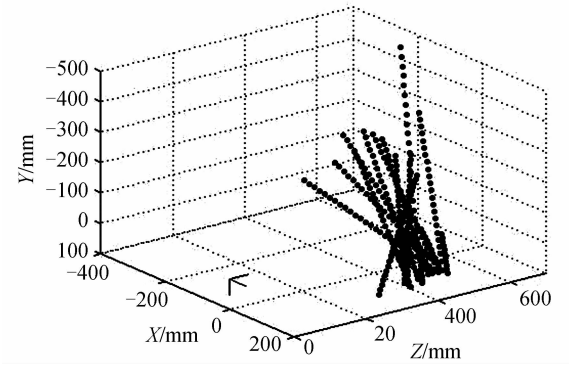

图 3 标定点相对摄像机空间位置

Fig. 3 Position of calibration points relative to camera

拟合得到光平面方程系数 $\boldsymbol{w}$ 为

$$\boldsymbol{w}=[0.8102 \quad -0.5854 \quad 0.0291 \quad -94.9889]$$

为便于比较，对上述每幅图像，分别求出光条纹直线 L_s^u 与棋盘格角点阵列构成的 10 行 20 列直线的交点，同样也取得30个点作为标定点，再利用交比不变方法得出标定平面系数，记为 $\boldsymbol{w}'$

$$\boldsymbol{w}'=[0.8138 \quad -0.5791 \quad 0.0487 \quad -94.1963]$$

可见，两种方法标定结果近似相同.

3.2 空间平板检测实验

为检验标定结果的准确度，设计空间平板检测实验，如图 4.

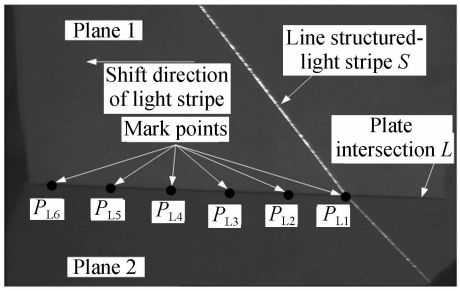

图 4 检测实验平板及标记点

Fig. 4 Detection experiment plate and mark points

用两块平板 Plane1 和 Plane2 摆放在空间固定位置，两平板交线为 L，在 L 上依次选取 6 个标记点 P_{Li}(i=1～6)，相临两点间隔 40mm. 结构光投射到两平板上形成折线条纹 S，折线交点在 L 上. 操作机器人使固定其末端的结构光传感器沿 L 方向做平移运动(由于平移方向与 L 方向不严格平行，故需记录每次实际平移距离)，使光条纹折线交点与 6 个标记点依次重合并采集图像，共 6 幅，采每幅图像时均通过机器人示教器记录当前机器人末端位姿数据. 对每幅图像提取条纹线 S 上 40 个采样点，分别应用实验 3.1 中本文方法及交比不变方法的标定结果 w 和 w'，将上述数据代入式(5)计算各点的三维坐标，设采集第 1 幅图像时的摄像机位置为初始坐标系，将后 5 幅图像数据统一换算到初始摄像机坐标系.

为验证实验准确度，以 6 个标记点相对机器人基坐标系的位置为测度，通过记录的机器人末端位姿及固定的手眼位姿数据(ABB1410 机器人的重复定位准确度为±0.05 mm)，可计算得到的 6 个标记点在机器人基坐标系下的坐标，记为 P_{Bi}^{C}(i=1～6)，实验数据如表 1. 再利用示教方法[16]让机器人工具焊枪末端尖点依次运动和每个标记点位置重合，通过示教盒直接读取各点在机器人基坐标系下的坐标，得出结果记为 P_{Bi}^{R}(i=1～6)，通过比较 P_{Bi}^{C} 和 P_{Bi}^{R} 的距离误差来反映标定结果的准确度，实验结果如表 2.

