

文章编号 1004-924X(2010)03-0685-07

# 空间圆姿态识别二义性的角度约束消除

魏振忠, 赵 征, 张广军

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要:** 为了消除视觉测量中单个圆姿态识别中存在二义性的问题, 提出了一种基于空间角度约束消除二义性的方法, 并且对姿态求解算法进行了误差分析, 为准确进行姿态估算给出了指导性的实验结果。在摄像机已标定的前提下, 根据圆特征在图像上的投影椭圆曲线确定了圆心位置和圆平面姿态参数, 计算结果存在二义性; 利用欧式空间中的角度不变量, 识别出圆平面的真实姿态参数, 同时确定圆心的真实位置; 最后, 根据误差传播理论对基于单圆特征的位姿估计算法进行了精度分析。实验结果表明, 圆平面姿态角的测量绝对误差在  $0.2^\circ$  以内, 圆心的定位误差为  $0.5\%$ , 根据圆平面的位姿参数计算的共面直线的距离误差为  $0.8\%$ 。该方法能够准确地识别圆平面的位置和姿态, 计算过程简单, 结果稳定可靠且具有较高的精度。

**关键词:** 机器视觉; 姿态求解; 圆; 二义性; 角度约束; 误差分析

**中图分类号:** TP242.6 **文献标识码:** A

## Solution of duality in pose estimation of single circle using Euclidean angular constraint

WEI Zhen-zhong, ZHAO Zheng, ZHANG Guang-jun

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics

Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to solve the duality problem in pose estimation of a single circle in machine vision, an approach based on Euclidean angular constraint is presented to identify the unique pose result. The accuracy of pose estimation is analyzed, which provides constructive suggestions on achieving accurate pose estimation of circles based on experimental results. The pose of single circle is recovered from its projection in an image with a calibrated camera, though the result is ambiguous, only two possible results exist. Then, the unique pose is identified based on the Euclidean angular invariant. Finally, the accuracy of pose estimation is analyzed based on the theory of error propagation. Experimental results indicate that the absolute error of pose angle of the circle plane and the relative error of position determination are within  $0.2^\circ$  and  $0.5\%$  respectively, and the absolute error of reconstructed distance between the two lines is within  $0.8\%$ . These results show that the approach can identify correctively poses and positions of circle planes and can offer a high measuring accuracy and reliable results by a sim-

收稿日期: 2009-04-17; 修订日期: 2009-08-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50875014); 教育部新世纪优秀计划资助项目 (No. NCET-07-0043); 北京市自然科学基金资助项目 (No. 3092014)

ple computing process.

**Key words:** machine vision; pose estimation; circle; duality; angular constraint; error analysis

## 1 引言

在机器视觉测量中,空间物体的姿态测量是指在摄像机已标定的条件下,通过空间三维基元(如点和直线等)与图像二维基元之间的对应关系,求得摄像机坐标系与物体坐标系之间的刚体变换关系<sup>[1]</sup>。

圆是物体的基本几何形状,在许多自然景物和人造物体中大量存在,如各种工件、零部件的定位孔等。基于单个圆进行空间位姿测量的视觉检测技术,综合运用了电子学,光电探测,图像处理和计算机技术,实现对物体的空间定位,具有非接触,速度快,柔性好以及自动化程度高等优点,具有广泛而重要的应用前景,在摄像机标定、姿态定位、图像矫正等方面都有广泛的应用<sup>[2-4]</sup>。

利用单个圆特征进行姿态计算,存在二义性<sup>[5-6]</sup>,在没有其它约束的条件下,由单个圆的投影曲线不能确定真实的空间圆姿态信息。本文讨论了在最少场景信息的条件下,通过几何约束消除利用圆特征进行姿态计算中存在的二义性问题。首先根据圆投影曲线进行姿态定位,在此基础上,利用已知的空间角度约束,确定真实的位姿参数;若空间角度约束未知,那么通过同一场景的多幅图像,根据欧式空间中角度不变性确定真实的姿态参数。

