0254-6124/2011/31(4)-527–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Yao Rongbin, Ding Shangwen, Li Shengquan, Fan Bing, Li Qiang. Measure for relative position and pose of RVD spacecrafts based on trinocular vision method. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(4): 527-533

基于三目视觉的航天器交会对接位姿测量方法研究*

姚荣斌[1,2] 丁尚文[3] 李生权[4] 范 兵[2] 李 强[2]

1(南京大学近代声学教育部重点实验室 南京 210008)

2(连云港师范高等专科学校自然科学系 连云港 222006)

3(南京航空航天大学自动化学院 南京 210016)

4(南京航空航天大学 飞行器结构力学与控制教育部重点实验室 南京 210016)

摘 要 随着载人航天和宇宙空间站的不断发展, 航天器自主对接技术显得日趋重要. 在航天器对接的最后逼近阶段, 实时精确测量两航天器间的相对位置姿态参数是对接成功的关键. 针对航天器交会对接中位置姿态参数的测量问题, 研究了三目视觉的非线性测量方法, 阐述三目视觉的测量原理并建立数学模型, 将相对位姿参数求解问题转化为非线性优化问题, 进而利用 Levenberg-Marquardt 算法求解. 仿真研究表明, 与双目视觉线性方法和三目视觉线性方法相比, 该方法能降低图像匹配误差的影响, 提高特征点的定位精度, 增加测量系统的可靠性.

关键词 三目视觉, 交会对接, 相对位置姿态测量, 航天器

中图法分类号 V 556. 3

Measure for Relative Position and Pose of RVD Spacecrafts Based on Trinocular Vision Method

YAO Rongbin[1,2] DING Shangwen[3] LI Shengquan[4] FAN Bing[2] LI Qiang[2]

1(*Key Laboratory of Modern Acoustics, Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing* 210008)

2(*Natural Science Department of Lianyungang Teachers College, Lianyungang* 222006)

3(*Astronautics College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing* 210016)

4(*Ministry of Education Key Laboratory of Aircraft Structural Mechanics and Control, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing* 210016)

Abstract With the continuous development of Manned spaceflight and space station, autonomous spacecraft Rendezvous and Docking Technique becomes more important. During the spacecraft's final approach phase of Rendezvous and Docking (RVD), real-time accurate measurement of the relative position and orientation parameters between the two spacecrafts is the key to success. For Rendezvous and Docking spacecrafts position and orientation parameters of the process of measurement problems, a trinocular measurement method was used. This paper not only prescribed the measuring principle

* 国家自然科学基金重点项目 (50830207), 国家自然科学基金面上项目 (50745101) 和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (CX10B_096Z) 共同资助

2010-01-12 收到原稿, 2011-03-05 收到修定稿

E-mail: dsw3403221981@126.com

of trinocular, but also established a non-linear mathematical model based on trinocular vision. To solve relative position and pose of RVD spacecrafts based on trinocular vision method, the non-linear mathematical model was transferred into a non-linear optimization problem; and was completed by Levenberg-Marquardt algorithm. Experiments with simulated data show that compared with linear methods of binocular vision and trinocular, this non-linear trinocular method can reduce the impact on the image matching error, meanwhile improve the located positioning accuracy of feature points and increase the reliability of measurement system.

Key words Trinocular vision, Rendezvous and Docking (RVD), Relative position and attitude, Spacecrafts

1 引言

视觉测量在航天器相对位置和姿态参数测量中具有重要作用, 相关研究不断深入 [1−6]. 就摄像机个数而言, 基于视觉的相对位姿测量方法可分为单目、双目和多目视觉测量法. 其共同点是在追踪航天器上安装摄像机, 用于测量交会航天器间的相对位姿参数; 在目标航天器上设置光标点, 即将航天器间的相对位姿参数求解问题转化为合作目标间的视觉测量问题. 单目视觉 [7−8] 测量由于本身无法通过像点确定光标点的深度, 通常采用非线性算法, 因此初始值估计的准确程度将直接影响测量的实时性和准确性. 双目视觉测量方法 [9] 通过像点匹配克服了单目视觉无法确定光标点深度的问题, 并提出了线性算法, 其难点在于图像匹配问题, 特征像点的定位匹配误差精度是决定线性算法的关键环节. 三目视觉 [10] 测量使用了距离差平方和的方法, 降低了特征像点的定位匹配误差, 其使用线性算法求解航天器间的相对位姿, 忽略了由于受图像噪声影响, 旋转矩阵不具有正交性所造成的较大误差等情况.

