

# 融合相机和激光雷达的小天体运动状态估计方法

陈友<sup>1,2</sup>, 郭金融<sup>1,2</sup>, 刘延杰<sup>1,2</sup>, 邵巍<sup>1,2</sup>, 黄翔宇<sup>3</sup>

(1. 青岛科技大学 自动化与电子工程学院, 青岛 266100; 2. 山东省深空自主着陆技术重点实验室, 青岛 266100;  
3. 北京控制工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 针对单一视觉传感器难以实现小天体运动状态估计的问题, 提出了一种融合相机和激光雷达的小天体运动状态估计方法。首先, 建立融合相机和激光雷达测量模型, 通过跟踪带有深度信息的图像特征点, 利用扩展卡尔曼滤波器估计小天体的自旋角速度、自旋轴方向、位置和速度; 其次, 设计了特征融合矩阵, 可实现对图像特征点、点云、融合特征点的实时更新; 最后, 分析本文算法的有效性以及特征点数量、观测高度、噪声大小对算法的影响。仿真结果表明, 本文算法的精度和收敛速度均优于基于单一传感器的小天体运动状态估计方法。

**关键词:** 信息融合; 小天体; 运动状态估计; 扩展卡尔曼滤波

**中图分类号:** V448.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-9287(2024)01-0063-08

**DOI:** 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230039

**引用格式:** 陈友, 郭金融, 刘延杰, 等. 融合相机和激光雷达的小天体运动状态估计方法[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(1): 63-70.

**Reference format:** CHEN Y, GUO J R, LIU Y J, et al. A method for estimating motion state of small bodies based on fusion of camera and LIDAR[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(1): 63-70.

## 引言

小天体探测对研究太阳系的起源与演化、抵御近地小天体碰撞以及开采丰富的化学物质具有重要的科学价值<sup>[1-2]</sup>。未来人类将探索更多的小行星、彗星等天体, 探索任务也将变得更加复杂。为了使探测器能够安全地到达目标天体, 需要确定小天体的自旋角速度、自旋轴方向以及小天体运动状态。但由于小天体体积小、距离地球遥远且自身通常处于翻滚状态, 在地面难以直接获得可靠的小天体自旋参数信息<sup>[3-4]</sup>。在探测器着陆过程中, 图像和距离信息是获得小天体旋转参数的重要来源。采用相机进行测量的成本低、分辨率高、范围广, 且已有很多被证实的小天体旋转参数估计方法, 使用单一传感器在复杂的深空环境中难以鲁棒地估计小天体运动状态<sup>[5]</sup>。研究一种稳定且准确的小天体运动状态估计方法是十分必要的<sup>[6-7]</sup>。

近些年来, 单目相机或激光雷达被广泛应用在旋转参数估计中。Liu 等<sup>[8]</sup>通过提取图像椭圆边缘拟合出椭圆曲线来确定目标的姿态, 但其泛化能力有待提高。Broida 等<sup>[9]</sup>利用单目相机获取目标序列图像信息, 通过跟踪被观测序列图像的特征点, 利用扩展卡尔曼滤

波器估计出目标旋转轴方向和旋转角速度。毕思博等<sup>[10]</sup>提出一种基于光变曲线的小天体旋转参数估计方法。建立小天体椭球模型, 在不同时间点对目标天体成像采样, 利用最小二乘法拟合得到光变曲线进而求解目标旋转参数。Pesce 等<sup>[11]</sup>提出了一种面向非合作目标已知三维模型的相对位姿估计方法, 该方法是一种基于单目相机的松耦合结构体系, 通过 H- $\infty$  滤波器估计相对位置, 利用二阶最小能量滤波器解算相对姿态, 其缺陷是依赖于目标三维模型和初始位姿。Paolo 等<sup>[12]</sup>提出了一种自主确定小天体旋转状态的算法, 在接近段观测小天体旋转并跟踪图像特征点, 估计出可能的旋转轴, 利用特征点运动和启发式方法选择旋转轴, 通过反投影小天体亮度中心估计旋转中心。Volpe 等<sup>[13]</sup>设计了一种基于扩展卡尔曼滤波器的相对位姿估计算法, 利用单目相机和激光测距仪获取序列图像的特征点和距离信息作为观测量, 实现对目标航天器形状三维重建和相对位姿估计, 并设计了一种特征跟踪排序算法, 能够有效解决特征点的消失和重现问题。在小天体探测任务中, 光学相机采集图像受限于光照条件的影响, 在弱光、逆光、阴影等条件下采集的图像被提取的特征信息会减少, 进而影响小天体运动状态的

收稿日期: 2023-03-31 修回日期: 2023-11-15

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2023MF006, ZR2023QF176); 空间碎片专项(KJSP2020020302); 国防科工局稳定支持项目(HTKJ2022KL502001)

