

火星探测环绕段自主光学导航算法研究 (特约)

郑循江¹, 何峰^{1,2*}, 姜丽辉¹, 曹卫卫¹, 肖东东¹

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;
2. 南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对火星探测环绕段自主导航需求, 结合初始轨道参数及光学导航相机拍摄的火星图像, 提出了一种基于火星本体的高精度自主导航方法。该方法首先利用初始轨道参数得到火星在导航相机像平面下的投影图, 然后将该投影图与导航相机拍摄的火星图进行匹配融合得到火星的边缘图, 后用该边缘图进行精确椭圆拟合, 继而可实现器-火视线距和视线矢量的测量, 在算法仿真过程中充分考虑到了工程实现中可能会遇到的图像旋转、平移及尺寸变换问题, 仿真结果表明: 提出的利用先验信息的图像融合测量算法较单独利用火星图像进行导航测量的方法, 精度和可靠度均有较大提升, 可满足火星探测环绕段的任务需求。

关键词: 火星探测; 环绕段; 自主导航; 图像融合; 椭圆拟合

中图分类号: P123.2⁺¹ **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190458

Research on autonomous optical navigation algorithm for Mars exploration during the surround segment(*Invited*)

Zheng Xunjiang¹, He Feng^{1,2*}, Jiang Lihui¹, Cao Weiwei¹, Xiao Dongdong¹

(1. Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China;
2. Academy of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Demand for autonomous navigation for mars exploration during the surround segment, a high-precision autonomous navigation method using Mars ontology was proposed based on the initial orbital parameters and the Mars image was taken by the optical navigation camera. The method first used the initial orbital parameters to obtain a projection of Mars in the camera phase plane, then matched the projection map with the Mars image to get the edge map of Mars, using the edge map for accurate ellipse fitting to achieve detector-Mars line of sight distance and line of sight vector measurement. In the process of algorithm simulation, the problems of image rotation, translation and size transformation that may be encountered in engineering implementation were fully considered. The simulation results show that the proposed image fusion measurement algorithm using prior information, the accuracy and reliability is improved more than the navigation method using mars image alone, which can meet the mission requirements of Mars exploration during the surround segment.

Key words: Mars exploration; surround segment; autonomous navigation; image fusion; ellipse fitting

收稿日期:2020-03-06; 修订日期:2020-04-08

基金项目:上海市科技人才计划(17XD1420800)

作者简介:郑循江(1976-),男,研究员,博士,主要从事空间光电传感器技术研究。Email: goodzxj@163.com

通讯作者:何峰(1986-),男,高级工程师,硕士,主要从事空间光电传感器技术研究。Email: hefeng330467115@126.com

0 引言

执行深空探测任务必然要建立完善的导航与控制方案来确定轨道信息,对于近地轨道飞行器主要依赖于地面测控网来跟踪测量实现卫星的定轨导航;随着人类对太空探索的深入,飞行器与地面的通信延迟会越来越严重(地-火通信延迟可达 22 min),甚至会出现完全中断(长时间日凌,最长可达 1 个月)的情况,此时,单纯依赖地面测控网很难做到实时定轨,应对突发情况;这就要求飞行器能够自主完成定轨、定姿等基本功能,在深空探测领域,自主导航逐渐有替代地面导航成为航天器导航的主体的趋势^[1]。

光学自主导航具有自主性强、精度高、实时性好等优点,是深空探测中广泛采用的一种自主导航方式,先后在 Deep Impact、SMART-1 及 MUSES-C^[2] 等深空探测任务中得到过成功的应用。近年来,随着我国深空探测任务的逐步展开,自主导航也开始被关注,参考文献 [3-4] 分别就火星探测任务中的巡航段和接近段提出了各自的导航算法解决方案,具有一定参考价值。

由于深空环境的不同,不同任务段所采用的自主导航方式必须充分考虑各自不同的特性,在环绕段导航相机能够捕获到近距离高清的目标天体图像,这有利于提高自主导航的精度,但环火轨道是一个大椭圆轨道,为保证导航精度,导航相机的光学视场不能选择太大,为满足环火科学任务段的导航需求,选择的光学视场在环火段只能拍摄到一段弧,如果只利用该弧段进行导航信息解算,很难达到任务需求,且存在较高的误警率;因此,提出利用地面测定轨的轨道初值及星敏感器的姿态信息先预估火星在相机像平面下的投影,然后将该投影图与相机拍摄到的火星弧段图进行匹配融合计算,最终得到满足任务需求的导航信息。

1 投影边缘生成算法

要得到火星在导航相机像平面下的投影图,需要有火星在导航相机像平面下的位置信息 $C(X_0, Y_0, Z_0)$, 该信息可由卫星的 GNC 分系统通过地面测定轨获取。

