

运动重建约束角的圆位姿二义性消除方法

张李俊 黄学祥 冯渭春 胡天健 梁书立

北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094

摘要 针对单个圆进行视觉测量存在的位姿二义性问题,提出了一种运动重建约束角的二义性消除方法。在相机已标定的前提下,利用圆的投影椭圆曲线确定圆的位姿参数,位姿存在二义性;利用多视图从运动恢复结构方法估计特征点的世界坐标,并利用特征点重建约束角;基于刚体运动不改变空间夹角的特性同时唯一确定多视图的圆位姿。仿真结果显示:在500 mm距离内,噪声强度为0.4 pixel时二义性消除成功率为100%,强度为1 pixel时成功率约为93%;噪声强度为0.1 pixel,距离在1000 mm时具有99.6%的成功率。此外,在二视图的情形下算法的平均运行时间约为5 ms,适合实时性的应用。该方法不需要目标的额外信息,能够实时有效地消除圆位姿的二义性。

关键词 机器视觉;圆;位姿估计;二义性;角度约束;从运动恢复结构

中图分类号 TP242.6

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0115002

Solution of Duality in Pose Estimation of a Single Circle Utilizing Constraint Angles Motion Reconstruction

Zhang Lijun Huang Xuexiang Feng Weichun Hu Tianjian Liang Shuli

Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

Abstract In order to cope with the pose duality problem in the visual measurement of a single circle, a disambiguating approach is proposed utilizing constraint angles motion reconstruction. On the premise of camera calibrated, the pose parameter of a circle is estimated from its projected ellipse curve but the pose has duality. The world coordinates of feature points are recovered by the method of multiple view structure from motion and constraint angles are reconstructed with feature points. Based on the nature that rigid body motion does not change space angles, the poses of multiple view are determined simultaneously. Experimental results indicate that within the range of 500 mm the circle radius, the success rate of eliminating false solution is up to 100% when the noise level is within 0.4 pixel and 93% when the noise level is 1 pixel. And the success rate is 99.6% when the noise level is 0.1 pixel and the range is 1000 mm the circle radius. Besides, the average run time of the proposed algorithm in two views is about 5 ms which suits real-time application. The proposed approach can effectively identify real poses of a single circle in real time without any additional information of target.

Key words machine vision; circle; pose estimation; ambiguity; angular constraint; structure from motion

OCIS codes 150.0155; 120.1880; 110.5200

1 引言

利用自然特征测量目标本体坐标系与相机坐标系间相对位姿关系,在增强现实^[1]、相机标定^[2]、视觉跟踪^[3]以及视觉测量^[4-5]等机器视觉领域中有广泛应用。圆是一类常见的自然特征,在自然景物和人造物体中大量存在,比如道路旁圆形的指示牌,用于相机标定的圆形靶标物,空间飞行器上的星箭对接环、推进器喷管管口等。相较于点线特征,基于圆的视觉位姿估计有很多的优势,如需要的特征数目少、具备一定的抗遮挡能力、特征识别容易等。

收稿日期: 2015-06-05; 收到修改稿日期: 2015-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(11402004)

作者简介: 张李俊(1991—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉和视觉测量方面的研究。E-mail: zljun@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 黄学祥(1970—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事空间操作方面的研究。E-mail: h_xxiang@163.com

基于分析几何的单个圆位姿闭式解^[6-7]具有二义性,其中一个为真实解,另一个为虚假解,从位姿中找出真实解对于实际的应用非常重要。为了消除解的二义性,文献[8]提出当目标为圆柱体时,利用圆柱体的两条母线可以消除圆的二义性;文献[9]指出,若圆的半径已知并能在像平面识别圆心的投影点,则圆的位姿可以唯一确定;文献[6]提出对于同时存在多个圆且法向量相同的情形,可以将法向量平行作为约束来消除二义性;文献[10]提出当圆平面上存在直线对时,可以利用直线对的角度约束消除二义性;文献[11]利用圆平面上圆外侧参考点到圆心距离的欧式不变性作为约束消除位姿的二义性。以上方法或是要求目标存在特殊的结构,或是需要目标额外的可识别的特征,当场景不满足要求时,方法将不再适用。文献[12]利用激光测距仪的距离信息消除解的二义性,该方法不需要目标具备特殊的结构或额外的特征信息,但需要其他测量设备辅助,增加了额外的成本。

针对圆位姿二义性问题,本文讨论了一种在无先验信息条件下,利用刚体运动不改变空间夹角的角度约束来消除单个圆位姿二义性问题的方法。利用两次成像得到的圆投影椭圆计算出各自相机系下圆位姿解和对应的圆法向量,利用每次成像提取共同的目标特征点,基于从运动恢复结构的方法解算特征点的世界坐标和两次成像相机的外参数。再从特征点中选择一组特征点对,利用点对的世界坐标和两次成像相机的外参数分别计算特征点对两个相机系中的相机系坐标,得到特征点对连线的方向向量。计算每次成像圆法向量与特征点对连线方向向量的夹角,基于刚体运动不改变空间夹角的角度约束,唯一确定每次成像圆的位姿。