估计精度<sup>[14-16]</sup>。

基于三维点云信息的旋转运动估计方法按原理可分为二类。第一类是基于点云特征点轨迹的旋转参数估计方法。Feng 等<sup>[17]</sup>利用人工标定的特征点获取运动轨迹,用以估计旋转参数,但当观测点云特征点数目较少或缺失时,非合作目标旋转参数估计精度会降低。第二类是基于点云配准的旋转参数估计方法。Reza 等<sup>[18]</sup>提出一种基于点云配准的旋转参数估计算法,该方法先对不同时间获取的点云进行匹配,并基于Rodriguez公式求解旋转轴方向和角速度,但不适用于目标快速旋转的情况。Xu 等<sup>[19]</sup>引入了一种双配准矩阵,用于恢复特征点的局部运动轨迹,进而求解目标旋转参数,在此基础上提出一种基于扩展卡尔曼滤波的非合作目标旋转轴方向和旋转角速度估计方法,但增加了算法的复杂度。三维点云作为一种深度信息可以被激光雷达获取,且对光照条件不敏感,但其采集的点云分辨率低,会影响点云配准的精度。

针对上述问题,本文提出一种融合相机和激光雷达的小天体运动状态估计方法。融合相机和激光雷达可有效克服二者弊端进而实现对小天体运动状态的鲁棒估计。根据图像特征点的深度信息,本文算法能同时估计出探测器和小天体的相对位姿。首先根据小天体与探测器之间的相对运动,推导出相对运动模型。建立融合激光雷达和相机的观测模型;其次选取较为稳定的图像特征点作为跟踪特征点,通过Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) 光流法实现图像帧间特征匹配<sup>[20-22]</sup>;最后利用扩展卡尔曼滤波器估计小天体的自旋角速度、自旋轴方向、位置和速度。

## 1 相对运动模型与测量模型

### 1.1 坐标系定义

为了便于描述探测器与小天体相对位姿,引入3个坐标系:小天体质心坐标系 $O_B - X_B Y_B Z_B$ 、相机坐标系 $O_C - X_C Y_C Z_C$ 、激光雷达坐标系 $O_L - X_L Y_L Z_L$ 。

小天体质心坐标系 $O_B - X_B Y_B Z_B$ :假设其原点 $O_B$ 位于目标天体的质心位置, $X_B$ 、 $Y_B$ 、 $Z_B$ 轴满足右手坐标系定则,此坐标系用于描述被观测特征点的空间位置。

相机坐标系 $O_C - X_C Y_C Z_C$ :设此坐标系的原点 $O_C$ 位于探测器质心, $X_C$ 、 $Y_C$ 、 $Z_C$ 轴满足右手坐标系定则。为简化计算,假设相机坐标系和激光雷达坐标系重合,各坐标系之间的关系如图1所示。

### 1.2 相对运动模型

定义状态向量由小天体的位置、速度、姿态四元数、自旋角速度以及特征点的位置组成<sup>[23]</sup>。具体定义如下

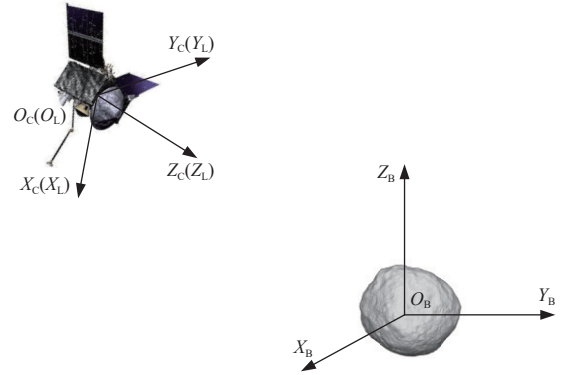


图1 坐标系定义

Fig. 1 Definition of coordinate systems

$$s = [\mathbf{r} \ \mathbf{v} \ \mathbf{q}_{B/C} \ \boldsymbol{\omega} \ \mathbf{x}_p] \quad (1)$$

其中: $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{v}$ 为坐标系 $O_C - X_C Y_C Z_C$ 中探测器相对于小天体的位置和运动速度; $\mathbf{q}_{B/C}$ 为小天体质心坐标系相对于相机坐标系的姿态四元数; $\boldsymbol{\omega}$ 表示小天体坐标三轴的角速度矢量;图像特征点在小天体质心坐标系 $O_B - X_B Y_B Z_B$ 中的空间坐标表示为 $\mathbf{x}_p$ 。

在相机坐标系下,小天体位置矢量的微分为其速度,假设其速度和旋转角速度的微分为零;小天体为刚体,被跟踪特征点在小天体质心坐标系下的坐标不变。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} = 0 \\ \dot{\mathbf{q}}_{B/C} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\Omega} \mathbf{q}_{B/C} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} = 0 \\ \dot{\mathbf{x}}_p = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

