

基于星箭对接环部件的飞行器单目视觉位姿测量方法

苗锡奎^{1,2,3,4} 朱 枫^{1,3,4} 丁庆海⁵ 郝颖明^{1,3,4} 吴清潇^{1,3,4} 夏仁波^{1,3,4}

¹ 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; ² 中国科学院大学, 北京 100049
³ 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
⁴ 辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016
⁵ 空军装备研究院装备总体论证研究所, 北京 100076

摘要 空间飞行器上普遍具有星箭对接环部件, 可以提供单圆特征, 但基于单个空间圆的单目视觉位姿估计有两个位姿解, 无法应用到实际工程中。为了有效剔除虚假解的干扰, 利用对接环平面外一参考点到圆心距离的欧氏不变性作为约束, 提出一种虚假解剔除方法, 给出了在该约束条件下有唯一解的证明, 并对位姿求解方法进行了误差仿真分析, 给出了提高测量精度的可行策略。根据空间圆在图像上的投影计算出空间圆位姿的两个解; 利用参考点到圆心的距离已知且不变作为约束剔除虚假解, 得到星箭对接环的真实位姿; 对该方法的有效性进行了仿真和实验验证。实验结果表明, 该方法可有效剔除虚假解, 计算过程简单, 结果稳定可靠, 对接环圆心计算误差小于 0.5%, 姿态角误差小于 0.8°。

关键词 测量; 对接环; 位姿测量; 空间圆特征; 距离约束; 虚假解剔除

中图分类号 TP242.6 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0412006

Monocular Vision Pose Measurement Based on Docking Ring Component

Miao Xikui^{1,2,3,4} Zhu Feng^{1,3,4} Ding Qinghai⁵ Hao Yingming^{1,3,4}
Wu Qingxiao^{1,3,4} Xia Renbo^{1,3,4}

¹ Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

⁴ Key Laboratory of Image Understanding and Computer Vision, Shenyang, Liaoning 110016, China

⁵ Research Institute of General Development and Demonstration of Equipment, Equipment Academy of Air Force, Beijing 100076, China

Abstract Docking ring is a typical component on space vehicle, which can provide a single circle feature. But monocular vision pose estimation based on single circle with two solutions, which can not be applied to practical engineering application. In order to exclude the interference of false solution, a new method of removing the false solution using Euclidean distance invariance as a constraint is proposed to solve the pose ambiguity, and the paper gives the proof of a unique solution under the constraint. The error simulation analyses of the method are done, and feasible strategies to improve the measurement accuracy are given. According to the projection of the circle on the image, two pose solutions of the circle are calculated. Then a reference point on the circle supporting plane outside the circle is selected. The distance between the reference point and circle center is Euclidean invariant and prior

收稿日期: 2012-11-23; **收到修改稿日期**: 2012-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(51005229)资助课题。

作者简介: 苗锡奎(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事计算机视觉、视觉测量与导航和图像处理等方面的研究。

E-mail: miaoxikui@sia.cn

导师简介: 朱 枫(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事计算机视觉、视觉测量与导航和模式识别等方面的研究。

E-mail: fzhu@sia.cn.

knowledge, which can be used for a constraint to exclude the false solution to get the uniquely correct solution. The effectiveness and superiority of the method are verified by numerical simulation and experiments. Experimental results indicate that the method is robust to the noise, can get the right solution, requires least constraint conditions for the circle, and the calculation process is simple. Pose results are stable and reliable, and more accurate. The relative error of the circle center is less than 0.5%, and the absolute error of pose angle is less than 0.8°.

Key words measurement; docking ring; pose measurement; circle feature; distance constraint; false solution removal

OCIS codes 120.6085; 150.0155; 110.5200

1 引 言

在轨执行空间任务一般都会有目标飞行器相对位姿测量的需求^[1],即测量目标飞行器相对于追踪飞行器的位置与姿态。由于光学成像系统能够提供大量包含有目标飞行器相对位置和姿态等信息的高分辨率图像,且仅需安装低能耗像机,因此视觉位姿测量技术可用于解决空间目标位姿测量问题。

现有的目标视觉位姿测量方法主要是针对合作目标^[2~7],即安装有专用视觉测量标志器的目标。由于有合作标志器,图像特征提取精度十分高,最后的位姿精度也较高,且抗噪声能力强。对于没有安装测量标志器的空间非合作飞行器,只能利用其上的典型部件来完成位姿测量,而且特征提取精度必然要低于如合作标志器特征提取的精度。

空间非合作飞行器上普遍具有星箭对接环这一典型部件,该部件可以提供单个空间圆特征。基于单目视觉的单圆特征定位,很多学者对其进行了研究^[8~13]。较传统的基于点特征和直线特征的位姿估计方法,基于单圆特征的视觉位姿估计不仅需要的特征数量较少,而且在识别、抗遮挡等方面具有明显的优势;更重要的是圆定位不需要考虑复杂的对应问题,而利用特征点、线进行定位必须解决对应问题,对应问题在计算机视觉中堪称经典难题,所以利用圆进行定位可以减少不必要的麻烦。

Safaei-Rad 等^[8,9]分别提出了圆姿态重建的闭式解法,这些方法都是建立在分析几何基础之上。遗憾的是这些方法对于单个圆位姿估计结果具有二义性,而且没有给出直观的几何解释。Wang 等^[10]提出利用单个圆或两对平行线来恢复摄像机的位姿,并指出当空间圆半径已知,且圆心在像平面上的投影点可识别出来时,则摄像机的位姿可以唯一确定;Shiu 等^[11]利用圆柱的椭圆投影和两条母线的投影,在假设圆柱底面圆半径已知的情况下求解圆柱体的三维位姿与方向,推导给出了位姿的闭式解;Zheng 等^[12]对单圆定位问题重新进行了推导,从几何意义上给出了空间圆位姿有两个解的完备解释,