根据光学成像原理建立三维空间到二维空间的投影模型如图 1 所示^[5-6], 火星球心坐标为 $C(X_0, Y_0, Z_0)$, 火星半径为 R , 通过图 1 所示几何关系可得到相机可

视火星的最大圆的圆心 $c(x_0, y_0, z_0)$ 和半径 r 如下:

$$\begin{cases} x_0 = X_0 \cdot (1 - R^2/H) \\ y_0 = Y_0 \cdot (1 - R^2/H) \\ z_0 = Z_0 \cdot (1 - R^2/H) \\ r = R \cdot \sqrt{1 - R^2/H} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $H=X_0^2+Y_0^2+Z_0^2$ 。

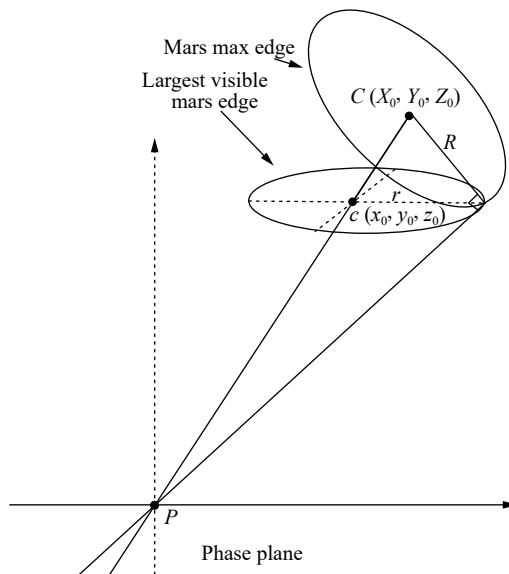


图 1 相机成像几何关系

Fig.1 Camera imaging geometry

已知三维空间圆的圆心 $c(x_0, y_0, z_0)$ 和半径 r , 建立如图 2 所示向量关系, 则该圆的参数方程可表示为:

$$\begin{cases} x(\theta) = x_0 + r \cos(\theta)a_1 + r \sin(\theta)b_1 \\ y(\theta) = y_0 + r \cos(\theta)a_2 + r \sin(\theta)b_2 \\ z(\theta) = z_0 + r \cos(\theta)a_3 + r \sin(\theta)b_3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: (a_1, a_2, a_3) 与 (b_1, b_2, b_3) 分别对应单位向量 \vec{a} 和 \vec{b} , 它们既垂直于向量 \vec{n} , 又互相垂直, θ 变化范围为 $(0, 2\pi)$ 。

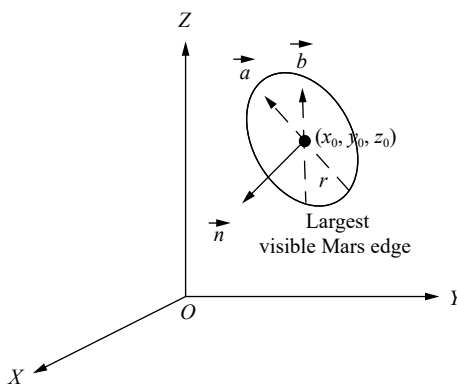


图 2 三维空间中的圆

Fig.2 Circle in 3-D space

根据小孔成像投影模型,可得到三维的可视火星最大边缘在导航相机像平面的投影方程为:

$$\begin{cases} x_u(\theta) = -f \cdot x(\theta)/z(\theta) \\ y_u(\theta) = -f \cdot y(\theta)/z(\theta) \end{cases} \quad (3)$$

式中: f 为相机的焦距。

图 3 是根据上面投影关系得到的一个仿真结果,其中虚线椭圆为通过先验信息获得的整个火星在像平面的成像,后续计算以此作为标称椭圆,图中*标识弧段为标称椭圆中的模拟成像弧段的对应弧段,+弧段是模拟的导航相机拍摄的真实弧段,是由对标称弧段进行平移、旋转、尺度变化和加入零均值高斯误差得到的。

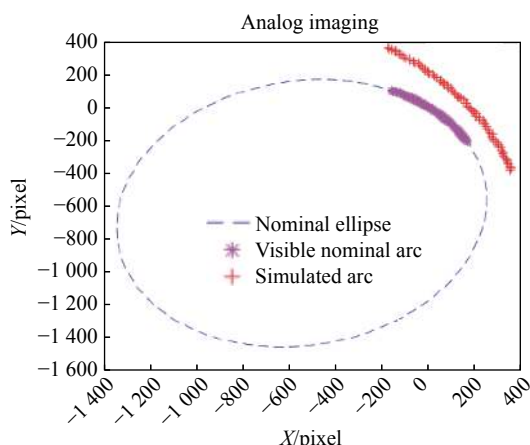


图 3 模拟成像结果示意图

Fig.3 Schematic diagram of simulated imaging results

2 三维度弧段匹配算法

导航相机实际成像过程中,受曝光时间、算法模型、安装精度及目标特性等因素的影响,拍摄的弧段相比较于计算得到的弧段可能存在位置、角度和大小三个维度的不匹配问题,无法直接利用计算得到的标称椭圆进行融合计算,需要对标称椭圆进行平移、旋转和尺度的变换。

