

# 基于图像的着陆点评估及探测器运动估计方法

田 阳, 崔平远, 崔祐涛

(哈尔滨工业大学深空探测基础研究中心, 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 针对深空探测任务特点给出了一种基于导航图像的探测器着陆点选择与探测器运动估计技术。考虑到在着陆初始阶段(探测器高度  $> 2$  km)导航相机所拍摄到的天体表面近似为平面。这里通过跟踪至少 4 个平面内的特征点在导航图像序列中的位置, 利用最小二乘法计算单应矩阵, 由该矩阵得到探测器部分相对运动参数。结合激光测距仪给出的探测器与天体表面之间的距离信息, 可以得到全部 6 自由度参数。安全着陆点的选择与评估首先利用图像灰度预选出平整的着陆点, 再由着陆点对应的单应矩阵和之前获得的帧间相对运动验证着陆点坡度。蒙特卡洛仿真结果表明, 着陆点评估算法能够有效地选取满足平整和坡度要求的着陆点, 运动估计算法实时地对探测器参数进行估计, 平移估计相对误差小于 10%, 旋转估计误差小于  $0.23^\circ$ 。

**关键词:** 软着陆; 运动估计; 着陆点选择; 单应矩阵

**中图分类号:** V448.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-1328(2010)01-0098-06

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.01.016

## 0 引言

深空探测任务由于地面站与探测器距离远, 信号延迟大, 加之着陆天体的过程持续时间相对较短, 因此必须发展深空探测器着陆阶段的自主导航技术。在着陆过程中, 自主导航系统应该能够获得探测器相对天体表面的运动信息, 并且应该具有自主的安全着陆点评估能力, 以保证任务安全完成。NASA 在即将实施的 Mars Science Laboratory 和彗星小行星采样返回任务当中都提出要进行精确定点着陆和障碍规避机动, 可见具备自主导航能力是未来深空探测器的发展方向。

针对深空着陆任务的特点, 美国 JPL 的 Andrew E. Johnson 提出了利用 8 点算法进行探测器着陆阶段的运动估计<sup>[1]</sup>。Yang Cheng 利用单应矩阵将不同位姿拍摄的导航图像进行转换, 跟踪特征点以估计探测器的水平速度<sup>[2]</sup>。Larry Matthies 等提出利用立体视觉进行陡坡和岩石等障碍检测的方法<sup>[3]</sup>。

本文对基于图像的运动估计算法进行了研究, 考虑到探测器在下降的初始阶段, 与星体表面有较大的距离 ( $> 2$  km), 此时特征点近似的分布在平面内。因此这里提出在这一阶段由单应矩阵估计探测

器运动的算法; 跟踪至少 4 个特征点并利用最小二乘算法得出单应矩阵, 由单应阵给出探测器的部分运动参数和着陆点平面法线方向; 根据激光测距仪(与导航相机光轴同向安装)给出的探测器在光轴方向到平面距离和平面法线方向得出探测器高度, 进而得到全部运动信息。并分析了假设特征点近似位于平面内, 对探测器运动估计造成的影响。对于着陆点的选择, 首先以像素灰度差异为指标在导航图像中搜索着陆点预选区域, 并认为该区域满足着陆点平整度要求。然后在相邻两帧导航图像中匹配预选区域内的像素点得到单应矩阵, 根据运动估计算法给出的帧间运动从该矩阵中求取预选区域的坡度情况, 符合条件的作为安全着陆点。