但仍然没有给出剔除虚假解的方案。

综上所述利用单个圆进行定位,解具有二义性。由于无法正确剔除虚假解使基于单个圆的定位方法无法应用于实际中。利用单个圆进行定位,从两个解中找出真解,对于工程应用来说是至关重要的。为此,文献^[13]利用激光测距仪的距离信息改进了单目单圆定位方法,能够测量出空间圆的全部位姿信息,从两组解中确定出正确解。但本方法需要增加额外的成本,在测量设备上安装激光测距仪,而且需要标定激光测距仪与摄像机之间的位置关系。另外在测量时由于激光测距仪也会引入误差,对最终的位姿测量结果也有影响。文献^[8]对多个法向量相同的空间圆成像,然后利用法向量平行这一约束来剔除虚假解。这种方法对空间场景的约束较多,至少需要两个圆,当空间场景不满足约束时,该方法将不再适用。

为了能够利用星箭对接环部件对非合作飞行器进行单目视觉定位,本文针对单圆定位二义性问题,通过引入欧氏空间中距离不变性作为约束,提出一种新的虚假解剔除方法,仅需在对接环平面上圆外侧一参考点即可。该方法对对接环的约束最少,即在最少的场景信息条件下获得对接环的正确位姿。利用对接环的图像投影计算出两个位姿解;利用欧式空间中距离的不变性,将对接环中心点与参考点之间的距离已知且不变作为约束,唯一确定对接环位置和姿态参数。

2 空间圆成像

2.1 空间圆的位姿表示

星箭对接环部件外边缘呈圆形,可以提供单圆特征,故后文中将对接环部件抽象为单个空间圆特征进行研究。利用单个圆进行视觉位姿测量,求解的位姿参数有空间圆圆心的三维坐标和空间圆支撑平面的法向量。由于空间圆绕其过圆心的法向量旋转具有对称性,当支撑平面的法向量确定后,空间圆无论绕其旋转轴转动多大角度,空间圆在图像上的

成像将不会发生变化。因此空间圆的姿态角只有两个自由度是确定的,分别是俯仰角和偏航角。如图1所示定义了空间圆所在平面的姿态角,设 \mathbf{n} 为三维空间中圆所在平面的法向量,在坐标系 $O_o-X_oY_oZ_o$ 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 $X_oO_oY_o$ 平面的夹角,取值范围为 $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$,偏航角 θ 定义为法向量 \mathbf{n} 在 $X_oO_oY_o$ 平面上的投影向量 \mathbf{n}_p 与 O_oX_o 轴正向的夹角,取值范围为 $[0, 2\pi]$ 。当已知空间圆平面法向量 $\mathbf{n}(n_x, n_y, n_z)$,根据几何三角关系就可以计算出俯仰角 ϕ 和偏航角 θ 。

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

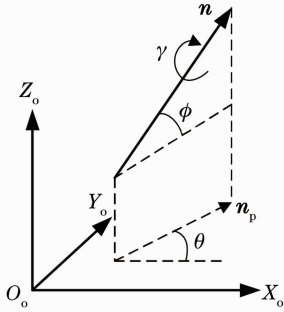


图1 空间圆位姿参数定义

Fig.1 Definition of pose parameters of space circle

2.2 坐标系定义及摄像机成像模型

为便于分析,建立如图2所示的摄像机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 、像平面坐标系 $O_I-X_IY_I$ 、世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 。由于摄像机在标定之后与世界坐标系之间的位置关系保持不变,因此仅在摄像机坐标系下求解空间圆的圆心坐标和其支撑平面的法向量。

假设空间圆上的三维点在摄像机坐标系下的

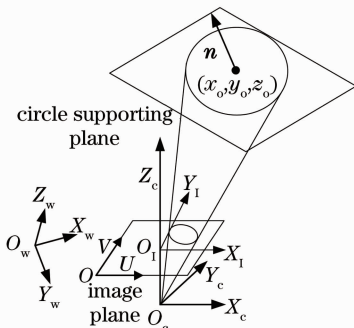


图2 各坐标系定义

Fig.2 Definition of different coordinate systems

坐标为 $p_i = (x_i, y_i, z_i)^T$,与其成像后的图像坐标 $(u_i, v_i, 1)^T$ 之间的关系由针孔成像模型描述,表示为

$$z_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 (f_u, f_v) 称为摄像机的焦比,即像平面上 U 轴和 V 轴上像素距,无量纲, $f_u = f/d_u, f_v = f/d_v$,其中 f 为相机的焦距,单位为mm, d_u, d_v 为像平面上每个像素横向和纵向方向上的宽度,单位为mm。 (u_0, v_0) 称为摄像机的主点,单位为pixel。 (f_u, f_v, u_0, v_0) 统称为摄像机的内参数,它描述了图像坐标系与摄像机坐标系间的映射关系。目标位姿测量前,必须获取摄像机的以上参数,即对摄像机进行标定。

另外由于摄像机坐标系是一个无法测量的坐标系,为了验证位姿解算方法还要确定摄像机坐标系与世界坐标系之间的关系,将所有位姿量都转换到世界坐标系下。由于标定过程没有精确标定出摄像机的焦距 f ,仅标定出 (f_u, f_v) 。而在欧氏空间中,空间点的坐标都是长度单位,为了单位的统一,将图像点像素坐标转化到归一化焦距平面上,即转换到焦距 $f = 1$ 的归一化焦距平面上,表示为