## 2 基于角度约束的姿态识别二义性消除方法

### 2.1 基于单个圆投影的姿态定位方法

不失一般性,所有的讨论均以摄像机已标定的基础上,所有的图像点坐标都可以转化到归一化焦距平面上,对应的摄像机焦距  $f = 1$ ,计算结果中所有的长度均以  $f$  为单位。

利用单幅图像的投影圆可计算得到空间圆圆心坐标和所在平面的法向量<sup>[5]</sup>,计算过程简单,并可得到圆心坐标和平面法向量的解析解,但姿态计算结果存在二义性;若空间圆半径未知,计算的

圆心坐标与真实的圆心坐标在相差一个比例因子的条件下相等。

### 2.2 基于角度约束消除姿态二义性

如图 1 所示,设由投影椭圆计算得到的空间圆平面的法向矢量为  $\mathbf{n}_1 = (k_1, l_1, m_1)^\top$ 、 $\mathbf{n}_2 = (k_2, l_2, m_2)^\top$ , 圆心坐标分别为  $\mathbf{C}_1 = (X_{c1}, Y_{c1}, Z_{c1})^\top$ 、 $\mathbf{C}_2 = (X_{c2}, Y_{c2}, Z_{c2})^\top$ ,  $\mathbf{n}_1$  与  $\mathbf{C}_1$  决定了三维空间中的平面  $\pi_1$ , 同理得到  $\pi_2$ ; 设真实的法向矢量为  $\mathbf{n}_1$ ; 共面直线  $L_1, L_2$  在摄像机图像平面上的投影为  $l_1 = (a_1, b_1, c_1)$ 、 $l_2 = (a_2, b_2, c_2)$ , 摄像机光心  $o_c$  与  $l_1$  共同决定了投影平面  $\pi_{L_1}$ , 同理可得  $\pi_{L_2}$ 。

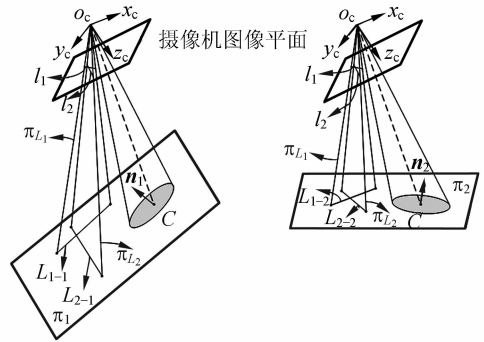


图 1 共面直线约束示意图

Fig. 1 Projections of coplanar lines and circle

在摄像机坐标系  $o_c-x_c y_c z_c$  下,直线  $l_1, l_2$  的表达式分别为:

$$l_1: \begin{cases} a_1 X_c + b_1 Y_c + c_1 = 0 \\ Z_c = f \end{cases}, \quad (1)$$

$$l_2: \begin{cases} a_2 X_c + b_2 Y_c + c_2 = 0 \\ Z_c = f \end{cases}, \quad (2)$$

其中  $f$  为摄像机焦距。

由  $o_c$  与  $l_1, l_2$  可得  $\pi_{L_1}$  与  $\pi_{L_2}$  的表达式为:

$$\pi_{L_1}: a_1 X_c + b_1 Y_c + \frac{c_1}{f} Z_c = 0, \quad (3)$$

$$\pi_{L_2}: a_2 X_c + b_2 Y_c + \frac{c_2}{f} Z_c = 0, \quad (4)$$

根据单个投影圆计算的位置和姿态为  $n_1, C_1$ , 由此可确定平面  $\pi_1$ :

$$\pi_1: k_1 (X_c - X_{c1}) + l_1 (Y_c - Y_{c1}) + m_1 (Z_c - Z_{c1}) = 0, \quad (5)$$

根据(3)(4)(5),可求得各平面之间的交线为  $L_{1-1}, L_{2-1}$ :

$$L_{1-1}: \frac{N_1 X_c - b_1 \omega_1}{L_1} = \frac{N_1 Y_c + a_1 \omega_1}{M_1} = Z_c, \quad (6)$$

$$L_{2-1}: \frac{N_2 X_c - b_2 \omega_2}{L_2} = \frac{N_2 Y_c + a_2 \omega_2}{M_2} = Z_c, \quad (7)$$