## 1 探测器运动估计

### 1.1 运动估计原理

如果探测器在不同位置姿态下进行了两次拍照, 对应的相机坐标系为  $F_1$  和  $F_2$ , 如图 1 所示。

特征点  $m_i$  在两个相机坐标系中分别由矢量  $X_i$  和  $X'_i$  表示, 则存在:

$$X'_i = RX_i + T' \quad (1)$$

$R$  和  $T'$  分别为两次拍照间的相机旋转和平移运动。

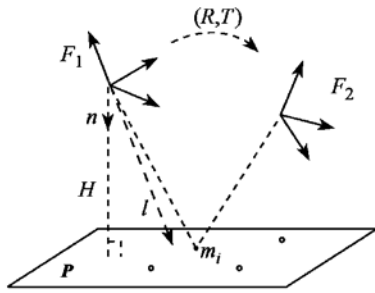


图 1 单应性原理

Fig. 1 Illustration of homography

当特征点位于同一平面内时,对应矢量还满足平面方程:

$$n^T X_i = n_1 x + n_2 y + n_3 z = H \quad (2)$$

其中  $n$  为平面的法线向量,  $H$  为探测器到平面的距离。结合式(1)和(2)得到:

$$X'_i = R X_i + T \frac{n^T X_i}{H} = P X_i \quad (3)$$

其中  $P = R \left( I + \frac{T n^T}{H} \right)$  为包含了图像间相对运动信息的单应矩阵。

### 1.2 探测器运动参数估计

考虑针孔相机成像模型,在相机坐标系下,真实世界的点  $m = (x, y, z)^T$  与其在相机像平面上的投影点坐标  $(u, v)^T$  有如下关系  $u = f \cdot \frac{x}{z}$ ;  $v = f \cdot \frac{y}{z}$ , 假设焦距  $f = 1$ , 并利用式(3)有:

$$\begin{aligned} u' &= \frac{p_{11} u + p_{12} v + p_{13}}{p_{31} u + p_{32} v + p_{33}} \\ v' &= \frac{p_{21} u + p_{22} v + p_{23}}{p_{31} u + p_{32} v + p_{33}} \end{aligned} \quad (4)$$

$u, v$  和  $u', v'$  分别为同一特征点在两个像平面上的位置,  $P_{ij}, (i, j = 1, 2, 3)$  为单应矩阵元素。根据式(4), 如果令  $P_{33} = 1$  则单应矩阵有 8 个独立待定参数, 那么通过跟踪至少 4 个特征点就可以由最小二乘方法在一个比例系数的前提下确定的单应矩阵。

设由最小二乘获得的单应矩阵为  $P_0$ , 与  $P$  的关系为  $P = \rho P_0$ ,  $\rho$  为比例系数。注意到  $P^T P$  将消掉旋转矩阵  $R$  得到仅由平移向量  $T$  和平面法线  $n$  组成的表达式<sup>[4]</sup>, 所以有:

$$P^T P = \rho^2 P_0^T P_0 = I + n t^T + t n^T + \tau_1^2 m m^T \quad (5)$$

其中  $t = \frac{T}{H}$ ,  $\tau_1^2 = t^T t$ 。显然矩阵  $P^T P$  有特征向量  $s_1 = t \times n$ , 而且对应的特征值  $\lambda_1 = 1$ 。同时由于该矩

阵为对称阵, 所以其余两个特征向量应与  $s_1$  正交, 因此假设  $s_{2,3} = a_{2,3} t + b_{2,3} n$  且其对应的特征向量为  $\lambda_2$  和  $\lambda_3$ 。将  $s_{2,3}$  带入到(5)式当中得到:

$$\lambda_{2,3} = 1 + \tau_2 + \frac{1}{2} (\tau_1^2 \pm \tau_1 \sqrt{\tau_1^2 + 4(1 + \tau_2)}) \quad (6)$$

$$\frac{b_{2,3}}{a_{2,3}} = \frac{1}{2} (\tau_1^2 \pm \tau_1 \sqrt{\tau_1^2 + 4(1 + \tau_2)}) \quad (7)$$

这里  $\tau_2 = n^T t$ 。将矩阵  $P^T P$  通过数值运算得出的特征值  $\eta_{1,2,3}$  与上面  $\lambda_{1,2,3}$  的表达式对应起来, 就能够求取运动参数  $t$  和法线  $n$ 。