### 1.3 测量模型

在探测器着陆过程中,单目相机获取导航图像,进而提取图像特征点。激光雷达获取特征点深度信息,将点云投影到像平面上,建立图像特征点与特征点深度信息的匹配关系。假设第 $i$ 个特征点的测量量为

$$\begin{cases} z_i = [u \ v]^T = \frac{f}{z_i^c} [x_i^c \ y_i^c]^T \\ \rho_i = \|\mathbf{r}^B - \mathbf{P}_i^B\|_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\mathbf{P}_i^C = [x_i^c \ y_i^c \ z_i^c]^T$ 为特征点 $\mathbf{P}_i$ 在相机坐标系 $O_C - X_C Y_C Z_C$ 中的空间位置矢量; $\mathbf{r}^B$ 为探测器在小天体质心坐标系 $O_B - X_B Y_B Z_B$ 下的空间位置矢量; $\mathbf{P}_i^B$ 为特征点 $\mathbf{P}_i$ 在小天体质心坐标系 $O_B - X_B Y_B Z_B$ 下的空间位置矢量。

## 2 融合相机和激光雷达算法

### 2.1 状态方程

根据相对运动模型,系统状态方程可表示为

$$\dot{s} = \mathbf{F}s + \mathbf{Q} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{F}$ 为状态转移矩阵, $\mathbf{F}$ 由式(2)可得; $\mathbf{Q}$ 为协方差矩阵,其维度为 $25 \times 25$ 。

状态转移矩阵的雅可比矩阵为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{F}_3 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_3 = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}_{3N \times 3N} \quad (5)$$

其中: $N$ 为特征点的数量。

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{x_{13}}{2} & -\frac{x_{12}}{2} & \frac{x_{11}}{2} & \frac{x_{10}}{2} & -\frac{x_9}{2} & \frac{x_8}{2} \\ -\frac{x_{13}}{2} & 1 & \frac{x_{11}}{2} & \frac{x_{12}}{2} & \frac{x_9}{2} & \frac{x_{10}}{2} & -\frac{x_7}{2} \\ \frac{x_{12}}{2} & -\frac{x_{11}}{2} & 1 & \frac{x_{13}}{2} & -\frac{x_8}{2} & \frac{x_7}{2} & \frac{x_{10}}{2} \\ -\frac{x_{11}}{2} & -\frac{x_{12}}{2} & -\frac{x_{13}}{2} & 1 & -\frac{x_{17}}{2} & -\frac{x_{18}}{2} & -\frac{x_{19}}{2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}$$

### 2.2 观测方程

若小天体质心坐标系到相机坐标系的姿态四元数定义为 $\mathbf{q}_{B/C} = q_1 + iq_2 + jq_3 + kq_4$ ,在左手坐标系下,其对应旋转矩阵为

$$\mathbf{R}_{B/C} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} r_{11} = q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 \\ r_{12} = 2q_1q_2 - 2q_4q_3, r_{13} = 2q_1q_3 + 2q_4q_2 \\ r_{22} = -q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 \\ r_{21} = 2q_1q_2 + 2q_4q_3, r_{23} = 2q_2q_3 - 2q_4q_1 \\ r_{33} = -q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 \\ r_{31} = 2q_1q_3 - 2q_4q_2, r_{32} = 2q_2q_3 + 2q_4q_1 \end{cases}$$

若小天体在相机坐标系中 $t$ 时刻的位置坐标定义为

$$\mathbf{r}^C(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t)]^T \quad (8)$$

假设跟踪到 $N$ 个特征点,第 $i$ 个特征点在小天体质心坐标系下的坐标表示为

$$\mathbf{P}_i^B = [x_i \ y_i \ z_i]^T \quad (9)$$

其中: $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

那么第 $i$ 个特征点在相机坐标系中可以表示为

$$\mathbf{P}_i^C(t) = \mathbf{r}^C(t) + \mathbf{R}_{B/C}(t)\mathbf{P}_i^B(t) \quad (10)$$

其中: $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

探测器在小天体质心坐标系下 $t$ 时刻的位置为

$$\mathbf{r}^B(t) = -\mathbf{R}_{B/C}^T(t)\mathbf{r}^C(t) \quad (11)$$

在小天体质心坐标系下,相机与第 $i$ 个特征点之间的位置矢量为

$$\rho_i^B(t) = \mathbf{P}_i^B(t) - \mathbf{r}^B(t) = \mathbf{P}_i^B(t) + \mathbf{R}_{B/C}^T(t)\mathbf{r}^C(t) \quad (12)$$

激光雷达获取的特征点深度信息为 $\rho_i^B(t)$ 向量大小,即探测器和特征点间的距离,根据图像特征点坐标以及特征点相对于探测器的距离信息估计小天体运动状态。由式(3)可得观测方程为

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{Z}_v \ \mathbf{Z}_m]^T + \mathbf{V} = [x_1 \ y_1 \ \dots \ x_N \ y_N \ \rho_1 \ \dots \ \rho_N] + \mathbf{V} \quad (13)$$

