

基于 Rodrigues 参数的视觉相对位姿确定算法

岳晓奎, 侯小娟

(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

摘 要: 以 Rodrigues 参数作为姿态描述参数提出了一种视觉相对位姿确定算法。Rodrigues 参数作为一种简洁、高效的姿态描述法,适用于实时性要求高的视觉相对位姿确定,但它本身的奇异性使其不能用于大角度的位姿确定。将视觉导航方法和无奇异姿态描述的 Rodrigues 参数切换理论结合起来,推导了基于 Rodrigues 参数的视觉相对位姿解算模型,并给出了这种相对位姿确定算法的流程。仿真结果表明该算法能很好地解决奇异问题,实现全姿态运动情形下的相对位姿确定。

关键词: 相对位姿; 视觉导航; Rodrigues 参数; 奇异性

中图分类号: V412 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2010)03-0753-05

DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2010.03.021

0 引言

随着航天技术的不断发展,在轨操作任务不断深入,对航天器相对位姿确定的实时性和精度提出了更高的要求。基于视觉的相对位姿确定方法是目前国内外研究的热点,它与传统的位姿确定方法(如天文导航,惯性导航,卫星导航)相比,具有成本低、精度高、自主性强、易于实现等优势,非常适合近距离相对位姿确定。

目前视觉导航领域的相对位姿确定主要采用传统的姿态描述方法:欧拉角法,方向余弦矩阵法和四元数法。其中,欧拉角法涉及大量的三角运算,存在奇异、运算效率低等问题;方向余弦矩阵法由于约束条件过多,难以解决计算效率不高的问题;四元数法能很好的解决奇异问题,但它并非姿态描述的最小实现形式。Rodrigues 参数能利用 3 个参数描述姿态,与四元数相比其姿态解算具有速度快的优点^[1-3]。

为了充分发挥视觉导航和 Rodrigues 参数在相对位姿确定方面的优势,将两者结合起来就显得尤为必要。但 Rodrigues 参数本身的奇异问题,使它只适合小角度的姿态确定^[4]。为解决这种奇异问题,本文在视觉导航理论和 Rodrigues 参数相结合的基础上,引入了参数切换法^[5-7],将基于 Rodrigues 参数和视觉信息的位姿确定算法扩大到全姿态运动范围

中,提出了基于 Rodrigues 参数的视觉相对位姿确定算法。

1 基于 Rodrigues 参数的姿态描述方法

Rodrigues 参数 $\mathbf{g} = [g_1 \ g_2 \ g_3]^T$ 定义为^[8]

$$\mathbf{g} = \tan(\theta/2) \mathbf{n} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{n} = [n_1 \ n_2 \ n_3]^T$ 、 θ 分别为 Euler 轴上的单位矢量和绕 \mathbf{n} 的旋转角。由 Rodrigues 参数的定义可以看出,当 $\theta \rightarrow \pi$ 时, \mathbf{g} 的模 $g \rightarrow \infty$, 此时无法进行姿态解算,即出现奇异问题。

由于四元数 $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]^T$ 为

$$\begin{cases} q_i = n_i \sin(\theta/2) & i = 1, 2, 3 \\ q_4 = \cos(\theta/2) \end{cases} \quad (2)$$

所以 Rodrigues 参数 \mathbf{g} 也可定义为

$$g_i = q_i / q_4, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

Rodrigues 参数的奇异问题很大程度上限制了其广泛应用。为了避免这种奇异问题,可以采用 Shuster 提出的序贯旋转方法 MSR^[5-6], 利用 4 套 Rodrigues 参数进行相互切换实现位姿的求解,即参数切换法^[7]。下面对这种方法进行介绍。

设航天器本体坐标系相对于参考坐标系 $r^{(0)}$ 的 Rodrigues 参数为 $\mathbf{g}^{(0)}$, 将参考坐标系 $r^{(0)}$ 绕其第 i ($i = 1, 2, 3$) 个坐标轴旋转 π 得到的坐标系称为参考坐标系 $r^{(i)}$, 本体坐标系相对于旋转后参考坐标系

$r^{(i)}$ 的 Rodrigues 参数记为 $\mathbf{g}^{(i)}$, 则 $\mathbf{g}^{(i)}$ 为

$$\begin{cases} \mathbf{g}^{(0)} = [q_1/q_4 & q_2/q_4 & q_3/q_4]^T \\ \mathbf{g}^{(1)} = [-q_4/q_1 & q_3/q_1 & -q_2/q_1]^T \\ \mathbf{g}^{(2)} = [-q_3/q_2 & -q_4/q_2 & q_1/q_2]^T \\ \mathbf{g}^{(3)} = [q_2/q_3 & -q_1/q_3 & -q_4/q_3]^T \end{cases} \quad (4)$$

