

空间失稳目标的高精度运动估计方法

孙日明¹, 杨苾辰², 马永峰¹, 孔祥宇², 李常贤²

(1. 大连交通大学 理学院, 辽宁 大连 116028;

2. 大连交通大学 电气信息工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 运动估计是解决线性测量系统下动态目标成像畸变问题的有效手段, 然而空间失稳目标的非合作性和运动复杂性往往使得运动估计精度难以保证。为提高运动估计的准确性, 提出了一种特征驱动的空间失稳目标高精度运动估计方法。该方法首先引入球面坐标建立一般空间失稳目标的自约束时空运动模型, 将运动估计推演到高维空间进行非线性无约束求解。然后, 根据真实解的存在唯一性, 制定了两次异帧相似判别法则给出非线性求解的成功判别, 提高运动估计的准确性和鲁棒性。最后, 实验比较了不同条件下多类非线性求解方法针对本问题的求解效率, 设计了一种基于初值精度划分的求解策略, 进一步提高运动估计的效率。实验结果显示该方法最多采用 15 帧均可实现一般情况的高精度 ($<10^{-5}$) 运动估计, 进而能够对成像畸变进行精准畸变矫正。

关键词: 线性测量; 空间失稳目标; 运动估计; 畸变矫正; 异帧相似判别

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200104

High-precision motion estimation for instability space targets

Sun Riming¹, Yang Yichen², Ma Yongfeng¹, Kong Xiangyu², Li Changxian²

(1. School of Science, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Motion estimation is an effective way to rectify the distortion of linear array images of moving target in linear measurement system. However, the non-cooperation and motion complexity of instability space targets make it difficult to precisely estimate their motion parameters. In order to improve the estimation accuracy, a feature-driven high-precision motion estimation for instability space targets was presented. Firstly, a self-constrained motion model of instability space targets by means of the spherical coordinate was established, which transformed the motion estimation into an unconstrained nonlinear optimization problem in high dimensional space. Then, according to the existence and uniqueness of global solutions, an effective way was devised to judge the validity of obtained solutions via comparing the similarity of two solutions calculated via two solving processes under different selections of frame number, which evidently improved the effectiveness and robustness of our method. Finally, the solving efficiency among different non-linear solution methods in the view of our problem was numerically analyzed and an efficient solution scheme in terms of the accuracy of initial values was presented to improve the efficiency of our method. Experimental results illustrate that only needing a maximum of 15 frames of linear array images the estimation accuracy of motion parameters all reach ($<10^{-5}$) and thus achieve the high performance of rectification for distorted linear array images in our research background.

Key words: linear measurement; instability space targets; motion estimation; distortion rectification; similarity comparison under different selections of frame number

收稿日期: 2020-04-07; 修订日期: 2020-06-09

基金项目: 国家自然科学基金 (11801056); 辽宁省教育厅科学技术研究项目 (JDL2017014)

0 引言

自人类开始航天活动以来,对空间失稳失控目标的监测一直是航天领域的重要任务之一^[1]。多种基于单目视觉^[2-3]、双目视觉、图像序列、激光成像的监测方法^[4]已经被提出。相较于视觉成像,激光雷达成像^[5-6]具有激光测距、成像速度快、受光照影响小、抗有源干扰能力强等优点,是一种理想的空间目标测量技术,主要包括线阵成像^[7]和平面成像^[8]两类方式。相较于平面成像,线阵成像具有成像分辨率高、测量视场角大等优点,适用于远距离大型空间目标的精密测量,是空间目标三维位姿测量拟定的使用工具。

线阵式测量方式在每个时刻只能获取测量目标的一组线信息。对于静态目标,直接组合不同时刻获取的多组线信息能够得到测量目标的真实三维形貌。但对于动态目标,由于测量目标的位姿一直处于变化状态,不同时刻获取的是当前时刻下测量目标单元位置的距离信息,直接组合这些线信息并不能真实反映测量目标的三维形貌,人们称这类线阵图像为测量目标的畸变线阵图像。事实上,畸变线阵图像中的畸变信息蕴含了测量目标的运动信息,能够用于测量目标的运动估计,同时估算出的运动参数也能够对畸变线阵图像进行矫正^[7],进而得到测量目标的真实三维位姿。

线性测量系统下对动态目标的运动估计主要在两种情况下进行,合作情况下和非合作情况下。在合作情况下,人们往往可以通过在待测目标上设计一些最初用于分析人类运动的标定来进行运动估计。例如,Zhao 等人^[9]通过匹配标注在运动球上的特征点实现了球体运动模型中运动参数的精确估计。高俊钗等人^[10]通过以标准圆形作为标定目标确定了物像关系和校正插值系数,进而能够对任意形状的测量目标进行线阵成像校正。合作模式下的运动估计通常能够达到高精度的估计结果,但是对于无法进行标定的测量情况并不适用。

在非合作情况下,多数方法是通过不同设备间的信息交互或者多个传感器的协同监测进行运动估计的。例如,Zhang 等人^[11]利用由积分陀螺仪和视觉导航系统组成的集成传感器对空间失稳目标进行运动估计。J.E.等人^[12]构建了一个有四条水平传感线的线

