

# 单圆位姿识别二义性的矩形约束消除

陈至坤, 胡连军\*, 王 一, 王 荃

华北理工大学电气工程学院, 河北 唐山 063210

**摘要** 为了解决单目视觉中单圆位姿测量方法存在虚假解的问题,提出了矩形约束消除位姿二义性的方法。在相机已标定的情况下,采集目标上圆与矩形的图像,要求圆与矩形共面或者两个平面相互平行。首先通过相关数学推导可获得圆特征的圆心位置和过圆心法向量,但是圆心位置和过圆心法向量均存在二义性虚假解;其次由先验条件未知的矩形所确定的平面法向量与过圆心的真实法向量平行作为约束条件,可有效消除虚假解;最后由相关算法可计算出真实法向量所包含的物体姿态参数,同时可确定物体的真实位置。经实验验证,物体姿态测量的绝对误差小于 $0.5^\circ$ ,表明该方法简单易行,可有效消除单圆位姿测量虚假解。

**关键词** 机器视觉; 二义性; 矩形约束; 位姿求解; 圆

**中图分类号** TP242.6 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.101501

## Solution of Duality in Pose Estimation of a Single Circle Using Rectangle Constrain

Chen Zhikun, Hu Lianjun, Wang Yi, Wang Quan

College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China

**Abstract** In order to solve the false pose of a single circle feature in the monocular vision measurement, a method for eliminating the pose duality of a single circle based on rectangle constrain is proposed. When the camera is calibrated in advance, the images of the circle and rectangle of the target are acquired, and the planes of circle and rectangle are required to be coplanar or parallel to each other. Firstly, the center position of the circle feature and the normal vector of the circle plane can be obtained by the mathematical derivation which has a false solution. Secondly, based on the constrain condition that the real normal vectors between the circle plane and the normal vector of the rectangle plane whose priory condition is unknown are parallel to each other, the false solution can be effectively eliminated. Finally, the real pose parameters of the object can be calculated by the related algorithm, so the real position of the object is acquired. The experimental results show that the absolute error of the object attitude measurement is less than  $0.5^\circ$ , which shows that the proposed method is simple and easy to implement and can eliminate the false pose effectively.

**Key words** machine vision; duality; rectangle constrain; pose estimation; circle

**OCIS codes** 150.0155; 120.1880; 110.5200

## 1 引言

工业生产中,对零部件的定位和装配、太空中飞船的交会对接及目标物的视觉跟踪等都与视觉位姿测量密切相关<sup>[1]</sup>。现有的位姿测量方法大多需要在目标上专门安装位姿测量所需的合作特征,比如点特征、线特征、二次曲线特征<sup>[2]</sup>。依据目标上的点特征在世界坐标系中的表达与点特征在成像平面上的坐标关系求得世界坐标系与相机坐标系之间的刚性关系,即多点透视(PNP)问题<sup>[3-5]</sup>,相较于点特征而言,线特征具有更强

**收稿日期:** 2017-04-25; **收到修改稿日期:** 2017-05-24

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(51505125)

**作者简介:** 陈至坤(1961—),男,博士,教授,主要从事机器视觉技术及应用、荧光光谱检测等方面的研究。

E-mail: zkchen@ncst.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: hulianjun0910@163.com

的抗遮挡能力且操作简单,但线特征不是普遍存在于目标物上的,因而无法广泛使用。为此基于非合作目标的位姿测量成为众多学者研究的内容,但是需要人为地提取目标上的有用特征以确定物体的位姿,因此非合作目标位姿的测量难度较大<sup>[6]</sup>。

圆广泛存在于自然界和人造物体上,如航天飞行器上的圆形对接部件、水道管口等,因此为具有圆形特征的物体位姿测量赋予了现实意义<sup>[7]</sup>。相较于点、线、曲线特征而言,圆特征具有抗干扰能力强、容易识别等特点,因此在视觉位姿计算领域得到了广泛应用<sup>[8]</sup>。但是圆形特征的位姿闭式解具有二义性,如何消除虚假解而获得真实解变得尤为重要。Safaei-Rad等<sup>[9]</sup>提出目标物上存在多个圆时,以法向量平行为限制条件可以有效消除二义性,需要场景中至少存在两个圆环;苗锡奎等<sup>[10]</sup>在圆外设置一参考点,以参考点到圆心的欧氏距离不变性这一原理消除二义性;张磊等<sup>[11]</sup>通过引入激光测距仪,以光点坐标在圆形目标上为约束可以消除圆位姿二义性,却增加了额外成本;魏振忠等<sup>[12]</sup>提出以圆所在平面内直线对的夹角作为约束可以唯一确定圆形位姿,当夹角未知时需要相机在不同姿态下进行图像采集。上述方法大多条件严苛,一旦场景信息不足便不能适用。