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix}.\quad (3)$$

x_n, y_n 为相应像点在归一化焦距平面上的坐标,单位为mm,在归一化焦平面上有

$$\begin{cases} x_n = \frac{X_c}{Z_c} \\ y_n = \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases}.\quad (4)$$

2.3 空间圆的成像方程

不考虑退化情况(空间圆成像为直线),空间圆在图像平面上的投影为一椭圆^[9],摄像机光心与空间圆形成一椭圆锥,该椭圆锥同时也将通过其投影图像。在归一化焦平面上,设投影椭圆方程为

$$ax_n^2 + by_n^2 + cx_ny_n + dx_n + ey_n + h = 0. \quad (5)$$

将摄像机归一化成像模型(4)式代入椭圆方程(5)式中可以得到空间椭圆锥的方程:

$$ax^2 + by^2 + cxy + dxz + eyz + hz^2 = 0. \quad (6)$$

该椭圆锥方程可以写成矩阵乘积的形式,表示为

$$[x \ y \ z] \mathbf{Q} [x \ y \ z]^T = 0, \quad (7)$$

式中

$$Q = \begin{bmatrix} a & \frac{c}{2} & \frac{d}{2} \\ \frac{c}{2} & b & \frac{e}{2} \\ \frac{d}{2} & \frac{e}{2} & f \end{bmatrix}. \quad (8)$$

2.4 空间圆的位置和方向

由 2.3 节推导可知,空间圆在图像平面上的投影为椭圆,假设空间圆的半径为 R ,则求解空间圆的位置与方向就相当于在空间寻找一切割平面,使得该平面切割圆锥后,与圆锥面相交形成一个半径为 R 的圆。该圆的圆心三维坐标和切割平面的法向量[按照(1)式就可以计算出姿态角]即为所求。由于直接在摄像机坐标系空间中计算时,圆锥的表达形式十分复杂,切割平面切割圆锥时也不便于描述和计算,故将其变换到标准坐标空间中计算,得出结果后再变换回摄像机坐标系中。

(6)式中,等式左边为二次多项式,可以写成二次型, Q 为 3×3 对称矩阵。由文献[9]可知,三阶对称阵必存在正交矩阵 P 可将 Q 对角化,即

$$P^{-1}QP = P^TQP = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3). \quad (9)$$

令:

$$[x \ y \ z]^T = P[x' \ y' \ z']^T, \quad (10)$$

于是可将上面的圆锥旋转变换为标准的圆锥,二次型可化为标准形,即将(10)式代入(7)式中得到:

$$\{P[x' \ y' \ z']^T\}^T Q P [x' \ y' \ z']^T = 0,$$

$$[x' \ y' \ z']^T P Q P [x' \ y' \ z']^T = 0. \quad (11)$$

则可得到一个旋转轴为 z' 的规范圆锥体,如图 3 所示。

$$\lambda_1 x'^2 + \lambda_2 y'^2 + \lambda_3 z'^2 = 0. \quad (12)$$

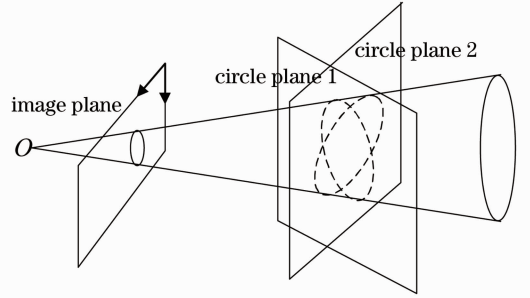


图 3 空间圆的两个位姿解

Fig. 3 Two pose solutions of the space circle

由于(12)式表示一圆锥,根据标准圆锥的表达式可知, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 中必有 2 个值符号相同,且与另外一个异号。当空间圆成像为圆时,该圆锥变成圆锥,则同号的 2 个值相等。根据文献[9]的相应结论,设矩阵 Q 的特征值与规范化特征向量分别为 (μ_1, μ_2, μ_3) 与 (f_1, f_2, f_3) ,则 $P = [e_1 \ e_2 \ e_3]$ 与 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 的取值应按照如下方式确定:设 μ_1, μ_2 同号,且 $\|\mu_1\| \geq \|\mu_2\|$,则 $\lambda_3 = \mu_3$; 如果 $e_3 [0 \ 0 \ 1]^T > 0$,则 $e_3 = f_3$,否则 $e_3 = -f_3$; $\lambda_2 = \mu_2, e_2 = f_2$; $\lambda_1 = \mu_1, e_1 = e_2 \times e_3$ 。

当求出标准空间下的圆锥时,可求得圆心位置为

$$[x'_0, y'_0, z'_0] = \left[\pm R \sqrt{\frac{|\lambda_3| (|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{|\lambda_1| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}, \ 0, \ R \sqrt{\frac{|\lambda_1| (|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{|\lambda_3| (|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \right]. \quad (13)$$

切割平面法向量为

$$[n'_x, n'_y, n'_z] = \left[\pm \sqrt{\frac{(|\lambda_1| - |\lambda_2|)}{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}}, \ 0, \ -\sqrt{\frac{(|\lambda_2| + |\lambda_3|)}{(|\lambda_1| + |\lambda_3|)}} \right]. \quad (14)$$