性测量系统用于感测高尔夫球的实时运行轨迹。Sun 等人^[13]通过带有标定参考点的多个定位器和校准线阵相机获得了高分辨率的快速三维测量方法。除了测量设备间的协同合作,在两幅或多幅图像中寻找对应点的归一化互相关方法也是一种常用于克服运动畸变的方法。李荣华等人^[14]通过连续两次扫描进行点云配准得到了空间目标的瞬时运动参数,实现了单一载荷下非合作自旋空间目标运动估计(Relative Pose Measurement, RPM)方法。但对于复杂运动的测量目标或者两次获取点云重合量达不到配准要求的情况,该方法的运动估计误差会很大。近来,孙日明等人^[15]根据空间失稳目标特征角点的时空关系提出了一种分层次进行局部自旋和全局进动的运动估计(Local Similarity and Global Continuity based Motion Estimation, LGME)方法。该方法估算了自旋及进动的全部运动参数,但是对于自旋并不显著于进动或者自旋轴不能绕进动轴旋转一周的测量情况,运动估计的精度仍不能得到保障。

为克服 LGME 方法中的条件稳定限制,解决单传感器线性测量系统下空间失稳目标的成像畸变问题,文中提出了一种高精度的空间失稳目标运动估计方法。该方法引入球面坐标建立了自约束的一般空间失稳目标时空运动模型,减少待定参数的同时化运动估计问题为无约束下高维非线性求解问题。同时,为抑制非线性求解固有的不稳定性,创新性地提出了两次异帧相似判别法则对求解进行成功判别,提高运动估计的准确性和鲁棒性。最后,实验比较了多类非线性求解方法针对本问题的求解效率,设计了依据初值精度划分的求解策略,高效地实现了不受帧数选取条件约束的高精度运动估计,进而解决了空间失稳目标在单传感器线性测量系统下的成像畸变问题。

1 自约束运动模型

一般地,测量运动目标上一点 $P(x, y, z)$ 经过 Δt 时刻后,该点的三维坐标 $P'(x', y', z')$ 可表示为:

$$P' = RP + T \quad (1)$$

式中: R 为三阶实系数旋转矩阵; T 为三维平移向量, R 和 T 由测量目标运动情况决定。

空间失稳目标通常以自旋、进动和章动的复合运动状态存在。针对文中研究背景,章动可忽略不计,

这里仅考虑自旋和进动,其运动规律如图 1 所示。根据空间失稳目标的运动规律,其运动模型可具体地表示为:

$$P' = A_{l_s}^T B_{\omega_s} A_{l_s} (P - O_{l_s}) + O_{l_s} \quad (2)$$

其中

$$A_{l_s} = \begin{bmatrix} \frac{-n_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2}}} & \frac{-m_s^i p_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2}} \sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2} + p_s^{i2}}} & \frac{m_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2} + p_s^{i2}}} \\ \frac{m_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2}}} & \frac{-n_s^i p_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2}} \sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2} + p_s^{i2}}} & \frac{n_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2} + p_s^{i2}}} \\ 0 & \frac{m_s^{i2} + n_s^{i2}}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2}} \sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2} + p_s^{i2}}} & \frac{p_s^i}{\sqrt{m_s^{i2} + n_s^{i2} + p_s^{i2}}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B_{\omega_s} = \begin{bmatrix} \cos \omega_s \Delta t & -\sin \omega_s \Delta t & 0 \\ \sin \omega_s \Delta t & \cos \omega_s \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

是关于自旋轴 $\vec{l}_s = (m_s^i, n_s^i, p_s^i)$ 和自旋角速度 ω_s 的表达式; O_{l_s} 为自旋轴 \vec{l}_s 的空间位置。空间失稳目标在做自旋运动的同时其自旋轴也做锥面运动,即其自旋轴 \vec{l}_s 绕点 O_p , 方向为 \vec{l}_p 的进动轴以角速度 ω_p 做旋转运动。自旋轴方向 \vec{l}_s 和空间位置 O_{l_s} 在等时间间隔 Δt 下,不断地更新为:

$$\begin{cases} O_{l_s^{i+1}} = A_{l_p}^T B_{\omega_p} A_{l_p} (O_{l_s} - O_p) + O_p \\ \vec{l}_s^{i+1} = A_{l_p}^T B_{\omega_p} A_{l_p} (\vec{l}_s + O_{l_s} - O_p) + O_p + O_{l_s^{i+1}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: A_{l_p} 和 B_{ω_p} 分别为进动轴 $\vec{l}_p = (m_p, n_p, p_p)$ 和进动角速度 ω_p 的表示式,具体表达式可以参见公式 (2), 这里

$$\vec{l}_s = (\cos \alpha_s^i \sin \beta_s^i, \sin \alpha_s^i \sin \beta_s^i, \cos \beta_s^i), \vec{l}_p = (\cos \alpha_p \sin \beta_p, \sin \alpha_p \sin \beta_p, \cos \beta_p) \quad (6)$$

并将其代入公式 (2) 的 A_{l_s} 和公式 (3) 的 A_{l_p} , 此时, A_{l_s} 和 A_{l_p} 进一步地表示为:

$$A_{l_s} = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_s^i & -\cos \alpha_s^i \cos \beta_s^i & \cos \alpha_s^i \sin \beta_s^i \\ \cos \alpha_s^i & -\sin \alpha_s^i \cos \beta_s^i & \sin \alpha_s^i \sin \beta_s^i \\ 0 & \sin \beta_s^i & \cos \beta_s^i \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A_{l_p} = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_p & -\cos \alpha_p \cos \beta_p & \cos \alpha_p \sin \beta_p \\ \cos \alpha_p & -\sin \alpha_p \cos \beta_p & \sin \alpha_p \sin \beta_p \\ 0 & \sin \beta_p & \cos \beta_p \end{bmatrix} \quad (8)$$