后续计算匹配过程中将相机拍摄得到的弧段,即图 3 中的红色弧段作为目标弧段,把通过计算得到的标称弧段,即图 3 中的粉红色弧段作为待匹配弧段,通过如下 R 、 t 、 S 变换流程,最终得到一组变换参数 R 、 t 、 S 和匹配后的弧段,过程如下:

- (1) 通过比例的方法,使两段弧段中的点形成点对;
- (2) 求一次 R 、 t 、 S 并将 R 、 t 、 S 作用在待匹配弧

段上,使其靠近目标弧段,并作为迭代的初值;

(3) 通过几何距离最短的方法,将两段弧段中的点形成点对;

(4) 求一次 R 、 t ,并将 R 、 t 作用在待匹配弧段上,并保留 R 、 t ;

(5) 求两弧段之间的误差,若误差小于阈值则输出结果,若误差大于阈值则重复步骤(3)、(4)。

在匹配时,两个弧段存在尺度问题,这会导致弧段的点数不同。而计算 R 、 t 、 S 的过程需要两个弧段的点数相同且两两配对,所以在每次计算 R 、 t 、 S 之前,都需要对两个弧段进行配对。计算 R 、 t 、 S 的方法如下:

假设图 3 红色的弧段为 $P = \{p_1, \dots, p_i\}$, 粉红色的弧段为 $Q = \{q_1, \dots, q_i\}$, 现在需要找到一个变换 R 、 t 、 S 使得:

$$\forall i, p_i = SRq_i + t \quad (4)$$

首先,先定义第 i 对点的误差项:

$$e_i = p_i - (SRq_i + t) \quad (5)$$

然后,构建最小二乘问题,求使误差平方和达到极小的 R 、 t 、 S 。

$$\sum_{i=1}^n \|p_i - (SRq_i + t)\|^2 \quad (6)$$

上式中既有 R 、 t ,又有 S ,直接求解较为困难,下面推导求解方法。

首先,定义两组点的质心:

$$p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i) \quad (7)$$

$$q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i) \quad (8)$$

两组点减去质心可得:

$$p'_i = p_i - p \quad (9)$$

$$q'_i = q_i - q \quad (10)$$

误差项可以重新写成:

$$e_i = p'_i - SRq'_i - t'_0 \quad (11)$$

其中:

$$t'_0 = t - p + SRq \quad (12)$$

误差的和如下所示:

$$\sum_{i=0}^n \|p'_i - SRq'_i - t'_0\|^2 \quad (13)$$

展开可得:

$$\sum_{i=1}^n \|p'_i - SRq'_i\|^2 - 2t'_0 \sum_{i=1}^n (p'_i - SRq'_i) + n\|t'_0\|^2 \quad (14)$$

如上式, 第一项和第三项是非零的, 第二项等于零, 其中第一项与 t'_0 无关, 要求此项最小可以令 t'_0 等于零, 即:

$$e_i = p'_i - SRq'_i \quad (15)$$

两边同除以 \sqrt{S} 可得:

$$e_i = \frac{1}{\sqrt{S}} p'_i - \sqrt{S} Rq'_i \quad (16)$$

由于旋转不会改变长度的大小,

$$\|q'_i\|^2 = \|Rq'_i\|^2 \quad (17)$$

误差和就成了:

$$\frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \|p'_i\|^2 - 2 \sum_{i=1}^n p'_i Rq'_i + S \sum_{i=1}^n \|q'_i\|^2 \quad (18)$$

可以写成下式:

$$\left(\sqrt{S} \sum_{i=1}^n \|q'_i\|^2 - \frac{1}{\sqrt{S}} \sum_{i=1}^n \|p'_i\|^2 \right)^2 + 2 \left(\sum_{i=1}^n \|q'_i\|^2 \sum_{i=1}^n \|p'_i\|^2 - \sum_{i=1}^n p'_i Rq'_i \right) \quad (19)$$

如果令上式值更小, 则平方项等于零, 可以求出 S :

$$S = \left(\sum_{i=1}^n \|p'_i\|^2 / \sum_{i=1}^n \|q'_i\|^2 \right)^{1/2} \quad (20)$$