其中:

$$d_1 = (L_1, M_1, N_1) = \left( \begin{vmatrix} b_1 & c_1 \\ l_1 & m_1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} c_1 & a_1 \\ m_1 & k_1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ k_1 & l_1 \end{vmatrix} \right)$$

$$\omega_1 = -k_1 X_{c1} - l_1 Y_{c1} - m_1 Z_{c1}$$

$$d_2 = (L_2, M_2, N_2) = \left( \begin{vmatrix} b_2 & c_2 \\ l_1 & m_1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} c_2 & a_2 \\ m_1 & k_1 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} a_2 & b_1 \\ k_1 & l_1 \end{vmatrix} \right)$$

$$\omega_2 = -k_1 X_{c1} - l_1 Y_{c1} - m_1 Z_{c1}$$

根据(6)(7)可以计算三维空间直线对  $L_{1-1}$ 、 $L_{2-1}$  之间的夹角:

$$\alpha_{\pi 1} = \cos^{-1} \left( \frac{\text{dot}(d_1, d_2)}{\|d_1\| * \|d_2\|} \right), \quad (8)$$

同理,对于  $n_2, C_2$  也可计算得到  $L_{1-2}$ 、 $L_{2-2}$  之间的夹角:

$$\alpha_{\pi 2} = \cos^{-1} \left( \frac{\text{dot}(d_1, d_2)}{\|d_1\| * \|d_2\|} \right), \quad (9)$$

设空间中两直线间的真实夹角为  $\alpha_0$ , 则有:

$$\begin{cases} \|\alpha_{\pi 1} - \alpha_0\| = 0 \\ \|\alpha_{\pi 2} - \alpha_0\| \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知,若  $\alpha_0$  已知,则通过一幅图像则可判断出空间圆姿态的真实值;若  $\alpha_0$  未知,则需要摄像机从不同的角度拍摄第二幅图像,在欧氏空间中直线的角度保持不变:

$$\begin{cases} \alpha_{\pi 1-p1} = \alpha_{\pi 1-p2} = \alpha_0 \\ \alpha_{\pi 2-p1} \neq \alpha_{\pi 2-p2} \end{cases}, \quad (11)$$

其中,  $\alpha_{\pi 1-pi}$  ( $i=1, 2$ ) 代表的是两次成像后解算的空间直线参数。因此,由(11)可确定圆平面的真实姿态参数。

综上,通过与圆共面的直线约束,利用欧氏空间中的角度不变性可消除基于单圆的位姿解算中存在的二义性问题。

### 3 单圆姿态测量误差分析

如图 2 定义空间圆所在平面的姿态角。设  $n$  为三维空间中圆所在平面的法向矢量,在坐标系  $\sigma\text{-}xyz$  下,  $n$  对应的姿态角为俯仰角  $\phi$  和方位角  $\theta$ 。俯仰角  $\theta$  定义为法向量  $n$  与  $xoy$  平面的夹角,取值范围为  $[-\pi/2, \pi/2]$ ,方位角  $\theta$  定义为  $n$  在  $xoy$  上的投影  $n_p$  与  $x$  轴正向的夹角,取值范围为  $[0, 2\pi]$ 。

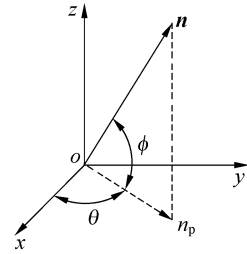


图 2 姿态角定义

Fig. 2 Definition of pose angle

空间圆在图像平面上的投影为椭圆,可由由椭圆圆心坐标  $x_{ec}, y_{ec}$ , 椭圆度  $A$  (椭圆长短轴之比), 以及椭圆短轴与坐标系  $X$  轴正向的夹角  $\gamma$  来表示。