基于此,本文提出了在最少的约束条件下对具有圆特征的物体位姿的二义性进行消除的方法。首先根据圆特征在相机成像平面上的投影椭圆解算出圆心位置与过圆法向量,然后求解出约束矩形所在平面的法向量,以圆特征真实法向量与矩形所在平面法向量平行为约束条件可有效消除圆特征的虚假位姿。

## 2 圆特征的位姿估计方法

### 2.1 圆形位姿表示

不失一般性,所有假设都建立在相机已标定好的基础上。圆形特征位姿测量需要求解出世界坐标系中圆心坐标和过圆平面的法向量。空间圆绕其所在平面的过圆心法向量旋转具有对称性,因此法向量一经确定,无论绕其旋转多大角度只能求出圆形姿态的两个自由度,即俯仰角与偏转角。如图1所示,设坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 下 $n=(n_x, n_y, n_z)$ 为圆形特征所在平面的法向量。偏转角 $\alpha$ 定义为法向量在 $X_cO_cZ_c$ 上的投影线与 $X$ 轴正方向的夹角,取值范围为 $[0, 2\pi]$ ;俯仰角 $\beta$ 定义为法向量与 $X_cO_cZ_c$ 平面的夹角,取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。如果圆形特征所在平面的法向量 $n=(n_x, n_y, n_z)$ 为已知,依据现有的三角数学推算可解出偏转角 $\alpha$ 和俯仰角 $\beta$ 分别为

$$\alpha = \arctan \frac{n_y}{n_x}, \quad (1)$$

$$\beta = \arctan \frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}. \quad (2)$$

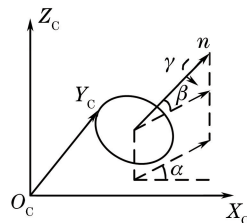


图1 空间圆位姿定义

Fig. 1 Definition of the space circle pose

### 2.2 圆形位姿估计

空间圆形特征在相机成像平面上的投影为椭圆,假设圆特征半径为 $R$ 。由文献[5]可知相机光心与椭圆投影可唯一确定一个圆锥,当一个平面与此圆锥的截面形成半径为 $R$ 的圆时,此截面圆心坐标即为空间圆形特征的位置,而截面圆环的法向量包含了空间圆形特征的姿态信息。

但是单目相机下单圆特征位姿测量的解不唯一,如图2所示。其中 $E$ 为空间圆特征在成像平面上的椭圆投影, $C_1$ 与 $C_2$ 为椭圆投影所对应的两个空间圆形特征,在没有约束条件的情况下无法确定 $E$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 的对应关系。由文献[9]可求得空间圆特征的圆心坐标与过圆法向量分别为

$$[x'_0 \quad y'_0 \quad z'_0] = \begin{bmatrix} \pm R \sqrt{\frac{|\lambda_3| (|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{|\lambda_1| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} & 0 & R \sqrt{\frac{|\lambda_1| (|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{|\lambda_3| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$[n'_x \quad n'_y \quad n'_z] = \begin{bmatrix} \pm \sqrt{\frac{(|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} & 0 & -\sqrt{\frac{(|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $[x'_0 \quad y'_0 \quad z'_0]$ 、 $[n'_x \quad n'_y \quad n'_z]$  分别为空间圆特征的圆心坐标与过圆法向量在标准坐标系下的表示,  $R$  为圆的半径,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  为标准坐标系下圆锥的系数。

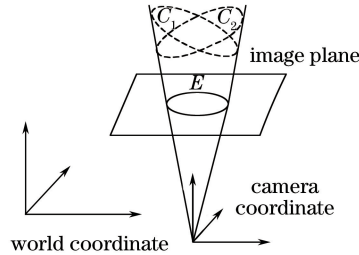


图2 单圆位姿测量示意图

Fig. 2 Schematic of single circle pose measurement

### 3 矩形约束下圆特征位姿二义性消除

#### 3.1 矩形约束平面的法向量求解

为了消除圆特征位姿测量的二义性,可以引入矩形约束。为了在最少约束条件下达到消除虚假解的目的,本文方法不需要事先获知矩形在世界坐标系下的坐标和几何尺寸,仅要求矩形所在平面与圆特征所在平面共面或者矩形所在平面与圆特征所在平面相互平行即可。

