

基于航天应用的多圆特征识别和姿态估计

吴 斌, 叶 东, 郭玉波, 陈 刚

哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 为了实现多圆特征识别和姿态估计,将航天器常见的几何特征如旋转体(SOR)应用于姿态估计,提出了一种基于椭圆归类的单目视觉姿态估计方法。在图像中采用基于弧段的椭圆检测方法检测目标上的椭圆特征;提出一种基于 SOR 空间圆平行性和垂直性约束的椭圆归类方法,得到合理的椭圆特征;利用这些特征估计航天器和摄像机之间的姿态。实验结果表明:该方法具有较好的椭圆归类效果和姿态估计精度,对于含有 0~16% 的椒盐噪声的仿真图,归类精确率不低于 97%;实物实验中,角度误差不超过 1°,深度方向(小于 10 m)的测量误差不超过 80 mm,其他方向的测量误差不超过 15 mm。

关键词 机器视觉; 椭圆归类; 姿态估计; 航天应用; 单目视觉

中图分类号 TP242.6 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0915004

Multiple Circle Recognition and Pose Estimation for Aerospace Applications

Wu Bin, Ye Dong, Guo Yubo, Chen Gang

School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract A novel ellipse classification and relative pose estimation algorithm is presented based on surface of revolution (SOR) for multiple-ellipse images. Firstly, the contour following method is performed on images to detect ellipses. Secondly, the meaningful ellipses are obtained based on parallel constraint and vertical constraint. Finally, relative pose between the target and the camera is calculated by the meaningful ellipses. Experimental results indicate that the method performs well in ellipse classification and pose estimation. The precision of classification is higher than 97% for synthetic images corrupted by 0-16% salt-and-pepper noise. The absolute error of the pose angle is less than 1°, and the absolute errors along the depth direction and other directions are less than 80 mm and 15 mm, respectively, when the measurement distance is less than 10 m.

Key words machine vision; classification of ellipses; pose estimation; aerospace applications; monocular vision

OCIS codes 150.0155; 120.1880; 110.5200

1 引 言

对于人造物体(特别是航天器),圆是最常见的特征之一,比如交会对接装置中的星箭对接环、火箭喷管、空间站横截面等。利用这些圆特征估计航天器的姿态,在航天任务中是非常重要的。相比于点、直线特征,圆特征具有抗遮挡能力强、特征不易受噪声影响等优点^[1]。

通过射影变换,空间圆在摄像机像平面上投影为椭圆^[2-6]。Safaei-Rad 等^[7]提出利用投影椭圆和摄像机原点形成的空间圆锥求解单个圆的空间位姿,但该方法的解具有二义性。对此,国内外做了大量研究^[8-16]。Zheng 等^[10-11]从射影几何的角度解释了姿态估计产生二义性的原因,即对于单一投影椭圆,无法确定空间圆所在平面的圆环点。Kim 等^[12]和 Jiang 等^[13]指出,若已知两个共面圆的投影椭圆,则可得到空间平面的圆

收稿日期: 2016-12-21; **收到修改稿日期:** 2017-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(51075095)

作者简介: 吴 斌(1987—),男,博士研究生,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail: wubin5652005@163.com

导师简介: 叶 东(1968—),男,博士,教授,主要从事基于串/并联结构的坐标测量理论和技术、双目/单目视觉坐标测量理论和技术方面的研究。E-mail: yedong@hit.edu.cn(通信联系人)

环点,并给出了闭合解。Chen 等^[14]提出利用三个共面非同心圆确定唯一姿态解,Wu 等^[15]通过两个平行圆进行姿态估计。苗锡奎等^[16]利用圆外一点到圆心距离不变作为约束得到唯一姿态解,这种方法需要已知一个点特征的空间三维坐标。上述方法均假定图像背景相对简单,可以直接从图像中分辨所需的投影椭圆。

实际应用中,目标物体可能存在多个圆特征,且由于噪声、光照、拍摄角度等因素影响也会存在伪椭圆。因此,需要对图像上的椭圆进行归类,选择合理的椭圆特征建立物体坐标系,进而估计目标姿态。一般而言,常见航天器(如星箭对接环、火箭喷管、空间站等)存在一种称为旋转体(SOR)的结构,这种结构上的空间圆所在的平面相互平行,且经过其圆心的直线垂直于其所在平面。基于此,本文将应用于椭圆归类中,提出了投影椭圆的平行性和垂直性约束,得到 SOR 上空间圆的投影,进而提出空间多椭圆姿态估计方法。本文算法首先对图像进行椭圆检测,然后基于提出的平行性和垂直性约束采用随机采样一致性(RANSAC)算法将椭圆归类,得到 SOR 上空间圆的投影椭圆,最后根据这些椭圆计算航天器在摄像机坐标系下的坐标。

2 椭圆检测

采用 Fornaciari 等^[17]提出的基于弧段提取的算法检测椭圆,该算法将弧段提取和归类结合,计算简单,速度非常快。首先对目标图像进行 Canny 边缘检测,将图像转化为边缘图像,然后通过梯度方向约束检测弧段,最终由这些弧段的曲率将弧段聚合生成椭圆。

3 椭圆归类

由第 2 节可检测得到图像上的椭圆,需要将这些椭圆归类,从多个干扰椭圆或者伪椭圆中区分出合理的椭圆用于姿态检测,如图 1 所示。

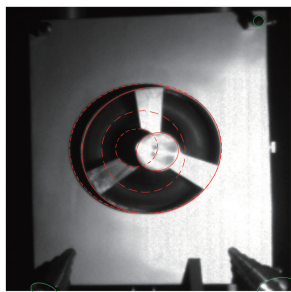


图 1 轮廓阴影产生的伪椭圆(红色虚线)、SOR 投影椭圆(红色实线)及其他椭圆(绿色实线)