由  $\lambda_{2,3}$  的表达式容易证明  $\lambda_2 > \lambda_1 = 1 > \lambda_3$ , 所以若特征值  $\eta_2 > \eta_1 > \eta_3$  则可以得到比例系数  $\rho = \frac{1}{\eta_1}$ , 这样就有:

$$\lambda_{2,3} = \rho \eta_{2,3} \quad (8)$$

同时令特征向量的模:

$$\|s_{2,3}\| = a^2 \left( u_1^2 + \left( \frac{b}{a} \right)^2 + 2 \frac{b}{a} u_2 \right) = 1 \quad (9)$$

根据式(6)、(7)、(8)和(9)解得:

$$t = \frac{b_3 s_2 - b_2 s_3}{a_2 b_3 - a_3 b_2}, \quad n = \frac{a_3 s_2 - a_2 s_3}{a_3 b_2 - a_2 b_3} \quad (10)$$

由单应矩阵的定义, 两次拍照间的旋转矩阵为:

$$R = \rho P_0 (I + t n^T)^{-1} \quad (11)$$

如图 1 所示, 若激光测距仪测得的距离为  $l$ , 那么探测器到平面高度为:

$$H = n \cdot l \quad (12)$$

探测器的平移矢量为:

$$T = H t \quad (13)$$

至此探测器的运动参数全部由单应矩阵获得, 但是在由特征值对应求取中间参数并计算特征向量时存在多解, 导致最后得到的运动参数有 4 组解。其中 2 组位于平面的另一侧, 可以增加约束  $X \cdot n > 0$  剔除<sup>[4]</sup>。另 2 组由探测器动力学约束进行验证得到正确的运动参数。

### 1.3 平面假设误差分析

单应矩阵应用的基本条件就是全部特征点位于同一平面内, 而目标天体的表面不可能完全满足该条件, 因此这里对运动估计算法的合理性进行分析。如果特征点  $m_i$  不在假定的平面  $P$  内, 且与平面距离为  $h$ , 探测器初始位置  $F_1$  距平面高度为  $H$ , 如图 2 所示。

在位置  $F_1$  进行拍照,  $m_i$  点将被认为是在平面内的点  $m'_i$ 。当探测器经过平移运动  $T$  和旋转运动  $R$  到达位置  $F_2$  时, 再次进行拍照, 单应矩阵  $P$  的真值应该

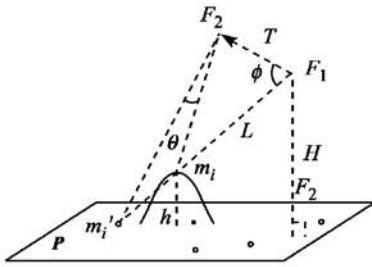


图 2 特征点在平面外  
Fig.2 Non-coplanar feature

由点  $m_i'$  在像平面上的投影计算, 而实际上是由  $m_i$  的投影点计算  $P$  矩阵。所以, 考察点  $m_i$  和  $m_i'$  在相机像平面上的成像差异, 由误差角  $\theta$  表示。显然, 该角与探测器的旋转运动无关, 而且当平移运动  $T$  与直线  $m_i m_i'$  的夹角  $\phi$  一定时,  $T$  的指向与  $\theta$  的大小无关, 所以这里只考虑  $F_1$ 、 $F_2$  和  $m_i$  位于与  $P$  垂直的平面内的情况。因此, 误差角  $\theta$  由几何关系表示为:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{L - T \cos \phi}{T \sin \phi} - \tan^{-1} \frac{L - T \cos \phi - l}{T \sin \phi} \quad (14)$$