由 2.1 可知,空间圆所在平面的姿态角参数 ( $\phi, \theta$ ) 可由已标定的摄像机图像平面上的投影椭圆直接求取,其函数表达式为:

$$y(\phi, \theta) = f(x_1, x_2, x_3, x_4), \quad (12)$$

其中,  $y(\phi, \theta)$  表示圆平面的姿态角,  $x_1, x_2, x_3, x_4$  分别代表摄像机图像平面上椭圆的圆心坐标  $x_{ec}, y_{ec}$ , 椭圆度  $A$  (椭圆长短轴之比), 以及椭圆短轴与摄像机图像坐标系  $x_i$  轴正向的夹角  $\gamma$ 。

假定  $x_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 独立的受高斯噪声影响,且噪声的均值向量为  $\tilde{\mu}$ , 方差向量为  $\tilde{\sigma}^2$ :

$$\begin{cases} \tilde{\mu} = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ \tilde{\sigma}^2 = [\sigma_{x_1 x_1}^2 \ \sigma_{x_2 x_2}^2 \ \sigma_{x_3 x_3}^2 \ \sigma_{x_4 x_4}^2]^T \end{cases}, \quad (13)$$

根据误差传播定律:

$$\tilde{C} = \tilde{J} \tilde{\Lambda} \tilde{J}^T, \quad (14)$$

其中,  $\tilde{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial x_1} & \frac{\partial \phi}{\partial x_2} & \frac{\partial \phi}{\partial x_3} & \frac{\partial \phi}{\partial x_4} \\ \frac{\partial \theta}{\partial x_1} & \frac{\partial \theta}{\partial x_2} & \frac{\partial \theta}{\partial x_3} & \frac{\partial \theta}{\partial x_4} \end{bmatrix}$ , 称为 Jacobi-

an 矩阵,  $\tilde{C}$  为平面的姿态参数 ( $\phi, \theta$ ) 的协方差矩阵,  $\tilde{\Lambda}$  为椭圆参数 ( $x_{ec}, y_{ec}, A, \gamma$ ) 的噪声的协方差矩阵。Jacobian 矩阵中的各偏微分项可由式(12)的差分方程来近似求取<sup>[7]</sup>。取(14)中主对角元素上的值,可得:

$$\begin{cases} \sigma_{\phi}^2 = \sum_{i=1}^4 M_{x_i}^{\phi} \sigma_{x_i}^2 = \sigma^2 M^{\phi} \\ \sigma_{\theta}^2 = \sum_{i=1}^4 M_{x_i}^{\theta} \sigma_{x_i}^2 = \sigma^2 M^{\theta} \end{cases}, \quad (15)$$

其中  $M_{x_i}^{\phi}, M_{x_i}^{\theta}$  为相对于姿态参数  $\phi, \theta$  的图像椭圆参数的噪声放大倍数,其绝对值越大,说明由图像椭圆参数  $x_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 的噪声引起的姿态

参数的噪声越大。

图 3、图 4 分别给出了当圆平面处于的不同姿态角时,  $M_{x_i}^{\phi}$ 、 $M_{y_i}^{\phi}$  的变化趋势。图中,  $x$  轴为俯仰角, 变化范围为  $[0, \pi/2]$ ,  $y$  轴为方位角, 变化范围为  $[0, 2\pi]$ ,  $z$  轴为误差放大倍数。

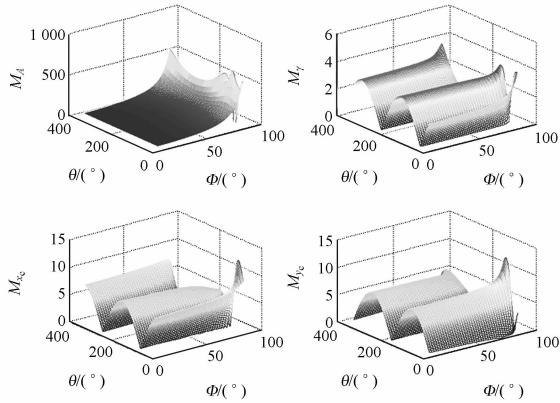


图 3 相对于俯仰角, 图像椭圆参数的误差放大倍数  
Fig. 3 Amplification of ellipse parameter noise with respect to pitch angle