如图3所示,  $L_i$  为矩形在世界坐标系下的四条边,  $i = 1, 2, 3, 4$ 。假设相机坐标系下矩形平面的法向量为  $\mathbf{N}$ ,  $L_i$  在相机坐标系下的方向向量为  $\mathbf{V}_{ci} = (A_{ci}, B_{ci}, C_{ci})$ , 只要推导出任意相邻两个方向向量  $\mathbf{V}_{ci}$  即可通过向量的叉乘求得矩形平面在相机坐标系下的法向量  $\mathbf{N}$ 。

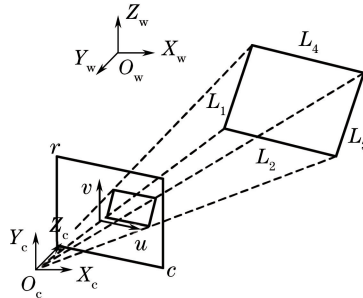


图3 矩形所在平面法向量求解

Fig. 3 Solution of normal vector in the plane of the rectangle

设  $L_i$  在相机成像平面上的投影为  $l_i$ , 其投影方程可以通过图像处理的相关知识求得:  $a_i x + b_i y + c_i = 0$ , 因此  $l_i$  上的任意一点可以写成  $(x_i, y_i, f)$ , 那么相机光心  $O_c$  与  $l_i$  上任意一点连线的方向向量可写成  $\mathbf{n}_i = (x_i, y_i, f)$ 。此外, 由数学知识可知  $\mathbf{v}_i = (-b_i, a_i, 0)$  为投影直线在相机成像平面上的方向向量, 由于相机成像平面与相机坐标系的  $XOY$  平面平行, 因此  $\mathbf{v}_i = (-b_i, a_i, 0)$  也可表示投影直线在相机坐标系下的方向向量。

由透视投影的相关知识可定义投影平面  $S_i$  为  $L_i, l_i$ 、相机光心  $O_c$  所确定的平面。设投影平面的法向量为  $\mathbf{N}_i$ , 可由向量的叉乘求得

$$\mathbf{N}_i = \mathbf{n}_i \times \mathbf{v}_i. \quad (5)$$

由透视投影的不变性可知, 矩形在世界坐标系下的对边平行、临边垂直的性质在相机坐标系下同样成立。法向量  $\mathbf{N}_1$  垂直于投影平面  $S_1$ , 因此  $\mathbf{N}_1$  垂直于边  $L_1$ ; 同理法向量  $\mathbf{N}_3$  垂直于边  $L_3$ 。已知边  $L_1$  平行于  $L_3$ , 因此  $\mathbf{N}_3$  垂直于边  $L_1$ 。因此边  $L_1$  在相机坐标系下的方向向量  $\mathbf{V}_{c1}$  可表示为

$$\mathbf{V}_{c1} = \mathbf{N}_1 \times \mathbf{N}_3. \quad (6)$$

已知  $L_2$  垂直于  $L_1$  且由上述推导同理可知  $\mathbf{N}_2$  垂直于  $L_2$ , 因此边  $L_2$  在相机坐标系下的方向向量  $\mathbf{V}_{c2}$  可表示为

$$\mathbf{V}_{c2} = \mathbf{N}_2 \times \mathbf{L}_1, \quad (7)$$

式中  $\mathbf{L}_1$  表示边  $L_1$  在相机坐标系下的方向向量  $\mathbf{V}_{c1}$ 。

因此矩形平面在相机坐标系下的法向量  $\mathbf{N}$  可由(6)式、(7)式求得

$$\mathbf{N} = \mathbf{V}_{c1} \times \mathbf{V}_{c2}. \quad (8)$$

### 3.2 矩形约束下二义性消除方法

根据单圆特征在相机平面下的椭圆投影可解算出空间圆特征位置与姿态的二组解, 其中每组解中位置与姿态相对应, 因此通过消除虚假姿态的方式可得到圆特征物体的真实位姿解。

假设(4)式对应的圆特征平面在相机坐标系下的法向量为  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ 。因为矩形所在平面与圆特征所在平面共面或者矩形所在平面与圆特征所在平面相互平行, 所以在相机坐标系下圆特征所在平面的真实法向量与矩形约束所求平面法向量平行。设圆特征平面在相机坐标系下的真实法向量为  $\mathbf{n}_1$ , 则

$$\mathbf{n}_1 \approx k\mathbf{N}, \quad k \neq 0. \quad (9)$$

通过(9)式可有效消除圆特征位姿的虚假解, 把  $\mathbf{n}_1$  代入到(1)式、(2)式可解出圆特征的姿态参数。由上述推导可知, 在最少的约束条件下, 无需已知矩形在世界坐标系下的几何尺寸和坐标即能达到消除圆位姿虚假解的目的。