其中: $\mathbf{V}$ 为高斯白噪声; $(x_N, y_N)$ 为第 $N$ 个特征点的像素坐标; $\rho_N$ 为第 $N$ 个特征点与探测器之间的距离。

$$\begin{cases} x_i = \frac{x(t) + [r_{11} \ r_{12} \ r_{13}]\mathbf{P}_i^B(t)}{z(t) + [r_{31} \ r_{32} \ r_{33}]\mathbf{P}_i^B(t)} \\ y_i = \frac{y(t) + [r_{21} \ r_{22} \ r_{23}]\mathbf{P}_i^B(t)}{z(t) + [r_{31} \ r_{32} \ r_{33}]\mathbf{P}_i^B(t)} \end{cases} \quad (14)$$

$$\rho_i = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \quad (15)$$

$$\begin{cases} A = x_i + [r_{11} \ r_{12} \ r_{13}]\mathbf{r}^C(t) \\ B = y_i + [r_{21} \ r_{22} \ r_{23}]\mathbf{r}^C(t) \\ C = z_i + [r_{31} \ r_{32} \ r_{33}]\mathbf{r}^C(t) \end{cases} \quad (16)$$

### 2.3 特征信息融合策略

设 $t_1$ 时刻与 $t_2$ 时刻匹配的图像特征点集为

$$\mathbf{V}_{12} = \begin{bmatrix} p_1^1 \ \dots \ p_i^1 \ \dots \ p_n^1 \\ p_1^2 \ \dots \ p_i^2 \ \dots \ p_n^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中: $p_i^1$ 为 $t_1$ 时刻图像的第 $i$ 个特征点坐标; $p_i^2$ 为 $t_2$ 时刻图像的第 $i$ 个特征点坐标; $p_i^1$ 和 $p_i^2$ 为匹配的图像特征点对; $n$ 为匹配特征点的个数。

$t_2$ 时刻与 $t_3$ 时刻匹配的图像特征点集为

$$\mathbf{V}_{23} = \begin{bmatrix} p_1^2 \ \dots \ p_j^2 \ \dots \ p_m^2 \\ p_1^3 \ \dots \ p_j^3 \ \dots \ p_m^3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中:  $p_j^2$  为  $t_2$  时刻图像的第  $j$  个特征点坐标;  $p_j^3$  为  $t_3$  时刻图像的第  $j$  个特征点坐标;  $p_j^2$  和  $p_j^3$  为匹配的图像特征点对;  $m$  为匹配特征点的个数。

通过计算  $V_{12}$  和  $V_{23}$  中  $t_2$  时刻特征点之间的距离得到矩阵

$$D_{m \times n} = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \cdots & d_{nm} \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中:  $d_{ij} = \|p_i^2 - p_j^3\|_2$

若  $d_{ij} = 0$ ,  $p_i^2$  和  $p_j^3$  为同一特征点,  $D_{m \times n}$  中第  $j$  列中  $d_{ij} = 0$  的特征点  $p_j^3$  为旧特征点。若第  $j$  列中元素不全为零, 则  $p_j^3$  为新特征点。

- 1) 新特征点坐标初始化, 设新增加特征点数目为  $\zeta$ , 状态向量维度更新为  $13 + 3(N + \zeta)$ ;
- 2) 观测矩阵维度更新为  $3(N + \zeta)$ ,  $13 + 3(N + \zeta)$ ;
- 3) 协方差矩阵  $Q$  维度更新为  $13 + 3(N + \zeta)$ , 协方差矩阵  $R$  维度更新为  $3(N + \zeta)$ ,  $13 + 3(N + \zeta)$ 。

图像特征点和点云特征点融合后存在3种情况:

- 1) 点云与图像特征点对准成功的融合特征点;
- 2) 融合后剩余的图像特征点信息;
- 3) 融合后剩余的三维点云信息。

针对信息融合的3种可能, 为充分利用图像和点云匹配信息, 假设

$$X = [X_0 \ X_1 \ X_2 \ X_3]$$

其中:  $X_0$  为小天体位置、速度、姿态四元数、角速度;  $X_1$  为融合成功的特征点坐标;  $X_2$  为图像特征点坐标;  $X_3$  为三维点云坐标。

观测方程的雅可比矩阵为

$$\frac{\partial H}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{cl}}{\partial X_0} & \frac{\partial h_{cl}}{\partial X_1} & 0 & 0 \\ \frac{\partial h_c}{\partial X_0} & 0 & \frac{\partial h_c}{\partial X_2} & 0 \\ \frac{\partial h_l}{\partial X_0} & 0 & 0 & \frac{\partial h_l}{\partial X_3} \end{bmatrix}$$

其中:  $y = h_{cl}(X)$  为融合相机和激光雷达的观测方程;  $y = h_c(X)$  为相机的观测方程;  $y = h_l(X)$  为激光雷达的观测方程。