最后还要将所求结果转换到摄像机坐标系下:

$$[x_0, y_0, z_0]^T = P[x'_0, y'_0, z'_0]^T, \quad (15)$$

$$[n_x, n_y, n_z]^T = P[n'_x, n'_y, n'_z]^T. \quad (16)$$

综上所述:单圆定位,当空间圆成像为椭圆时, $\lambda_1 \neq \lambda_2$,空间圆位置与方向共有 2 组可行解,当空间圆成像为圆时, $\lambda_1 = \lambda_2$,空间圆位置与方向有唯一解。

3 基于参考点约束的二义性消除

从 2.4 节的论述中可知,单个空间圆的单目视觉定位方法所求得的空间圆圆心三维坐标和其法向量有 2 个解。本文提出将空间圆平面上圆外侧一参

考点 M 到圆心 C 的距离已知作为约束来剔除虚假解。如图 4 所示,圆平面上—参考点 M 到圆心的距离为 l ,利用该距离约束就可以有效剔除虚假解。本方法仅需要圆平面外侧一参考点即可,对空间圆的约束最少,所需的场景信息也最少。

由于距离在欧氏空间是几何不变量,所以参考点 M 到空间圆圆心 C 的距离 l 无论在摄像机坐标系下还是在标准圆锥坐标系下都是恒定不变的。空间平面在标准圆锥坐标系下切割圆锥后交线为半径为 R 的圆,将切割平面、圆锥及参考点向由圆锥 OZ 轴与参考点的像点组成的平面上投影得到

如下图 5 所示的截面,将该截面记为 XOZ 面。

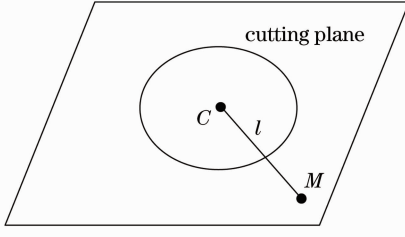


图 4 圆平面上—参考点

Fig. 4 One reference point on the circle plane

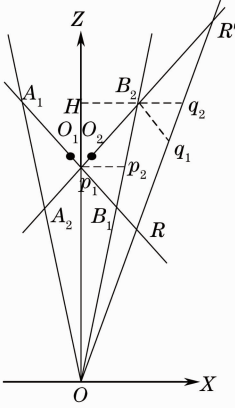


图 5 圆锥与切割平面在 XOZ 平面的投影

Fig. 5 Projection of cone and sectioning planes on the XOZ plane

直线 A_1B_1 、 A_2B_2 是两个空间圆在 XOZ 平面上的投影直线,这两个空间圆的空间位姿都是问题的可行解,圆心分别是 O_1 与 O_2 ; R 与 R' 分别是空间圆平面上圆外侧一参考点 M 在 XOZ 平面上的投影;其中 M 到圆心的距离为 l ,如果用 C 表示空间圆的圆心,则即 $\|MC\| = l$;只要空间圆位姿有两个解,就能证明无论在哪个坐标系下 $\|O_1R\| \neq \|O_2R'\|$,且两者中只有正确位姿解的空间圆满足圆心到参考点的距离等于 $\|MC\|$,即 $\|O_1R\| = \|MC\| = l$ 或 $\|O_1R'\| = \|MC\| = l$;这样就可以将空间圆圆心到参考点的距离 l 作为约束,剔除虚假解。

下面证明,只要直线 A_1B_1 、 A_2B_2 不重合(问题有两个解), $\|O_1R\| \neq \|O_2R'\|$,即可说明该方法有效。

证明:不失一般性,假设空间圆平面截圆锥后,空间圆和一参考点在 XOZ 平面上的投影如图 5 所示。

由于 $\|O_1R\| = \|O_1B_1\| + \|B_1R\|$; $\|O_2R'\| = \|O_2B_2\| + \|B_2R'\|$; $\|O_1B_1\| = \|O_2B_2\| = R$;欲证明: $\|O_1R\| \neq \|O_2R'\|$,只需

证明 $\|B_1R\| \neq \|B_2R'\|$ 。

根据文献[9]的结论,直线 A_1B_1 、 A_2B_2 方程表达式为

$$Z = \pm \sqrt{\frac{\lambda_1}{\lambda_3}} X. \quad (17)$$

过直线 A_1B_1 与 A_2B_2 的交点 p_1 做辅助线 $p_1p_2 \perp OZ$,则有 $\angle B_2p_1p_2 = \angle B_1p_1p_2$;过 B_2 做 $B_2q_1 \parallel B_1p_1$ 交 OR' 于 q_1 ; $B_2q_2 \parallel p_1p_2$ 交 OR' 于 q_2 ,交 OZ 于 H ;又由于 OR 与 OB_1 相交于点 O ,即两条直线不平行,所以有 $\|B_2q_1\| > \|B_1R\|$ 。

在 $\triangle OHq_2$ 中有:

$\angle B_2q_2R' = \angle B_2HO + \angle HOR' = 90^\circ + \angle HOR' > 90^\circ$,所以在 $\triangle B_2q_2R'$ 中有 $\angle R'B_2q_2 + \angle B_2R'q_2 < 90^\circ$ 。

在 $\triangle q_2B_2q_1$ 中有: $\angle B_2q_2R' = \angle B_2q_1q_2 + \angle q_1B_2q_2 > 90^\circ$,又由于: $\angle R'B_2q_2 = \angle q_1B_2q_2$,所以: $\angle B_2q_1q_2 + \angle R'B_2q_2 > 90^\circ$;而 $\angle R'B_2q_2 + \angle B_2R'q_2 < 90^\circ$,所以有: $\angle B_2q_1q_2 > \angle B_2R'q_2$ 。

在 $\triangle q_1B_2R'$ 中,根据大角对大边的原则得出 $\|B_2R'\| > \|B_2q_1\| > \|B_1R\|$, $\|B_1R\| \neq \|B_2R'\|$ 得证。