Fig. 1 Fake ellipses generated by shadows (red dotted line), ellipses generated by projection of SOR (red solid line), and other ellipses (green solid line)

3.1 平行性约束

平行性约束是利用 SOR 上空间圆所在平面相互平行得到的约束条件。平行性约束条件可由两步得到:首先计算空间圆所在平面法向量,然后由空间圆和摄像机中心形成的圆锥与空间圆所在的平面相交,形成的图形在该平面上为圆,即可得到平行性约束条件。

3.1.1 平面法向量求解

SOR 上空间圆所在的平面 $\pi_i (i=0,1,\dots,n)$ 之间是相互平行的,因此 π_i 和无穷远平面 π_∞ 相交于同一条无穷远直线 L_∞ ,该无穷远直线 L_∞ 和 π_∞ 上的绝对二次曲线 Ω_∞ 相交于两个复共轭的圆环点,所以 SOR 上空间圆经过无穷远平面上的同一对复共轭圆环点。因此在像平面上,SOR 上空间圆的投影椭圆必然都经过一对复共轭点,这对点是圆环点的投影点(ICP)。

设空间圆 C_1, C_2 在像平面的投影为二次曲线 \tilde{C}_1, \tilde{C}_2 , 则 \tilde{C}_1, \tilde{C}_2 必然相交于 ICP, 即方程:

$$\begin{cases} \mathbf{X}^T \tilde{C}_1 \mathbf{X} = 0 \\ \mathbf{X}^T \tilde{C}_2 \mathbf{X} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

必然有两个复共轭的复数解。其中, \mathbf{X} 表示二次曲线上点的坐标(1)式有四个解:其中一对复共轭的复数解

是 ICP, 构成一条实数直线 \tilde{L}_∞ (无穷远直线 L_∞ 的投影); 另外一对可能是实数解也可能是复数解, 构成一条实数直线 $\tilde{\Delta}$ 。从解中选择 ICP 的原则如下^[18]:

- 1) 若 \tilde{C}_1, \tilde{C}_2 有交点, 四个解中必然有一对为复共轭复数解, 另一对为实数解, ICP 即为复共轭复数解;
- 2) 若 \tilde{C}_1, \tilde{C}_2 没有交点, \tilde{C}_1, \tilde{C}_2 总是分布在 \tilde{L}_∞ 的一侧, 且同时分布在 $\tilde{\Delta}$ 的两侧。

对于已经标定的摄像机, 可求空间圆 C_1, C_2 所在平面法线在摄像机坐标系下的坐标^[19]:

$$\mathbf{n} = [n_1 \quad n_2 \quad n_3]^T = \mathbf{K}^T \tilde{L}_\infty, \quad (2)$$

式中 \mathbf{K} 为摄像机内参矩阵。

3.1.2 平行性约束条件

摄像机中心和像面上的投影二次曲线 \tilde{C} 形成空间圆锥。设 \tilde{C} 的方程为

$$au^2 + bv^2 + cuv + du + ev + f = 0, \quad (3)$$

将投影条件 $u = f_0 x/z$ 和 $v = f_0 y/z$ (f_0 为摄像机的焦距) 代入(3)式中, 可得空间圆锥的方程为

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Exz + Fyz = 0, \quad (4)$$

式中, $A = af_0^2, B = bf_0^2, C = f_0, D = cf_0, E = df_0, F = ef_0$ 。

通过单位正交变换矩阵将摄像机坐标系 $o-xyz$ 转化为 $o-x'y'z'$, 使得 z' 轴垂直于空间圆所在平面, 如图 2 所示。单位正交变换矩阵的表达式为

$$\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1 \quad \mathbf{T}_2 \quad \mathbf{T}_3] = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{21} & t_{31} \\ t_{12} & t_{22} & t_{32} \\ t_{13} & t_{23} & t_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{n_2}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2}} & \frac{n_1 n_3}{\sqrt{(n_1 n_3)^2 + (n_2 n_3)^2 + (n_1^2 + n_2^2)^2}} & n_1 \\ \frac{-n_1}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2}} & \frac{-n_2 n_3}{\sqrt{(n_1 n_3)^2 + (n_2 n_3)^2 + (n_1^2 + n_2^2)^2}} & n_2 \\ 0 & \frac{-n_1^2 - n_2^2}{\sqrt{(n_1 n_3)^2 + (n_2 n_3)^2 + (n_1^2 + n_2^2)^2}} & n_3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中列向量 \mathbf{T}_3 是空间圆所在平面的法向量 \mathbf{n} , 列向量 \mathbf{T}_1 是与列向量 \mathbf{T}_3 正交的任意单位向量, 列向量 $\mathbf{T}_2 = \|\mathbf{T}_3 \times \mathbf{T}_1\|$ 。