针对以上不足, 运用三目视觉非线性方法来测量两航天器间的相对位姿参数, 利用正交矩阵本身所固有的性质, 建立非线性算法, 可以克服旋转矩阵由于受图像噪声影响不具有正交性所造成的较大误差等缺陷.

2 测量原理

2.1 坐标系

如图 1 所示, 建立如下 4 个坐标系.

(1) 目标航天器坐标系 $Oxyz$, 简称 (O) 系: 该坐标系原点定义在 4 个目标特征光点的几何中心上, 4 个特征点 A_1, A_2, A_3, A_4 构成正方形, x 轴由 A_4 指向 A_2; y 轴由 A_3 指向 A_2; z 轴与 x, y 轴构成右手系.

(2) 追踪航天器坐标系 $O'x'y'z'$, 简称 (O') 系: 原点在追踪航天器的质心, 坐标轴的指向可根据追踪航天器的几何形状确定, 且符合右手系, 三台摄像机与追踪器固联.

(3) 摄像机坐标系 $C_1(x_{c1}y_{c1}z_{c1})$, 简称 (C_1) 系: 原点 C_1 定义为投影透镜的中心, x_1 轴与 y_1 轴分别与像片的横方向和纵方向平行, z_1 轴为主光轴方向, 三轴构成右手坐标系; 第 2 台和第 3 台摄像机也安装在追踪航天器上, (C_2) 和 (C_3) 系的建系方法与 (C_1) 系类似. 假设三台摄像机相互位姿已标定.

(4) 摄像机 C_1 的像平面像素坐标系 $I_1(uv)$, 简称 (I_1) 系: 原点 I_1 位于图像平面左上角 (0,0) 处; u 轴与 v 轴分别平行于图像像素的行数和列数; 图像中心点 O_1 的坐标为 (u_0, v_0); 摄像机 C_2, C_3 的像平面像素坐标系 $I_2(u, v)$, $I_3(u, v)$ 系的建系方法与 (I_1) 系类似.

2.2 三目视觉测量原理

如图 2 所示, 受摄像机标定误差、像点的定位匹配误差等影响, 三条直线 $O_{c1}P_1, O_{c2}P_2$ 和 $O_{c3}P_3$ 不能准确地交于空间点 P, 而是分别两两相交于空间三点 P_1, P_2 和 P_3.

P 点在 (O') 系下坐标为 $P(x'y'z')$, 其对应的估计值 P' 应满足到三点 P_1, P_2, P_3 距离的和最小, 由算术平均数的距离差平方和 [10] 原理得到

$$P' = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3}.$$

假设特征光点 A_i 在 (O) 系下坐标为 $A_i(x_i, y_i, z_i)$,

其在 O' 系下的估计值记为 A'_i, 对应的在 O' 系下的理想值记为 $\tilde{A}_i$, 且 $\tilde{A}_i = \boldsymbol{R}A_i + \boldsymbol{t}$, 估计值 A'_i 和理想值 $\tilde{A}_i$ 的误差函数为

$$f(\boldsymbol{R},\boldsymbol{t}) = \sum_{i=1}^{4} \|A'_i - \tilde{A}_i\|^2.$$

由于旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 是正交矩阵, 将旋转矩阵正交性质与误差函数联系起来, 它们之间满足目标函数:

$$f(\boldsymbol{R},\boldsymbol{t}) = \sum_{i=1}^{4} \|A'_i - \tilde{A}_i\|^2 + \sum_{j=1}^{3} \lambda_j (\boldsymbol{r}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_j - 1)^2 + 2\lambda_4(\boldsymbol{r}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_2)^2 + 2\lambda_5(\boldsymbol{r}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_3)^2 + 2\lambda_6(\boldsymbol{r}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_3)^2. \tag{1}$$

其中, $(\boldsymbol{R},\boldsymbol{t})$ 是 (O) 系相对 O' 系的旋转矩阵、平移矢量; $\boldsymbol{r}_i$ $(i = 1,2,3)$ 表示旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的第 i 列. 为了满足惩罚因子 $\boldsymbol{r}_j^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_j - 1 = 0$ 和 $\boldsymbol{r}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_j = 0$, λ_i 必须取足够大的数 [11](本文取 $\lambda_i = 100$). 一般情况下, 非线性数值优化算法不能保证一定收敛, 初始值选取的优劣通常决定着算法能否最终收敛. 如果选择不当可能导致局部最小值在有限的时间内根本不收敛. 因此, 需要重点考虑迭代初始值的选取问题.