由 $q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 = 1$ 可知 q_1, q_2, q_3, q_4 不会同时为零, 所以 $\mathbf{g}^{(0)}, \mathbf{g}^{(1)}, \mathbf{g}^{(2)}$ 和 $\mathbf{g}^{(3)}$ 的模不会同时为零, 即不会同时出现奇异现象。因此, 在给定时刻可以利用 $\mathbf{g}^{(0)}, \mathbf{g}^{(1)}, \mathbf{g}^{(2)}$ 和 $\mathbf{g}^{(3)}$ 中远离奇异点的那一个来描述姿态。

从(4)式可以看出, $\mathbf{g}^{(i)}, i = 0, 1, 2, 3$ 满足如下关系

$$\mathbf{g}^{(i')} = \mathbf{T}_j(\mathbf{g}^{(i)}) \quad j = 1, 2, 3; i, i' = 0, 1, 2, 3 \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_1(\mathbf{g}^{(i)}) &= [-1/g_1^{(i)} & g_3^{(i)}/g_1^{(i)} & -g_2^{(i)}/g_1^{(i)}]^T \\ \mathbf{T}_2(\mathbf{g}^{(i)}) &= [-g_3^{(i)}/g_2^{(i)} & -1/g_2^{(i)} & g_1^{(i)}/g_2^{(i)}]^T \\ \mathbf{T}_3(\mathbf{g}^{(i)}) &= [g_2^{(i)}/g_3^{(i)} & -g_1^{(i)}/g_3^{(i)} & -1/g_3^{(i)}]^T \\ i' &= \begin{cases} j, & \text{若 } i = 0 \\ 0, & \text{若 } j = i \\ 6 - j - i, & \text{若 } j \neq i \text{ 且 } i \neq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

从(5)式可以看出 $\mathbf{g}^{(i)}, i = 0, 1, 2, 3$ 关于 \mathbf{T}_j 运算不仅是封闭的, 而且可以通过这种运算使得参数的三个分量的模均小于 1, 从而远离了奇异点。

鉴于此, 利用 4 套 Rodrigues 参数相互切换的方法来描述姿态可以选择如下的切换规则:

(1) 切换条件: $\mathbf{g}^{(i)}$ 满足 $|\mathbf{g}_j^{(i)}|$ 在 $\{|\mathbf{g}_1^{(i)}|, |\mathbf{g}_2^{(i)}|, |\mathbf{g}_3^{(i)}|, 1\}$ 中最大;

(2) 切换操作: $\mathbf{g}^{(i')} = \mathbf{T}_j(\mathbf{g}^{(i)})$ 。

这样可以保证始终利用 $\mathbf{g}^{(0)}, \mathbf{g}^{(1)}, \mathbf{g}^{(2)}$ 和 $\mathbf{g}^{(3)}$ 中远离奇异点的那一个来描述姿态。

2 基于 Rodrigues 参数的视觉相对位姿确定

2.1 摄像机模型

摄像机模型反映了三维空间目标点到二维图像点的几何投影关系, 下面介绍本文采用的线性摄像机模型^[9]。

假设目标航天器的特征点 P 在目标本体坐标系下的坐标为 (X_T, Y_T, Z_T) , 在摄像机坐标系下的坐标为 (X_C, Y_C, Z_C) , 目标航天器相对于主动航天器的位置在摄像机坐标系下的坐标为 (t_x, t_y, t_z) , 则

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 \mathbf{R} 为目标本体坐标系相对于摄像机坐标系的方向余弦矩阵。

假设目标航天器的特征点 P 的像点 p 在像平面坐标系中的坐标为 (x, y) , 可得

$$\begin{cases} x = \frac{-fX_C}{Z_C} \\ y = \frac{-fY_C}{Z_C} \end{cases} \quad (7)$$