2 基于空间圆投影的位姿估计方法

2.1 空间圆的位姿表示

不失一般性,所有的讨论均假设相机已完成标定,并在成像过程中内参数保持不变。

基于圆的位姿参数有圆心的三维坐标和圆平面的法向量。单个圆具有旋转不变性,只能确定圆的两个姿态角,分别是俯仰角和偏航角。如图1所示,设 \mathbf{n} 为三维空间中圆平面的法向量,在坐标系 $O-XYZ$ 下, \mathbf{n} 对应的姿态角分别为俯仰角 ϕ 和偏航角 θ 。俯仰角 ϕ 定义为法向量 \mathbf{n} 与 XOY 平面的夹角,偏航角 θ 定义为法向量 \mathbf{n} 在 XOY 平面上的投影向量 \mathbf{n}_p 与 OX 轴正向的夹角。当已知圆平面法向量 $\mathbf{n}=(n_x, n_y, n_z)$, 则俯仰角 ϕ 和偏航角 θ 分别为

$$\begin{cases} \phi = \arctan \frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}} \\ \theta = \arctan \frac{n_y}{n_x} \end{cases} \quad (1)$$

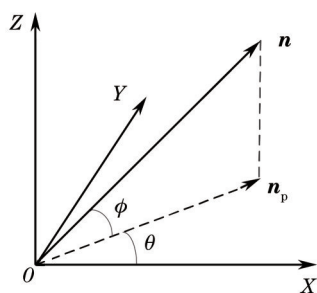


图1 圆姿态参数定义

Fig.1 Definition of circle pose parameters

2.2 坐标系定义与成像模型

图2坐标系关系中, $O_c-X_cY_cZ_c$ 为相机坐标系, $O-UV$ 为图像像素坐标系, $o-xy$ 为归一化焦距平面坐标系。

相机成像采用常见的针孔成像模型,相机坐标系下的三维点 $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ 与像点的图像像素坐标 $p(u, v)$ 之间的关系采用齐次坐标表示为

$$Z_c p = K P_c, \quad (2)$$

式中 K 为相机的内参数矩阵,它描述了相机坐标系与图像像素坐标系之间的映射关系。为了计算的需要,

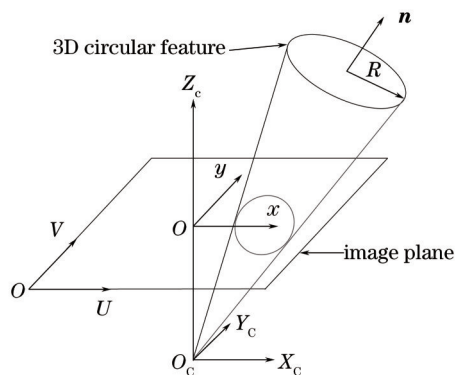


图 2 坐标系定义

Fig.2 Definition of coordinate systems

有时需要将图像的像素坐标转换到归一化焦距平面上,即将焦距 f 等价于1。设 (x_i, y_i) 为像点在归一化焦距平面坐标系下的坐标,其与在相机坐标系下的三维坐标的关系为

$$\begin{cases} x_i = \frac{X_i}{Z_i} \\ y_i = \frac{Y_i}{Z_i} \end{cases} \quad (3)$$

2.3 空间圆的位姿估计方法

图2为空间圆透视投影形成椭圆的过程,在归一化焦距平面坐标系下,椭圆上点满足方程:

$$ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f = 0 \quad (4)$$

利用(3)式关系替换椭圆方程中 x, y ,整理得到空间圆锥方程:

$$aX^2 + bY^2 + cXY + dXZ + eYZ + fZ^2 = 0 \quad (5)$$

该圆锥方程可以用二次型表示:

$$[X \ Y \ Z]Q[X \ Y \ Z]^T = 0 \quad (6)$$

由圆锥的一般性方程不便于解算圆的位置和姿态,可以先变换为规范圆锥体,解算后再将圆的位姿变换回相机坐标系。由文献[7]可知,对称矩阵必然存在正交矩阵将其对角化,即对于对称矩阵 Q ,存在正交矩阵 P ,使得:

$$\Lambda = P^{-1}QP = P^TQP = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (7)$$

利用变换 $[X \ Y \ Z]^T = P[X' \ Y' \ Z']^T$,可将二次型(7)式转化为标准二次型:

$$[X' \ Y' \ Z']A[X' \ Y' \ Z']^T = 0 \quad (8)$$

即在正交矩阵 P 作用下,圆锥方程转化为旋转轴为 Z' 的标准圆锥体:

$$\lambda_1 X'^2 + \lambda_2 Y'^2 + \lambda_3 Z'^2 = 0 \quad (9)$$

由标准圆锥的性质,系数 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 中两个符号相同,并与第三个异号。根据文献[5]的相关结论,假设得到矩阵 Q 的特征值 (μ_1, μ_2, μ_3) 和归一化特征向量 (f_1, f_2, f_3) ,并有 μ_1, μ_2 同号且 $\|\mu_1\| \geq \|\mu_2\|$ 。则 $P = [e_1 \ e_2 \ e_3]$ 与 Λ 的取值按照以下方法:如果 $e_3[0 \ 0 \ 1]^T > 0$,则 $e_3 = f_3$,否则 $e_3 = -f_3$; $\lambda_2 = \mu_2$, $e_2 = f_2$; $\lambda_1 = \mu_1$, $e_1 = e_2 \times e_3$ 。此时如果用垂直于 Z' 的平面与圆锥体相交将得到一个长轴沿 Y' 方向的椭圆。求出规范圆锥体后,标准空间中圆心位置 $[x'_0, y'_0, z'_0]$ 和相应法向量 $[n'_x, n'_y, n'_z]$ 分别为

$$\begin{cases} [x'_0, y'_0, z'_0] = \left[\pm R \frac{|\lambda_3|(|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{\sqrt{|\lambda_1|(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}}, 0, R \frac{|\lambda_1|(|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{\sqrt{|\lambda_3|(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \right] \\ [n'_x, n'_y, n'_z] = \left[\pm \frac{(|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{\sqrt{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}}, 0, -\frac{(|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{\sqrt{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \right] \end{cases} \quad (10)$$