将(5)式代入(4)式, 得到空间圆锥在坐标系 $o-x'y'z'$ 下的方程为

$$A'x'^2 + B'y'^2 + C'z'^2 + 2D'x'y' + 2E'x'z' + 2F'y'z' = 0, \quad (6)$$

式中

$$A' = At_{11}^2 + Bt_{12}^2 + Ct_{13}^2 + Dt_{11}t_{12} + Ft_{12}t_{13} + Et_{11}t_{13}, \quad (7)$$

$$B' = At_{21}^2 + Bt_{22}^2 + Ct_{23}^2 + Dt_{21}t_{22} + Ft_{22}t_{23} + Et_{21}t_{23}, \quad (8)$$

$$C' = At_{31}^2 + Bt_{32}^2 + Ct_{33}^2 + Dt_{31}t_{32} + Ft_{32}t_{33} + Et_{31}t_{33}, \quad (9)$$

$$D' = At_{11}t_{21} + Bt_{12}t_{22} + Ct_{13}t_{23} + \frac{1}{2}(Dt_{11}t_{22} + Dt_{12}t_{21} + Ft_{12}t_{23} + Ft_{13}t_{22} + Et_{11}t_{23} + Et_{13}t_{21}), \quad (10)$$

$$E' = At_{11}t_{31} + Bt_{12}t_{32} + Ct_{13}t_{33} + \frac{1}{2}(Dt_{11}t_{32} + Dt_{12}t_{31} + Ft_{12}t_{33} + Ft_{13}t_{32} + Et_{11}t_{33} + Et_{13}t_{31}), \quad (11)$$

$$F' = At_{21}t_{31} + Bt_{22}t_{32} + Ct_{23}t_{33} + \frac{1}{2}(Dt_{21}t_{32} + Dt_{22}t_{31} + Ft_{22}t_{33} + Ft_{23}t_{32} + Et_{21}t_{33} + Et_{23}t_{31}). \quad (12)$$

对(6)式配方可得:

$$A' \left(x' + \frac{E'z'}{A'} \right)^2 + B' \left(y' + \frac{F'z'}{B'} \right)^2 + 2D'x'y' = \frac{E'^2 z'^2}{A'} + \frac{F'^2 z'^2}{B'} - C'z'^2. \quad (13)$$

在坐标系 $o-x'y'z'$ 下, 任意平面 $z' = k$ ($k > 0$) 和圆锥的截面必然为圆, 故平行性约束为

$$A' = B' \neq 0, \quad D' = 0, \quad \frac{E'^2}{A'} + \frac{F'^2}{B'} - C' > 0. \quad (14)$$

3.2 垂直性约束

SOR 上空间圆之间的另一个几何关系是空间圆中心的连线垂直于圆所在的平面。如图 3 所示, 设空间圆 C_1, C_2 的中心为 p_1, p_2 , 对应像平面上的投影点为 \tilde{p}_1, \tilde{p}_2 , 投影点在摄像机坐标系下的坐标可直接由

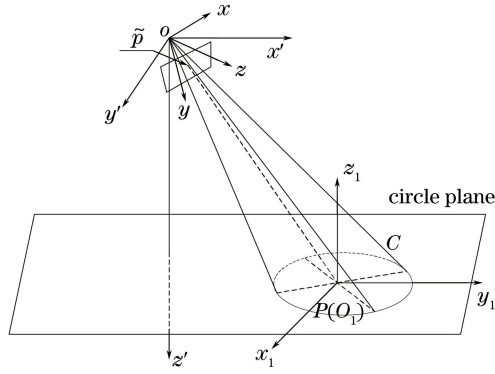


图 2 坐标系与坐标系变换

Fig. 2 Coordinate systems and their transformation

对极关系得到：

$$\tilde{\mathbf{p}}_1 = \mathbf{K}^{-1} \tilde{\mathbf{C}}_1^{-1} \tilde{\mathbf{L}}_\infty, \quad (15)$$

$$\tilde{\mathbf{p}}_2 = \mathbf{K}^{-1} \tilde{\mathbf{C}}_2^{-1} \tilde{\mathbf{L}}_\infty. \quad (16)$$

如图 3 所示, $\tilde{\mathbf{p}}_1$ 、 $\tilde{\mathbf{p}}_2$ 的反向投影直线 l_1 、 l_2 必然分别经过空间点 p_1 、 p_2 , l_1 、 l_2 相交于摄像机中心并可确定一个平面 π 。在平面 π 上, 过点 $\tilde{\mathbf{p}}_2$ 作与 L 平行的直线交 l_1 于 $\tilde{\mathbf{p}}_3$, 则 $\tilde{\mathbf{p}}_3$ 的坐标为 $\tilde{\mathbf{p}}_3 = \lambda \tilde{\mathbf{p}}_1$ ($\lambda \neq 0$), 则必然存在 λ 使得向量 $\tilde{\mathbf{p}}_3$ 垂直于圆所在的平面, 可得：

$$(\tilde{\mathbf{p}}_3 - \tilde{\mathbf{p}}_2) \parallel \mathbf{n}. \quad (17)$$

设 $\tilde{\mathbf{p}}_1$ 、 $\tilde{\mathbf{p}}_2$ 的坐标分别为 $\tilde{\mathbf{p}}_1 = [\tilde{p}_{11} \ \tilde{p}_{12} \ \tilde{p}_{13}]^T$ 、 $\tilde{\mathbf{p}}_2 = [\tilde{p}_{21} \ \tilde{p}_{22} \ \tilde{p}_{23}]^T$, 代入(17)式可得：

$$\frac{\lambda \tilde{p}_{11} - \tilde{p}_{21}}{n_1} = \frac{\lambda \tilde{p}_{12} - \tilde{p}_{22}}{n_2} = \frac{\lambda \tilde{p}_{13} - \tilde{p}_{23}}{n_3} = c, \quad (18)$$