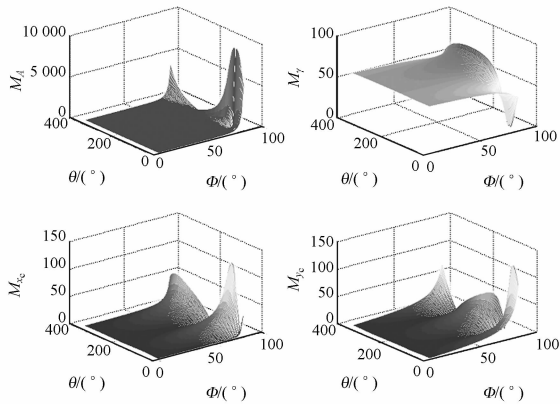


图 4 相对于方位角, 图像椭圆参数的误差放大倍数  
Fig. 4 Amplification of ellipse parameter noise with respect to azimuth angle

由图 3、图 4 可知随着  $\phi$ 、 $\theta$  的变化,  $M_A^{\phi}$  的变化范围远远大于  $M_y^{\phi}$ 、 $M_x^{\phi}$ 、 $M_z^{\phi}$ , 因此图像椭圆的椭圆度的误差会对计算结果产生最大的影响, 是影响姿态计算精度的主要因素。俯仰角  $\phi$  越接近  $90^\circ$ ,  $M_A^{\phi}$  的变化幅度越大; 当俯仰角较小时, 偏航角  $\theta$  的变化对姿态计算结果没有作用, 当俯仰角较大且接近于  $90^\circ$  时, 偏航角的误差才会对姿态计算精度产生影响。综上:

(1) 空间圆平面的姿态角计算精度主要由图像投影椭圆的椭圆度  $A$  影响, 投影椭圆其它参数

对于姿态角的影响较小;

(2) 圆平面的俯仰角较小时, 投影椭圆各参数的误差放大倍数均较小, 此时的姿态角计算精度较高, 说明算法在此时的稳定性高; 随着俯仰角的增大, 计算误差增大, 算法的稳定性降低。

## 4 实验结果和误差分析

### 4.1 仿真实验结果

通过仿真实验, 确定在有噪声的情况下, 基于单个圆进行姿态计算的精度。数字摄像机的焦距为  $8 \text{ mm}$ , CCD 成像大小为  $768 \times 576$ , 圆半径为  $50 \text{ mm}$ , 实验中为投影椭圆的边缘点加入均方差为的高斯白噪声, 每一组实验均重复 200 此以消除噪声随机性对结果的影响。

实验结果为计算值与真实值的 RMS 误差, 定义为:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{pose\_cal} - \text{pose\_set})^2}{n}}$$

其中:  $\text{pose\_cal}$  代表由投影曲线计算得到的姿态参数,  $\text{pose\_set}$  是设定的姿态参数。

图 5、图 6 显示了圆平面处于不同姿态时, 计算结果的绝对误差, 图中,  $x$  轴为俯仰角, 变化范围为  $[0, \pi/2]$ ,  $y$  轴为方位角, 变化范围为  $[0, 2\pi]$ ,  $z$  轴为姿态计算的绝对值。由图可见, 当圆平面的俯仰角接近  $90^\circ$  时, 姿态角的误差快速增加, 在俯仰角较小时 (小于  $60^\circ$ ), 姿态角的精度保持在  $0.2^\circ$  以内, 圆平面方位角变化对结果影响不大; 数字仿真结果与第 3 节中的误差分析结论保持一致。数字仿真实验的结果仅给出了圆平面的姿态对于计算精度的影响趋势, 而非求取摄像机

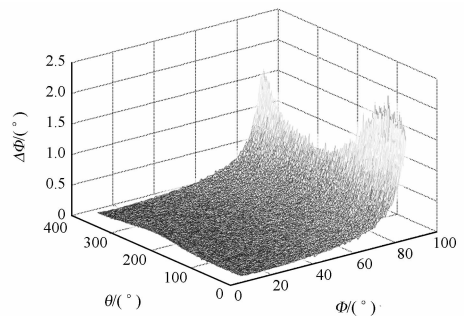


图 5 姿态角变化时, 俯仰角的绝对误差  
Fig. 5 Absolute error of calculated pitch angle with varying pose angles