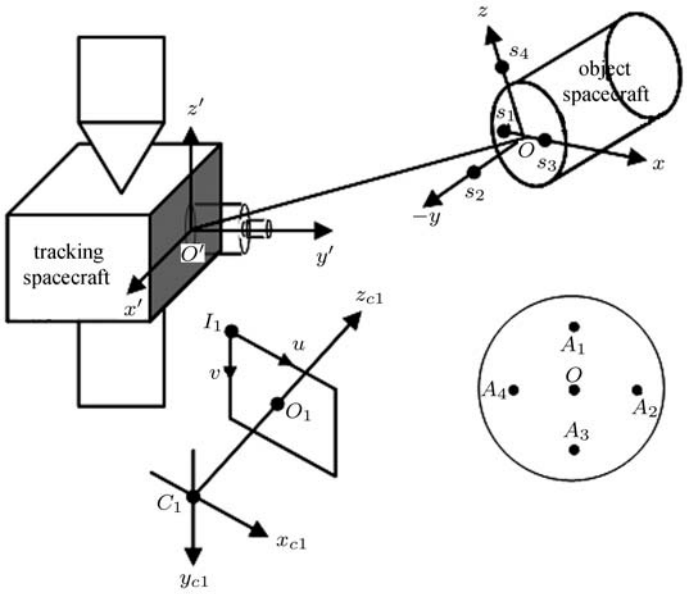


图 1 坐标系的建立

Fig. 1 Establishment of the coordinate system

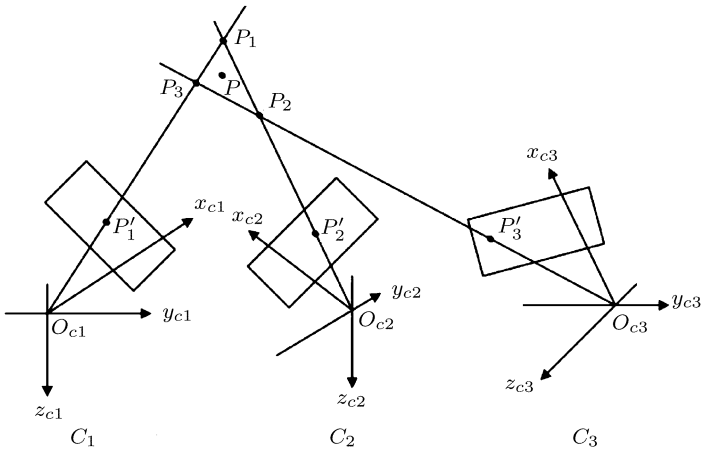


图 2 三目视觉定位

Fig. 2 Trinocular vision positioning

2.3 最优化算法

式 (1) 的最小化问题为非线性优化问题, 可以利用许多非线性优化算法求解. 这些算法通常受目标函数 $f(\boldsymbol{R},\boldsymbol{t})$ 的 Hessian 矩阵 $\boldsymbol{\nabla}_x\boldsymbol{\nabla}_x^{\mathrm{T}}f(\boldsymbol{R},\boldsymbol{t})$ 在最小点附近的条件数和初始值估计两个因素影响. 传统的 Guass-Newton 方法是局部收敛的, 通常要求初始值靠近全局极小值点. 另外要求 Fisher 信息矩阵条件较好才能保证迭代收敛.

信赖域方法 (Levenberg-Marquardt) [7,11] 是一种较优的非线性算法, 不仅承袭了牛顿法的快速收敛性优点, 还能够保证算法的总体收敛. 信赖域的数学模型如下:

$$\begin{aligned}\min q^k(\boldsymbol{s}) =& f(x_k)+\boldsymbol{g}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s}+\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{s},\\ \Omega_k =& \{x\|s\|\leqslant h_k\}.\end{aligned}\tag{2}$$

其中, $\boldsymbol{s}=x-x_k$, $\|s\|$ 为 2–范数, $\boldsymbol{g}_k=\boldsymbol{\nabla}f(x_k)$, $\boldsymbol{B}_k$ 表示 $f(x)$ 的 Hessian 矩阵 $\boldsymbol{\nabla}^2f(x_k)$, 参数 h_k 代表信赖域半径, 其大小取决于二次型 $q_k(\boldsymbol{s})$ 在以点 x_k 为中心, h_k 为半径的领域内对 $f(x)$ 的拟合程度, 其对 $f(x)$ 拟合程度用 $r_k=\Delta f/\Delta q_k$ 来衡量. 为了对 $f(\boldsymbol{R},\boldsymbol{t})$ 求最优值, 将信赖域算法列出.