### 3 仿真及其结果分析

从美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 官网获取“贝努” (Bennu) 小天体三维模型、着陆段高度数据以及“欧西里斯-雷克斯号” (OSIRIS-REx) 探测器的导航传感

器具体参数, 模拟小天体探测器的着陆过程。小天体与探测器模型的初始位姿关系如图2所示, 探测器在着陆过程中获取的部分图像如图3所示。假设图像噪声为高斯白噪声,  $\sigma_{pix}$  表示噪声的标准差; 像素点距离噪声为高斯噪声,  $d_m$  表示像素点距离标准差。仿真参数初始化如表1和表2所示。旋转角速度误差为滤波器估计值与真实值之间的误差, 旋转轴指向误差为滤波器估计值与真实值之间的误差。

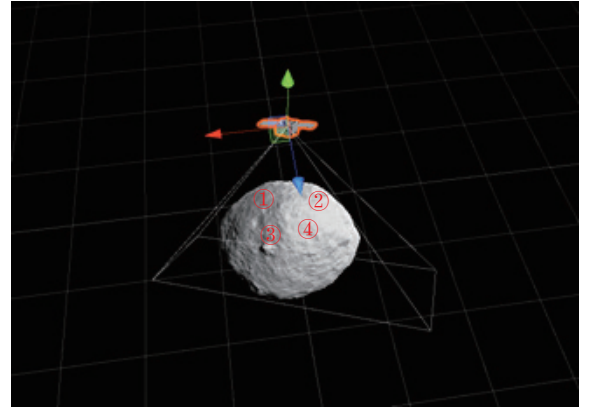


图2 小天体与探测器初始位姿示意图

Fig. 2 The relationship between the small body and the detector's initial pose

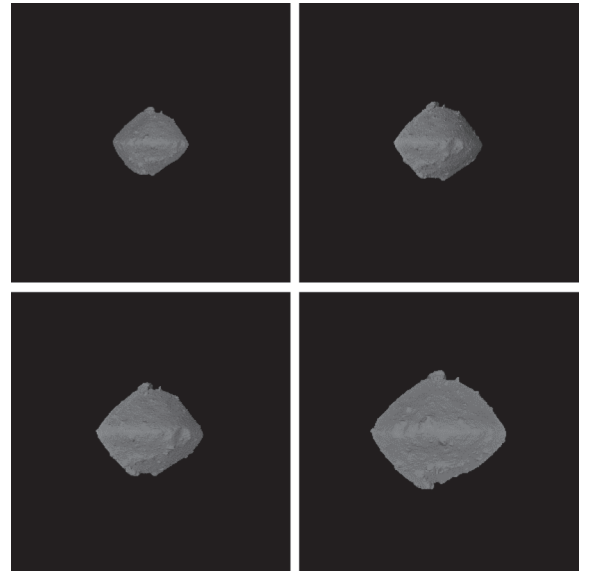


图3 不同观测距离的小天体图像

Fig. 3 Small body images at different observation distances

表1 传感器参数

Table 1 Parameters of sensors

仿真参数	数值
相机焦距/mm	125
相机视场角/(°)	20.8
相机分辨率	1 024 × 1 024
激光雷达分辨率	512 × 512

表 2 状态变量初始化

Table 2 Initial state

仿真参数	数值
小天体初始位置/m	[0 0 1 000]
小天体速度/(m·s <sup>-1</sup> )	[1 1 2]
姿态四元数	[0 0 0 1]
小天体旋转角速度/(rad·s <sup>-1</sup> )	[0 0 0.233]
特征点1坐标/m	[-96 217 -79]
特征点2坐标/m	[114 218 -41]
特征点3坐标/m	[-94 138 174]
特征点4坐标/m	[92 94 -194]

为了测试融合相机和激光雷达的小天体运动状态估计方法的有效性和估计精度, 设定3个实验, 具体如下:

实验一: 将本文算法分别与基于单目相机、激光雷达、光变曲线的小天体自旋参数估计方法进行对比实验, 分析各算法精度和收敛速度。

实验二: 利用蒙特卡洛方法测试噪声大小对本文算法的影响。保持 $d_m$ 不变, 取 $\sigma_{pix}$ 为1~6, 计算收敛时间内旋转参数的均方根误差。在 $\sigma_{pix}$ 相同的情况下, 取 $d_m$ 为距离信息的1%~6%。

实验三: 测试不同观测高度和观测特征点数目对本文算法的影响。保持图像和距离噪声大小不变, 设置观测高度为800~2 000 m。观测高度为1 200 m, 被观测特征点的数目为4~10。

由图4和图5可知, 传统基于单目相机的估计方法分别在第80和120帧收敛, 基于激光雷达的估计方法分别在第150和200帧收敛, 本文方法中旋转角速度和旋转轴方向在第20帧收敛。与基于单一传感器的小天体运动状态估计方法相比, 本文方法能够快速收敛, 小