由于公式 (7) 的 A_{l_s} 和公式 (8) 的 A_{l_p} 总是满足 $A_{l_s} A_{l_s}^T = E$ 以及 $A_{l_p} A_{l_p}^T = E$, 这里, E 是单位矩阵, 则如上述形式的 A_{l_s} 和 A_{l_p} 总是正交矩阵。容易验证, B_{ω_s} 和 B_{ω_p} 也是正交矩阵。根据正交矩阵性质 (正交矩阵的乘积也是正交矩阵), 其旋转矩阵 $R_{\omega_s} = A_{l_s}^T B_{\omega_s} A_{l_s}$ 和 $R_{\omega_p} = A_{l_p}^T B_{\omega_p} A_{l_p}$ 总是满足旋转矩阵 R 的正交约束, 即新运动模型 (公式 (2)~(8)) 具有正交的自约束性。

综上, 将球面坐标引入原运动模型^[15], 能够建立

不再赘述。
根据线阵激光成像雷达的成像原理, 每个时刻只能获取测量目标的一组线信息。因此, 线阵图像中不同线信息对应的旋转矩阵 R 和平移向量 T 是不相同的^[15], 并且随着时间的增加公式 (2) 和公式 (3) 的表达式将会更加复杂。同时, 由于旋转矩阵 R (公式 (1) 中) 必须为正交矩阵, 因此根据公式 (2)、(3) 进行的运动估计将会是正交约束下的运动参数非线性求解问题。

为提高求解效率, 笔者在运动模型 (公式 (2) 和 (3)) 中引入球面坐标, 将自旋轴 $\vec{l}_s = (m_s^i, n_s^i, p_s^i)$ 和进动轴 $\vec{l}_p = (m_p^i, n_p^i, p_p^i)$ 采用球面坐标给出其单位化形式,

其自约束形式的空间失稳目标运动模型。该自约束运动模型 (公式 (2)~(8)) 不仅减少了原模型中待定参数的个数, 同时将运动估计问题转化为无约束下的高维非线性求解问题, 极大地提高了运动参数的求解效率。

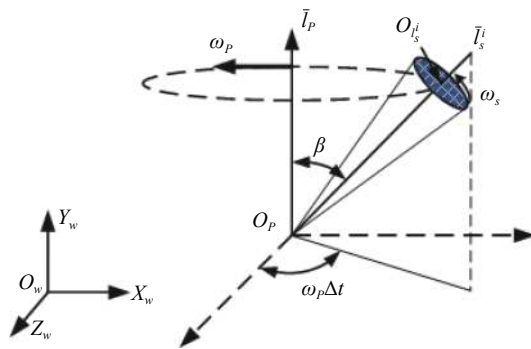


图 1 空间失稳目标运动示意图

Fig.1 Motion of instability space targets

2 高精度运动估计方法

自约束空间失稳目标运动模型 (公式 (2)~(8)) 的建立使得笔者能够将空间失稳目标的运动估计问题转化为无约束下 9 个待定参数的非线性求解问题。然而, 高维非线性求解一直是数学上的一个难题, 并没有一般性的解析求解方法, 通常采用迭代寻优的数值方法求解。针对该问题, 理论上只需要建立 9 个关于这些待定参数的方程进行运动估计, 即

$$P_{i+1} - f(P_i, \alpha_{s_0}, \beta_{s_0}, \omega_s, \alpha_p, \beta_p, \omega_p, O_p) = 0 \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

式中: P_i 和 P_{i+1} 分别为同一点特征在等时间间隔 Δt 下的空间位置; $\alpha_{s_0}, \beta_{s_0}$ 和 α_p, β_p 分别为初值自旋轴方向和进动轴方向对应的球面参数; ω_s 和 ω_p 分别为自旋角速度和进动角速度; O_p 为进动轴空间位置。在实际中,

为避免非线性求解的不唯一性, 通常采用拟合的方式来获得待定参数的数值解, 这里笔者选择它的最小二乘解, 即:

$$\min \sum_{i>2} \|P_{i+1} - f(P_i, \alpha_{s_0}, \beta_{s_0}, \omega_s, \alpha_p, \beta_p, \omega_p, O_p)\|^2 \quad (10)$$

传统数值迭代求解方法^[16-19]多受初值影响严重, 智能寻优方法^[20-23]在迭代后期的求解效率也有待提高。近来, 结合两类方法优点的改进智能寻优方法也被提出, 改进方式通常依据具体问题^[24]不同而不同。为提高所提问题的求解效率, 笔者依据初值精度提出了分策略的求解方法, 即在满足参考文献 [15] 中的稳定条件下采用局部收敛性强的传统迭代求解方法, 在无先验判别的其他一般情况下采用受初值影响小数值论证佳的改进智能寻优方法, 具体流程如图 2 所示。