第一步 初始化, 给出 x_0, 令 $h_0=\|g_0\|$, $k=0$.

第二步 任意 $k>0$.

①利用 x_k 和 h_k, 计算得到 $\boldsymbol{g}_k$ 和 $\boldsymbol{B}_k$; 若 $\|g_k\|<\varepsilon$, 停止.

②利用式 (2) 求出 s_k.

③分别求出 $f(x_k+s_k)$ 和 r_k 的值.

④若 $r_k<0.25$, 置 $h_{k+1}=\|s_k\|/4$; 若 $r_k<0.75$ 和 $\|s_k\|=h_k$, 置 $h_{k+1}=2h_k$. 否则, 令 $h_{k+1}=h_k$.

⑤若 $r_k\leqslant 0$, 置 $x_{k+1}=x_k$, 否则, 置 $x_{k+1}=x_k+s_k$

第三步 令 $k=k+1$, 转第二步.

信赖域方法虽然在理论上具有理想的全局收敛性, 但是在计算目标函数的 Hessian 矩阵时, 会产生截断误差, 因而会影响收敛速度和收敛结果, 其收敛结果精度也与初值的选取有较大关系.

3 位姿初始值的选取

对于数值迭代算法, 初始估值的选取对迭代的收敛性和收敛速度具有十分重要的作用. 采用 Qian 等 [10] 的三目视觉线性方法求出的旋转矩阵和相对位置作为迭代的初始值. 在各种误差很小的情况下, Qian 等 [10] 的方法可以得到相当精确的相对位姿参数. 虽然在有误差的情况下, 解的精度有所降低, 但其足够满足本文初值选取的精度要求. 为方便讨论, 将 Qian 等 [10] 的算法总结如下.

P 点在三摄像机 C_1,C_2 和 C_3 成像平面上的投影 P_1,P_2,P_3 已经分别从三幅图像中检出, 即已知 P_1,P_2,P_3 对应空间同一点 P, 假设摄像机已经标定且其投影矩阵 $\boldsymbol{M}_1,\boldsymbol{M}_2$ 和 $\boldsymbol{M}_3$ 已知, 则由坐标转换可得

$$\boldsymbol{z}_{c1}\begin{bmatrix}u_1\\v_1\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{M}_1\begin{bmatrix}x'\\y'\\z'\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}m_{11}^1&m_{12}^1&m_{13}^1&m_{14}^1\\m_{21}^1&m_{22}^1&m_{23}^1&m_{24}^1\\m_{31}^1&m_{32}^1&m_{33}^1&m_{34}^1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x'\\y'\\z'\\1\end{bmatrix},\tag{3}$$

$$\boldsymbol{z}_{c2}\begin{bmatrix}u_2\\v_2\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{M}_2\begin{bmatrix}x'\\y'\\z'\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}m_{11}^2&m_{12}^2&m_{13}^2&m_{14}^2\\m_{21}^2&m_{22}^2&m_{23}^2&m_{24}^2\\m_{31}^2&m_{32}^2&m_{33}^2&m_{34}^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x'\\y'\\z'\\1\end{bmatrix},\tag{4}$$

$$\boldsymbol{z}_{c3}\begin{bmatrix}u_3\\v_3\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{M}_2\begin{bmatrix}x'\\y'\\z'\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}m_{11}^3&m_{12}^3&m_{13}^3&m_{14}^3\\m_{21}^3&m_{22}^3&m_{23}^3&m_{24}^3\\m_{31}^3&m_{32}^3&m_{33}^3&m_{34}^3\end{bmatrix},\tag{5}$$