从表 2 的实验结果可见，本文方法标定结果计算得到的 P_{Bi}^{C} 和示教盒读出的 P_{Bi}^{R}(i=1～6)之间的距离平均误差为±0.437 mm，小于交比不变法的平均误差±0.649 mm，证明本文方法标定准确度较高. 如图 5，将表 2 的实验结果写入机器人直线运动指令，机器人可平稳地沿平板交线轨迹运动.

表 1　平板检测实验数据

Table 1　Experimental data of flat detection

Mark points	Image coordinates		Coordinates in the initial camera coordinate system			Position and pose of the camera in the robot base coordinate system(RBCS)/mm (Translation vector and pose quaternion)						
	u_c/pix	v_c/pix	x_c/mm	y_c/mm	z_c/mm							
1	581.288 1	413.071 5	144.518 0	73.714 2	723.809 8	1 217.8	133.0	983.1	−0.289 7	0.668 9	−0.626 8	0.276 0
2	581.550 9	413.471 7	104.730 7	74.014 6	723.930 2	1 217.8	173.0	983.1	−0.289 7	0.668 9	−0.626 8	0.276 0
3	580.823 8	412.239 7	64.062 6	73.053 4	723.197 4	1 217.8	213.0	983.1	−0.289 7	0.668 9	−0.626 8	0.276 0
4	581.419 1	413.125 1	24.530 4	73.711 1	723.401 4	1 217.8	253.0	983.1	−0.289 7	0.668 9	−0.626 8	0.276 0
5	580.749 4	412.322 8	−15.872 0	73.173 5	723.793 9	1 217.8	293.0	983.1	−0.289 7	0.668 9	−0.626 8	0.276 0
6	580.126 6	411.480 8	−56.307 2	72.574 9	723.868 7	1 217.8	333.0	983.1	−0.289 7	0.668 9	−0.626 8	0.276 0

表 2　标定点间距离的比较(单位/mm)

Table 1　Comparison of distance between tow calibration points (mm)

Mark points	Coordinates in RBCS (Results by presented method)			Coordinates in RBCS (Results by cross ratio invariance method)			Coordinates in RBCS (Results by robot teaching)			Distance error (presented method)	Distance error (cross ratio invariance method)
	x_b^c	y_b^c	z_b^c	x_b^i	y_b^i	z_b^i	x_b^r	y_b^r	z_b^r	$\lVert P_{Bi}^C - P_{Bi}^R \rVert$	$\lVert P_{Bi}^I - P_{Bi}^R \rVert$
1	1 706.37	16.38	437.38	1 706.21	16.46	437.25	1 706.7	16.1	437.5	0.449	0.657
2	1706.29	56.16	437.10	1706.59	56.22	437.85	1 706.1	56.4	437.4	0.428	0.689
3	1 706.35	96.81	438.29	1 706.43	97.13	437.84	1 706.2	97.0	438.0	0.378	0.596
4	1 706.11	136.33	437.69	1 705.93	135.75	437.61	1 706.3	136.1	437.3	0.491	0.629
5	1 706.65	176.73	437.74	1 706.14	176.09	438.11	1 706.3	176.5	437.6	0.442	0.671
6	1 707.15	217.24	438.22	1 706.58	216.93	437.73	1 706.9	217.4	437.9	0.436	0.653

图 5　机器人沿平板交线运动

Fig. 5　The robot motion along the flat intersection

4　结论

提出了一种基于单应性矩阵的线结构光平面参量标定方法，该方法采用平面矩形靶标调制光平面，通过建立靶标平面和图像平面的单应性关系，自由获取标定点. 该方法具有如下优点：

1)获取标定点效率高. 标定点数量获取不受靶标限制，一幅图像可获取任意多个标定点；

2)靶标制作简单灵活. 只要符合单应性矩阵计算要求的靶标都可实现，最低只需尺寸已知的任意不共线四点即可，无需做其他特殊设计；

3)该方法具有一定通用性. 对点、线结构光标定均适用、对圆结构光标定改造后适用；

4)与三坐标测量机等设备相比，本文方法适合于现场标定.