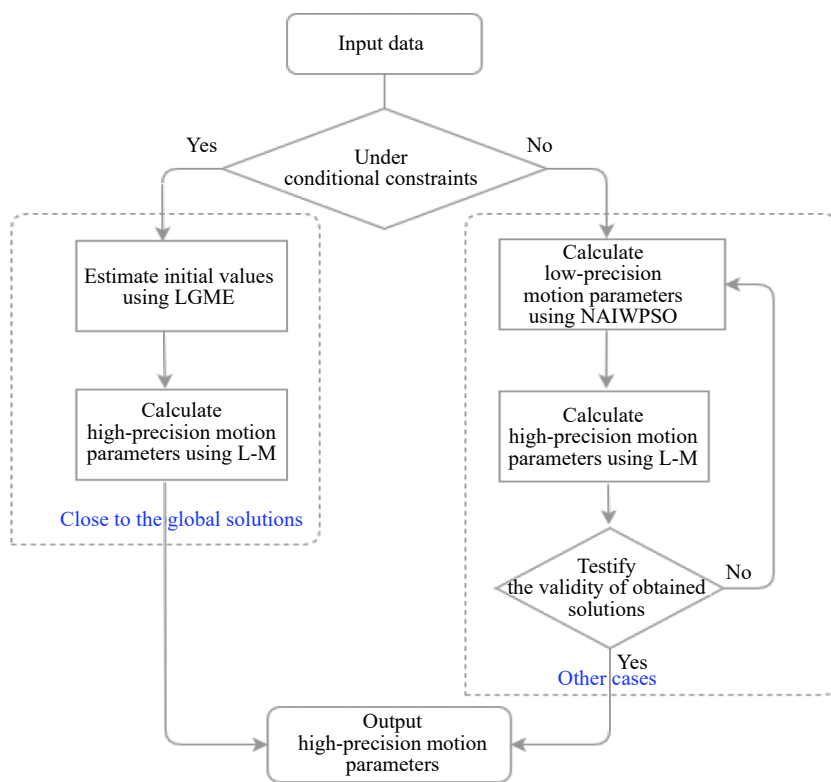


图 2 所提方法流程图

Fig.2 Workflow of the method proposed in the paper

2.1 初值精度高情况

当实际情况满足参考文献 [15] 中的稳定条件, 即自旋运动较进动显著且帧数选取满足自旋轴绕进动轴旋转一周时, 待定运动参数距真实最优解近, 以它们作为迭代初值, 采用局部收敛能力强的传统迭代求解方法能够快速地收敛到高精度运动参数。文中实

验比较了不同运动情况下多种传统非线性求解方法在初值精度高时的求解效率 (收敛速度和收敛精度), 如图 3 所示。

容易发现, 在距真实解近的情况下, L-M 方法无论在收敛精度还是在收敛速度方面较其他方法都具有优势, 因此文中经验选择 L-M 方法作为初值精度

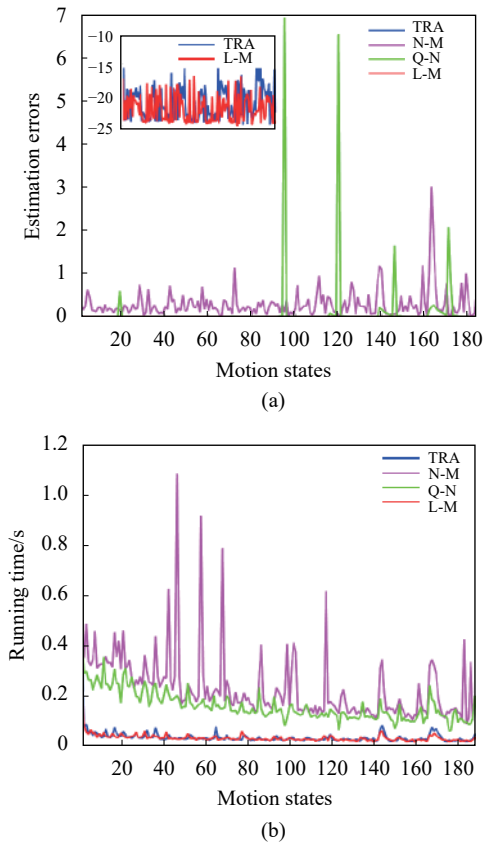


图 3 四种传统非线性求解方法在初值精度高时的求解效率。其中 (a) 和 (b) 分别为信任域法 (TRA)^[16]、单纯形法 (N-M)^[17]、拟牛顿法 (Q-N)^[18] 和 Levenberg-Marquardt(L-M)^[19] 方法不同运动状态下收敛精度和收敛速度的比较结果

Fig.3 Comparison results of convergence efficiency among four nonlinear least squares methods with initial values close to global solutions. (a) and (b) are the results of estimation errors and running time with TRA, N-M, Q-N and L-M methods under a variety of motion states, respectively

高时的非线性求解方法^[19]。

2.2 其他一般情况

当实际情况不满足文献中的稳定条件 (或无法进行先验判别) 时, 文中引入群智能方法, 通过种群间的协同合作补偿非线性求解对初值精度的敏感性, 并在迭代后期采用局部收敛速度快的 L-M 方法提高收敛效率, 最后通过两次异帧最小二乘解的相似度进行成功判别, 高效地实现一般情况下空间失稳目标的高精度运动估计。

为分析不同粒子群寻优方法针对文中问题的求解效率, 文中数值比较了在固定优选值 (Particle swarm optimization, PSO)^[20]、线性控制 (Binary PSO

with Time-Varying Acceleration Coefficients, BPSOT-VAC)^[21]、非线性控制 (Adaptive Particle Swarm Optimization, APSO)^[22] 及惯性自适应控制 (New Adaptive Inertia Weight based PSO, NAIWPSO)^[23] 下多种粒子群寻优方法针对文中问题适应度 (公式 (10)) 变化及收敛速度情况。考虑粒子群寻优固有的随机性, 对每个运动状态进行 100 次实验, 去掉最好和最差的 10 次结果后对其进行综合评估, 如图 4 所示。