利用双目视觉定位算法 [9], 可以得到点 P_i 在 (C_i) 系的坐标为

$$\boldsymbol{P}_i\begin{bmatrix}x'\\y'\\z'\end{bmatrix}=(\boldsymbol{G}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}_i)^{-1}\boldsymbol{G}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_i,\tag{6}$$

$$\boldsymbol{G}_1=\begin{bmatrix} u_1m_{31}^1-m_{11}^1 & u_2m_{32}^1-m_{12}^1 & u_1m_{33}^1-m_{13}^1\\ v_1m_{31}^1-m_{21}^1 & v_1m_{32}^1-m_{22}^1 & v_1m_{33}^1-m_{23}^1\\ u_2m_{31}^2-m_{11}^2 & u_2m_{32}^2-m_{12}^2 & u_2m_{33}^2-m_{13}^2\\ v_2m_{31}^2-m_{21}^2 & v_2m_{32}^2-m_{22}^2 & v_2m_{33}^2-m_{23}^2 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{H}_1=\begin{bmatrix} m_{14}^1-u_1m_{34}^1\\ m_{24}^1-v_1m_{34}^1\\ m_{14}^2-u_2m_{34}^2\\ m_{24}^2-v_2m_{34}^2 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{G}_2=\begin{bmatrix} u_2m_{31}^2-m_{11}^2 & u_2m_{32}^2-m_{12}^2 & u_2m_{33}^2-m_{13}^2\\ v_2m_{31}^2-m_{21}^2 & v_2m_{32}^2-m_{22}^2 & v_2m_{33}^2-m_{23}^2\\ u_3m_{31}^3-m_{11}^3 & u_3m_{32}^3-m_{12}^3 & u_3m_{33}^3-m_{13}^3\\ v_3m_{31}^3-m_{21}^3 & v_3m_{32}^3-m_{22}^3 & v_3m_{33}^3-m_{23}^3 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{H}_2=\begin{bmatrix} m_{14}^2-u_2m_{34}^2\\ m_{24}^2-v_1m_{34}^2\\ m_{14}^3-u_2m_{34}^3\\ m_{24}^3-v_2m_{34}^3 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{G}_3=\begin{bmatrix} u_1m_{31}^1-m_{11}^1 & u_1m_{32}^1-m_{12}^1 & u_1m_{33}^1-m_{13}^1\\ v_1m_{31}^1-m_{21}^1 & v_1m_{32}^1-m_{22}^1 & v_1m_{33}^1-m_{23}^1\\ u_3m_{31}^3-m_{11}^3 & u_3m_{32}^3-m_{12}^3 & u_3m_{33}^3-m_{13}^3\\ v_3m_{31}^3-m_{21}^3 & v_3m_{32}^3-m_{22}^3 & v_3m_{33}^3-m_{23}^3 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{H}_3=\begin{bmatrix} m_{14}^1-u_1m_{34}^1\\ m_{24}^1-v_1m_{34}^1\\ m_{14}^3-u_3m_{34}^3\\ m_{24}^3-v_3m_{34}^3 \end{bmatrix}.$$

通过坐标变换可以进一步求得 (O) 系与 (O') 系之间的相对位置和相对姿态. 如图 1 所示, 目标航天器上设置的 4 个特征光点 A_1, A_2, A_3, A_4 位于同一平面中并构成正方形, 可得目标中心位置为 [12]

$$t_{OO'}=\frac{1}{4}(A_1'+A_2'+A_3'+A_4'). \tag{7}$$

为得到目标航天器和追踪航天器间的姿态, 将目标航天器上的 4 个特征点 A_1, A_2, A_3, A_4 取出 3 个点进行矢量组合, 且矢量组合 $A_4-A_1, A_2-A_1, (A_2-A_1)\times(A_4-A_1)$ 三者彼此线性无关, 在 (O') 系上存在对应的三个矢量 $A_2'-A_1'$, $A_4'-A_1'$, $(A_2'-A_1')\times(A_4'-A_1')$, 利用它们之间的对应关系建立航天器间的姿态方程:

$$\begin{aligned} A_{O123}=&[A_2-A_1 \quad A_4-A_1\\ &(A_2-A_1)\times(A_4-A_1)],\\ A_{O'123}=&[A_2'-A_1' \quad A_4'-A_1' \quad (A_2'-A_1')\times\\ &(A_4'-A_1')]R_{123}=A_{O'123}A_{O123}^{-1}. \end{aligned}$$