实验表明，该算法可实现光平面参量的快速准确定，利用标定结果达到的平均定位测量准确度为±0.437mm，满足工业现场的实际要求.

参考文献

[1] DEWAR R. Self-generated targets for spatial calibration of structured light optical sectioning sensors with respect to an external coordinate system [C]. Robots and Vision′88 Conference Proceedings, Detroit, 1988:5-13.

[2] DUAN Fa-jie, LIU Feng-mei, YE Sheng-hua. A new accurate method for the calibration of line structured light sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, **21**(1):108-110.
段发阶，刘凤梅，叶声华. 一种新型线结构光传感器结构参量标定方法[J]. 仪器仪表学报，2000，**21**(1):108-110.

[3] LIN Na, MA Zi, HU Ying, *et al*. New method for calibration of line structure light vision sensor based on robot system[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, **26**(9):101-103.
林娜，马孜，胡英，等. 基于机器人系统的线结构光视觉传感器标定新方法[J]. 传感器与微系统，2007，**26**(9)：101-103.

[4] WEI Zhen-zhong, ZHANG Guang-jun, XU Yuan. Calibration approach for structured lighted stripe vision sensor[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, **41**(2): 210-214.
魏振忠，张广军，徐园. 一种线结构光视觉传感器标定方法[J]. 机械工程学报，2005，**41**(2)：210-214.

[5] ZHOU Fu-qiang, ZHANG Guang-jun. Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations [J]. *Image and Vision Computing*, 2005, **23**(1): 59-67

[6] 张广军，孙冠华，刘谦哲，等. 一种基于二维交比不变的结构光传感器结构参量标定[P]. CN 200810081873.4，2009.12.

[7] CHEN Xin-yu, MA Zi, WANG Yang, *et al*. A simple method to calibrate parameters of the line structured light[J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2013, **24**(3): 563-568.
陈新禹，马孜，汪洋，等. 线结构光参量的简易标定方法[J].

光电子.激光,2013,**24**(3):563-568.

[8] CHEN Tian-fei, ZHAO Ji-bin, WU Xiang. New calibration method for line structured light sensor based on planar target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(1): 0112004.
陈天飞,赵吉宾,吴翔. 基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法[J]. 光学学报. 2015,**35**(1):0112004.

[9] 张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社,2005.

[10] ZHANG Zheng-you. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1334.

[11] WU Bin, ZHU Hong-yan, XIAO Xin-tong, *et al*. Extraction of plane target image features based on homography matrix in visual measurement[J]. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2011, **22**(8): 1211-1215.
吴斌,朱洪岩,肖心通,等. 视觉测量中基于单应性矩阵的平面靶标图像特征提取[J]. 光电子.激光,2011,**22**(8):1211-1215.

[12] 徐德,谭民,李原. 机器人视觉测量与控制[M],北京:国防工业出版社,2011.

[13] CHEN Guang-jing, CHEN Ming-gui. XIAO Yu-qiang. The new sub-pixel loacation algorithm based on Hough transform [J]. *Electronic Design Engineering*, 2010, **18**(12): 127-130.
陈光静,陈明贵,肖玉强. 一种基于 Hough 变换新的亚像素定位算法[J]. 电子设计工程. 2010,**18**(12):127-130.

[14] HU Kun, ZHOU Fu-qiang, ZHANG Guang-jun. Fast extrication method for sub-pixel center of structured light stripe[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(10):1326-1329.
胡坤,周富强,张广军. 一种快速结构光条纹中心亚像素准确度提取方法[J]. 仪器仪表学报,2006,**27**(10):1326-1329.

[15] 叶晖,管小清. 工业机器人实操与应用技巧[M]. 北京:机械工业出版社,2010.

Foundation item: The Joint Innovation Fund for Industry-Academia-Research-Prospective Joint Research Project of JiangSu Province, China (No. BY2014005-09) and the Scientific Research Fund Project of Nanjing Institute of Technology, Nanjing, China (No. YKJ201333)