容易发现, NAIWPSO 方法和其他方法在运行时间几乎相同的情况下对本问题的适应度下降速度最快、收敛效率最高, 故文中经验选取 NAIWPSO 作为

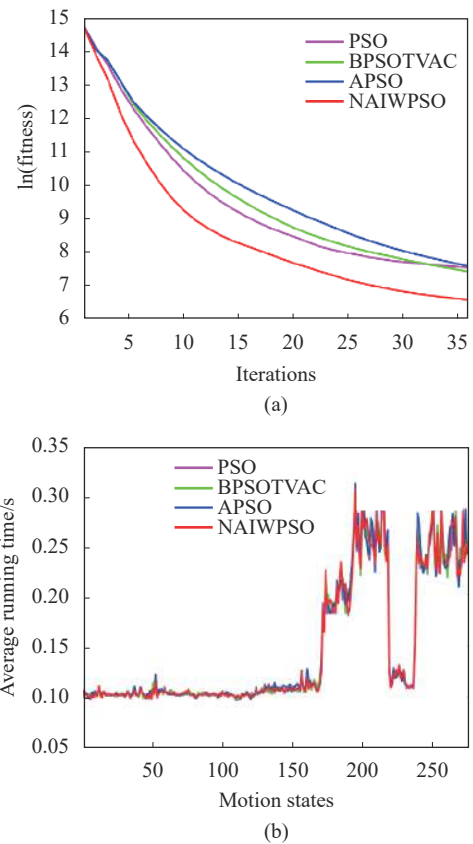


图 4 四种粒子群方法在一般情况下收敛效率的比较结果, 这里种群规模为 100, 最大迭代次数为 35。其中 (a) 和 (b) 分别为 PSO, BPSOTVAC, APSO 和 NAIWPSO 不同运动状态下平均适应度变化及平均运行时间的比较结果

Fig.4 Comparison results of convergence efficiency among four kinds of particle swarm optimization methods for general cases. Here the group size is 100 and the maximum number of iterations is 35. (a) and (b) are the results of average fitness variation and average running time with PSO, BPSOTVAC, APSO and NAIWPSO under a variety of motion states, respectively

一般情况下非线性求解前期的群优化方法。同时,为补偿粒子群寻优方法在迭代后期收敛效率不高的问题,在求解后期采用具有局部收敛快的 L-M 方法进一步提高该情况下非线性求解的效率。

值得说明的是,由于粒子群寻优方法固有的随机性,以及 L-M 方法的初值敏感性,按照上述方法求解并不能保证运动参数非线性求解的准确性。为抑制非线性求解固有的不稳定性,笔者根据文中提出真实解的存在唯一性提出了两次异帧相似判别法则,即根据两次在帧数不同条件下最小二乘解的相似度对获取的运动参数进行成功判别。

设 $X_1^* = (\alpha_{s_0}^1, \beta_{s_0}^1, \omega_s^1, \alpha_p^1, \beta_p^1, \omega_p^1, O_p^1)$ 和 $X_2^* = (\alpha_{s_0}^2, \beta_{s_0}^2, \omega_s^2, \alpha_p^2, \beta_p^2, \omega_p^2, O_p^2)$ 分别为不同帧数选取条件下获得的最小二乘解,当且仅当

$$\|X_1^* - X_2^*\| < \varepsilon \quad (11)$$

这里, ε 为给定阈值,取 $\varepsilon = 10^{-3}$,判定非线性求解成功,否则,判定为求解不成功并重新进行一般情况下的求解流程直至求解成功。

从实验结果看,该判别法则极大地抑制了非线性求解中不稳定因素,能够保证一般情况下文中方法运动估计的准确性和鲁棒性。

3 实验结果与分析

文中以 64 位 Windows 10 系统, Intel(R) Core(TM) i7-7500U CPU@2.70 GHz 处理器, 16 GB 内存为实验环境验证文中方法运动估计的有效性。实验源数据来自上海宇航系统工程研究院,采用尼康激光扫描仪获取卫星模型的三维点云,整体尺寸 14400 mm×

4800 mm×4400 mm。根据空间失稳目标的实际运动情况,实验分别对 $\omega_s = 15\sim 37$ (°)/s, $\omega_p = 3\sim 14$ (°)/s 的空间失稳目标进行运动估计。实验数据采集条件(线阵激光成像雷达参数)如表 1 所示。

表 1 线阵激光成像雷达参数

Tab.1 Parameters of linear laser imaging radar

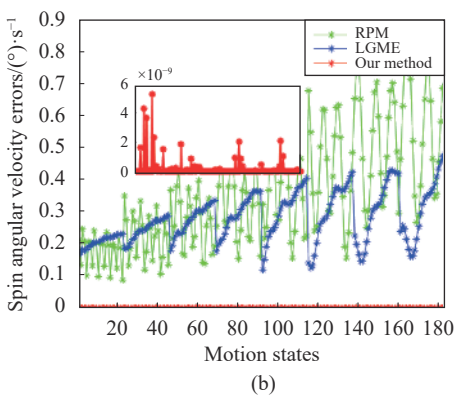
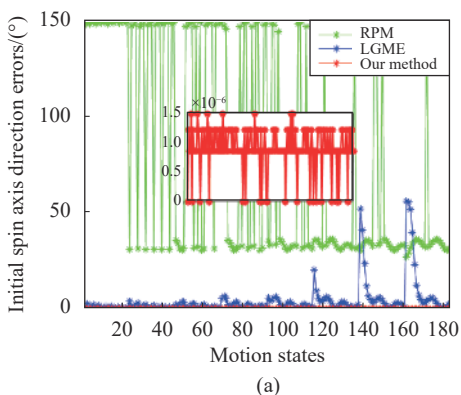
Detection distance	Imaging Resolution	View angle	Ranging Precision	Angle precision	Updating rate	Scanning time (once)
50 m	512×512	10°×10°	2 cm	36"	1 frame/s	500 ms