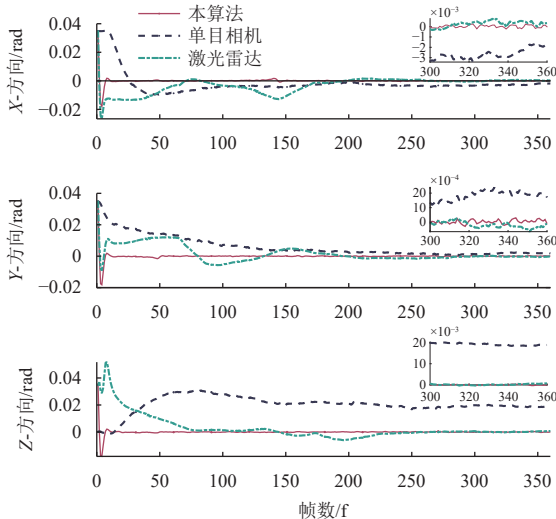


图 4 自旋角速度估计误差

Fig. 4 Error of rotation angular velocity

天体自旋角速度误差为0.01 rad/s, 旋转轴方向误差为0.05 rad。从表3中可以得出, 本文方法在X、Y、Z方向的旋转角速度、旋转轴指向平均误差均低于基于光变曲线法。基于光变曲线小天体旋转参数估计方法存在曲线拟合的误差会影响估计精度, 且其适用于距离较远的接近段。小天体在整幅图像占比较小, 在较短时间内, 拟合曲线变化不明显, 具有局限性。

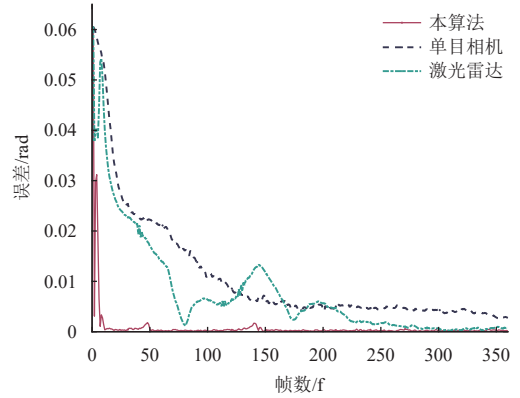


图 5 自旋轴方向估计误差

Fig. 5 Estimation error of the rotation axis of small body

表 3 角速度和旋转轴指向平均误差比较

Table 3 Comparison of average errors in angular velocity and rotation axis pointing

方法	光变曲线法	本文算法
角速度 $\omega_z$ /(rad·s <sup>-1</sup> )	0.006 5	0.000 28
角速度 $\omega_y$ /(rad·s <sup>-1</sup> )	0.000 8	0.000 37
角速度 $\omega_x$ /(rad·s <sup>-1</sup> )	0.003 8	0.000 51
旋转轴X指向/rad	1.494 0	0.038 90
旋转轴Y指向/rad	0.009 0	0.027 60
旋转轴Z指向/rad	1.570 0	0.042 90

由图6和图7可知, 小天体速度在第50帧收敛, 误差约为0.2 m/s; 小天体位置在第150帧收敛, 误差约为2 m。而基于单目相机的小天体旋转参数估计方法由于缺失深度信息, 无法估计小天体的位置。

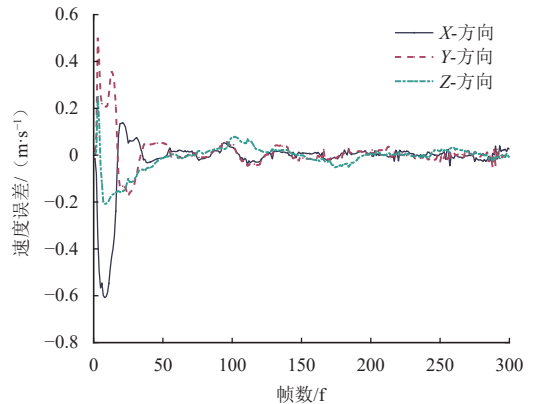


图 6 小天体速度误差

Fig. 6 Velocity error of small body

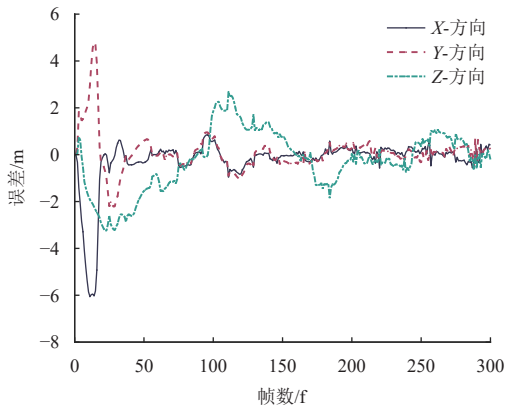


图7 小天体位置误差  
Fig. 7 Small body position error

由图8可知,探测器和小天体之间的观测距离越远,角速度误差就越大。相较于仅单目相机估计方法,本文算法误差增长速度较慢。由图9可知,随着跟踪特征点数量增加,旋转角速度的误差变得更小。