的最优视角。图 7 表示,当圆平面姿态固定时(俯仰角,方位角均为  $45^\circ$ ),圆心与光心距离变化时,姿态角的绝对误差,随着距离的增加,误差增大,这是由于成像椭圆的大小减小,噪声大小相等的情况下对椭圆度参数影响增强,从而降低了姿态角的计算精度。

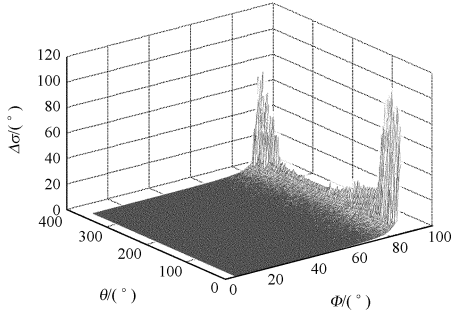


图 6 姿态角变化时,方位角的绝对误差

Fig. 6 Absolute error of calculated azimuth angle with varying pose angles

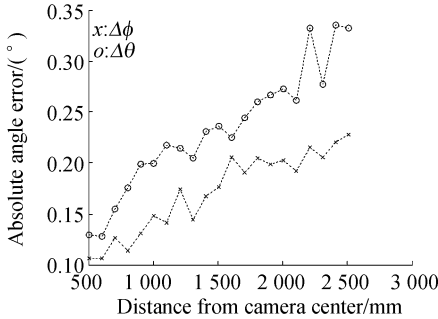


图 7 圆心距离变化时,姿态角的绝对误差

Fig. 7 Absolute error of calculated pose angle with varying distance

### 4.2 真实图像实验

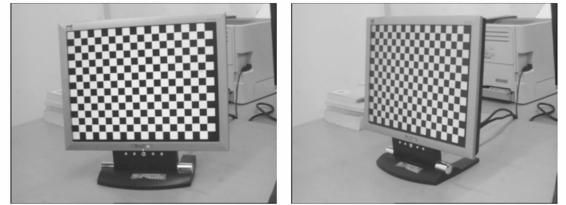
实验所用的传感器由 Mintron 468p 工业 CCD 和 8 mm 镜头组成,图像分辨率为  $768 \times 576$ 。传感器可事先标定<sup>[8]</sup>,标定得到摄像机的内部参数矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1\ 314.567 & 0 & 390.089 \\ 0 & 1\ 312.145 & 340.628 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

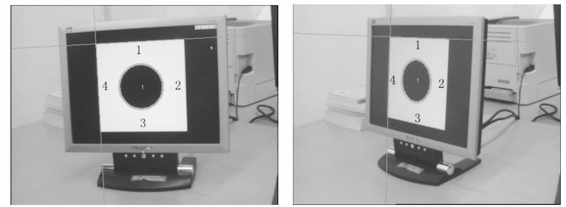
镜头畸变系数:  $k_c = [-0.244, 0.366]$

如图 8 所示,图像边缘点由 Canny 算子<sup>[9]</sup>检测获得,并利用插值法求得其亚像素坐标,图像椭圆和直线特征可由类似于文献[10]的方法从背景中分割开来,并通过最小二乘法获得其特征参数。

图 8 中,(a)、(c)两幅图像对应于相同的位置姿态参数,(b)、(d)两幅图像的位置姿态参数相同。利用(c)、(d)两幅图像中的单圆和共面直线可确定圆平面的姿态和圆心的坐标,结果见表 1。由表 1 可知,两幅图像中  $\alpha_1 \neq \alpha_3, \alpha_2 = \alpha_4$ ,因此可判定真实的空间圆位姿参数在两幅图中为  $\alpha_2, \alpha_4$  对应的位姿参数,即  $(n_2, t_2)$  和  $(n_4, t_4)$ 。利用(a)、(c)两幅图像中的棋盘角点,同样可以计算出计算机屏幕的姿态和位置,以此作为基准值,将单圆位姿计算结果与之进行比较,姿态角误差在  $0.2^\circ$  以内,圆心定位相对误差为  $0.5\%$ 。