同理得到 $R_{124}, R_{234}, R_{134}$, 取它们的简单均值作为 $\boldsymbol{R}$ 的初始估值, 有

$$\boldsymbol{R}=\frac{1}{4}(R_{123}+R_{124}+R_{134}+R_{234}).$$

4 数值仿真

仿真实验中, 三摄像机的参数均设为 $\alpha=1300$, $\beta=1200$, $u_0=412$, $v_0=280$, $s=0$, 图像的分辨率设为 768×576 pixel, 为便于分析实验数据结果, 将旋转矩阵分解为旋转轴和旋转角两部分 [13], O' 系与 O 系之间的旋转角、旋转轴和平移矢量设为 $\frac{\pi}{10}$, $[1,0,0]^{\mathrm{T}}$, $[8,-10,40]^{\mathrm{T}}$; C_2 系与 C_1 系之间的旋转角、旋转轴和平移矢量设为 $\frac{\pi}{6}$, $[0.4364,0.2182,0.8729]^{\mathrm{T}}$, $[5,-1,2]^{\mathrm{T}}$; C_3 系与 C_1 系之间的旋转角、旋转轴和平移矢量设为 $\frac{\pi}{8}$, $[0.5,0.5,0.7071]^{\mathrm{T}}$, $[-2,-1,10]^{\mathrm{T}}$; 光标点在 O 系下的坐标分别为

$$\boldsymbol{A}=(-2,2,0)^{\mathrm{T}}, \quad \boldsymbol{B}=(2,2,0)^{\mathrm{T}},$$
$$\boldsymbol{C}=(2,-2,0)^{\mathrm{T}}, \quad \boldsymbol{D}=(-2,-2,0)^{\mathrm{T}}.$$

假设光标点对应的像点受噪声影响. 噪声大小 0~2 pixel, 间距 0.1 pixel, 图 3 和图 4 分别为 (O') 系相对 (O) 系之间的旋转角、旋转轴和平移矢量的绝对误差和均方差随噪声水平变化的仿真曲线, 以及与 Zhang 等 [9] 的双目视觉线性方法、Qian 等 [10] 三目视觉线性方法的比较. 变化曲线在每一噪声水平下的结果均是 100 次独立实验的均值. 所有实验均在相同条件下完成.

从图 3 可以看到, 随着噪声的增大, 用本文三目视觉非线性方法得到的旋转角 (0.18°)、旋转轴 (2.5°) 和相对位置 (0.05°) 最大误差比用 Zhang 等 [9] 的双目视觉方法得到的旋转角 (1.2°)、旋转轴 (7.0°) 和相对位置 (0.055°) 最大误差要小得多; 与 Qian 等 [10] 的三目视觉线性方法得到的旋转角 (0.38°)、旋转轴 (3.1°) 和相对位置 (0.049°) 最大误差相比较, 可以发现旋转角和旋转轴误差要小, 在 0~1.5 pixel 的噪声范围内, 相对位置误差接近, 在 1.5~2 pixel 的噪声范围内, 相对位置最大误差相差 0.001°. 根据一般理论 [14], 在对图像光标点检测时, 像素误差通常不会超过 1.5 pixel. 由图 4 的均方差结果可以看出, 随着图像噪声的增加, 采用双目视觉线性方法得到的旋转角和旋转轴误差波动最大, 三目视觉线性方法得