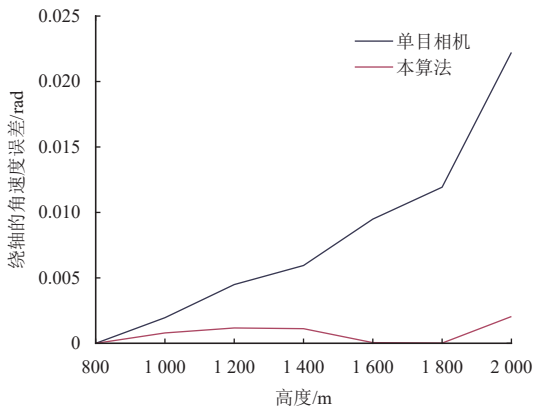


图8 不同观测距离估计结果  
Fig. 8 Estimation results with different observation distances

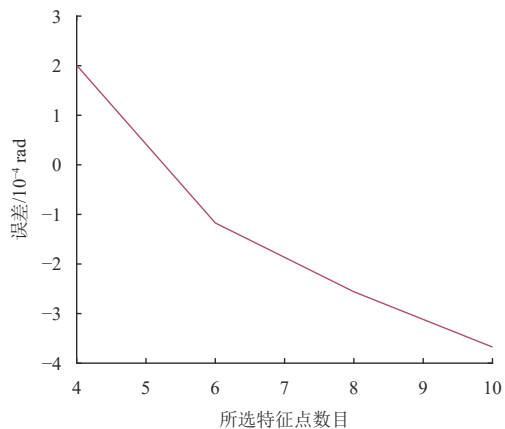


图9 不同选点数量旋转角速度估计结果  
Fig. 9 Results of angular velocity with different numbers of points

计算200~300帧间旋转参数的均方根误差,由表4可知,所提出算法的稳态估计误差随着图像噪声水平

的增加而增加,并且误差的增加非常缓慢。在图像噪声标准差大于3个像素时,本文算法也能估计出目标的旋转轴方向和自旋角速度。由表5可知,在图像噪声不变的前提下,距离噪声增大,均方根误差就会增大。

表4 不同图像噪声下角速度估计均方根误差

$\sigma_{\text{pix}}/$ (pixels)	角速度均方根误差/ ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )	旋转轴方向均方根 误差/rad
1	0.001 24	0.000 48
2	0.001 44	0.000 63
3	0.001 82	0.001 18
4	0.002 10	0.001 58
5	0.002 34	0.002 02
6	0.002 77	0.002 37

表5 不同距离噪声下角速度估计均方根误差

$d_m/\%$	旋转轴方向均方根误差/rad	角速度均方根误差/ ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1	0.001 23	0.002 57
2	0.002 34	0.004 36
3	0.005 87	0.006 45
4	0.006 12	0.008 29
5	0.007 25	0.009 02
6	0.008 31	0.010 01

## 4 结 论

本文提出了一种融合相机和激光雷达的小天体运动状态估计方法。设计了一种基于图像特征点、点云、融合特征点的观测量更新方法,该方法可以更充分利用有效的观测信息,提高估计方法的稳定性。基于单一相机的小天体运动状态估计方法Z轴方向的位置误差较大,融合深度信息,弥补图像缺失的深度,提高了Z轴方向的位置估计精度,同时小天体自旋轴方向和自旋角速度收敛加快。通过数学仿真验证了所提出的方法的有效性,分析了特征点数目、观测距离、观测噪声对估计精度的影响。仿真结果表明,小天体的自旋角速度、自旋轴方向、位置和速度误差分别为0.01 rad/s、0.05 rad、2 m、0.2 m/s。

## 参 考 文 献

- [1] 崔平远,赵冬越,朱圣英,等. 小天体主动附着制导与控制技术进展[J]. 宇航学报, 2021, 42(9): 1057-1066.  
CUI P Y, ZHAO D Y, ZHU S Y, et al. Research progress of guidance and control technologies for active landing on small celestial bodies[J]. Journal of Astronautics, 2021, 42(9): 1057-1066.
- [2] DE LEÓN J, CAMPINS H, MORATE D, et al. Expected spectral characteristics of (101955) Bennu and (162173) Ryugu, targets of the OSIRIS-REx and Hayabusa2 missions[J]. Icarus, 2018, 313: 25-37.
- [3] 黄翔宇,徐超,胡荣海,等. 小行星动能撞击自主导航与制导方法研