在假设图 5 所示的情况下, A_1B_1 所对应的空间圆是正确解,即 $\|O_1R\| = \|MC\| = l$,而 $\|O_1R'\| \neq \|MC\| = l$,则可以利用该约束有效剔除 A_2B_2 所对应的空间圆虚假解。只要该参考点在空间圆外侧,该方法就能有效剔除虚假解。因为当参考点在空间圆上时,空间圆无论以什么姿态成像,约束距离都恒等于圆的半径 R ,而且参考点距离圆心越远,剔除虚假解就越有效。

综上所述,通过引入共面圆外侧一参考点作为约束,利用参考点到圆心距离的欧氏不变性可以有效地消除基于单圆的位姿估计中存在两个解的问题。

4 实验结果与误差分析

4.1 仿真实验与结果

为了验证本方法距离约束对不同强度噪声的稳健性以及在不同测量距离下的有效性,建立了 Matlab 软件仿真实验系统,模拟位姿估计过程,这也是目前位姿估计算法最常用的研究手段^[5]。本课题组做了大量的模拟实验对该方法进行了验证。实验中,给定摄像机内参数如下: $d_u = d_v = 0.005 \text{ mm}$; 焦距 $f = 8 \text{ mm}$; 等效焦距 $f_u = f_v = 1600$ 、主点坐标 $(u_c, v_c) = (256, 256)$, 图像尺寸为 $512 \text{ pixel} \times$

512 pixel。空间圆半径 $R = 50 \text{ mm}$ ；空间圆平面上—参考点到圆心距离为 80 mm。图 6(a)为空间三维圆及其平面上—距离固定的参考点。

空间圆位姿用其圆心三维坐标 $T(T_x, T_y, T_z)$ 和姿态角，即俯仰角 ϕ 和偏航角 θ 表示。为度量位姿测量误差，定义姿态角误差 $(\Delta\phi, \Delta\theta) = (\phi - \hat{\phi}, \theta - \hat{\theta})$

和圆心三维坐标误差 $(\Delta T_x, \Delta T_y, \Delta T_z) = (T_x - \hat{T}_x, T_y - \hat{T}_y, T_z - \hat{T}_z)$ ，其中 $\hat{\phi}, \hat{\theta}$ 为 ϕ, θ 的估计值， \hat{T} 为 T 的估计值。为客观评价该方法的精度，使实验结果更具有统计意义，本节中的所有实验，对每种参数条件运行 1000 次，然后取平均值作为实验结果。

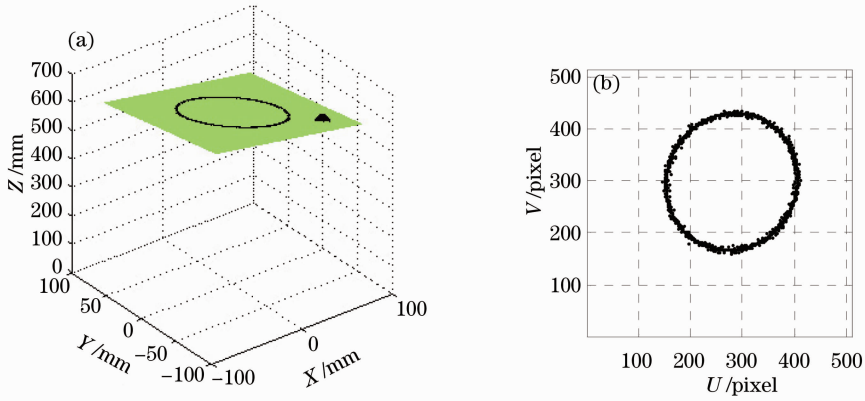


图 6 (a)空间圆与参考点；(b)空间圆与参考点的成像

Fig. 6 (a) Space circle and reference point; (b) imaging of space circle and reference point

距离约束对不同强度噪声的稳健性实验中，根据透视投影关系将空间圆以一定姿态与位置投影到像平面上，其中俯仰角 ϕ 均匀分布在 $[10^\circ, 80^\circ]$ 中，偏航角 θ 均匀分布在 $[0^\circ, 360^\circ]$ 中，随机取值产生姿态角； T_x, T_y 均匀分布在 $[-50 \text{ mm}, 50 \text{ mm}]$ 中， T_z 均匀分布在 $[500 \text{ mm}, 700 \text{ mm}]$ 中，随机取值产生圆心三维坐标 $T(T_x, T_y, T_z)$ 。圆平面上参考点 M 位置固定，且到圆心距离为 80 mm。保证空间圆上的点和参考点 M 能够在图像上成像。为了验证算法的稳健性，模拟了摄像机参数误差和特征提取误差，在空间圆成像后的投影椭圆的边缘点和参考点成像后的像点上分别加入 0 均值且标准差为 σ 的高斯白噪声，然后用椭圆拟合方法拟合椭圆，获取相应的参数以计算空间圆位姿，图像中椭圆用 1000 个点拟合。图 6(b)给出了参考点成像、成像椭圆及其上的高斯

噪声。

图 7 给出了各位姿参数误差与噪声的关系。图中姿态角误差单位为 $(^\circ)$ ，圆心坐标误差单位为 mm，各误差量取绝对值。从图中可以看出，当不受噪声影响时，位姿参数误差为 0，说明本文方法的计算过程是正确的。随着图像噪声强度的增加，各位姿量的误差也逐渐变大。两个姿态角误差中，偏航角略大于俯仰角；而圆心坐标误差，光轴方向上的误差较另外两个方向上的误差都大。虽然误差曲线出现了微小振荡、不规整的情况，这主要是由于随机选取位姿和随机添加误差的有偏性造成的，但仍然可以看出误差随着噪声强度增加的变化趋势。仿真实验结果表明，即使在图像噪声较大的情况下，该距离约束也能有效地剔除虚假解的干扰。姿态角误差最大不超过 1.5° ，圆心坐标误差最大不超过 1.3 mm，说