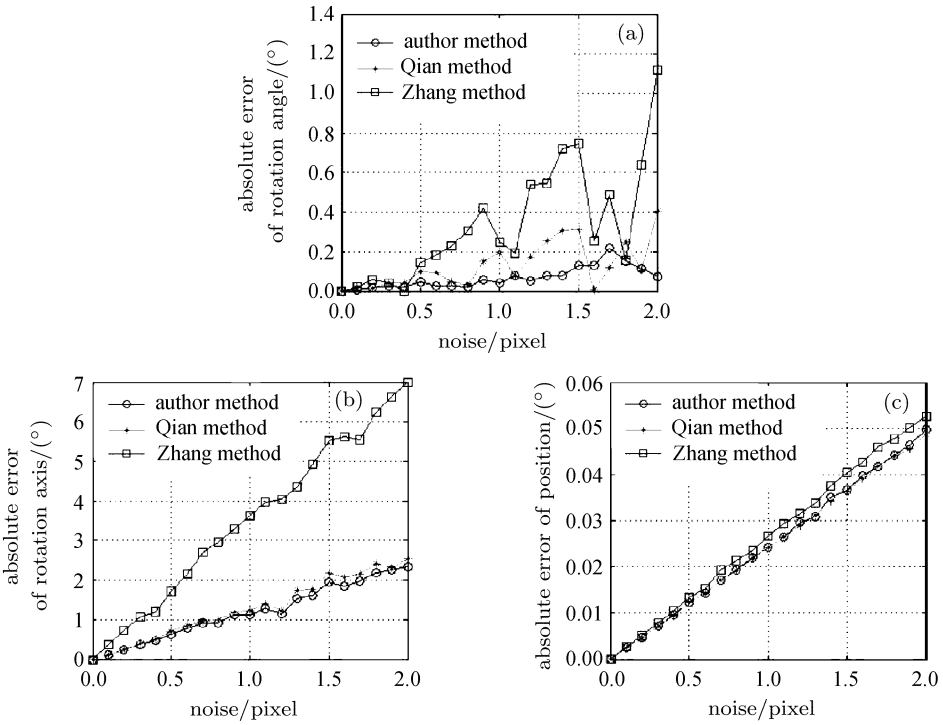


图 3 航天器间姿态与位置的绝对误差在不同噪声水平下的变化曲线

Fig. 3 Absolute errors of pose and position between spacecrafts under different noise level

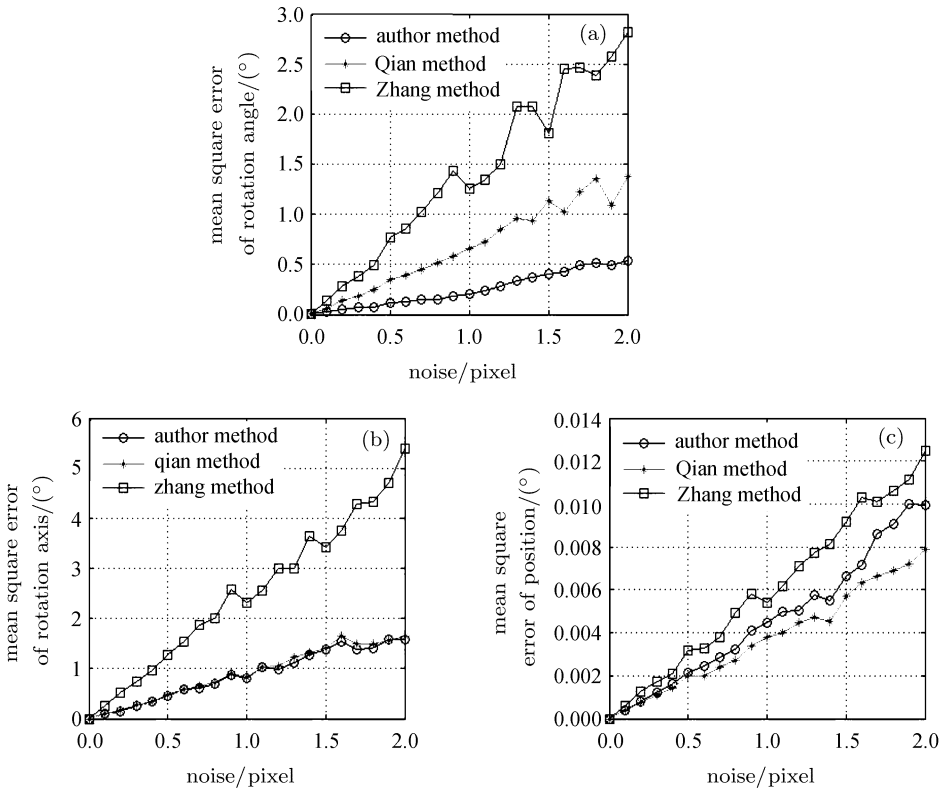


图 4 航天器间姿态与位置的均方差在不同噪声水平下的变化曲线

Fig. 4 Standard deviations of pose and position between spacecrafts under different noise level

到的旋转角和旋转轴误差波动比较大, 而三目视觉非线性方法得到的旋转角和旋转轴误差波动最小. 将几种方法按照相对位置误差波动进行降序排列, 依次为双目视觉线性方法、三目视觉线性方法、三目视觉非线性方法.

5 结论

在总结单双目测量方法优缺点的基础上, 使用三目视觉非线性测量方法, 推导出了航天器间的位姿方程, 根据仿真结果可以得到如下结论.