## 4 实验结果

为了验证本文方法的可行性, 搭建了圆形位姿虚假解消除实验平台, 如图 4 所示。该实验平台包括 halcon 生成的标定板、半径已知圆形目标物、与圆形共面的矩形、CCD 相机、卓立汉光高精度手动角位移台。相机的分辨率为  $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ , 由焦距为  $8 \text{ mm}$  的 Computar 镜头组成。实验前, 调整相机与拍摄物的高度, 要求圆形与矩形处在相机的视野内, 并对相机进行精确标定。



图 4 圆形位姿虚假解消除实验平台

Fig. 4 Experimental platform for eliminating false solution of circular pose

1) 把共面圆与矩形约束以一定的角度摆放在实验平台上, 并用相机对共面圆与矩形约束所在平面进行图像采集; 2) 对采集的图像进行平滑、降噪得到易于图像处理的照片, 如图 5(a) 所示; 3) 对预处理后的图像进行阈值分割选出圆形与矩形感兴趣区域, 如图 5(b) 所示; 4) 筛选出感兴趣区域中的圆形区域, 并进行椭圆拟合、用拟合的椭圆参数生成椭圆的亚像素轮廓, 如图 5(c) 所示, 然后通过亚像素轮廓求得圆形物体的圆心坐标与过圆法向量; 5) 对感兴趣区域通过特征选择筛选出矩形边缘, 如图 5(d) 所示。然后对矩形的四条边分别进行直线拟合获得直线参数; 6) 可求出矩形约束所在平面的法向量。实验结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 圆特征所确定的平面的真实法向量与矩形所确定的平面法向量之间存在近似平行的关系, 由此可以唯一确定圆特征所在平面的法向量。然后通过圆特征所在平面的真实法向量求解出物体的姿态角, 其中物体的姿态角测量值与真实值之间存在一定的误差, 绝对误差小于  $0.5^\circ$ 。

其中姿态角的测量误差的主要来源有以下几点: 1) 测量物体与相机之间的距离, 两者之间的距离过大会导致特征物体的成像太小, 从而导致特征提取时误差过大, 最后姿态测量的准确性会大大降低。因此需要

使测量物体与相机之间的距离适宜;2) 相机标定误差, 成像模型源自于对内参的标定, 而世界坐标系与相机坐标系之间的转换通过对相机的外参标定获得。而内外参数的标定不可能达到理想水平, 必将引入误差。标定误差可通过引入高性能的相机以降低误差对实验的影响;3) 矩形各个边与椭圆参数的拟合误差, 可通过优化拟合算法达到更高精度的参数拟合。

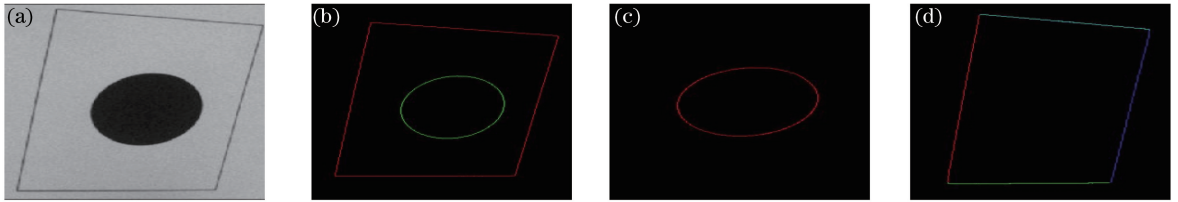


图 5 (a) 预处理后的图像; (b) 感兴趣区域; (c) 圆形感兴趣区域; (d) 矩形感兴趣区域

Fig. 5 (a) Preprocessed image; (b) region of interest; (c) circular region of interest; (d) rectangular region of interest