其中 f 为摄像机的焦距。

(6)~(7)式构成了视觉导航的基本方程, 相对位姿确定实质上就是解这组方程。

2.2 相对位姿确定模型的建立

将视觉导航基本方程(6)~(7)式中的方向余弦矩阵利用 Rodrigues 参数表示, 构成了基于 Rodrigues 参数的视觉相对位姿确定算法的基本方程。

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\mathbf{g}^{(i)}) \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x = \frac{-fX_C}{Z_C} \\ y = \frac{-fY_C}{Z_C} \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\mathbf{R}(\mathbf{g}^{(i)})$ 为 $\mathbf{g}^{(i)}$ 向方向余弦矩阵 \mathbf{R} 的转换公式

$$\mathbf{R}(\mathbf{g}^{(i)}) = \frac{1}{1 + |\mathbf{g}^{(i)}|^2} \{ (1 - |\mathbf{g}^{(i)}|^2) \mathbf{I} + 2\mathbf{g}^{(i)}[\mathbf{g}^{(i)}]^T - 2[\mathbf{g}^{(i)} \times] \} \mathbf{R}^{(i)}$$

$$\mathbf{R}^{(0)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}^{(2)} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}^{(3)} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(8)~(9)式构成的视觉相对位姿确定基本方程是一组非线性方程, 为了便于计算, 需要线性化。为此, 须定义状态误差向量。

定义 $\mathbf{g}^{(i)}$ 的误差为初值 $\mathbf{g}_0^{(i)}$ 到 $\mathbf{g}^{(i)}$ 的旋转 $\delta\mathbf{g}$, 即

$$\mathbf{g}^{(i)} = \delta\mathbf{g} * \mathbf{g}_0^{(i)} = \frac{\delta\mathbf{g} + \mathbf{g}_0^{(i)} - \delta\mathbf{g} \times \mathbf{g}_0^{(i)}}{1 - \delta\mathbf{g} \cdot \mathbf{g}_0^{(i)}} \quad (10)$$

其中 ‘*’ 代表 Rodrigues 参数乘法

平移向量的误差 Δt 定义为 t 与初值 t_0 之差,即

$$\Delta t = t - t_0 \tag{11}$$

δg 和 Δt 构成了状态误差向量

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \delta g \\ \Delta t \end{bmatrix} \tag{12}$$

下面将(8)和(9)式转化为关于 ΔX 的线性方程。

在一阶近似的情况下

$$\begin{aligned} R(g^{(i)}) &= R(\delta g^{(i)}) R(g_0^{(i)}) \\ &= \{I - 2[\delta g^{(i)} \times]\} R(g_0^{(i)}) \end{aligned}$$

代入(8)式得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} &= \{I - 2[\delta g^{(i)} \times]\} R(g_0^{(i)}) \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \\ &= R(g_0^{(i)}) \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{x0} \\ t_{y0} \\ t_{z0} \end{bmatrix} - 2[\delta g^{(i)} \times] \\ &\quad R(g_0^{(i)}) \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta t_x \\ \Delta t_y \\ \Delta t_z \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{13}$$

记

$$\begin{bmatrix} \bar{X}_c \\ \bar{Y}_c \\ \bar{Z}_c \end{bmatrix} = R(g_0^{(i)}) \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{x0} \\ t_{y0} \\ t_{z0} \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta X_c \\ \Delta Y_c \\ \Delta Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{X}_c \\ \bar{Y}_c \\ \bar{Z}_c \end{bmatrix} \tag{15}$$

则

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta X_c \\ \Delta Y_c \\ \Delta Z_c \end{bmatrix} &= -2[\delta g^{(i)} \times] \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta t_x \\ \Delta t_y \\ \Delta t_z \end{bmatrix} \\ &= 2 \begin{bmatrix} 0 & -Z_r & Y_r \\ Z_r & 0 & -X_r \\ -Y_r & X_r & 0 \end{bmatrix} \delta g^{(i)} + \begin{bmatrix} \Delta t_x \\ \Delta t_y \\ \Delta t_z \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{16}$$

其中

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} = R(g_0^{(i)}) \begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{bmatrix} \tag{17}$$

将(16)式写为

$$\begin{bmatrix} \Delta X_c \\ \Delta Y_c \\ \Delta Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -2Z_r & 2Y_r & 1 & 0 & 0 \\ 2Z_r & 0 & -2X_r & 0 & 1 & 0 \\ -2Y_r & 2X_r & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Delta X \tag{18}$$

将(9)式一阶泰勒展开,得

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\bar{f}\bar{X}_c \\ \bar{Z}_c \\ -\bar{f}\bar{Y}_c \\ \bar{Z}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -f/\bar{Z}_c & 0 & \bar{f}\bar{X}_c/\bar{Z}_c^2 \\ 0 & -f/\bar{Z}_c & \bar{f}\bar{Y}_c/\bar{Z}_c^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_c \\ \Delta Y_c \\ \Delta Z_c \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$\text{记} \quad \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\bar{f}\bar{X}_c \\ \bar{Z}_c \\ -\bar{f}\bar{Y}_c \\ \bar{Z}_c \end{bmatrix} \tag{20}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} \tag{21}$$