(1) 在 0∼2 pixel 的噪声范围内, 与双目、三目视觉线性方法相比, 三目视觉非线性方法得到的旋转矩阵均比其他两种方法的精度高.

(2) 在 0∼1.5 pixel 的噪声范围内, 三目视觉非线性方法得到的相对位置精度比用双目视觉线性方法得到的相对位置精度高, 与三目视觉线性方法得到的相对位置精度几乎相同.

(3) 在 1.5∼2 pixel 的噪声范围内, 三目视觉非线性方法得到的相对位置精度比用双目视觉线性方法得到的相对位置精度高, 比用三目视觉线性方法得到的相对位置精度略低.

参考文献

[1] Mukundan R, Ramakrishnan K R. A quaternion solution to the pose determination problem for rendezvous and docking simulations [J]. *Math. Comput. Simul.*, 1995, **39**:143-153

[2] Ohn L J, Declan C H, Karim P W, *et al.* Vision-based Navigation for Rendezvous, Docking and Proximity Operations [R]. AAS99 - 021, 1999

[3] Philip N K, Ananthasayanam M R. Relative position and attitude estimation and control schemes for the final phase of an autonomous docing mission of spacecraft [J]. *Acta Astron.*, 2003, **52**:511-522

[4] Davis T, Baker T, Belchak T, *et al.* XSS-10 microsatellite demonstration program [C]//17th AIAA/USU Conference on Small Satellites. Logan UT: Utah State University, SSC03-IV-1, 2003

[5] Wu Hongxin, Hu Haixia, Xie Yongchun, Wang Ying. Several questions on autonomous rendezvous docking [J]. *J. Astron.*, 2003, **24**(2):132-137. In Chinese (吴宏鑫, 胡海霞, 解永春, 王颖. 自主交会对接若干问题 [J]. 宇航学报, 2003, **24**(2):132-137)

[6] Fei Weichun. Estimation method of relative position and attitude for spacecraft rendezvous and docking [J]. *Chin. Space Sci. Tech.*, 2004, (3):1-5. In Chinese (费蔚春. 飞行器交会对接相对位置和姿态的估值方法 [J]. 中国空间科学技术, 2004, (3):1-5)

[7] Zhang Shijie, Cao Xibin, Chen Xueqin. Closed-form method for relative pose parameters of spacecraft based on optical measurement [J]. *Acta Aeron. Astron. Sinica*, 2005, **31**(1):1002-1582. In Chinese (张世杰, 曹喜滨, 陈雪芹. 航天器相对位姿参数光学测量解析算法 [J]. 航空学报, 2005, **31**(1):1002-1582)

[8] Jiang Gangwu, Gong Hui, Wang Jing, Jiang Ting. The optical measurement of self-calibration in orbit for spacecraft rendezvous and docking [J]. *J. Astron.*, 2007, **28**(1):97-103. In Chinese (江刚武, 龚辉, 王净, 姜挺. 空间飞行器交会对接相对位置和姿态的在轨自检校光学成像测量算法 [J]. 宇航学报, 2007, **28**(1):97-103)

[9] Zhang Qingjun, Hu Xiulin, Ye Bin, Zhong Shan. Binocular vision-based relative position and attitude determination between spacecrafts [J]. *J. Astron.*, 2008, **29**(1):1000-1328. In Chinese (张庆君, 胡修林, 叶斌, 钟山. 基于双目视觉的航天器间相对位置和姿态的测量方法 [J]. 宇航学报, 2008, **29**(1):1000-1328)

[10] Qian Ping, Wang Huinan. A measuring method for relative attitude and position parameters of RVD spacecrafts based on trinocular vision [J]. *J. Astron.*, 2010, **31**(6):1115-1120. In Chinese (钱萍, 王惠南. 基于三目视觉测量的航天器交会对接位姿算法 [J]. 宇航学报, 2010, **31**(6):1115-1120)

[11] Thai Quynh Phong, Radu Horaud, Adnan Yassine, Pham Dinh Tao. Object pose from 2-D to 3-D point and line correspondences [J]. *Int. J. Comp. Vis.*, 1995, (15):225-243

[12] Zhang Shuqin. Technology of space rendezvous measurement and engineering applications [M]. Beijing:China Astronautic Publishing House, 2006. In Chinese (张淑琴. 空间交会对接测量技术及工程应用 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2006)

[13] Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 88-109

[14] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pat. Anal. Mach. Intel.*, 2000, **22**(11):1330-1334