最后转换到相机坐标系下

$$\begin{cases} [x_0, y_0, z_0]^T = P[x'_0, y'_0, z'_0]^T \\ [n_x, n_y, n_z]^T = P[n'_x, n'_y, n'_z]^T \end{cases} \quad (11)$$

3 从运动恢复结构

如果目标特征点的世界系坐标已知,根据特征点与像点的对应关系,通过求解透视 n 点定位(PNP)问题^[13]可以得到特征点在相机系中的坐标和目标相对于相机的位姿。但如果特征点的世界坐标未知,则无法直接求解特征点的相机系坐标和目标的位姿,此时需要对目标进行三维重建恢复特征点的结构信息再实现相对位姿的估计。基于单目相机的三维重建是机器视觉领域的从运动恢复结构问题,即通过单目相机多个位姿下采集的目标图像序列,利用多视图匹配的特征点同时求解相机外参数和重建特征点世界坐标。

设有 m 次成像,利用特征点的提取与匹配,例如文献[14],得到 n 个共同特征点,记第 i 个特征点的世界坐标 $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$,第 j 次成像点的像素坐标为 $p_{ji}(u_{ji}, v_{ji}), i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$ 。通过最小化重投影误差来估计所有特征点的世界系坐标和不同成像时刻的相机外参数,即如下的非线性最小二乘问题

$$\min_{a_j, P_i} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d[\pi(a_j, P_i), p_{ji}]^2, \quad (12)$$

式中 $d(x, y)$ 表示像素坐标 x, y 间的欧式距离, a_j 表示 j 时刻的相机外参数向量, $\pi(a_j, P_i)$ 表示第 i 个特征点在 j 时刻成像的投影方程。(12)式所示的最优化问题在机器视觉领域常用 Levenberg-Marquardt 优化算法进行迭代求解,本文利用 sba 软件包^[15]实现优化。理想情况下,上述优化函数能找到全局最优解,但有陷入局部最优解的风险。

从运动恢复结构方法最少仅需两个视图,此时,有 2 个不同的成像方位,设特征点数为 n ,则单目测量的观测方程数为 $4n$ 。每个时刻的外参数数目与姿态的表示方法有关,如 sba 软件包采用四元数描述旋转矩阵,则外参数数目为 7。每个特征点的世界坐标维度为 3。因此,总的待求参数数目为 $14+3n$ 。在没有其他约束条件的情形下,要求特征点的数目满足: $4n \geq 14 + 3n$, 即 $n \geq 14$ 。

上述优化问题需要事先估计初值。由于成像位置未知,不失一般性,设定第一次成像相机位于世界坐标系原点(则平移向量为 $t_1=0$),规范方向为 $R_1=I$;第二次成像的旋转矩阵为 R_2 ,平移向量为 t_2 。采用的初值估计方法如下:令旋转矩阵 $R_2=I$,平移向量 $t_2=[1,0,0]^T$,特征点的世界坐标都为 $[0,0,1]^T$ 。实验中该初值估计方法具有很好的效果。

4 单圆位姿二义性消除方法

4.1 二视图单圆位姿二义性消除方法

由 2.3 节的论述可知,基于圆的单目视觉位姿估计得到的圆心三维坐标和法向量具有二义性。基于刚体运动不改变空间夹角的角度约束,提出将二视图情形下,特征点连线的方向向量与圆法线的夹角不变作为约束来消除二义性。如图 3 所示,二视图情形下特征点对 M_1, M_2 与对应特征点对 M'_1, M'_2 的连线与分别与真实圆法线 \hat{n}_1, \hat{n}_2 的夹角都为 θ ,利用该角度约束可以有效消除位姿估计的二义性。本文方法最少仅需目标的两幅图像即可消除测量的二义性,不需要额外的先验信息。

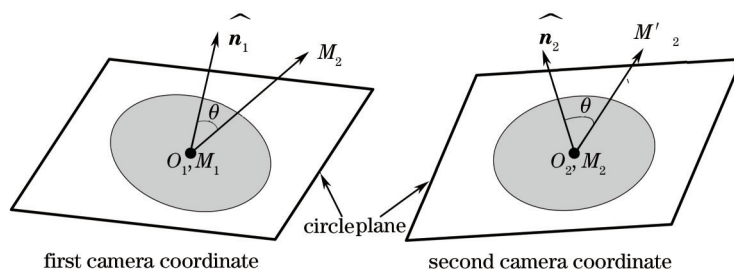


图 3 二视图情形下圆法向与连线方向向量

Fig.3 Normal vectors of circle and directional vectors of connecting lines in two views