求出 S 后, 问题就变成了求下式中的 R 和 t , 然后通过求 R 和 t 不断地迭代, 直到求出一个较好解:

$$\forall i, p_i = Rq_i + t \quad (21)$$

首先, 先定义第 i 对点的误差项:

$$e_i = p_i - (Rq_i + t) \quad (22)$$

然后构建最小二乘问题, 求使误差平方和达到极小的 R 和 t :

$$\sum_{i=1}^n (p_i - (Rq_i + t))^2 \quad (23)$$

上式中既有 R 又有 t , 直接求解较为困难, 推导求解方法如下。

首先, 定义两组点的质心:

$$p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i) \quad (24)$$

$$q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i) \quad (25)$$

用没有下标的字母代表质心。随后, 在误差函数中做如下的处理:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \|p_i - (Rq_i + t)\|^2 &= \sum_{i=1}^n \|p_i - Rq_i - t - p + Rq + p - Rq\|^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n \|p_i - p - R(q_i - q) + (p - Rq - t)\|^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\|p_i - p - R(q_i - q)\|^2 + \|p - Rq - t\|^2 \right. \\ &\quad \left. + 2(p_i - p - R(q_i - q))^T (p - Rq - t) \right) \end{aligned} \quad (26)$$

观察上式, 可以发交叉项中在求和之后为零, 因此, 优化的目标函数可以简化为:

$$\sum_{i=1}^n \left(\|p_i - p - R(q_i - q)\|^2 + \|p - Rq - t\|^2 \right) \quad (27)$$

仔细观察上式的左右两项, 可以发现左边只与 R 有关, 而右边既有 R 也有 t , 但只和质心相关。只要获得了 R , 令右边项为零就能得到 t , 设:

$$P_i = p_i - p \quad (28)$$

$$Q_i = q_i - q \quad (29)$$

根据以上算法可知, 求得旋转以后, 平移量是很容易得到的, 下面推导旋转量的计算方法。展开关于 R 的误差项得:

$$\sum_{i=1}^n \|P_i - RQ_i\|^2 = \sum_{i=1}^n (P_i^T P_i + Q_i^T R^T R Q_i - 2P_i^T R Q_i) \quad (30)$$

上式中, 第一项和第二项都与 R 无关, 因此, 实际上优化目标函数变为:

$$\sum_{i=1}^n -P_i^T R Q_i = \sum_{i=1}^n -tr(R Q_i Q_i^T) = -tr \left(R \sum_{i=1}^n Q_i Q_i^T \right) \quad (31)$$

接下来, 介绍怎样通过 SVD 解出上述问题中的最优的 R 。关于最优性的证明较为复杂, 见参考文献 [7-9]。

为了解 R , 先定义矩阵:

$$W = \sum_{i=1}^n Q_i Q_i^T \quad (32)$$

式中: W 是一个 3×3 的矩阵, 对 W 进行 SVD 分解, 得:

$$W = U \varepsilon V^T \quad (33)$$

式中: ε 为奇异值组成的对角矩阵, 对角线元素从大到小排列, 而 U 和 V 为对角矩阵。当 W 满秩时, R 为:

$$R = UV^T \quad (34)$$

这样就获得了 R , 根据下式可以求出 t 。

$$p - Rq - t = 0 \quad (35)$$

如图 4、5 所示, 采用这种方法可以顺利地把标称椭圆匹配到模拟成像的弧段中, 匹配完成以后, 就可以对弧段补点然后做椭圆拟合和视线提取。

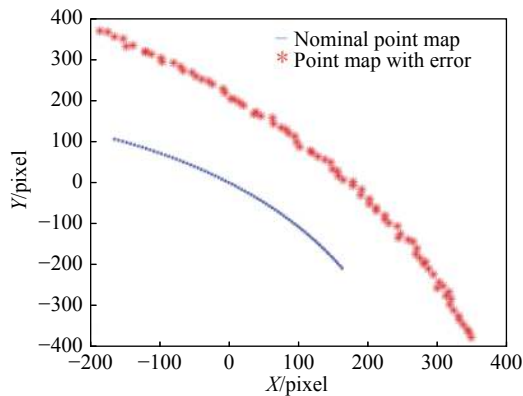


图 4 模拟点云图及标称弧段点云图

Fig.4 Analog point cloud map and nominal arc point cloud map

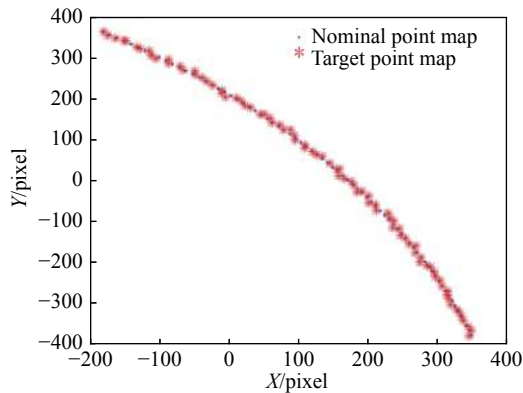


图 5 标称弧段与模拟成像弧段匹配结果图

Fig.5 Matching results of nominal arc and simulated imaging arc

3 椭圆拟合算法

任何一个椭圆可以写成如下曲线形式:

$$F(x, y) = Ax_i^2 + Bx_iy_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F = 0 \quad (36)$$