这里,采用向量 2 范数($\|\cdot\|_2$)计算初始自旋轴、进动轴的估计误差,采用绝对误差($|\cdot|$)计算自旋角速度 ω_s 和进动角速度 ω_p 的估计误差。

3.1 初值精度高时运动估计的实验分析

当自旋运动较进动显著且帧数选取满足自旋轴绕进动轴旋转一周时,参考文献 [15] 能够估算出精度较高的运动参数,以这些运动参数为求解初值,能够快速(平时运行时间<0.25s)收敛到高精度的运动参数。这里,选取实验对象为自旋角速度 $\omega_s = 15\sim 37$ (°)/s,进动角速度 $\omega_p = 3\sim 10$ (°)/s 的空间失稳目标,图 5 给出了文中方法与其他两种解决文中问题方法的运动估计比较结果。

RPM 方法仅考虑空间失稳目标的自旋运动,这里只给出该方法自旋参数的实验比较结果。如图 5 所示,RPM 方法的运动估计误差是很大的。同时发现,当进动比较剧烈时,LGME 方法的运动估计精度仍会受到影响,很难获得高精度的运动估计,而文中方法在该组实验中针对不同运动状态的运动估计均能够达到高精度($<10^{-4}$)的估计结果。



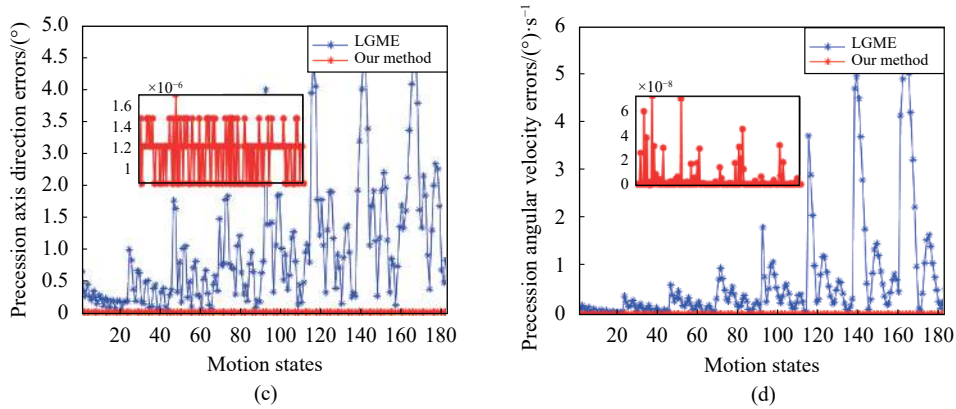


图 5 初值精度高时文中方法与 RPM 及 LGME 运动估计的比较结果。(a), (b), (c) 和 (d) 分别是初始自旋轴、自旋角速度、进动轴和进动角速度在不同运动状态下估计误差的比较结果

Fig.5 Comparisons results of motion estimation among RPM, LGME and our proposed method with initial values close to global solutions. (a), (b), (c) and (d) are the comparisons of estimation errors of initial spin axis, spin angular velocity, precession axis and precession angular velocity under a variety of motion states

3.2 一般情况下运动估计的实验分析

在一般情况下, LGME 方法不能保证运动估计的精度, 甚至存在远远偏离真实解的情况。为检验文中方法在一般情况下运动估计的有效性, 文中对 $\omega_s =$

15~37 (°)/s, $\omega_p = 3\sim 14$ (°)/s 的空间失稳目标采用固定帧数 (15 帧) 给出与 RPM、LGME 方法的实验比较结果。