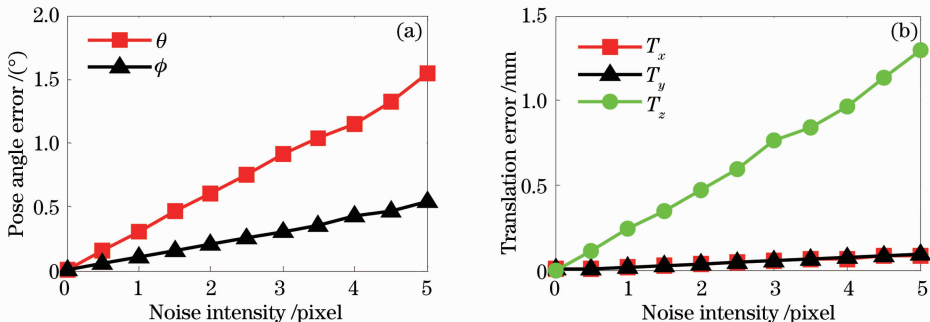


图 7 位姿估计误差与噪声的关系。(a)姿态角误差；(b)圆心坐标误差

Fig. 7 Pose estimation error as a function of noise. (a) Error of pose angle; (b) error of circle center coordinate

明本算法是稳健有效的。

距离约束在不同测量距离下的有效性实验:测量距离取值范围[400 mm, 1000 mm],圆平面姿态固定时(俯仰角和方位角均为 45°),在投影椭圆的边缘点上加入 0 均值且标准差 $\sigma=2$ 的高斯白噪声。

图 8 给出了位姿估计精度随测量距离的变化情

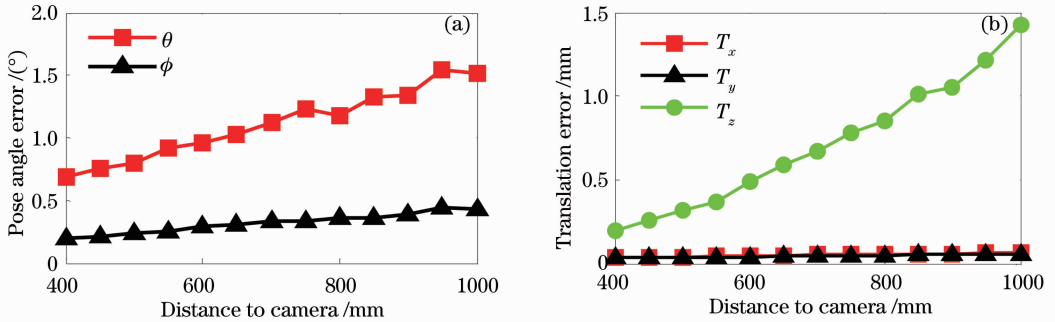


图 8 位姿估计误差与测量距离关系。(a)姿态角误差; (b)圆心坐标误差

Fig. 8 Pose estimation error as a function of measurement distance. (a) Error of pose angle; (b) error of circle center coordinate

4.2 真实实验与结果

为了用真实实验验证本方法的有效性和可行性,搭建了基于星箭对接环部件的位姿测量平台。实验平台主要包括自制飞行器底板模型(包含星箭对接环模型),计算机,电荷耦合器件(CCD)摄像机、标定板和激光跟踪仪等,如图 9 所示。摄像机使用 Vision

Components 的 VC4468,分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,配焦距为 8 mm 的 Computar 镜头,摄像机事先精确标定^[14,15]。星箭对接环圆半径为 60 mm,圆外侧参考点使用与对接环共面的矩形部件上一角点充当,到圆心距离为 114.5 mm,模型加工精度为 0.01 mm。

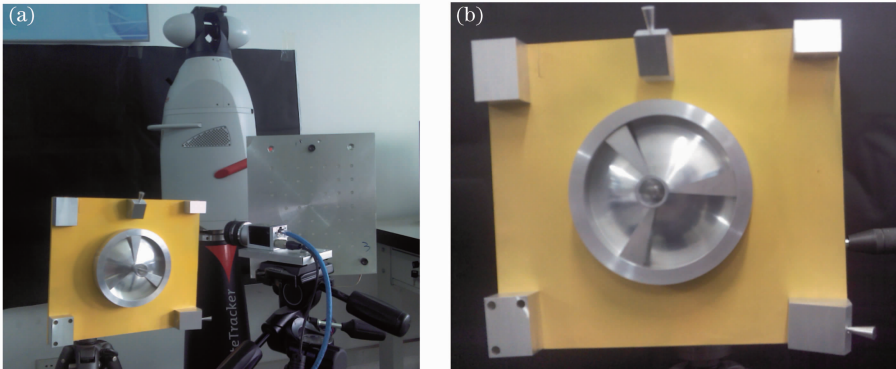


图 9 (a)位姿测量实验平台和(b)对接环部件模型

Fig. 9 (a) Experimental platform of pose measurement and (b) docking ring model

在提取椭圆时,对图像做中值滤波对图像进行预处理,主要是为了消除一些由尖刺孤立峰值构成的散粒噪声;然后利用 Canny 算子^[16]检测空间圆成像后的椭圆轮廓,用多项式拟合的方法获取轮廓点的亚像素坐标;再用椭圆拟合方法^[17]对这些点拟合成椭圆,所提取的椭圆用粉色曲线标记,如图 10 所示。实验图像是在空间暗室中拍摄。