定义如下性能指标:

$$S(a) = \sum_{i=1}^n [f_i(a, x)]^2$$

式中: $a = (A, B, C, D, E, F)^T$ 表示椭圆方程的待估参数; $f_i(a, x) = Ax_i^2 + Bx_iy_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F$ 是不同观测点 $x = (x_i, y_i)$ 处的观测值, 而待估椭圆的模型函数的理

论值为零, n 为点的个数。可以求得方程系数 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 。

对于以上最小二乘拟合参数 a , 若满足如下约束条件:

$$4AC - B^2 > 0 \quad (37)$$

则可判定所拟合的参数方程曲线为椭圆曲线。

通过边缘检测并结合椭圆拟合的方法, 就能够拟合出完整的轮廓曲线方程, 进而得到圆心和视半径, 转换关系可写成如下形式^[10-13]:

$$x_0 = \frac{2CD - BE}{B^2 - 4AC}, y_0 = \frac{2AE - BD}{B^2 - 4AC} \quad (38)$$

$$a = \sqrt{\frac{2[AE^2 + CD^2 - BDE + F(B^2 - 4AC)]}{(B^2 - 4AC)[\sqrt{(A - C)^2 + B^2} - A - C]}} \quad (39)$$

$$b = \sqrt{\frac{2[AE^2 + CD^2 - BDE + F(B^2 - 4AC)]}{(B^2 - 4AC)[-\sqrt{(A - C)^2 + B^2} - A - C]}} \quad (40)$$

$$\phi = \begin{cases} 0 & B = 0 \text{ 且 } A > C \\ \pi/2 & B = 0 \text{ 且 } A < C \\ \frac{1}{2} \cot^{-1} \left(\frac{A - C}{B} \right) & B \neq 0 \text{ 且 } A < C \\ \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \cot^{-1} \left(\frac{A - C}{B} \right) & B \neq 0 \text{ 且 } A > C \end{cases} \quad (41)$$

式中: (x_0, y_0) 为椭圆中心; a 和 b 为椭圆半长轴和半短轴; ϕ 为椭圆倾斜角。

弧段匹配完成后, 如图 6 所示, 在标称椭圆上取点补全弧段, 然后再对补全后的弧段利用上面最小二乘法进行椭圆拟合得到椭圆参数; 如图 7 所示, 如果只利用模拟成像弧段做椭圆拟合, 会得到绿色的小椭圆, 导致算法失效, 而黄色椭圆是采点补全后的弧段

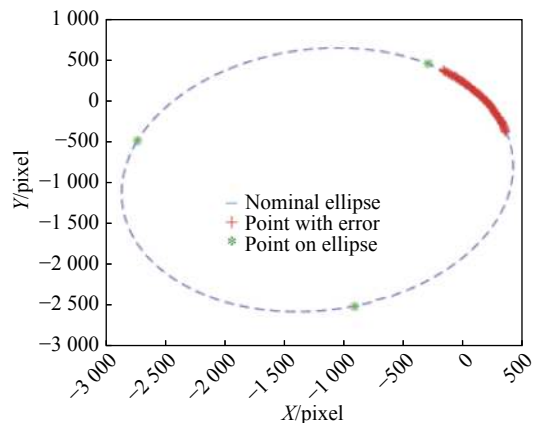


图 6 取点结果示意图

Fig.6 Taking point diagram

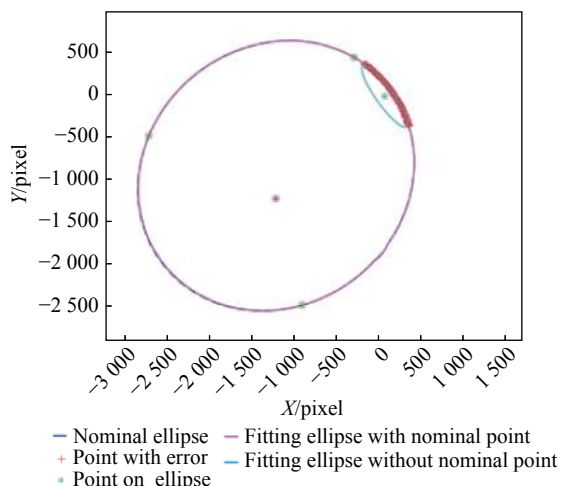


图 7 最小二乘椭圆拟合结果

Fig.7 Least squares ellipse fitting result

的拟合结果,图中可粗略看出其与标称椭圆基本重合。

4 质心修正及导航参数解算

由于导航相机对火成像时并不是光轴指向火星球心的,因此会导致实际火星球心的投影位置和椭圆拟合的圆心位置不重合的现象,由此带来的误差会随着光轴偏离球心的角度增大而增大,需要对此进行修正才能参与后续的轨道参数解算。