式中 c 为常数。

故垂直性约束条件为

$$\begin{cases} \tilde{p}_{11} n_2 - \tilde{p}_{12} n_1 \neq 0 \\ \tilde{p}_{11} n_3 - \tilde{p}_{13} n_1 \neq 0 \\ \tilde{p}_{13} n_3 - \tilde{p}_{13} n_2 \neq 0 \\ \frac{\tilde{p}_{21} n_2 - \tilde{p}_{22} n_1}{\tilde{p}_{11} n_2 - \tilde{p}_{12} n_1} = \frac{\tilde{p}_{21} n_3 - \tilde{p}_{23} n_1}{\tilde{p}_{11} n_3 - \tilde{p}_{13} n_1} = \frac{\tilde{p}_{22} n_3 - \tilde{p}_{23} n_2}{\tilde{p}_{12} n_3 - \tilde{p}_{13} n_2} \end{cases}. \quad (19)$$

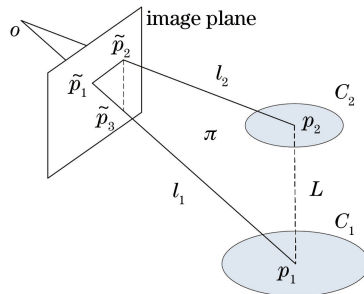


图 3 垂直性约束

Fig. 3 Vertical constraint

3.3 椭圆归类

基于前文所述平行性约束与垂直性约束, 采用 RANSAC 算法将图像上的椭圆归类, 从而得到 SOR 上空间圆的投影椭圆。设图像上检测到的椭圆集为 e_i ($i=1, 2, \dots, n$), 则 RANSAC 算法可归纳为: 从集合 e_i 中随机选择一对椭圆, 检测其是否满足平行性约束条件[(14)式]和垂直性约束条件[(19)式], 如果同时满足

两个约束条件,将这对椭圆作为内点。重复这个过程直到内点中椭圆的个数超过设定的阈值 T_{size} ,或者采样次数超过设定的阈值 T_{sam} 。RANSAC 算法中比较重要的参数有最大采样次数 T_{sam} 和最大一致集大小 T_{size} 。

最大采样次数 T_{sam} 定义如下。设从集合 e_i 中任意采样一对椭圆,这对椭圆是内点的概率为 p_{in} ,则从集合 e_i 中采样 n 次,在这 n 次采样中至少有一次是内点的概率为

$$p_n = 1 - [1 - (1 - p_{in})^2]^n, \quad (20)$$

则采样次数至少为

$$n = \frac{\lg(1 - p_n)}{\lg[1 - (1 - p_{in})^2]} T_{sam}, \quad (21)$$

p_{in} 一般由经验估计得到,设集合 e_i 中元素个数为 N_{e_i} ,其中内点的个数为 N_{in} ,则(21)式中 $p_{in} = C_{N_{in}}^2 / C_{N_{e_i}}^2$ 。 p_n 可自行根据实际情况选择,一般对于精度要求较高的系统, p_n 可取 0.99。

最大一致集大小和估计的 p_{in} 有关, $T_{size} = p_{in} \cdot N_{e_i}$ 。

4 姿态估计

如图 2 所示,航天器坐标系原点建于航天器底部的圆上,该圆所在的平面为 $O_1-x_1y_1$, z_1 轴垂直于该平面。因此,航天器的姿态可由航天器坐标系相对于摄像机坐标系的旋转矩阵和平移矩阵表示。

4.1 旋转矩阵和姿态角

仅考虑圆特征,可以确定物体平面的法线向量。通过两个空间圆投影在像平面形成的椭圆能够得到空间圆所在平面法线在摄像机坐标系下的坐标(3.1.1 节)。设 SOR 真实的平面法线向量为 $\tilde{\mathbf{n}}$,理论上由 SOR 上任意一对平面计算得到的平面法向量 $\mathbf{n}_i = [a_i \ b_i \ c_i]^T$ 和 $\tilde{\mathbf{n}}$ 相同,即:

$$\tilde{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{n}_i = \|\tilde{\mathbf{n}}\| \|\mathbf{n}_i\| \cos \theta = 1, \quad (22)$$

式中 θ 为偏航角。实际上由于误差的存在, \mathbf{n}_i 和 $\tilde{\mathbf{n}}$ 不完全相同,故问题可转化为最小二乘问题:

$$\min \|\mathbf{N}\tilde{\mathbf{n}} - \mathbf{b}\|, \quad (23)$$

式中 \mathbf{N} 是由 m 对椭圆得到的平面法向量组成的系数矩阵, \mathbf{b} 是 m 维列向量,

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_m & b_m & c_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

利用奇异值分解(SVD)能够方便地求出(23)式的最小二乘解^[19]。

因此,旋转矩阵可取为

$$\mathbf{b} = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \tilde{\mathbf{n}}], \quad (25)$$

式中列向量 \mathbf{r}_1 可取与 $\tilde{\mathbf{n}}$ 正交的任意单位向量,列向量 $\mathbf{r}_2 = \tilde{\mathbf{n}} \times \mathbf{r}_1$ 。

由得到的物体平面的法线向量 $\tilde{\mathbf{n}}(n_x, n_y, n_z)$ 可以计算出俯仰角 ϕ 和偏航角 θ ^[16] 分别为

$$\phi = \arctan \frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}, \quad (26)$$

$$\theta = \arctan \frac{n_y}{n_x}. \quad (27)$$

4.2 平移向量

若目标物体的几何尺寸信息未知,仅可以获得平移的方向。如图 4 所示,该空间圆所在平面和像平面之间的变换关系是平面射影变换:

$$s\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{P}\mathbf{X} = \mathbf{K} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