则

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f/\bar{Z}_c & 0 & \bar{f}\bar{X}_c/\bar{Z}_c^2 \\ 0 & -f/\bar{Z}_c & \bar{f}\bar{Y}_c/\bar{Z}_c^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_c \\ \Delta Y_c \\ \Delta Z_c \end{bmatrix} \tag{22}$$

将(18)式代入(22)式得

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f/\bar{Z}_c & 0 & \bar{f}\bar{X}_c/\bar{Z}_c^2 \\ 0 & -f/\bar{Z}_c & \bar{f}\bar{Y}_c/\bar{Z}_c^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & -2Z_r & 2Y_r & 1 & 0 & 0 \\ 2Z_r & 0 & -2X_r & 0 & 1 & 0 \\ -2Y_r & 2X_r & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Delta X \tag{23}$$

令

$$\Delta b_j = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \tag{24}$$

$$\begin{aligned} A_j &= \begin{bmatrix} -f/\bar{Z}_c & 0 & \bar{f}\bar{X}_c/\bar{Z}_c^2 \\ 0 & -f/\bar{Z}_c & \bar{f}\bar{Y}_c/\bar{Z}_c^2 \end{bmatrix} \times \\ &\quad \begin{bmatrix} 0 & -2Z_r & 2Y_r & 1 & 0 & 0 \\ 2Z_r & 0 & -2X_r & 0 & 1 & 0 \\ -2Y_r & 2X_r & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{25}$$

$$\text{则} \quad \Delta b_j = A_j \Delta X \tag{26}$$

上式就是(8)式和(9)式的线性化方程。

(26)式表示观测到 1 个特征点的线性化方程,当观测到 n 个特征点时,令

$$\Delta b = \begin{bmatrix} \Delta b_1 \\ \vdots \\ \Delta b_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix}$$

$$\text{则} \quad \Delta b = A \Delta X \tag{27}$$

当观测特征点的个数 $n = 3$ 且矩阵 A 的秩为 6 时,可直接求解(27)式;当观测特征点的个数 $n > 3$ 且矩阵 A 的秩为 6 时,可利用最小二乘法求解

$$\Delta X = (A^T W A)^{-1} A^T W \Delta b \quad (28)$$

其中 W 为加权矩阵,一般取单位矩阵。需要说明的是当矩阵 A 的秩小于 6,一般要提取更多的特征点使矩阵 A 满秩。

上述求解过程需要反复迭代逼近,直至改正数小于某一限值为止。

2.3 相对位姿确定流程

下面给出基于 Rodrigues 参数的视觉相对位姿确定算法的计算流程:

(1) 给定初始值 $X_0 = [g_0^{(i)} \quad t_0]^T$, 设定姿态参数误差界限 $\epsilon_1 > 0$ 和平移参数误差界限 $\epsilon_2 > 0$, 置 $k = 1$ 。本文取上一时刻的相对位姿参数作为当前时刻位姿解算的初始值。

(2) 解方程 (27) 式得第 k 次修正量 $\Delta X_k = \begin{bmatrix} \delta g_k^{(i)} \\ \Delta t_k \end{bmatrix}$, 则 $X_k = \begin{bmatrix} \delta g_k^{(i)} * g_{k-1}^{(i)} \\ t_{k-1} + \Delta t_k \end{bmatrix}$ 。

(3) 按照 Rodrigues 参数描述方法中所述方法判断 $g_k^{(i)}$ 是否满足切换条件,若满足切换条件,则进行切换操作。

(4) 若 $|\delta g_k^{(i)}| < \epsilon_1$ 且 $|\Delta t_k| < \epsilon_2$, 则停止计算,取 $X = X_k$; 否则,置 $k = k + 1$, 返回第(2)步。

3 仿真算例

上文基于 Rodrigues 参数提出了一种视觉相对位姿确定算法,下面对这种算法的有效性进行仿真分析。假定星载面阵 CCD 摄像机的分辨率为 2048×2048 像素,像元宽度为 $7 \mu\text{m}$,摄像机焦距为 200 mm ,摄像机成像和图像处理过程中带来 1 个像元的白噪声误差,设目标航天器为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 的一个立方体,其 8 个顶点中对于相机可见的顶点作为特征点。主动航天器和目标航天器的姿轨参数见表 1。仿真时间为 6000 秒,仿真步长为 5 秒。仿真结果如图 1~2 所示。