利用空间圆的成像方程,得到圆的二义性位姿和相应法向量;利用二视图从运动恢复结构计算相机外参数和特征点世界坐标,选取一对特征点 M_1, M_2 得到向量 $\overline{M_1 M_2}$ 和 $\overline{M'_1 M'_2}$, 则单位方向向量 r_1 和 r_2 为

$$\begin{cases} r_1 = \frac{\overline{M_1 M_2}}{|\overline{M_1 M_2}|} \\ r_2 = \frac{\overline{M'_1 M'_2}}{|\overline{M'_1 M'_2}|} \end{cases} \quad (13)$$

虽然三维重建与真实场景相差一个尺度因子(可利用圆的尺度信息恢复),但不改变空间的夹角。根据2.3节将两次成像的空间椭圆锥各自转化为规范椭圆锥,分别得到:正交矩阵 P_1 和 P_2 , 二义性位姿和在标准空间下的圆法向量 n'_1, n'_2 (此处 n'_1 表示第一次成像的两个圆法向转换到标准空间的两个法向, n'_2 同理)。利用正交矩阵将特征点连线方向向量 r_1, r_2 转换为标准空间的方向向量 r'_1, r'_2 :

$$\begin{cases} r'_1 = [r'_{1x} \ r'_{1y} \ r'_{1z}]^T = P_1^T r_1 = P_1^T [r_{1x} \ r_{1y} \ r_{1z}]^T \\ r'_2 = [r'_{2x} \ r'_{2y} \ r'_{2z}]^T = P_2^T r_2 = P_2^T [r_{2x} \ r_{2y} \ r_{2z}]^T \end{cases} \quad (14)$$

规定圆法向沿 Z 轴分量为负,则可以保证夹角求解的过程中符号不发生改变。在(10)式中,不妨设:

$$N_x = \frac{(|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{\sqrt{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}}, N_z = -\frac{(|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{\sqrt{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \quad (15)$$

第一、第二幅图像中圆二义性的法向量分别记为 n_1, n_2 和 n_3, n_4 , 由(10)、(15)式得到标准空间中法向量:

$$\begin{cases} n_{1,2} = [\pm N_{1x}, 0, N_{1z}]^T \\ n_{3,4} = [\pm N_{2x}, 0, N_{2z}]^T \end{cases} \quad (16)$$

则特征点连线的方向向量 r 与圆的二义性法向量 n 夹角的余弦为

$$\Delta = r^T \cdot n = (P \cdot r')^T \cdot P \cdot n' = (r')^T \cdot n' \quad (17)$$

将(14)、(16)式代入到(17)式中,得到两次成像过程中夹角的余弦分别为

$$\begin{cases} \Delta_{1,2} = (r'_1)^T \cdot n'_1 = \pm r'_{1x} N_{1x} + r'_{1z} N_{1z} \\ \Delta_{3,4} = (r'_2)^T \cdot n'_2 = \pm r'_{2x} N_{2x} + r'_{2z} N_{2z} \end{cases} \quad (18)$$

在理想条件下,不妨设 n_1 和 n_3 分别为两次成像真实位姿对应的法向量,则 Δ_1, Δ_3 为真值(真值记为 Δ),且有 $\Delta_1 = \Delta_3 = \Delta$ 。由(18)式可知:

$$\begin{cases} \Delta_2 = \Delta - 2r'_{1x} N_{1x} \\ \Delta_4 = \Delta - 2r'_{2x} N_{2x} \end{cases} \quad (19)$$

在非奇异的情形下(奇异性情形在4.2节分析),夹角(余弦)关系为

$$\Delta_1 = \Delta_3 = \Delta \neq \Delta_2 \neq \Delta_4 \quad (20)$$

则在二视图情形下,利用(18)式分别计算第一组圆法向与特征点连线夹角与第二组圆法向与特征点连线夹角,将第一组两个夹角分别与第二组的两个夹角进行比较找到相等的一对,则这对夹角分别对应的圆位姿为二视图圆位姿的真实解。在有噪声的情形下,在两次测量的两组余弦值中选取最接近的一对作为真实值从而消除二义性。

4.2 奇异性分析

在一些特殊情形下该二义性消除方法存在奇异性。考虑圆投影为椭圆或圆的情形,即在(19)式中 $N_{1z} \neq 0, N_{2z} \neq 0$, 则有:

1) 当 $N_{1x}=0$, 相应 $N_{1z} = -1$ (规定 N_{1z} 为负) 时

$$\Delta = \Delta_{1,2} = (r'_1)^T \cdot n'_1 = \pm r'_{1x} N_{1x} + r'_{1z} N_{1z} = -r'_{1z} \quad (21)$$

此时圆投影成圆形,位姿唯一,夹角大小也唯一。在有噪声的情形下, Δ_1, Δ_2 的值都很接近真值,可同时

用于判断第二次成像圆位姿的真实解。

2) 当 $r'_{1x} = 0$ 时

$$\Delta = \Delta_{1,2} = (\mathbf{r}'_1)^T \cdot \mathbf{n}_1 = \pm r'_{1x} N_{1x} + r'_{1z} N_{1z} = r'_{1z} N_{1z}, \quad (22)$$

此时圆的位姿依然具有二义性,但无法判断,在有噪声的情形下,依然能增加判断第二次成像圆位姿的真实解的可信度。和情形1相比,情形2中 $N_{1z} \neq -1$,依然具有二义性,因此利用 $N_{1z} \neq -1$ 可以将情形1和情形2区分开来。