其中  $L$  和  $l$  分别为  $F_1 m_i'$  和  $m_i m_i'$  的长度, 而且  $l = \frac{h}{H} L$ 。可以证明当  $\phi = \cos^{-1} \frac{T(2L - l)}{T^2 + L^2 - Ll}$  时, 角  $\theta$  取极值  $\theta_{\max} = \tan^{-1} \frac{Tl}{\sqrt{(T^2 - L^2)(T^2 - (L - l)^2)}}$ 。图 3 给出了特征点与平面距离是  $h = 5$  m, 探测器高度为 2 km 时  $\theta_{\max}$  与  $T$ 、 $L$  的关系。

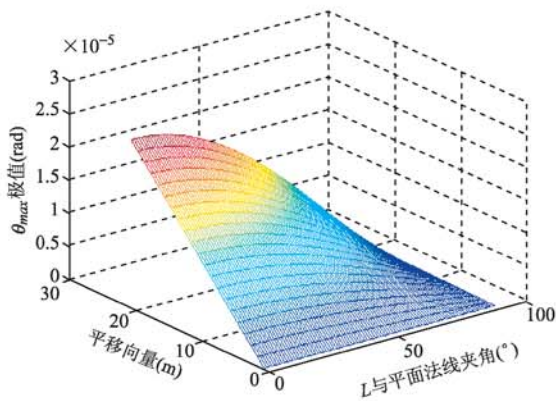


图 3  $\theta_{\max}$  与  $T$ 、 $L$  的关系  
Fig.3 The relation of  $\theta_{\max}$  and  $T$ 、 $L$

其中  $L$  的长度由  $F_1 m_i'$  和平面  $P$  的法线夹角表示, 范围是  $0 \sim 90^\circ$ , 平移量  $T$  的范围由探测器速度决定, 这里设定为  $0 \sim 20$  m, 即探测器的速度为  $0 \sim 20$  m/s。在高度一定的情况下  $\theta_{\max}$  的极值出现在最

大平移量和  $L$  与平面  $P$  的法线夹角最小时。图 4 给出了  $\theta_{\max}$  极值与探测器高度的关系。

随着高度的增加,  $\theta_{\max}$  极值随之减小; 特征点与平面距离分别是 2.5 m 和 5 m 时, 误差角最大极值都出现在 2 km 高度上, 分别为  $1.2 \times 10^{-5}$  rad 和  $2.5 \times 10^{-5}$  rad。而一般的窄视场导航相机的分辨率参数为  $10^{-4}$  rad/pixel<sup>[5]</sup>, 说明特征点近似位于一个平面内的假设只引入了 0.2 pixel 的误差。这与特征跟踪误差量级相当, 因此利用单应矩阵进行探测器运动估计是可行的。

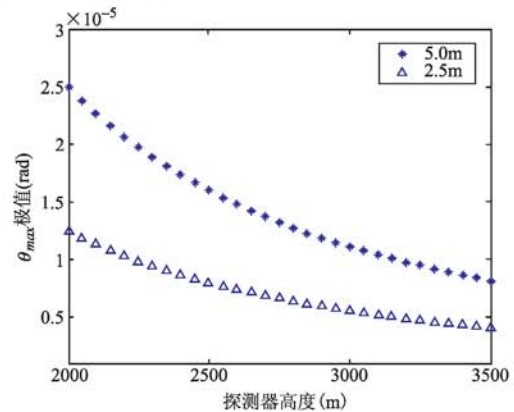


图 4  $\theta_{\max}$  极值曲线  
Fig.4 The curve of  $\theta_{\max}$

## 2 着陆点选择与评估

在最终着陆之前, 由于缺乏着陆点区域的地形数据, 因此探测器到达任务规划的着陆区域上空后, 应该具备自主安全着陆点选择的能力, 从而规避开对探测器成功着陆造成威胁的障碍。相对安全的着陆点至少应该满足平整和坡度两个要求, 也就是说着陆点内不能存在超过探测器容忍范围的石块或陨石坑, 着陆点平面与当地水平面的夹角不大于探测器结构设计的最大倾角。