从图 6 可以看出, 在固定帧数选取方案下, LGME 方法的运动估计也出现了严重偏离真实解的情况, 充

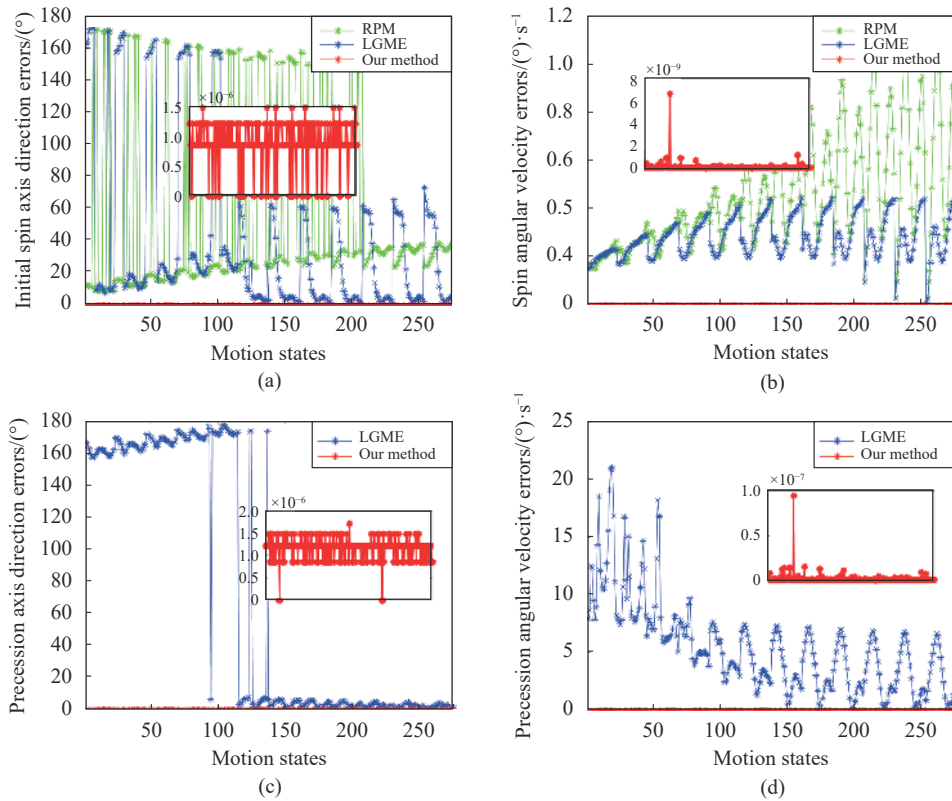


图 6 一般情况下文中方法与 RPM 及 LGME 运动估计的比较结果。(a), (b), (c) 和 (d) 分别是初始自旋轴、自旋角速度、进动轴及进动角速度在不同运动状态下估计误差的比较结果

Fig.6 Comparisons results of motion estimation among RPM, LGME and our proposed method for general cases. (a), (b), (c) and (d) are the comparisons of estimation errors of initial spin axis, spin angular velocity, precession axis and precession angular velocity under a variety of motion states

分说明了 LGME 方法的局限性。而文中方法在固定帧数 (15 帧) 选取方案下对研究背景下所有运动状态均能够达到高精度 ($<10^{-5}$) 的运动估计, 其平均运行时间 $<2.62s$ 。

3.3 线阵成像畸变矫正的实验分析

最后, 笔者数值分析了所提方法在线阵成像畸变矫正中的有效性。动态目标线阵成像的畸变是由测量目标与采集设备的相对运动引起的, 笔者通过将其他时刻 t_i 获取的线阵数据归一化到同一时刻, 这里称其为基准时刻 T , 完成对测量目标的成像畸变矫正。不失一般性, 这里设初始采集时刻 t_0 为基准时刻, 以点云在基准时刻空间位置的平均估计误差评价畸变矫正效果。图 7 给出了一般情况固定帧数选取方案下文方法与 RPM、LGME 方法在畸变矫正方面的比较结果。

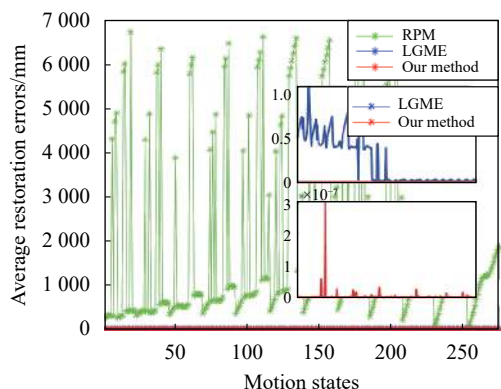


图 7 一般情况下文中方法与 RPM 及 LGME 在成像畸变矫正的比较结果

Fig.7 Comparisons results of restoration among RPM, LGME and our proposed method under a variety of cases

容易发现, 畸变矫正的准确度与运动估计的精度是正相关的, 文中方法较其他两种方法在不同运动状态下均获取了最好畸变矫正结果, 实现了固定帧数选取方案一般情况下的精准 ($<10^{-6}$) 畸变校正。

4 结 论

文中引入球面坐标建立了自约束空间失稳目标运动模型, 将运动估计问题转化为高维空间的无约束非线性求解问题。同时, 提出了两次异帧相似判别法则, 极大地抑制了非线性求解固有的不稳定性, 提高

了运动估计的准确性和鲁棒性, 实现了单传感器线阵测量系统一般情况空间失稳目标的高精度运动估计。该方法不受 LGME 方法的条件稳定性约束, 在固定帧数 (15 帧及以上) 选取方案下均能实现一般情况的空间失稳目标的高精度 ($<10^{-5}$) 运动估计, 进而得到高精度 ($<10^{-6}$) 的畸变矫正结果。固定帧数选取方案解决了运动状态先验未知情况下运动精度难以保证的难题, 但对于形状先验未知的情况文中方法仍有局限性, 该问题的解决将是笔者下一步的研究目标。

参考文献:

- [1] Wang Mingming, Luo Jianjun, Yuan Jianping, et al. An integrated control scheme for space robot after capturing non-cooperative target [J]. *Acta Astronautica*, 2018, 147: 350-363.
- [2] Wang Zhongyu, Li Yaru, Hao Renjie, et al. Monocular vision pose measurement algorithm based on points feature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0517002. (in Chinese)
王中宇, 李亚茹, 郝仁杰, 等. 基于点特征的单目视觉位姿测量算法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(5): 0517002.
- [3] Wu Xiuzhen, Liu Gang, Yu Fengquan, et al. Calibration of camera extrinsic parameters based on monocular visual with GPS assistant [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2252-2258. (in Chinese)
吴修振, 刘刚, 于凤全, 等. 基于单目视觉的GPS辅助相机外参数标定[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2252-2258.
- [4] Peng Jianqing, Xu Wenfu, Liang Bin, et al. Pose measurement and motion estimation of space non-cooperative targets based on laser radar and stereo-vision fusion [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 19(8): 1-11.
- [5] Bu Yuming, Du Xiaoping, Zeng Zhaoyang, et al. Research progress and trend analysis of non-scanning laser 3D imaging radar [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 711-727. (in Chinese)
卜禹铭, 杜小平, 曾朝阳, 等. 无扫描激光三维成像雷达研究进展及趋势分析[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 711-727.
- [6] Zhang Jian, Zhang Lei, Zeng Fei, et al. Development status of airborne 3D imaging lidar systems [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 213-232. (in Chinese)
张健, 张雷, 曾飞, 等. 机载激光3D探测成像系统的发展现状[J]. *中国光学*, 2011, 4(3): 213-232.
- [7] Sun Riming, Lin Tingting, Ji Lin, et al. A general linear imaging modeling method for space unstability targets and parameter optimization of linear laser radar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26 (6): 1524-1532. (in Chinese)