式中 s 为非零标量。将平面上空间圆中心的齐次坐标 $[0 \ 0 \ 1]$ 代入可得:

$$d\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}t, \quad (29)$$

式中 $\tilde{\mathbf{p}}$ 为空间圆中心在像平面上的投影,故可得平移向量的方向为

$$\mathbf{t}_{\text{dir}} = \|\mathbf{K}^{-1}\tilde{\mathbf{p}}\|. \quad (30)$$

若已知这个空间圆的半径为 R ,则由(13)式可得:

$$z' = \pm \sqrt{\frac{R^2}{\frac{E'^2}{A'^2} + \frac{F'^2}{B'^2} - C'}}, \quad (31)$$

由于物体总是位于摄像机前,故(31)式取正号。

如图 2 所示,空间圆中心的投影点 \tilde{p} 在坐标系 $o-x'y'z'$ 下的坐标为

$$\tilde{\mathbf{p}}' = \mathbf{T}\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{T}\mathbf{K}^{-1}\tilde{\mathbf{C}}^{-1}\tilde{\mathbf{L}}_{\infty}. \quad (32)$$

因此,在坐标系 $o-x'y'z'$ 下由点 o 和点 \tilde{p} 构成的直线和 z' 轴的夹角 α 满足方程:

$$\cos \alpha = \frac{\tilde{\mathbf{p}}' \cdot [0 \ 0 \ 1]^T}{\|\tilde{\mathbf{p}}'\|}. \quad (33)$$

由(31)式和(33)式可得摄像机原点 o 和空间圆中心 p 的几何距离为

$$d = \frac{\|\tilde{\mathbf{p}}'\| \sqrt{R^2}}{\tilde{\mathbf{p}}' \cdot [0 \ 0 \ 1]^T \sqrt{\frac{E'^2}{A'^2} + \frac{F'^2}{B'^2} - C'}}, \quad (34)$$

则可得物体坐标系到摄像机坐标系的平移向量为

$$\mathbf{t} = d\mathbf{t}_{\text{dir}}. \quad (35)$$

5 实验结果

5.1 仿真实验

为验证本文算法的有效性,建立了基于 Matlab 算法的仿真系统。摄像机分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,焦距为 10.02 mm ,主点位置为 $(1005.07, 1029.84)$,像元大小为 $0.015 \text{ mm} \times 0.015 \text{ mm}$ 。仿真计算机系统为 Core i7-860。

仿真目标设计为:目标物体坐标系的原点位于 SOR 最底层圆中心, z 轴为 SOR 的对称轴并且指向 SOR 顶层方向。设 SOR 自下向上第 i 个空间圆 C_i 的半径为 r_i ,在 C_i 上均匀取 360 个点,则这些点在物体坐标系下的坐标为 $\mathbf{X}_j = [r_i \cos \theta_j \ r_i \sin \theta_j \ z_i]^T, j = 0^\circ, 1^\circ, \dots, 359^\circ$ 。设物体坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移矩阵分别为 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} ,则 SOR 中空间圆上的点在摄像机像平面上的投影点为 $\tilde{\mathbf{X}}_j = \mathbf{R}\mathbf{X}_j + \mathbf{T}$ 。然后,在像平面上随机生成 n 个任意参数的噪声椭圆,即可得到仿真图像。图 4(a)为 SOR 上的空间圆,图 4(b)为其在图像上的投影,图 4(c)为加入干扰圆和 8%椒盐噪声后的图像。

定义姿态角的误差为 $(\Delta\varphi, \Delta\theta) = (\varphi - \hat{\varphi}, \theta - \hat{\theta})$,其中 $\hat{\varphi}, \hat{\theta}$ 为真值 φ, θ 的估计值。定义平移矩阵的误差为 $(\Delta T_x, \Delta T_y, \Delta T_z) = (T_x - \hat{T}_x, T_y - \hat{T}_y, T_z - \hat{T}_z)$,其中 $\hat{\mathbf{T}}$ 是真值 \mathbf{T} 的估计值。考虑到真实物体尺寸,各参数选择如下:空间圆半径在 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ 范围内随机选择,每个相邻的空间圆沿 z 轴方向,距离在 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}$ 范围内随机选择。为使物体全部呈现在像平面内,平移量 T_z 在 $1.3 \sim 10 \text{ m}$ 范围内取值,平移量 T_x, T_y 在 $-0.5 \sim 0.5 \text{ m}$ 范围内取值。

5.1.1 椭圆归类算法性能仿真

随机生成 m 个 SOR 上的空间圆,将其投影到图像中,并在图像中加入 m 个噪声椭圆。在 $m = \{4, 6, 8, 12\}$ 的图像中分别加入参数为 $\sigma = \{0, 4\%, 8\%, 12\%, 16\%\}$ 的椒盐噪声,共生成 20 组图像,每组随机生成 100 幅图像。通过检测精确率评价归类算法的性能,对 100 幅噪声相同、 m 相同的图像取平均值。结果如表 1 所示。当噪声为 0 时,归类算法的精确率为 100%,不随数量 m 的增加而产生误差;当存在噪声时,归类算法的