### 2.1 着陆备选区域的提取

由于着陆地点必须是平坦没有大块岩石及陨石坑的平面, 那么符合条件的着陆区在导航图像中对应像素亮度变化平缓甚至是没有变化的区域。因此采用像素区域的标准差<sup>[6]</sup>:

$$ISD(i, j) = \frac{\sum_{u=i-w}^{i+w} \sum_{v=j-w}^{j+w} I(u, v)^2}{(2w+1)^2} - \frac{\left[ \sum_{u=i-w}^{i+w} \sum_{v=j-w}^{j+w} I(u, v) \right]^2}{(2w+1)^4} \quad (15)$$

作为着陆点区域平滑程度的表示, 其中  $I(u, v)$  为



像素灰度值,检测窗口宽度为  $2w + 1$ 。

标准差值越小说明该区域越平整。为了提高图像处理的速度,可以对分辨率较高的图像采用高斯金字塔方法降低分辨率滤除噪声。并对导航相机视场内所有像素点进行标准差的计算,挑选出靠近视场中心的最平滑的区域作为着陆点的备选点,如图 5 所示。

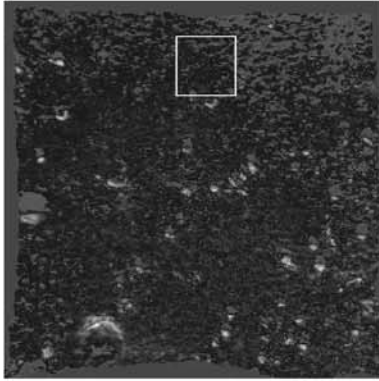


图 5 着陆点选择

Fig.5 Landing site selection

### 2.2 着陆点平面坡度估计

通过初步检测得到的着陆点备选区域基本满足了平整的要求,下面对其坡度进行估计。为了获得较高的精度,而且由于选取的着陆区域所包含的像素数较少,不会影响算法的实时性,因此利用  $L-M$  非线性迭代计算着陆区域的单应矩阵。

由于前后两次拍照时的参数不会完全相同,对应像素应该满足<sup>[6]</sup>:

$$I_2(u', v') = \alpha I_1(u, v) + \beta \quad (16)$$

其中  $I_1(u, v)$  和  $I_2(u', v')$  分别为同一点在两次拍照中对应的灰度值,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为对比度参数和亮度参数。但实际的导航图像会受到噪声的影响,式(16)不能精确成立。因此由最小化式(17)迭代确定  $P$  矩阵:

$$M = \sum [I_2(u', v') - \alpha I_1(u, v) - \beta]^2 \quad (17)$$

其中像素位置坐标  $u'$  和  $v'$  由式(4)确定。令  $f(u, v, P) = I_2(u', v') - \alpha I_1(u, v)$ , 则:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial p_{11}} &= -\alpha \cdot \frac{\partial I_2}{\partial u'} \cdot \frac{u}{D} \\ \frac{\partial f}{\partial p_{12}} &= -\alpha \cdot \frac{\partial I_2}{\partial u'} \cdot \frac{v}{D} \\ &\vdots \\ \frac{\partial f}{\partial p_{32}} &= \alpha \cdot \frac{\partial I_2}{\partial u'} \cdot \frac{v'u}{D} + \alpha \cdot \frac{\partial I_2}{\partial v'} \cdot \frac{v'v}{D} \end{aligned} \quad (18)$$

其中  $D = p_{31}u + p_{32}v + 1$ , 根据  $L-M$  非线性迭代

算法:

$$(A + \lambda I) \delta P = -b \quad (19)$$

式中  $\lambda$  为迭代比例因子,  $A = \sum \left( \frac{\partial f}{\partial P} \right) \left( \frac{\partial f}{\partial P} \right)^T$ ,  $b = \sum \left( \frac{\partial f}{\partial P} \right) (\beta - f(u, v, P))$ , 每一步迭代后单应矩阵的值更新为  $P + \delta P$ 。