- 孙日明, 林婷婷, 季霖, 等. 空间失稳目标线阵激光成像建模及参数优化[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(6): 1524-1532.
- [8] Chen Zhen, Liu Bo, Liu Enhai, et al. Electro-optic modulation methods in range-gated active imaging [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): A184-A190.
- [9] Zhao Zhuxin, Wen Gongjian. Ball's motion estimation using a line-scan camera, *Measurement Science Review*, 2011, 11(6): 185-191.
- [10] Gao Junchai, Lei Zhiyong, Wang Zemin. Image correction of linear array camera [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(9): 091501. (in Chinese)
高俊钗, 雷志勇, 王泽民. 线阵相机的图像校正[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(9): 091501.
- [11] Zhang LiuJun, Zhang Shifeng, Yang Huabo, et al. Relative attitude and position estimation for a tumbling spacecraft [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2015, 42: 97-105.
- [12] Bae Jieun, Kim Jinwook, Kim Hangjoon, et al. Estimation of 3-D trajectory of the golf ball using dual linear sensor[C]// *International Joint Conference on Inc. IEEE*, 2009: 2024-2030.
- [13] Sun Bo, Zhu Jigui, Yang Linghui, et al. Stereo line-scan sensor calibration for 3D shape measurement [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(28): 7905-7914.
- [14] Li Ronghua, Li Jinming, Chen Feng, et al. A method of relative pose measurement by single load for GEO instability Target [J]. *Journal of Astronautics*, 2017, 38(10): 1105-1113. (in Chinese)
李荣华, 李金明, 陈凤, 等. 高轨失稳目标单载荷相对位姿测量方法[J]. *宇航学报*, 2017, 38(10): 1105-1113.
- [15] Sun Riming, Li Jiangdao, Lin Tingting, et al. Distortion rectification of linear imaging for space unstability targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0926003. (in Chinese)
孙日明, 李江道, 林婷婷, 等. 空间失稳目标线阵成像畸变校正方法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(9): 0926003.
- [16] Tigao Montanher, Arnold Neumaier, Ferenc Domes. A computational study of global optimization solvers on two trust region subproblems [J]. *Journal of Global Optimization*, 2018, 71(4): 915-934.
- [17] Lagarias J C, Reeds J A, Wright M H, et al. Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions [J]. *SIAM Journal of Optimization*, 1998, 9(1): 112-147.
- [18] Hu Jiang, Jiang Bo, Lin Lin, et al. Structured quasi-Newton methods for optimization with orthogonality constraints [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2019, 41(4): A2239-A2269.
- [19] Shirangi M G, Emerick A A. An improved TSVD-based Levenberg-Marquardt algorithm for history matching and comparison with Gauss-Newton [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 143: 258-271.
- [20] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. Perth: IEEE, 1995: 1942-1944.
- [21] Chih Mingchang, Lin Chinjung, Chern Mawsheng, et al. Particle swarm optimization with time-varying acceleration coefficients for the multidimensional knapsack problem [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(4): 1338-1350.
- [22] Jiang Jianguo, Tian Yu, Wang Xiangqian, et al. Adaptive particle swarm optimization via disturbing acceleration coefficients [J]. *Journal of Xidian University*, 2012, 39(4): 74-80. (in Chinese)
姜建国, 田旻, 王向前, 等. 采用扰动加速因子的自适应粒子群优化算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2012, 39(4): 74-80.
- [23] Li Xuejun, Xu Jia, Zhu Erzhou, et al. A novel computation method for adaptive inertia weight of task scheduling algorithm [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2016, 53(9): 1990-1999. (in Chinese)
李学俊, 徐佳, 朱二周, 等. 任务调度算法中新的自适应惯性权重计算方法[J]. *计算机研究与发展*, 2016, 53(9): 1990-1999.
- [24] Yang Yichuan, Zhang Tianxian, Yi Wei, et al. Multi-static radar power allocation for multi-stage stochastic task of missile interception [J]. *Radar Sonar & Navigation IET*, 2018, 12(5): 540-548.



第一作者简介: 孙日明(1978-),女,副教授,博士,主要从事图像的畸变矫正方法、多尺度分析及图形图像压缩方法研究,2013年取得大连理工大学数学学院计算数学专业博士学位。以第一作者发表论文11篇,其中SCI检索1篇,EI检索7篇,主持辽宁省教育厅科学研究项目1项,辽宁省博士科研启动基金1项,主持校级教育改革项目1项,参加国家自然科学基金项目3项,辽宁省教育厅科学研究项目1项,辽宁省自然科学基金1项,辽宁省博士科研启动基金1项。Email: sunriming78@126.com