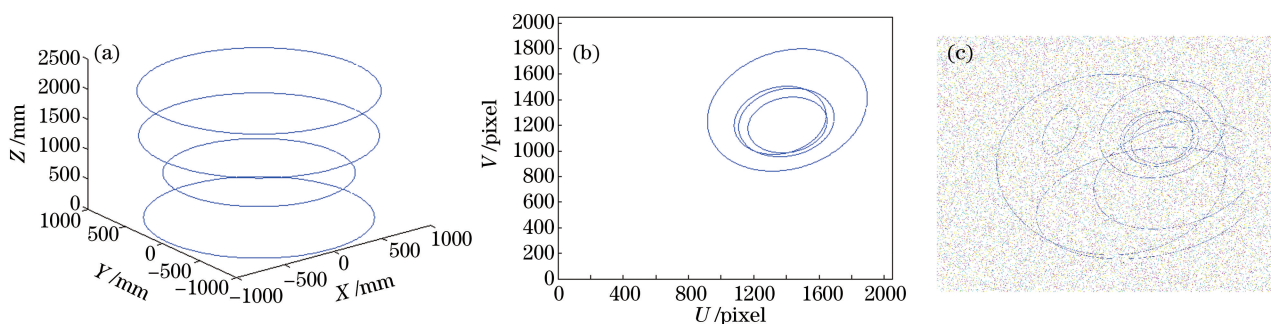


图 4 (a) SOR 上的 4 个空间圆;(b)空间圆在图像上的投影;(c)添加 4 个随机干扰椭圆以及 8%椒盐噪声后的图像

Fig. 4 (a) Four space circles of SOR; (b) imaging of the space circle; (c) image with four random ellipses as well as 8% salt and pepper noise

精确率反比于噪声和 m 的大小,随着噪声或 m 的增加而减小,但精确率不低于 97%。图 5 所示为一些仿真图及其归类效果。

表 1 归类精确率

Table 1 Precision of classification

m	Precision				
	$\sigma=0$	$\sigma=4\%$	$\sigma=8\%$	$\sigma=12\%$	$\sigma=16\%$
4	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
6	1.000	1.000	1.000	0.993	0.987
8	1.000	1.000	0.988	0.984	0.979
12	1.000	1.000	0.986	0.983	0.975

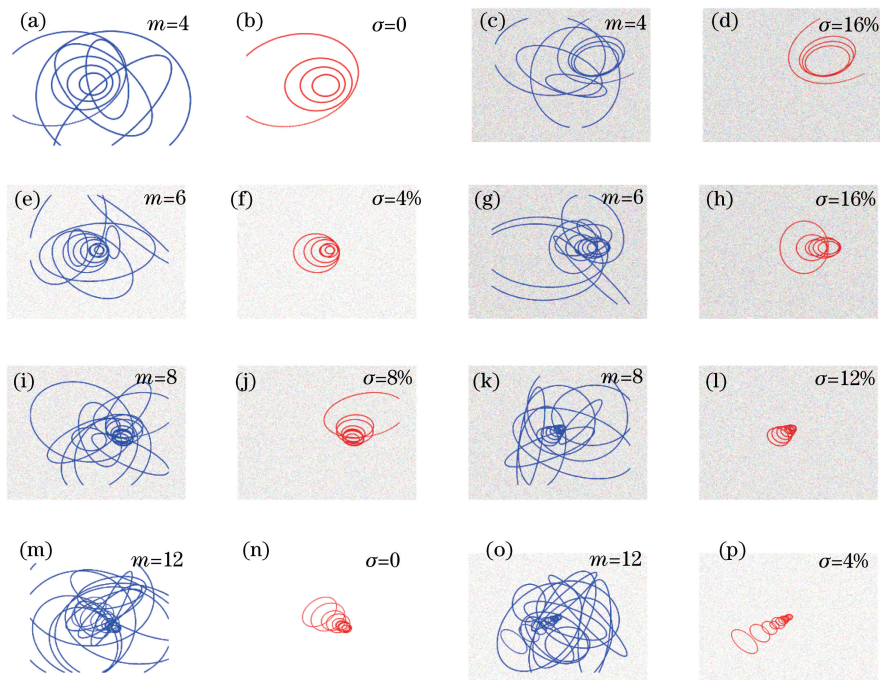


图 5 仿真图(蓝色)和处理结果(红色)举例

Fig. 5 Examples of simulation (blue) and classification results (red) for synthetic images

5.1.2 姿态估计算法仿真

图 6 所示为噪声 $\sigma=4\%$, $m=8$ 时,不同距离下姿态估计误差的变化情况。由图可知,估计误差正比于测量距离。这是因为随着测量距离增大,物体在像面上的分辨率变低,细节变差。角度误差不超过 0.25° , 平移误差不超过 5 mm。表 2 所示为图 5(e)的测量结果。

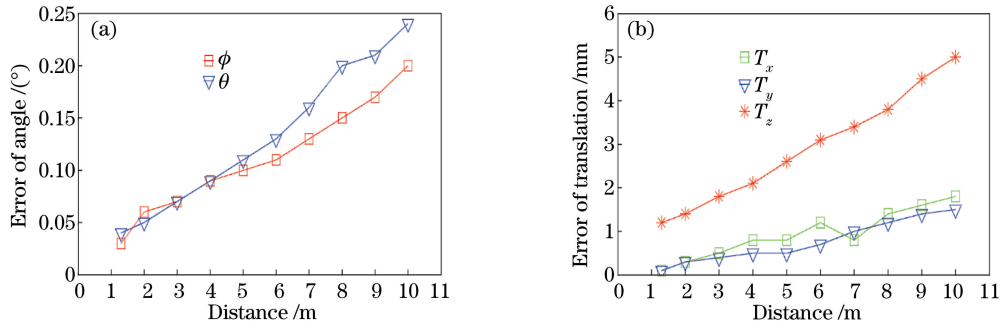


图 6 姿态估计误差与距离的关系。(a)角度误差;(b)平移误差

Fig. 6 Pose estimation error as a function of distance. (a) Error of angle; (b) error of translation

表 2 仿真图像姿态计算结果

Table 2 Pose estimation results for synthetic images

Pose parameter	Real	Estimated	Error
T_x /mm	120	119.214	0.786
T_y /mm	-120	-121.342	1.342
T_z /mm	5000	4997.476	2.524
\mathbf{n}	$[-0.0125 \ -0.2737 \ 0.9617]$	$[-0.0114 \ -0.2732 \ 0.9626]$	$[-0.0011 \ -0.0005 \ -0.0009]$
Φ /($^\circ$)	74.098	74.142	-0.044
θ /($^\circ$)	87.385	87.611	-0.226