由非线性迭代算法获得单应矩阵后,利用运动估计算法给出的两次拍照间的相对运动得到着陆点平面的法线方向。

### 3 仿真与结果

为了验证导航算法的有效性,进行了蒙特卡罗仿真试验。由于在图像处理领域已经发展了大量成熟有效的特征点跟踪算法,因此在仿真中没有考虑实际跟踪过程。而是利用 diamond-square 算法生成目标天体表面高程数据,根据探测器当前状态及导航相机的视场角生成天体表面特征点在像平面的位置,并设定特征点跟踪算法存在随机误差。

仿真设定探测器携带导航相机分辨率为  $10^{-4}$  rad/pixel, 相机焦距  $f = 120$  mm, 相机视角  $5.7^\circ$ , 拍照时间间隔为 1 s; 特征点跟踪算法存在  $0 \sim 0.2$  pixel 的随机匹配误差; 激光测距仪测量误差为 1%; 探测器拍照高度  $2 \sim 3.5$  km, 进行了 100 次蒙特卡罗仿真, 仿真结果如图 6~8 所示。

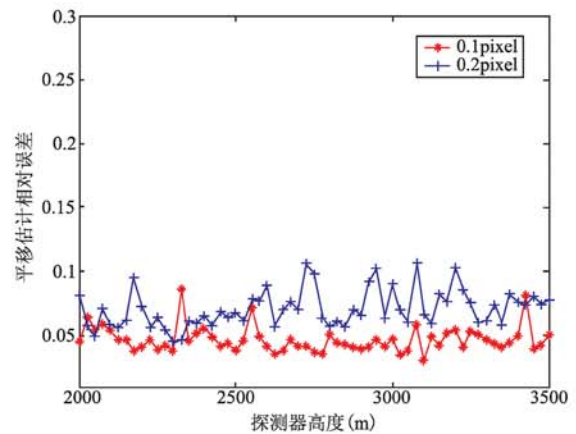


图 6 探测器平移估计相对误差

Fig.6 Translation estimation errors

图 6 为运动估计算法给出的探测器平移相对误差曲线,即平移误差的标准差与真实值之比。图 7 给出了探测器的旋转估计误差。在每个高度上都针对不同特征点跟踪算法匹配误差进行了仿真,图中两条曲线分别对应 0.1 pixel 之内和 0.2 pixel 之内的

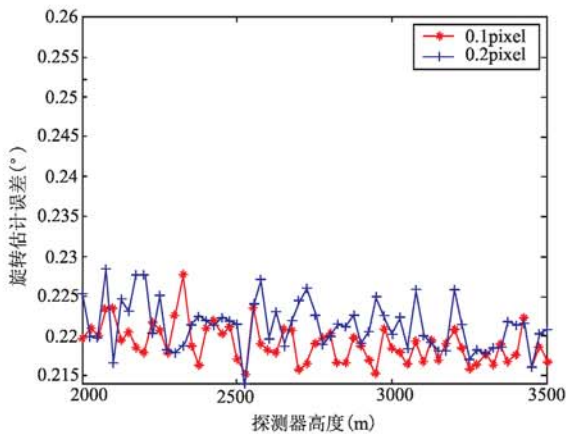


图 7 探测器旋转估计误差

Fig. 7 Rotation estimation errors

随机匹配误差结果。

在探测器高度大于 2.5 km 时, 0.1 pixel 匹配误差的结果明显优于 0.2 pixel, 位置相对误差在 5% 以内。但随着高度的下降, 两种结果差异不明显。这与之前的特征点在平面外带来的误差分析结果一致: 说明探测器具有一定高度时, 由于特征点在平面外而引入的误差对运动估计精度影响很小; 随着高度的降低这一影响逐渐变大, 并超过图像匹配跟踪误差成为主要的系统误差。