分析图 2~3 可以看出,在给定的参数情况下,利用上述算法得到 X 轴的相对位置精度约为 0.3 m , Y 轴和 Z 轴的相对位置精度约为 0.005 m , 三个轴的相对姿态精度约为 0.2° ,这说明垂直于摄像机光轴的两个方向的定位精度优于摄像机光轴方向的定位精度,而三个欧拉角的精度相当。

为了对比,利用文献[4]中的算法进行了相对位姿解算,与本文算法的计算精度相当,但文献[4]中的算法在 2228.6 秒时,Rodrigues 参数出现奇异,导

致程序终止而无法实现位姿的确定。从图 1~2 可以看出,本文算法的误差曲线比较平稳,说明这种算法能很好地解决 Rodrigues 参数的奇异问题,实现全姿态运动情形下的位姿确定。

表 1 主动航天器和目标航天器的姿轨参数

Table 1 Orbit and attitude parameters of vehicles

	主动航天器	目标航天器
升交点赤经/deg	0.0	0.0
轨道倾角/deg	42.225005	42.225
近地点幅角/deg	0.0	—
偏心率	0.0000001	0.0
半长轴/km	6721.200	6721.200
过升交点时刻/s	0.013	0.0
初始滚转角/deg	0.1	2.0
初始俯仰角/deg	0.1	2.0
初始偏航角/deg	0.1	2.0
滚转角速率/(deg/s)	0.0001	0.001
俯仰角速率/(deg/s)	0.0001	0.001
偏航角速率/(deg/s)	0.0001	0.08