5.2 实物实验

为了验证本文算法在实际应用中的效果,设计了模拟太空环境中航天器运动姿态的实物实验。如图 7 所示,实物实验设备包含卫星模型、嵌入式姿态测量系统、运动系统和标定系统。嵌入式系统集成成了光学摄像机以及现场可编程门阵列(FPGA, A3PE1500-FG676, Actel, 美国)和数字信号处理器(DSP, TMS320C6672, TI, 美国)计算模块,可完成所有的图像采集和计算功能,摄像机参数见 5.1 节。卫星模型与真实卫星的比例为 1:2,按此比例加工,加工精度为 0.01 mm,其主体为 1 m×1 m×1 m 的立方体,喷管直径为 125 mm(小圆),对接环直径为 450 mm(大圆)。运动系统可提供 6 个自由度的相对运动,利用包含全站仪的测量系统测量相对运动的实际姿态值。实验系统与卫星模型如图 7 所示。

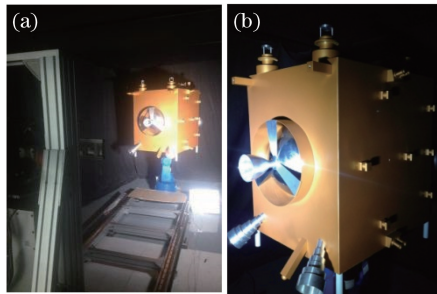


图 7 (a)实物实验系统;(b)卫星模型

Fig. 7 (a) Experimental system; (b) satellite mockup

实验中,由于运动系统深度方向可提供的运动范围为 0.1~15 m,故实验设计深度为 0.5~10 m,每隔 0.5 m 进行一组定点测量,每组位置在相机可见目标范围内随机选择 20 个位置进行测量(角度范围为 $0^\circ \sim 60^\circ$, x 、 y 方向平移范围为 0~500 mm),共有 400 个位置,每组测量的最大误差作为这组的精度。图 8(a)和 8(b)是距离为 2 m 时,从实际图像中提取的椭圆特征以及分类效果;图 8(c)和 8(d)是距离为 4 m 时,从实际图像中提取的椭圆特征以及分类效果。表 3 为图 8(c)的测量结果。实验结果如图 9 所示。图 9(a)为姿态角误差在不同距离下的变化情况,图 9(b)为平移量误差在不同距离下的变化情况。由图 9 可知,不同于仿真实验,实物姿态测量误差总体随测量距离的增大而增大,但是当测量距离小于 1.5 m 时,测量误差反而变

大。这是因为在这个距离内,卫星模型不能完全地呈现在摄像机视场内,并且距离太近会导致噪声边缘过多,降低了椭圆检测精度。

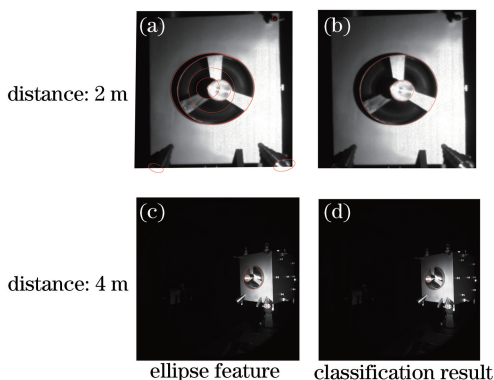


图 8 真实图及处理结果

Fig. 8 Real images and classification results

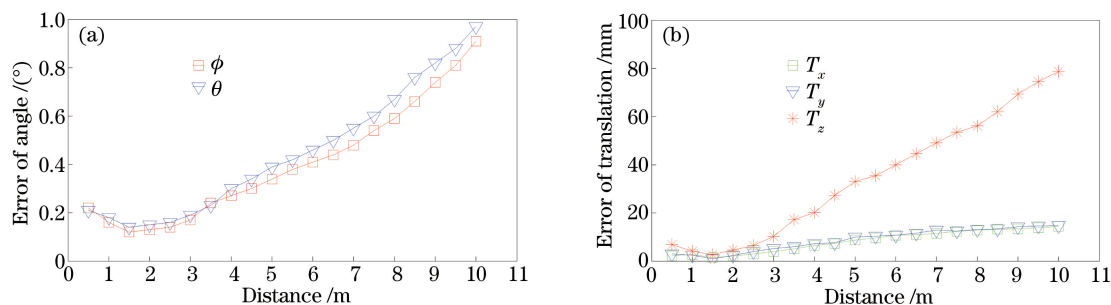


图 9 姿态估计误差与距离的关系。(a)角度误差;(b)平移误差

Fig. 9 Pose estimation error as a function of distance. (a) Error of angle; (b) error of translation

表 3 实际姿态计算结果

Table 3 Pose estimation results for real images

Pose parameter	Real	Estimated	Error
T_x /mm	687.526	686.346	1.180
T_y /mm	-33.988	-35.715	1.727
T_z /mm	1080.440	1077.570	2.870
n	$[-0.9837 \ 0.0439 \ -0.1743]$	$[-0.9659 \ 0.0421 \ -0.1733]$	$[-0.0178 \ 0.0018 \ -0.0010]$
Φ /($^\circ$)	-10.038	-10.162	0.124
θ /($^\circ$)	-2.555	-2.496	-0.059