3) 在(19)式中,当 $r'_{1x}/r'_{1z} = N_{2x}/N_{1x}$ 时, $\Delta_2 = \Delta_4$,此时有两组相等夹角值,无法通过夹角不变消除二义性。

在实际应用中,二视图三维重建可以得到多个特征点的三维坐标,为避免后两种二义性消除失效的情形,并同时降低噪声对结果的影响,可以引入多组点对利用夹角不变约束来共同消除位姿的二义性。

5 实验结果

5.1 计算机仿真实验结果

为了验证在不同强度噪声下的稳健性和不同距离下的有效性,建立了基于蒙特卡罗模拟的仿真实验系统,模拟不同参数和噪声强度的成像过程,对每种参数条件运行1000次,通过统计方法获取结果。实验所用计算机主频为2.1 GHz,内存为2 GB,操作系统为Windows 7。

实验中,给定相机内参数如下:图像尺寸为512 pixel×512 pixel,等效焦距 $f_u = f_v = 1000$,主点坐标(256, 256)。对目标设定如下:圆半径设为50 mm,俯仰角和偏航角分别记为 ϕ 和 θ ,圆心的世界坐标记为 (T_x, T_y, T_z) ;目标的本体坐标系原点 O 设在圆心处, Z 轴取圆法线方向, XOY 平面为圆平面;目标特征点数 n 取所需的最小值14,在 XOY 平面上的初始分布如图4所示。特征点分为A, B两类:A类在初始三维坐标上加上随机项以增加随机性;B类保持不变。由于从运动恢复结构是消除圆位姿二义性的中间步骤,实验用B类特征点连线间夹角的重建误差,如 $\angle B_1 B_2 B_5$ 的重建误差大小来评估三维重建水平,当误差小于设定阈值 t_{tol} 时认为重建成功。实验对两次成像的设定如下:根据透视投影关系将空间圆和特征点以一定的姿态与位置投影到二视图的像平面上,第一次成像的规范方向为 $\mathbf{R}_1 = \mathbf{I}$,平移向量为 $t_1 = 0$;第二次成像的旋转矩阵 \mathbf{R}_2 的参数用2-1-3顺序的欧拉角列向量 $[A_x, A_y, A_z]^T$ 表示,平移向量用列向量 $t_2 [t_x, t_y, t_z]^T$ 表示。

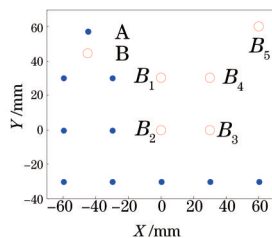


图4 特征点的初始分布

Fig.4 Initial distribution of feature points

不同噪声强度下二义性消除方法的稳健性实验中,目标本体系原点的 T_x, T_y 取为0, T_z 取为500,1000和1500 mm,分别为半径的10,20和30倍, ϕ 和 θ 都取为 10° ;第二次成像的旋转矩阵参数取 $A_x = A_y = 10, A_z = 0$,平移向量 t 取模为30 mm的随机向量。假设相机的内参数精确,噪声来自于特征点投影形成的像点。像点像素坐标加上均值为0,标准差为 σ_1 pixel的高斯噪声, σ_1 取值范围为0~1。由于圆的真实位姿已知,实验可以对二义性消除成功率(后文简称成功率)进行直接测量,并利用 t_{tol} 对三维重建水平进行间接评估, $t_{\text{tol}} = 5^\circ$ 。

图5给出了方法在不同噪声强度下的性能情况。在三个距离下,噪声强度为0时成功率和三维重建水平均为100%,即总能找到全局最优解;成功率随噪声强度增强而降低。距离为500 mm时具有很强的抗噪声能力:噪声强度在0.4 pixel以内时,成功率为100%,强度为1 pixel时成功率仍然能达到93%;三维重建水平在0.2 pixel的噪声强度以内时为100%,但随噪声强度加大,重建水平迅速降低,强度为1 pixel时降为55%。距离为1000 mm和1500 mm时,消除成功率随噪声强度平缓降低,但三维重建水平都在噪声强度为0.1 pixel左右迅速降低。

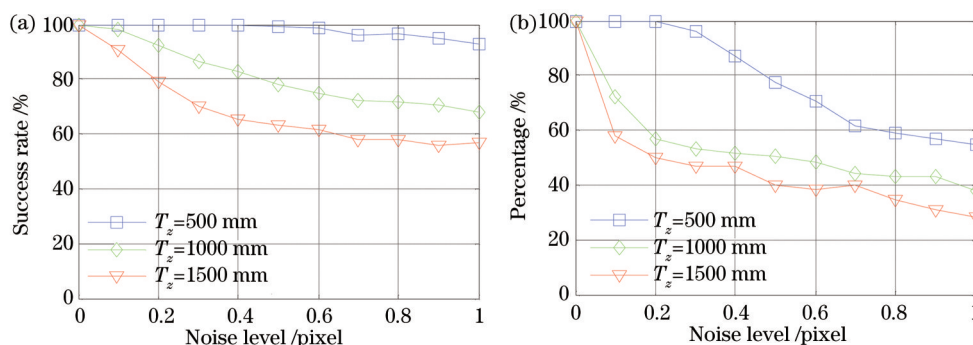


图 5 (a) 二义性消除成功率; (b) 三维重建水平

Fig. 5 (a) Success rate of eliminating duality; (b) level of three-dimensional reconstruction