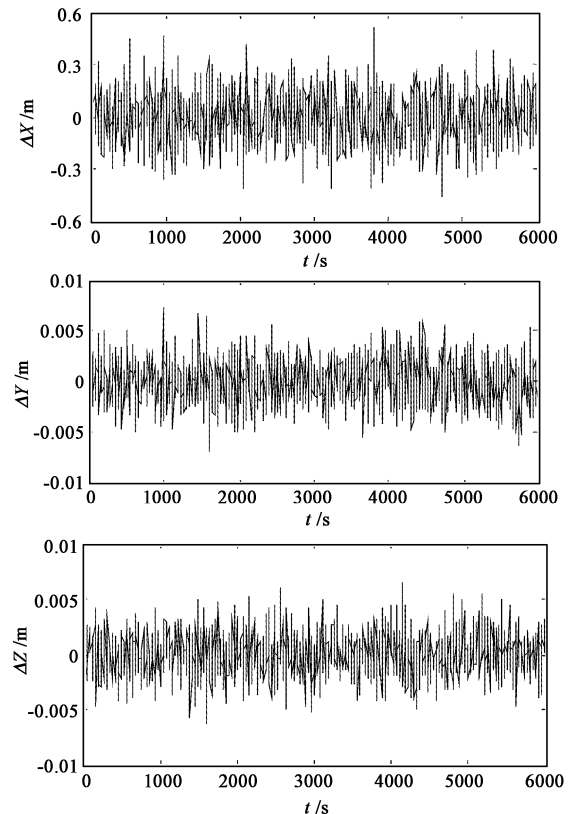


图 1 基于 Rodrigues 参数算法的位置误差

Fig. 1 Position errors of algorithms using Rodrigues parameters

4 结论

本文将视觉导航原理和 Rodrigues 参数理论相

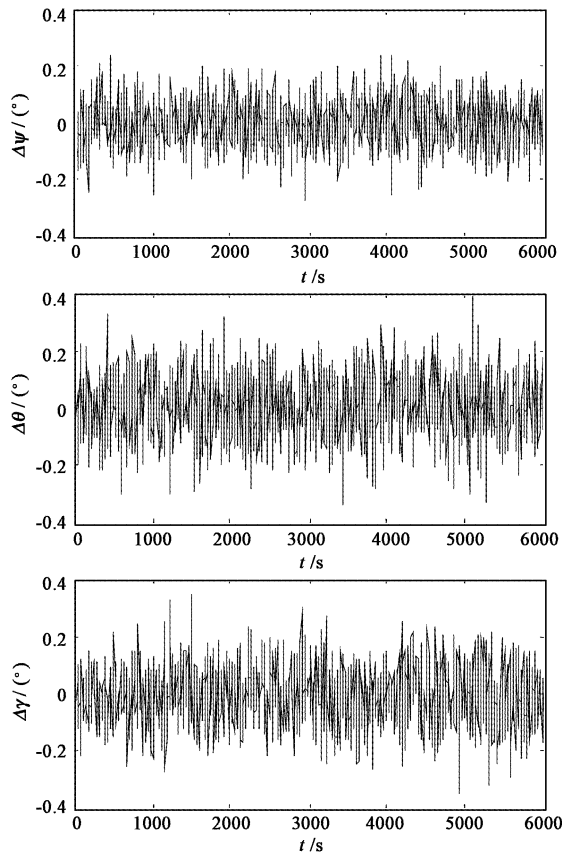


图2 基于 Rodrigues 参数算法的姿态角误差

Fig.2 Attitude errors of algorithms using Rodrigues parameters

结合,提出了基于 Rodrigues 参数的视觉相对位姿确定算法。这种算法既发挥了 Rodrigues 参数计算高效的优点,又通过参数切换法成功地解决了 Rodrigues 参数的奇异问题。理论分析和仿真结果表明该算法能有效地实现航天器全姿态运动情形下的相对位姿确定。进一步将基于相关的硬件设备开展算法的地面试验验证工作。

参考文献:

- [1] Schaub H, Junkins J L. Stereographic orientation parameters for attitude dynamics: a generalization of the Rodrigues parameters [J]. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1996, 44(1): 1 - 19.
- [2] 周江华,苗育红,王明海. 姿态运动的 Rodrigues 参数描述 [J]. *宇航学报*, 2004, 5: 514 - 519. [ZHOU Jiang-hua, MIAO Yu-hong, WANG Ming-hai. Attitude representation using Rodrigues parameter [J]. *Journal of Astronautics*, 2004, 25(5): 514 - 519.]
- [3] 王勇军,秦永元,杨波. 四元数、Rodrigues 参数在卫星姿态解算上的对比研究 [J]. *中国空间科学技术*, 2007, 3: 18 - 23. [WANG Yong-jun, QIN Yong-yuan, YANG Bo. Comparison of quaternion and Rodrigues parameters on attitude algorithm of secondary planet [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2007, 3: 18 - 23.]
- [4] 李克昭. 航天器特征提取与相对位姿确定算法研究 [D]. 西北工业大学博士论文, 2007. [LI Ke-zhao. Shape & state feature extraction and relative navigation algorithms for spacecraft [D]. *Northwestern Polytechnical University*, 2007.]
- [5] Shuster M D, Oh S D. Three-axis attitude determination from vector observation [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 1981, 4 (2): 70 - 77.
- [6] Mortari D, Angelucci M, Markley F L. Singularity and attitude estimation [C]. *Advances in the Astronautical Sciences*. San Diego, California: American Astronautical Society, 2000: 479 - 493.
- [7] 陈记争,袁建平,方群. 基于 Rodrigues 参数的姿态估计算法 [J]. *航空学报*, 2008, 29(4): 960 - 965. [CHEN Ji-zheng, YUAN Jian-ping, FANG Qun. Attitude estimation algorithm based on Rodrigues parameter [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(4): 960 - 965.]
- [8] Shuster M D. A survey of attitude representations [J]. *Journal of the Astronautical Sciences*, 1993, 41(4): 439 - 517.
- [9] 张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2005. [ZHANG Guang-jun. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005.]

作者简介:岳晓奎(1970-),男,博士,教授,研究方向为航天器动力学与控制、视觉导航。

通信地址:西北工业大学 251 # (710072)

电话:(029)88493685

E-mail: xkyue@nwpu.edu.cn

Vision-based Relative Position and Attitude Determination Using Rodrigues Parameters

YUE Xiao-kui, HOU Xiao-juan

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A Vision-based position and attitude determination algorithm is proposed using Rodrigues parameter to describe the attitude. Rodrigues parameters are simple and efficient in the attitude representation, which is suitable for Vision-based precise relative position and attitude determination, but it can not be used when angle is enough large, because it is singularity. So the algorithm is based on vision-based navigation theory and parameter switch theory of Rodrigues parameter that can avoid singular of attitude representation. The model is derived and the following of the relative position and attitude algorithm is given. Finally, the result of simulation proves that the algorithm successfully solved singularity problem and can determine relative position and attitude for all-attitude.

Key words: Relative position and attitude; Vision-based navigation; Rodrigues parameter; Singularity