利用 Leica AT901-LR 激光跟踪仪测量对接环的位姿:由于利用激光跟踪仪测量矩形部件的位姿

相对容易,而矩形部件与对接环部件的位姿在安装时精确已知,所以利用激光跟踪仪测量矩形部件的位姿可以间接求出对接环的位姿。激光跟踪仪的测量精度足够高,可以认为该测量值为准确值。再利用椭圆和参考点求解对接环的位姿,将结果与激光跟踪仪给出的结果对比,表 1 为图 10(b)的测量结果。圆心三维坐标为 $T(T_x, T_y, T_z)$,单位为 mm;对接环平面(圆平面)法向量为 \mathbf{n} ,姿态角分别为俯仰角 ϕ 和偏航角 θ ,单位为度,圆心到参考点的计算

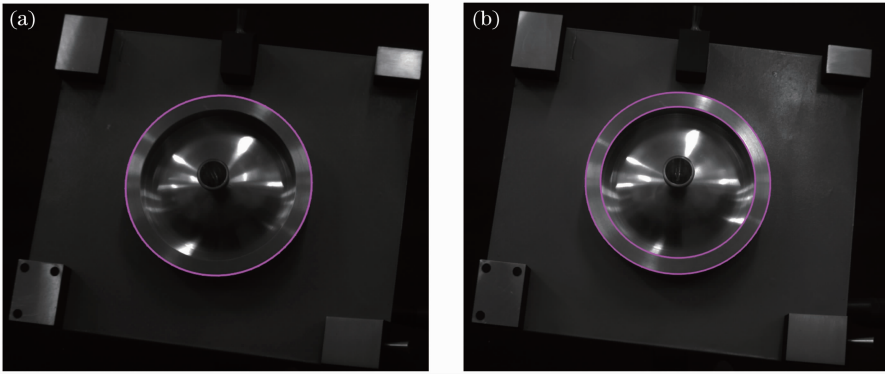


图 10 实际位姿测量图像。(a)位姿 1 下的对接环图像；(b)位姿 2 下的对接环图像

Fig. 10 Real images of pose measurement. (a) Docking ring image of pose case 1; (b) docking ring image of pose case 2

表 1 单圆与参考点的位姿计算结果

Table 1 Results from single circle and reference point

Pose paramaters	False pose	Right pose	Real pose	Error
T_X/mm	28.101	31.589	32.802	1.213
T_Y/mm	-23.853	-26.765	-28.258	1.493
T_Z/mm	815.904	815.008	818.579	3.571
\mathbf{n}	[0.3631 -0.2273 0.9036]	[-0.2962 0.1710 0.9397]	[-0.3104 0.1732 0.9328]	[0.0142 -0.0022 0.0069]
$\theta/(\circ)$	327.957	150.002	150.798	0.796
$\phi/(\circ)$	64.634	69.989	69.427	0.562
l/mm	106.541	115.186	114.50	0.686

距离为 l , 单位为 mm。

在实验结果的 2 个位姿中, 参考点到圆心的距离 l 截然不同, 只有结果 2 中 l 的大小最接近约束条件 ($l=114.5 \text{ mm}$), 该约束可以有效剔除虚假解的干扰。从实验结果看, 实际实验精度略差于仿真实验精度, 主要是由于摄像机的标定误差、实际图像噪声, 投影椭圆拟合误差和参考点特征提取误差造成的。但计算结果与激光跟踪仪得到的结果基本相同, 姿态角的最大误差不超过 0.8° , 圆心三维坐标在光轴方向上的误差最大, 但也不超过 0.5% $\{[31.589 \ -26.765 \ 815.008] - [32.802 \ -28.258 \ 818.579]\} / [31.589 \ -26.765 \ 815.008] \times 100\% = 0.49\%$, 说明本方法是有效的。变换空间圆到不同的位置和姿态处, 重复上述实验过程得到的结果精度基本相似。

4.3 误差分析与提高测量精度策略

根据仿真实验和真实实验分析, 可知影响该方法位姿测量精度的主要因素有:

1) 摄像机参数标定误差: 空间圆、参考点在图像上的成像参数依赖于摄像机的内参数, 而标定得到的内参数必然会含有误差, 内参数精度将直接影响空间圆和参考点成像精度, 进而影响到空间圆在摄像机坐标系下的位姿。另外在实际工程应用中,

常常需要标定外参数, 即摄像机坐标系与世界坐标系之间的关系, 进而求空间圆在世界坐标系下的位姿。而外参数标定时也存在误差, 因此摄像机的标定精度将影响最终位姿解算的精度;

2) 投影椭圆拟合误差、参考点提取误差: 求解位姿解的前提是要在图像中正确提取出椭圆以及参考点, 其提取精度将影响位姿测量精度^[18];

3) 空间圆与摄像机之间的相对距离和姿态^[19]: 空间圆距离越远, 成像越小, 特征区域所占的像素数越少, 特征提取精度越差, 对位姿测量的精度影响越大;

针对上述的主要误差源, 接下来的研究工作将主要从以下几个方面来提高位姿精度:

1) 提高摄像机参数标定精度: 目前采用的方法没有对摄像机的畸变系数进行标定, 未来将研究高精度的非线性标定方法标定摄像机的径向畸变、切向畸变及倾斜因子等系数;