如图 8 所示,实际火星球心投影位置应该是经过 O_3 点投影到平面上的 O_2 点,而采用椭圆拟合得到的椭圆的圆心为 O_1 点。

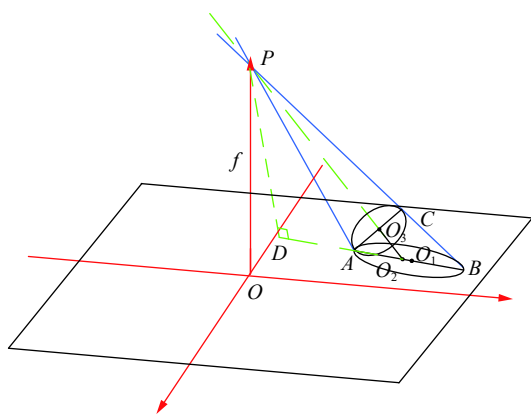


图 8 火星质心在像平面投影几何关系图

Fig.8 Mars center in the phase plane projection geometric relationship

根据投影关系,可采用如下几何方法进行修正:

已知条件:点 P 、 A 、 B 的坐标可通过上面椭圆拟合求得, O_2 在椭圆长轴 AB 上, 线段 PO_2 是 $\angle APB$ 的

角平分线。

定比分点公式:若 AB 上一点 O_2 将 AB 分为 $AO_2:O_2B=1:\alpha$, 则点 O_2 的坐标可以表示为:

$$O_2 = \frac{A + \alpha B}{1 + \alpha} \quad (42)$$

由余弦定理和角平分线的性质可以得到等式:

$$\frac{\overrightarrow{PA} \cdot \overrightarrow{PO_2}}{|\overrightarrow{PA}| \cdot |\overrightarrow{PO_2}|} = \frac{\overrightarrow{PO_2} \cdot \overrightarrow{PB}}{|\overrightarrow{PO_2}| \cdot |\overrightarrow{PB}|} \quad (43)$$

由以上等式便可求出 α , 求出 O_2 点坐标。

导航信息包括器-火视线矢量和视线距离,得到火星质心在像平面的投影点 O_2 坐标,相机坐标系下的器-火视线矢量可表示为:

$$[X, Y, Z] = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} [x, y, f] \quad (44)$$

式中: f 为焦距; $[x, y]$ 为 O_2 点在像平面下的坐标。

利用第 4 节拟合得到的椭圆,对导航相机拍摄到的火星边缘点进行滤波,代入公式 (42) 可解算器-火视线距,此部分详细推导过程可参考文献 [10]:

$$\rho = \left\{ \left[(e_c)_i^T A (e_c)_i \right] - \frac{\left[(e_c)_i^T A (e_i)_i \right]^2}{\left[(e_i)_i^T A (e_i)_i \right]} \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (45)$$

式中: ρ 为器-火视线距; $(e_c)_i$ 为相机指向火星球心单位矢量,可由火星球心在像平面坐标系下的投影求得; $(e_i)_i$ 为相机指向火星边缘的单位矢量,可由导航相机拍摄的火星边缘点求得,矩阵 A 为火星的特征参数,如下所示, a, b, c 为火星的 3 个主轴,如将火星看成是标准球体,则 3 个参数相等。

$$A = \begin{pmatrix} \frac{1}{a^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{b^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c^2} \end{pmatrix} \quad (46)$$

5 误差分析

从以下 4 个方面讨论了文中算法的误差及对最终结果的影响:

- (1) 输入数据噪声误差 (对应的是导航相机成像的图像噪声) 对形心矢量解算的影响;
- (2) 标称椭圆取点数量对形心矢量解算的影响;
- (3) 假设的待匹配弧段的与实际真实弧段的偏移量对形心矢量解算的影响;

(4) 输入图像的旋转、平移和尺度变化对形心矢量解算的影响。

5.1 数据噪声对形心矢量解算的影响

如图 9 和 10 所示, 从仿真图中可以看出: 随着输入数据误差的加大, 得到的形心矢量的误差也就越大, 但整体影响有限, 形心矢量误差非常小, 解算精度很高, 可满足探测任务的需求。