图 6 为噪声强度为 0.5 pixel 时的第一个位姿下成像的像点分布和三维重建后重投影的像点分布, 图 7(a) 均方根(RMS)值为不同距离下重投影像点坐标误差的均方根, 三个距离下 RMS 曲线差别很小, 均与噪声强度呈线性关系, 说明噪声是影响三维重建的主要因素。图 7(b) 为二义性消除算法的平均运行时间, 其中 sba 软件包核心代码基于 C 语言。无噪声时, 三个距离下的平均运行时间分别为 5, 6, 7 ms 左右; 噪声强度为 1 pixel 距离为 1500 mm 时平均运行时间约为 23 ms。

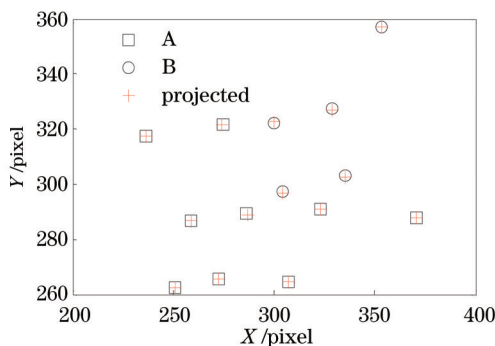


图 6 原始像点与重投影像点

Fig. 6 Original image points and projected image points

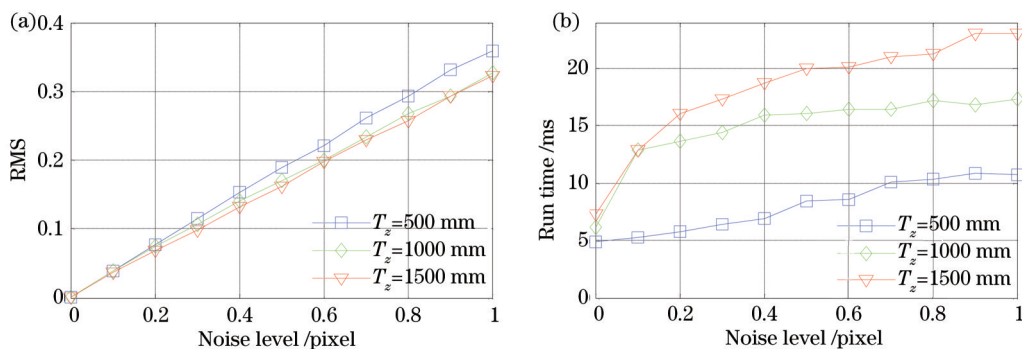


图 7 (a) 重投影误差的 RMS; (b) 运行时间

Fig. 7 (a) RMS of the reprojection error; (b) run time

不同距离下二义性消除方法的有效性实验中, T_x, T_y 为 0, T_z 范围取为 [300 mm, 1500 mm], 像点像素坐标分别加上均值为 0, 标准差为 0.1、0.2 和 0.5 pixel 的高斯噪声, 其他参数取值方法保持不变。

图 8 给出了该方法在不同距离下的性能情况, 距离小于 400 mm 时三种噪声强度下消除成功率均为 100%, 随着距离增加, 消除成功率缓慢下降趋势平缓。其中, 噪声强度在 0.1 pixel 时, 距离在 1000 mm 以内成功率在 99.6% 之上; 在 1500 mm 处仍然具有 88.2% 的成功率。不同噪声强度下, 三维重建水平在开始时变化比较平缓, 但都在某个距离处快速下降。

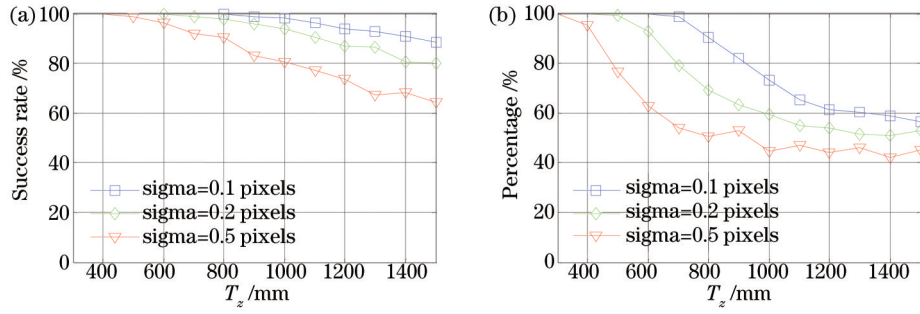


图 8 (a) 二义性消除成功率; (b) 三维重建水平

Fig.8 (a) Success rate of eliminating duality; (b) level of three-dimensional reconstruction

5.2 实物仿真实验结果

由于圆特征在航天器的相对位姿估计领域有广泛的应用^[4,10,16],利用卫星模型设计了实物仿真实验。实验设备包括包含星箭对接环(提供圆特征)的卫星模型、计算机、单目相机和标定板。相机内参数事先使用标定板标定,星箭对接环内圆半径为 19.0 mm,星箭对接环平面平行的矩形部件尺寸为 56.5 mm×72.5 mm。图 9 (a)~(c)为三个不同位姿下的卫星模型图像,图 9(d)~(f)红色曲线为边缘图像中利用椭圆检测^[17]方法提取的椭圆曲线,利用椭圆拟合方法^[18]拟合椭圆,得到椭圆参数,两视图间的特征点通过手动提取匹配。