表 1 测量实验结果

Table 1 Experimental results of the measurement

Circular normal vector $n_1$	Circular normal vector $n_2$	Rectangular normal vector $N$	True attitude angle / ( $^{\circ}$ )	Measurement of attitude angle / ( $^{\circ}$ )	Error / ( $^{\circ}$ )
(-5.02, 0.96, 8.59)	(4.98, -0.36, 8.66)	(-1.78, 0.13, -3.10)	(4, 60, 0)	(4.13, 60.03, 0)	(0.13, 0.03, 0)
(-0.02, -0.50, 0.86)	(-0.06, 0.48, 0.87)	(-0.11, -2.66, 4.75)	(88, 60, 0)	(87.71, 59.81, 0)	(0.29, 0.19, 0)
(-0.41, 0.30, 0.86)	(0.41, -0.28, 0.86)	(1.61, -1.07, 3.41)	(34, 60, 0)	(34.33, 60.00, 0)	(0.33, 0.00, 0)

## 5 结 论

利用生活中普遍存在的圆特征进行目标物定位, 其解具有二义性。为消除虚假解引入矩形约束, 不需要事先已知矩形在世界坐标系下的坐标和几何尺寸, 仅要求矩形所在平面与圆特征所在平面共面或者矩形所在平面与圆特征所在平面相互平行即可。以圆形特征所在平面的真实法向量与矩形约束所求出的平面法向量相互平行作为约束条件可解得圆形特征位姿的唯一解。经实验验证, 本文方法简单易行, 物体姿态测量的绝对误差小于  $0.5^{\circ}$ , 满足工业生产要求。

## 参 考 文 献

- [1] Zhai Guang, Zhang Jingrui, Zhou Zhicheng. A review of on-orbit life-time extension technologies for GEO satellites[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(7): 849-859.  
翟光, 张景瑞, 周志成. 静止轨道卫星在轨延寿技术研究进展[J]. 宇航学报, 2012, 33(7): 849-859.
- [2] Qin Lijuan, Hu Yulan, Wei Yingzi, *et al.* Research on pose estimation for three-dimensional objects based on rectangle [J]. Computer Engineering & Science, 2009, 31(4): 49-51.  
秦丽娟, 胡玉兰, 魏英姿, 等. 基于矩形的三维物体位姿估计研究[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(4): 49-51.
- [3] Wolfe W J, Mathis D, Skliris C W, *et al.* The perspective view of three points [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(1): 66-73.
- [4] Zhao Lianjun, Liu Enhai, Zhang Wenming, *et al.* Analysis of position estimation precision by cooperative target with three feature points [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(5): 1190-1197.  
赵连军, 刘恩海, 张文明, 等. 单目三点位置测量精度分析[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1190-1197.
- [5] Chen Zhikun, Xu Ao, Wang Fubin, *et al.* Pose measurement of target based on monocular vision and circle structured light [J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(5): 680-685.  
陈至坤, 徐傲, 王福斌, 等. 基于单目视觉和圆结构光的目标姿态测量方法[J]. 应用光学, 2016, 37(5): 680-685.
- [6] Hao Gangtao, Du Xiaoping. Advances in optical measurement of position and pose for space non-cooperative target [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080028.  
郝刚涛, 杜小平. 空间非合作目标位姿光学测量研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080028.
- [7] Zhang Lijun, Huang Xuexiang, Feng Weichun, *et al.* Solution of duality in pose estimation of a single circle utilizing



- constraint angles motion reconstruction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0115002.
- 张李俊, 黄学祥, 冯渭春, 等. 运动重建约束角的圆位姿二义性消除方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(1): 0115002.
- [8] Zhang Lijun, Huang Xuexiang, Feng Weichun, *et al.* Solution of duality in circular feature with three line configuration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0515001.
- 张李俊, 黄学祥, 冯渭春, 等. 消除圆位姿二义性的三线构型法[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0515001.
- [9] Safaee-Rad R, Tchoukanov I, Smith K C, *et al.* Three-dimensional location estimation of circular features for machine vision[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, 8(5): 624-640.
- [10] Miao Xikui, Zhu Feng, Ding Qinghai, *et al.* Monocular vision pose measurement based on docking ring component[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412006.
- 苗锡奎, 朱枫, 丁庆海, 等. 基于星箭对接环部件的飞行器单目视觉位姿测量方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0412006.
- [11] Zhang Lei, Xu Kejun, Zhao Rui, *et al.* Improvement of position and orientation measurement algorithm of monocular vision based on circle features[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2009, 32(11): 1669-1673.
- 张磊, 徐科军, 赵锐, 等. 一种基于圆特征的单目视觉位姿测量算法的改进[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2009, 32(11): 1669-1673.
- [12] Wei Zhenzhong, Zhao Zheng, Zhang Guangjun. Solution of duality in pose estimation of single circle using Euclidean angular constraint[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 685-691.
- 魏振忠, 赵征, 张广军. 空间圆姿态识别二义性的角度约束消除[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 685-691.