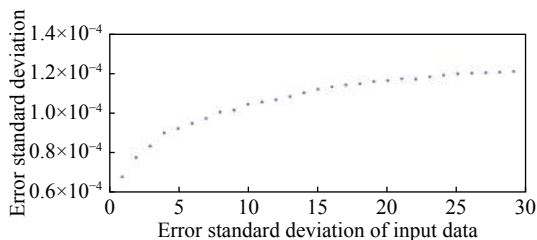


图 9 形心矢量俯仰角误差标准差

Fig.9 Centroid vector pitch angle error standard deviation

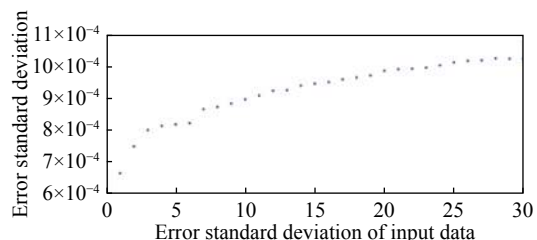


图 10 形心矢量偏航角误差标准差

Fig.10 Centroid vector yaw angle error standard deviation

5.2 标称椭圆取点对形心矢量解算的影响

图 11 讨论了对由先验信息得到的标称椭圆取点数量对形心矢量解算的影响, 由图中可以看出, 当只取一两个点时, 得到的结果误差较大, 大概在取 4 个

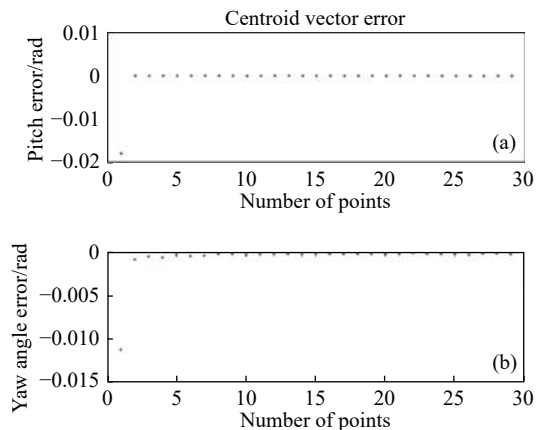


图 11 不同取点数对形心矢量的影响

Fig.11 Effect of different points on the centroid vector

点的时候, 误差就收敛到了一个较好的水平。

5.3 待匹配弧段偏移量对形心矢量解算的影响

前文假设了由先验信息得到的弧段就是目标弧段在标称椭圆上的相关弧段, 这个假设会产生一个误差, 即真实的相关弧段和假设的相关弧段存在位置偏移。此处仿真了不同偏移量对最终能够形心矢量计算的影响, 从图 12 中可以看出, 偏移会使得一个坐标方向产生较大的误差, 但在移量小于 20 个像素时, 整体偏移误差不大。

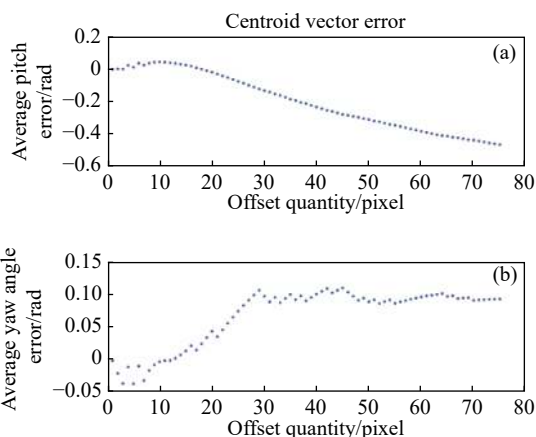


图 12 不同偏移量对形心矢量的影响

Fig.12 Effect of different offsets on the centroid vector

5.4 输入图像偏移对形心矢量解算的影响

针对科学任务段, 讨论在较近距离 (3 000 km) 和较远距离 (12 000 km) 的两种工况下, 输入图像的旋转、平移和尺度误差对形心矢量提取的影响。

由图 13 可知, 形心矢量的结果对图像的旋转很

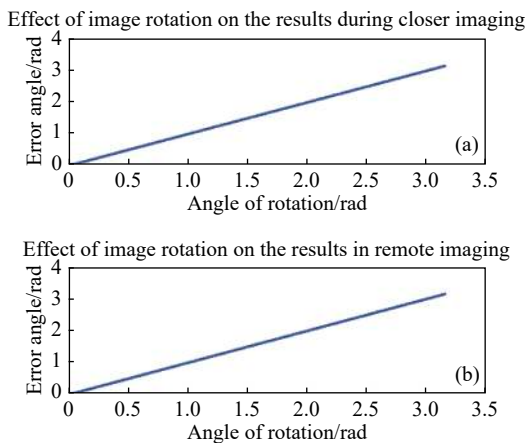


图 13 旋转对形心矢量解算的影响

Fig.13 Effect of rotation on the centroid vector solution

敏感,成像时图片的旋转误差会对结果产生较大影响;图 14 显示了平移对结果的影响,分析可知,成像距离越远,平移产生的影响越大;图 15 表示了尺度变化对结果的影响,图中显示成像距离越近,尺度误差产生的影响越大。