图 10 为其他角度和位置参数固定时姿态角误差随着姿态角度变化的情况。图 10(a)表明当测量距离为 6 m, x 、 y 方向位移均为 100 mm,偏航角为 0° ,俯仰角从 0° 变化到 60° 时,俯仰角误差随着俯仰角度的增加而增大,而偏航角误差有略微增大的趋势。图 10(b)表明当测量距离为 6 m, x 、 y 方向位移均为 100 mm,俯仰角为

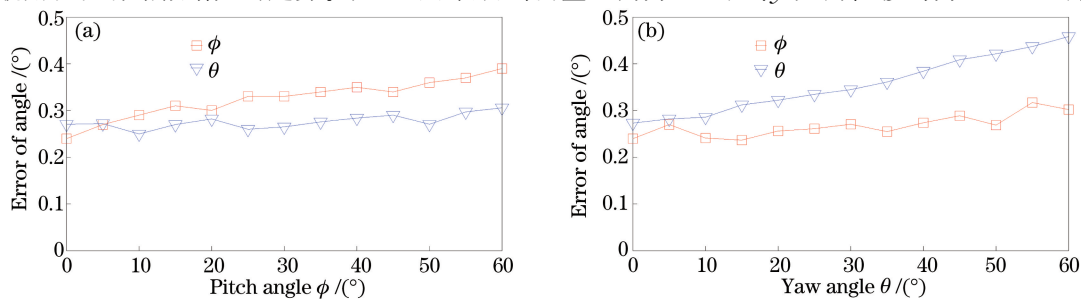


图 10 姿态角估计误差与角度的关系。(a)俯仰角;(b)偏航角

Fig. 10 Estimation errors of pose angles. (a) Pitch angle; (b) yaw angle

0°,偏航角从0°变化到60°时,偏航角误差随偏航角度的增加而增大,而俯仰角误差有略微增大的趋势。

实验表明:对于本文设计的实物实验,在测量距离为0.5~10 m范围内,都可以很好地得到SOR上空间圆的投影用于姿态计算。由图9可知,在测量距离小于10 m时,姿态角误差不超过1°,深度方向的平移量误差不超过80 mm,非深度方向的平移量误差不超过15 mm。

6 结 论

针对多圆目标,提出一种基于SOR特征归类的多圆姿态估计方法。该方法可从图像上众多椭圆中得到SOR上空间圆的投影椭圆,并利用这些椭圆估计目标姿态。首先依据SOR上空间圆的约束对图像上的投影椭圆进行归类,然后基于这些椭圆特征估计目标的姿态。实验表明,该方法具有良好的归类效果和姿态估计精度。在实物实验中,距离在10 m内姿态估计角度误差不超过1°,深度方向位置误差不超过80 mm,非深度方向位置误差不超过15 mm。

参 考 文 献

- [1] Gurdjos P, Sturm P, Wu Y. Euclidean structure from $N \geq 2$ parallel circles: theory and algorithms[C]. European Conference on Computer Vision, 2006, 3951: 238-252.
- [2] Eberli D, Scaramuzza D, Weiss S, *et al.* Vision based position control for MAVs using one single circular landmark[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 61: 495-512.
- [3] Wang W, Guan F, Ma S, *et al.* Measurement system of gear parameters based on machine vision[J]. Measurement and Control, 2015, 48(8): 242-248.
- [4] Xu G, Li X, Su J, *et al.* Circle recognition and parameter measurement methods with the similarity constraint on the slope curve of the tangent lines to a contour[J]. Optik, 2013, 124(16): 2463-2467.
- [5] Chen Z, Huang J B. A vision-based method for the circle pose determination with a direct geometric interpretation[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 2000, 15(6): 1135-1140.
- [6] 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.
- [7] Safaei-Rad R, Smith K C, Benhabib B, *et al.* An analytical method for the 3D-location estimation of circular features for an active-vision system[C]. IEEE International Conference on Systems, 1990: 215-220.
- [8] Huang B, Sun Y, Zhu Y, *et al.* Vision pose estimation from planar dual circles in a single image[J]. Optik, 2016, 127(10): 4275-4280.
- [9] Lu J, Xia M, Li W, *et al.* 3D location estimation of underwater circular features by monocular vision[J]. Optik, 2013, 124(23): 6444-6449.
- [10] Zheng Y, Ma W, Liu Y. Another way of looking at monocular circle pose estimation[C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2008: 861-864.
- [11] Zheng Y, Liu Y. Camera calibration using one perspective view of two arbitrary coplanar circles[J]. Optical Engineering, 2008, 47(6): 587-601.
- [12] Kim J S, Gurdjos P, Kweon I S. Geometric and algebraic constraints of projected concentric circles and their applications to camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(4): 637-642.
- [13] Jiang G, Quan L. Detection of concentric circles for camera calibration[C]. 10th IEEE International Conference on Computer Vision, 2005: 333-340.
- [14] Chen X, Zhao Y. The projected circle centres and polar line for camera self-calibration[J]. Optik, 2015, 126(20): 2565-2570.
- [15] Wu Y, Zhu H, Hu Z, *et al.* Camera calibration from the quasi-affine invariance of two parallel circles[C]. European Conference on Computer Vision, 2004, 3021: 190-202.
- [16] 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. 基于火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.

- [17] Fornaciari M, Prati A, Cucchiara R. A fast and effective ellipse detector for embedded vision applications[J]. Pattern Recognition, 2014, 47(11): 3693-3708.
- [18] Colombo C, Del B A, Pernici F. Metric 3D reconstruction and texture acquisition of surfaces of revolution from a single uncalibrated view[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(1): 99-114.
- [19] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.