2) 提高图像特征点提取精度: 椭圆上的点与参考点提取误差直接影响位姿精度, 因此有必要研究亚像素精度的椭圆, 特征点提取方法, 包括图像去噪处理、高精度、稳健性好的椭圆拟合算法和特征点提取算法等;

3) 采用可变焦距摄像机, 兼顾不同距离下特征

提取的精度；远距离时增大焦距，提高特征区域所占图像比例，近距离时减小焦距，保证所拍摄目标位于摄像机视场内。

5 结 论

利用星箭对接环部件上的单圆进行定位具有二义性，在没有任何约束的情况下，无法应用到实际工程中。为此，本文仅利用对接环平面上参考点，基于欧氏空间中线段长度的不变性，提出一种唯一确定空间圆姿态和位置参数的方法。将对接环圆点与参考点之间的距离作为约束，剔除单圆定位中虚假解的影响，得到了位姿的唯一解。该方法需要的约束信息最少，条件容易满足，计算简单。实验结果验证了该方法的正确性，能有效地剔除虚假解干扰，获取正确解，而且稳健性较好。圆心坐标计算误差小于0.5%，姿态角误差小于0.8°，满足位姿测量系统的精度要求。

还对影响位姿测量误差的因素进行了分析，指出三类误差源是影响测量精度的主要因素，接下来的工作将侧重于进一步提高测量精度；另外，本文提出的方法虽然是使用一个摄像机看对接环部件和单个参考点，是最少条件下唯一确定位姿的方法，当然摄像机也可以看多个参考点，将多个参考点与圆心的距离作为约束。当对接环部件与参考点的距离比较远时，单个摄像机在一定距离下不能对圆和参考点同时成像时，这时可以使用两个非公视场的摄像机分别观察圆和参考点。由于两个摄像机之间的位姿关系已精确标定，所以该距离约束同样可以辅助剔除虚假解。

参 考 文 献

- 1 Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen *et al.*. Mono camera and laser range finding sensor position-pose measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312001
晁志超, 伏思华, 姜广文等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0312001
- 2 Xiao Yongliang, Su Xianyu, Chen Wenjing. Fringe inverse video grammetry based on global pose estimation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0808003
肖永亮, 苏显渝, 陈文静. 基于全局位姿评估的条纹反向视觉测量[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0808003
- 3 Zhao Rujin, Zhang Qiheng, Zuo Haorui *et al.*. A method of improving the measuring accuracy of the pose of targets based on outliers-removal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2463~2467
赵汝进, 张启衡, 左颀睿等. 基于去离群点策略提高目标位姿测量精度[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2463~2467

- 4 L. Vincent, M. N. Francesc, F. Pascal. EPnP: an accurate O(n) solution to the PnP problem [J]. *International J. Computer Vision*, 2009, **81**(2): 155~166
- 5 H. Hmam, J. Kim. Optimal non-iterative pose estimation via convex relaxation [J]. *Image and Vision Computing*, 2010, **28**(11): 1515~1523
- 6 A. Joel, I. Stergios. A direct least-squares (dls) solution for PnP [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2011: 383~390
- 7 P. David, D. DeMenthon, R. Duraiswami *et al.*. Simultaneous pose and correspondence determination using line features [C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2003: 424~431
- 8 R. Safaee-Rad, I. Tchoukanov, S. K. Carless *et al.*. Three-dimensional location estimation of circular features for machine vision [J]. *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, 1992, **8**(5): 624~640
- 9 Y. C. Shiu, S. Ahmad. 3D location of circular and spherical features by monocular model-based vision [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1989: 576~581
- 10 G. H. Wang, J. Wu, Z. Q. Ji. Single view based pose estimation from circle or parallel lines [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, **29**(7): 977~985
- 11 Y. C. Shiu, C. Huang. Pose determination of circular cylinders using elliptical and side projection [C]. Proceedings of IEEE International Conference on Systems Engineering, 2003: 16~22
- 12 Zheng Yinqiang, Ma Wenjuan, Liu Yuncai. Another way of looking at monocular circle pose estimation [C]. Proceedings of International Conference on Image Processing, 2008: 86~864
- 13 Zhang Lei, Xu Kejun, Zhao Rui *et al.*. Improvement of position and orientation measurement algorithm of monocular vision based on circle features [J]. *J. HeFei University of Technology*, 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*, 2009, **32**(11): 1669~1673
- 14 Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334
- 15 Jiang Guangwen, Chao Zhichao, Fu Sihua *et al.*. High-accurate camera calibration technique based on controllable rotation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1308~1314
姜广文, 晁志超, 伏思华等. 基于可控旋转的像机高精度标定技术[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1308~1314
- 16 J. Canny. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, **8**(6): 679~698
- 17 A. W. Fitzgibbon, M. Pilu, R. B. Fisher. Direct least square fitting of ellipses [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, **21**(5): 476~480
- 18 Hao Yingming, Zhu Feng, Ou Jinjun *et al.*. Robustness analysis of pose estimation based on points [J]. *Computer Applications*, 2008, **28**(7): 1713~1717
郝颖明, 朱枫, 欧锦军等. 基于点特征的位姿测量系统鲁棒性分析[J]. *计算机应用*, 2008, **28**(7): 1713~1717
- 19 Zhu Feng, Hao Yingming, Ou Jinjun *et al.*. Influence of roll angle on robustness of P3 P pose estimation [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2008, **18**(10): 1041~1046
朱枫, 郝颖明, 欧锦军等. 横滚角对P3P位姿测量方法鲁棒性的影响分析[J]. *高技术通讯*, 2008, **18**(10): 1041~1046