(a)位置 1 角点特征 (b)位置 2 角点特征  
(a)Chessboard feature (b)Chessboard feature  
at pose 1 at pose 2



(c)位置 1 圆特征 (d)位置 2 圆特征  
(c)Circle feature at pose 1 (d)Circle feature at pose 2

图 8 真实图像示意图

Fig. 8 Real images

表 1 单圆位姿计算结果

Tab. 1 Pose results from single circle

编号	位姿参数计算结果	空间直线对夹角
位置 1	$n_1 = (-0.256, -0.028, 0.966)$	$\alpha_1 = 92.288^\circ$ $\alpha_2 = 89.875^\circ$ $\alpha_3 = 82.972^\circ$ $\alpha_4 = 90.102^\circ$
	$t_1 = (-27.611, -241.469, 3\ 056.813)$	
	$n_2 = (0.238, -0.124, 0.963)$	
	$t_2 = (-31.124, -240.785, 3056.833)$	
位置 2	$n_3 = (-0.755, -0.029, 0.655)$	$\alpha_1 = 92.288^\circ$ $\alpha_2 = 89.875^\circ$ $\alpha_3 = 82.972^\circ$ $\alpha_4 = 90.102^\circ$
	$t_3 = (-77.974, -284.994)$	
	$n_4 = (0.721, -0.090, 0.687)$	
	$t_4 = (-84.907, -284.711, 3\ 213.912)$	

表 2 标定结果与测量结果

Tab. 2 Poses from calibration and measurement

	标定结果			测量结果		
	法向量	姿态角	平移向量	法向量	姿态角	平移向量
位置 1	$\begin{pmatrix} 0.236 \\ -0.127 \\ 0.963 \end{pmatrix}$	$\phi=74.365^\circ$ $\theta=331.71^\circ$	$\begin{pmatrix} -35.380 \\ -243.917 \\ 3\ 039.560 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.238 \\ -0.124 \\ 0.963 \end{pmatrix}$	$\phi=74.365^\circ$ $\theta=332.48^\circ$	$\begin{pmatrix} -31.124 \\ -249.785 \\ 3\ 056.833 \end{pmatrix}$
位置 2	$\begin{pmatrix} 0.719 \\ -0.091 \\ 0.689 \end{pmatrix}$	$\phi=43.551^\circ$ $\theta=352.79^\circ$	$\begin{pmatrix} -89.118 \\ -287.685 \\ 3\ 196.578 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.721 \\ -0.09 \\ 0.687 \end{pmatrix}$	$\phi=43.393^\circ$ $\theta=352.88^\circ$	$\begin{pmatrix} -84.907 \\ -284.711 \\ 3\ 231.912 \end{pmatrix}$

表 3 空间直线距离

Tab. 3 Distances of reconstructed lines

直线对编号	位置 1			位置 2		
	测量值/pixel	绝对误差/pixel	相对误差	测量值/pixel	绝对误差/pixel	相对误差
1、2	604.98	4.98	0.83%	604.82	4.82	0.80%
2、3	603.72	3.72	0.62%	603.41	3.41	0.56%
3、4	603.99	3.99	0.66%	605.09	5.09	0.85%
4、5	604.55	4.55	0.76%	604.5	4.5	0.75%

根据测量结果所获得的圆平面的法向量和圆心的坐标值,求得图像上的白色方块的 4 个边长,并与真实值进行比较。真实的白色方块边长为 600 pixel。分别求得位置 1、2 处对应空间直线之间的距离。由表 3 可得,恢复的空间直线长度具有较好的精度,也证实了二义性消除方法切实可行。