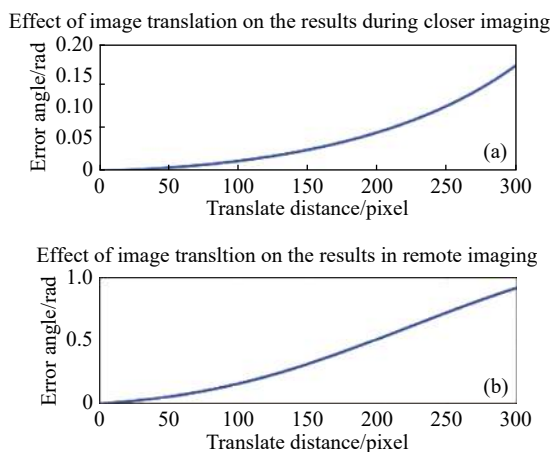


图 14 平移对形心矢量解算的影响

Fig.14 Effect of translation on the centroid vector solution

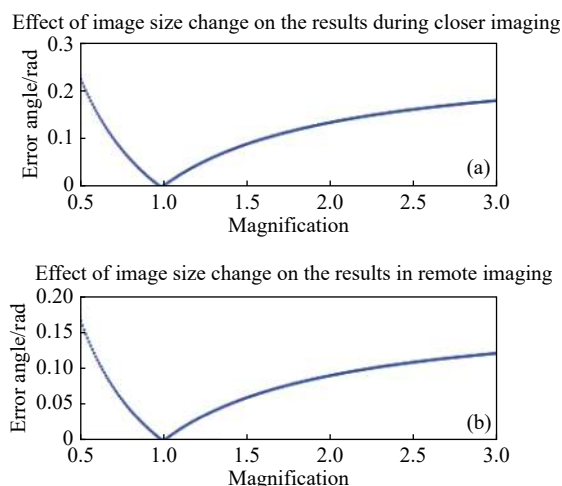


图 15 尺度变化对形心矢量解算的影响

Fig.15 Effect of size transformation on the centroid vector solution

6 结 论

针对火星探测环绕段的自主导航任务的特点,基于导航相机拍摄的小弧段火星边缘,结合初始轨道参数及姿态信息,提出了一种图像融合的高精度导航算法,对工程应用中拍摄弧段存在平移、旋转和尺度变化问题,给出了详细推导过程,并对因光学成像导致的质心偏移问题给出了几何矫正方法;为讨论

该算法在工程应用的适用性,文中从图像噪声、标称椭圆取点数量、待匹配弧段偏移量及拍摄弧段误差 4 个方面进行了影响分析;仿真结果显示,该套算法可有效剔除错误拟合结果,在边缘点定位精度达到亚像素的前提下,视线矢量解算精度可达 30",视线距解算精度可达 2 km。

参考文献:

- [1] Yim J R. Autonomous spacecraft orbit navigation[D]. Huston: Texas A&M University, 2002.
- [2] Zhu Shengying, Chang Xiaohua, Cui Hutao, et al. Research on autonomous navigation algorithm of deep space based on Line-of Sight vector [J]. *J Space Sci*, 2011, 31(4): 534-540.
- [3] Song Min, Yuan Yunbin. Research on autonomous navigation method for the cruise phase of mars exploration [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(7): 952-957. (in Chinese)
宋敏,袁运斌.火星探测巡航段自主导航方法研究[J].武汉大学学报·信息科学版,2016,41(7):952-957.
- [4] Tang Qingyuan, Wang Xiaole. Autonomous navigation algorithm during the phase of approaching Mars based on Light-of-Sight vector measurement [J]. *Aerospace Control and Application*, 2015, 41(3): 38-41. (in Chinese)
唐青原,王晓磊.基于视线矢量测量的火星接近段自主导航算法[J].空间控制技术与应用,2015,41(3):38-41.
- [5] Lu Ruikun. Study on autonomous optical navigation technology for deep space probe[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.(in Chinese)
陆瑞琨.深空探测器自主光学导航技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.(in Chinese)
- [6] Fang Jiancheng, Ning Xiaolin. Autonomous Celestial Navigation Method for Deep Space Probes[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010.
房建成,宁晓琳.深空探测器自主天文导航方法[M].西安:西北工业大学出版社,2010.
- [7] Francois Pomerleau, Francis Colas, Roland Siegwart. A review of point cloud registration algorithms for mobile robotics [J]. *Foundations and Trends in Robotics*, 2013, 4(1): 1-104.
- [8] Arun S, Huang T S, Blostein S D. Least-squares fitting of two 3-d point sets [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, PAMI-9(5): 698-700.
- [9] Besl P J, Mckay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.

- [10] John A Christian, E Glenn Lightsey. An on-board image processing algorithm for a spacecraft optical navigation sensor system[C]//AIAA SPACE 2010 Conference & Exposition, 2010.
- [11] Christian John A. Optical navigation using planet's centroid and apparent diameter in image [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015, 38(2): 192–204.
- [12] Fitzgibbon A, Pilu M, Fisher B. Least squares fitting of ellipses [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, 21(5): 476–480; 337–352.
- [13] Torr P, Zisserman A. Mlesac: A new robust estimator with application to estimating image geometry [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, 78(1): 138–156.