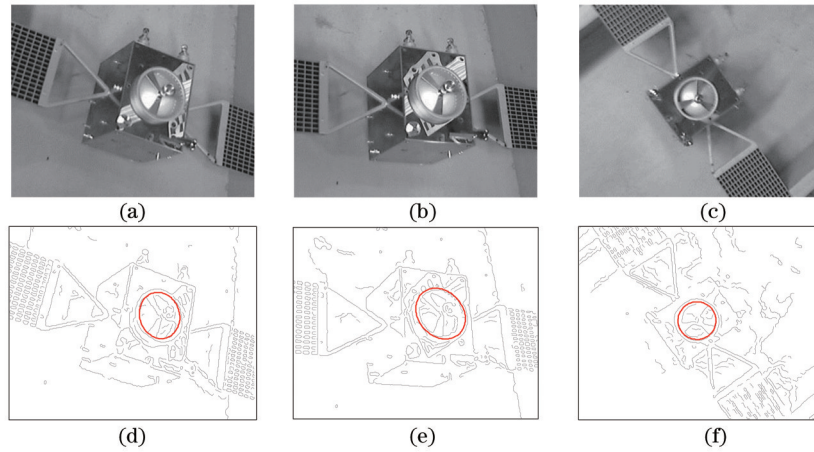


图 9 (a~c)模型位姿 1,2,3; (d~f)位姿 1,2,3 下的检测的椭圆

Fig.9 (a~c)Model pose 1,2,3; (d~f)ellipse detected in pose 1,2,3

实验中采用角度约束来唯一确定圆位姿,为了减小噪声的影响,随机选取多组点对连线与圆法向量夹角的总和。表 1 分别为选取图 9 中 (a,b)(a,c)和 (b,c)三组二视图的测量计算结果。其中, $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ 是在第一个相机系下圆位姿两个解对应的法向量, $\mathbf{n}_3, \mathbf{n}_4$ 是在第二个相机系下圆位姿两个解对应的法向量。由 (20) 式的夹角关系可知,圆法向量的真实解与特征点连线方向向量的夹角前后保持不变,实验中用 $d_{i,j}$ 计算夹角差,单位为 $^\circ$ 。 $d_{i,j}$ 是 K 组(实验中 $K=3$)重建特征点对连线与法向 i 和 j 的夹角差的大小之和, $i=1,2, j=3,4$, $d_{i,j}$ 最小值时 i, j 对应的解为二视图中圆法向量的真实解, $d_{i,j}$ 的计算公式为

$$\begin{cases} d_{i,j} = \sum_{k=1}^K \left| \text{ang}(\mathbf{r}_k, \mathbf{n}_i) - \text{ang}(\mathbf{R}_2 \mathbf{r}_k, \mathbf{n}_j) \right|, \\ \text{ang}(\mathbf{r}_k, \mathbf{n}_i) = \arccos(\mathbf{r}_k \mathbf{n}_i) \end{cases} \quad (23)$$

式中特征点对连线方向向量 \mathbf{r}_k 和圆的法向量 $\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j$ 都是单位向量, \mathbf{R}_2 为旋转矩阵, $\text{ang}(\mathbf{r}_k, \mathbf{n}_i)$ 表示向量 \mathbf{r}_k 与 \mathbf{n}_i 夹角的的大小,单位为 $^\circ$ 。

图 9 矩形部件尺寸已知,且与圆平面平行,可以利用部件的 4 个顶点^[13]求出对接环的真实法向作为参考。利用矩形部件计算得到三个位姿下圆的法向量(记作参考法向量)为: $[0.2881, -0.1978, -0.9369]^T$, $[0.3940, -0.1904, -0.8992]^T$ 和 $[0.1270, -0.0529, -0.9905]^T$ 。通过与参考法向量的对比:在 a,b 两个视角下, $(\mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3)$ 为正确的圆法向量组合,对应的夹角差 $d_{2,3}=1.5^\circ$,为最小值; a,c 两个视角下 $(\mathbf{n}_2, \mathbf{n}_4)$ 为正确的圆法向量组合,对

应的夹角差 $d_{2,4}=2.0^\circ$, 为最小值; b,c 两个视角下, (n_1, n_4) 为正确的圆法向量组合, 对应的夹角差 $d_{1,4}=1.5^\circ$, 为最小值。上述三个组合都正确的消除了两次成像圆位姿的二义性。在 a,c 组合中, 由于 c 视角圆法向接近光轴方向, 符合奇异性分析中的第 2 类情形, 测量结果上表现为 $d_{1,3}\approx d_{1,4}$, $d_{2,3}\approx d_{2,4}$; b,c 组合虽然也包含 c 视角, 但规律没有 a,c 组合明显。实验中共利用 5 幅图像组成 10 组二视图情形, 均成功消除圆位姿二义性。