另外,姿态角误差主要源于如下两个方面:(1) 摄像机内部参数的标定误差;(2) 图像平面上椭圆参数的拟合误差。本文的实验中采用的标定靶标是由计算机生成的数字图像,采用这种方式的优点在于:(1) 可以灵活的生成各种标定特征,如棋盘点,光条,圆孔等,也可自由的生成用于算法验证的各种测量图案,如文中的圆,方块等;(2) 避免了加工高精度靶标的成本开销。主要缺点是显示器的像素尺寸加工精度不高,显示器的分辨率有限,因此在显示器上生成的图像特征的精度要低于通过机械加工的靶标的精度。但是通过使用这种柔性靶标的方法可以方便快捷的进行算法的有效性验证。因此若对测量精度有较高要求时,推荐采用高精度的靶标,以提高测量的精度。

## 5 结 论

本文提出了一种在已知摄像机内部参数的情况下,仅利用场景中一个圆和共面的直线对,基于欧氏空间中的角度不变量,唯一确定空间圆所在平面的姿态和位置参数,且对与圆平面上的共面直线对没有任何约束的方法。交于传统的基于点对应和直线对应进行姿态定位的方法,基于圆进行位姿定位在识别,特征匹配,抗遮挡等方面具有明显的优势,不仅需要的特征数量较少,且不需要复杂的数学计算。但是,位姿计算结果对于图像椭圆和直线的拟合精度有较高要求,因此提高图像特征点的提取精度并采用鲁棒性好,精度高的拟合算法对于本算法具有重要的意义。实验结果表明:二义性消除算法能够准确地确定真实的姿态参数,姿态角绝对误差在  $0.2^\circ$  以内,圆心定位误差为  $0.5\%$ ,重构的空间直线距离误差为  $0.8\%$ 。实验结果有效地证实了算法的准确性,表明了算法具有良好的稳定性和精度。

## 参考文献:

- [1] 张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社,2005.  
ZHANG G J. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [2] HORACE H S, CHEN Y S. Planar rectification by solving the intersection of two circles under 2D homography [J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(7): 1117-1120.
- [3] WANG G H, WU J, JI Z Q. Pose estimation from circle or parallel lines in a single image[C]. *ACCV 2007 - 8th Asian Conference on Computer Vision*, 2007:363-372.
- [4] WU Y H, LI X J, WU F C, et al.. Coplanar circles, quasi-affine invariance and calibration [J]. *Image and Vision Computing*, 2006, 24(4): 319-326.
- [5] SAFAEE-RAD R, TCHOUKANOV I. Three-dimensional location estimation of circular features for machine vision [J]. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 1992, 8(5):624-640.
- [6] ZHENG Y Q, MA W J, LIU Y C. Another way of looking at monocular circle pose estimation [C]. *15th IEEE International Conference on Image Processing*, 2008:861-864.
- [7] CLAUS B M. A comparative study of the robustness of two pose estimation techniques [J]. *Machine Vision and Applications, Special Issue on Performance Characterization*, 1997, 5/6(9):291-303.
- [8] 周富强, 郝继贵, 杨学友, 等. CCD 摄像机快速标定技术[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(1):96-100.  
ZHOU F Q, ZHU J G, YANG X Y, et al... A high speed CCD camera calibration technique [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(1):96-100. (in Chinese)
- [9] CANNY J F. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, 8(6):679-698.
- [10] 林玉池, 崔彦平, 黄银国. 复杂背景下边缘提取与目标识别方法研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3):509-514.  
LIN Y CH, CUI Y P, HUANG Y G. Study on edge detection and target recognition in complex background [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):509-514. (in Chinese)

## 作者简介:



魏振忠(1972—),男,山东青岛人,副教授,博士,1997年于北京石油化工学院获得学士学位,1999年、2003年于北京航空航天大学分别获得硕士、博士学位,现为精密光机电一体化技术教育部重点实验室副主任,主要研究方向为机器视觉、光电测试等。E-mail: zhenzhongwei@buaa.edu.cn.



张广军(1965—),男,天津人,教授,博士生导师,1986年、1989年、1991年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为北京航空航天大学副校长,精密光机电一体化技术教育部重点实验室主任,主要研究方向为机器视觉、光电精密测量等。E-mail: gjzhang@buaa.edu.cn



赵征(1981—),男,重庆人,博士研究生,2004年于北京航空航天大学获得学士学位,主要研究方向为计算机视觉,图像处理等。E-mail: zhaozheng\_buaa@163.com