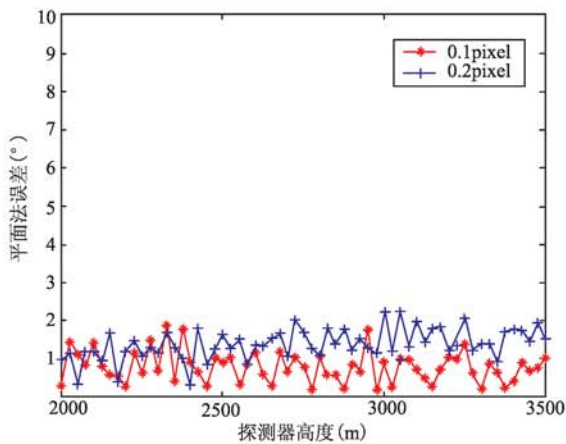


图 8 平面法线估计误差

Fig. 8 Normal vector estimation errors

图 8 为着陆点平面的法线方向估计误差, 该方向仅为探测器本体坐标系下的估计, 纵轴单位为度, 其结果也与探测器高度相关。

#### 4 结论

本文针对深空探测任务中着陆阶段的特殊性, 提出了一种基于图像序列由单应矩阵进行探测器运动估计的自主导航方法, 详细地说明了该方法的基本原理, 并分析了假设带来的算法误差。然后利用单应矩阵对安全着陆点的坡度进行评估。通过蒙特卡罗仿真对该方法进行了验证, 结果表明本文提出的深空探测器运动估计算法是有效的, 估计精度满足着陆要求, 并能够有效地选择安全的着陆点实施着陆。

#### 参考文献:

- [1] Johnson A E, Matthies L H. Precise image based motion estimation for autonomous small body exploration[C]//Proc. 5th Int'l - Symp. On Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 627634, 1999.
- [2] Yang Cheng, Johnson A E, Larry Matthies. MER-DIMES: A planetary landing application of computer vision[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999.
- [3] Matthies L, Huertas A, Cheng Y, Johnson A. Stereo vision and shadow analysis for landing hazard detection[J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Pasadena, CA, May 2008.
- [4] Zhongfei Zhang, Hanson A R. Scaled euclidean 3D reconstruction based on externally uncalibrated cameras[C]//Computer Vision, 1995. Proceedings, International Symposium on 21 - 23 Nov. 1995 Page(s): 37 - 42 Digital Object Identifier 10.1109/ISCV. 476974. 1995.
- [5] Hashimoto T. Light weight sensors for the autonomous asteroid landing of MUSES-C mission[J]. Acta Astronautica, 2003, 52(2-6):381-8.
- [6] Yang Cheng, Andrew E, Johnson, Larry H, Mattheis, Aron A. Wolf, Passive imaging based hazard avoidance for spacecraft safe landing [C]//Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space: i - SAIRAS 2001.

作者简介: 田阳(1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为深空探测自主导航、制导与控制。

通信地址: 哈尔滨工业大学科学园 3030 信箱(150080)

电话: (0451)86418320-312

E-mail: TianYangHIT@gmail.com

## Landing Site Assessment and Probe Motion Estimation Based on Image

TIAN Yang, CUI Ping-yuan, CUI Hu-tao

(Deep Space Exploration Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** This paper proposes a probe motion estimation and landing sites assessment algorithm. Due to the planar surface of landing site, the motion estimation algorithm based on essential matrix is instability. Motion Estimation algorithm from Homography is employed to fix this problem. Homography matrix is calculated by least squares method whit tracking at least 4 feature points through images. To calculate the motion of probe, the distance between probe and surface is also obtained by laser altimeter. The Landing Site is detected by the mean square error of the image intensity. Adding the motion of probe the algorithm determines the gradient of the site. The results of monte carlo simulation show that the proposed algorithm can select the landing site accurately, moreover it can provide the motion estimation of probe with translation estimation relative error under 10% and rotation estimation error under  $0.23^\circ$ .

**Key words:** Soft landing; Estimation; Landing sites selection; Homography matrix