表 1 测量结果

Table 1 Measurement results

View	n_1	n_2	n_3	n_4	$[d_{1,3}, d_{1,4}, d_{2,3}, d_{2,4}]$
a&b	$\begin{bmatrix} -0.5391 \\ 0.1739 \\ -0.8241 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4262 \\ -0.3034 \\ -0.8523 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.3912 \\ -0.3669 \\ -0.8440 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.5583 \\ 0.3789 \\ -0.7381 \end{bmatrix}$	[7.6, 3.8, 1.5, 5.0]
a&c	$\begin{bmatrix} -0.5391 \\ 0.1739 \\ -0.8241 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.4262 \\ -0.3034 \\ -0.8523 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0613 \\ 0.1572 \\ -0.9857 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.2064 \\ -0.0258 \\ -0.9781 \end{bmatrix}$	[4.9, 4.6, 2.4, 2.0]
b&c	$\begin{bmatrix} 0.3912 \\ -0.3669 \\ -0.8440 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.5583 \\ 0.3789 \\ -0.7381 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.0613 \\ 0.1572 \\ -0.9857 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.2064 \\ -0.0258 \\ -0.9781 \end{bmatrix}$	[3.6, 1.5, 6.1, 7.1]

6 结 论

提出了一种基于刚体运动不改变空间夹角的角度约束, 利用二视图从运动恢复结构方法重建空间约束角来消除圆位姿估计二义性的方法。该二义性消除方法不需要目标额外的先验结构或特征信息, 因此能适用于更广泛的场景。计算机仿真结果显示, 在 500 mm 距离内, 噪声强度小于 0.4 pixel 时二义性消除成功率为 100%, 强度为 1 pixel 时成功率约为 93%; 噪声强度在 0.1 pixel 时, 距离在 1000 mm 以内具有 99.6% 的成功率; 在 1500 mm 处成功率为 88.2%。实物仿真实验中 10 个二视图组合均成功消除二义性。实验结果表明该方法能有效地消除圆位姿的二义性, 获得正确解。

在二视图情形下, 二义性消除方法的平均运行时间约为 5 ms。该二义性消除方法需要利用椭圆检测和特征点提取与匹配的结果(可以并行执行), 因此可以配合快速椭圆检测方法和特征点提取与匹配方法实现实时性的应用。此外, 在点特征不丰富的场景还可以基于线段特征重建约束角^[19]来消除圆位姿二义性。

参 考 文 献

- 1 Uchiyama H, Marchand E. Object detection and pose tracking for augmented reality: Recent approaches[C]. 18th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV), 2012.
- 2 Wu Fanlu, Liu Jianjun, Ren Xin, *et al.*. Deep space exploration panoramic camera calibration technique based on circular markers[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1115002.
吴凡路, 刘建军, 任 鑫, 等. 基于圆形标志点的深空探测全景相机标定方法[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1115002.
- 3 Gargon G, Dame A, Marchand E. Direct model based visual tracking and pose estimation using mutual information[J]. Image and Vision Computing, 2014, 32(1): 54-63.
- 4 Xu W, Xue Q, Liu H, *et al.*. A pose measurement method of a non-cooperative GEO spacecraft based on stereo vision[C]. International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 2012: 966-971.
- 5 Chen Peng, Hu Guangda, Liu Xiaojun. Camera pose estimation based on virtual control points[J]. Chinese J Lasers, 2013, 39(11): 1108003.
陈 鹏, 胡广大, 刘晓军. 基于虚拟控制点的像机姿态测量算法[J]. 中国激光, 2013, 39(11): 1108003.
- 6 Safaei-Rad R, Tehoukanov 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.
- 7 Shiu Y C, Ahmad S. 3D location of circular and spherical features by monocular model-based vision[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetic 1989: 576-581.
- 8 Shiu Y C, Huang C. Pose determination of circular cylinders using elliptical and side projections[C]. IEEE International Conference on Systems Engineering, 1993: 265-268.
- 9 Wang G, Wu J, Ji Z. Single view based pose estimation from circle or parallel lines[J]. Pattern Recognition Letters, 2008, 29(7): 977-985.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 Zhang Lei, Xu Kejun, Zhao Rui, *et al.*. Improvement of position and orientation measurement algorithm of monocular vision based on circles[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.
- 13 Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. Epnp: An accurate o (n) solution to the pnp problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155–166.
- 14 Wang Canjin, Sun Tao, Wang Rui, *et al.*. Color image registration based on colored binary local invariant descriptor[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42 (1): 0109001.
王灿进, 孙 涛, 王 锐, 等. 基于彩色二进制局部不变特征的图像配准[J]. 中国激光, 2015, 42 (1): 0109001.
- 15 Lourakis M I A, Argyros A A. SBA: A software package for generic sparse bundle adjustment[J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2009, 36(1): 2.
- 16 Liang Bin, Du Xiaodong, Li Cheng, *et al.*. Advances in space robot on-orbit servicing for non-cooperative spacecraft[J]. Robot, 2012, 34(2): 242–256.
梁 斌, 杜晓东, 李 成, 等. 空间机器人非合作航天器在轨服务研究进展[J]. 机器人, 2012, 34(2): 242–256.
- 17 Chia A Y S, Rahardja S, Rajan D, *et al.*. A split and merge based ellipse detector with self-correcting capability[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(7): 1991–2006.
- 18 Fitzgibbon A, Pilu M, Fisher R B. Direct least square fitting of ellipses[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(5): 476–480.
- 19 Zhang L, Koch R. Structure and motion from line correspondences: Representation, projection, initialization and sparse bundle adjustment [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2014, 25(5): 904–915.

栏目编辑: 苏 岑