- 究[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(4): 438-446.
- HUANG X Y, XU C, HU R H, et al. Autonomous navigation and guidance for asteroid kinetic impact mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, 9(4): 438-446.
- [4] PESCE V, HAYDAR M F, LAVAGNA M, et al. Comparison of filtering techniques for relative attitude estimation of uncooperative space objects[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 84: 318-328.
- [5] 崔平远, 邵巍, 崔祐涛. 绕飞过程中小天体三维模型重构及探测器运动估计研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1381-1389.
- CUI P Y, SHAO W, CUI H T. 3-D small body model reconstruction and spacecraft motion estimation during fly-around[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(5): 1381-1389.
- [6] ELANKUMARAN K, DEMPSTER A G. Probabilistic approach to the autonomous navigation of distributed spacecraft near small celestial bodies[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 182: 517-530.
- [7] GE D, CUI P, ZHU S. Recent development of autonomous GNC technologies for small celestial body descent and landing[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, 110: 100551.
- [8] LIU C, HU W. Relative pose estimation for cylinder-shaped spacecrafts using single image[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(4): 3036-3056.
- [9] BROIDA T J, CHANDRASHEKHAR S, CHELLAPPA R. Recursive 3-D motion estimation from a monocular image sequence[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1990, 26(4): 639-656.
- [10] 毕思博. 接近段小天体三维建模和旋转轴方向估计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- BI S B. 3D modeling and rotation axis direction estimation for the approach phase of small celestial body[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [11] PESCE V, OPROMOLLA R, SARNO S, et al. Autonomous relative navigation around uncooperative spacecraft based on a single camera[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 84: 1070-1080.
- [12] PANICUCCI P, LEBRETON J, BROCHARD R, et al. Vision-based estimation of small body rotational state during the approach phase[EB/OL]. (2023)[2023-03-31]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.11364>.
- [13] VOLPE R, PALMERINI G B, SABATINI M. A passive camera based determination of a non-cooperative and unknown satellite's pose and shape[J]. *Acta Astronautica*, 2018, 151: 805-817.
- [14] SHARMA S. Comparative assessment of techniques for initial pose estimation using monocular vision[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 123: 435-445.
- [15] TURAN E, SPERETTA S, GILL E. Autonomous navigation for deep space small satellites: scientific and technological advances[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 193: 56-57.
- [16] OHIRA G, KASHIOKA S, TAKAO Y, et al. Autonomous image-based navigation using vector code correlation algorithm for distant small body exploration[J]. *Acta Astronautica*, 2022, 196: 400-413.
- [17] YU F, HE Z, WU Y, et al. Adaptive estimation of attitude and angular velocity of malfunctioned satellites for on-orbit servicing[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 230(13): 2425-2446.
- [18] JAZAR R N. *Theory of applied robotics: kinematics, dynamics, and control*[M]. Berlin: Springer, 2010: 91-148.
- [19] XU X, SHEN Z, ZHAO J, et al. Rotational motion estimation of non-cooperative target in space based on the 3D point cloud sequence[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(3): 1528-1537.
- [20] MAHAPATRA S, MOHAPATRA S K, SWAIN B R, et al. Simulation based algorithm for tracking multi-moving object using gaussian filtering with Lucas-Kanade approach[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 48: 789-794.
- [21] VISHNIAKOU I, PLOGER P G, SEELIG J D. Virtual reality for animal navigation with camera-based optical flow tracking[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2019, 327: 108403.
- [22] 刘鹏, 倪郑鸿远, 赵巍, 等. 一种小天体旋转参数估计方法[J]. 空间控制技术与应用, 2020, 46(6): 20-27.
- LIU P, NI Z H Y, ZHAO W, et al. A method for estimating rotation parameters of small body[J]. *Aerospace Contrd and Application*, 2020, 46(6): 20-27.
- [23] BARBIER T, GAO Y. Relative visual navigation around an unknown and uncooperative spacecraft[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 206: 144-155.

## 作者简介:

陈友(1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 深空探测器自主导航。

通信地址: 青岛科技大学自动化与电子工程学院(266100)

电话: 13165076092

E-mail: [cy9802ol@163.com](mailto:cy9802ol@163.com)

邵巍(1980-), 男, 教授, 主要研究方向: 深空探测器自主导航、机器视觉、图像处理与智能感知等。本文通信作者。

通信地址: 青岛科技大学自动化与电子工程学院(266100)

电话: 15166650567

E-mail: [greatshao@126.com](mailto:greatshao@126.com)

# A Method for Estimating Motion State of Small Bodies Based on Fusion of Camera and LIDAR

CHEN You<sup>1,2</sup>, GUO Jinrong<sup>1,2</sup>, LIU Yanjie<sup>1,2</sup>, SHAO Wei<sup>1,2</sup>, HUANG Xiangyu<sup>3</sup>

(1. College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266100, China;

2. Shandong Key Laboratory of Autonomous Landing for Deep Space Exploration, Qingdao 266100, China;

3. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Only one vision sensor is incompetent for estimating the motion state of small body. In order to solve this problem, a small body motion state estimation method based on the fusion of camera and LIDAR was proposed. Firstly, a fused camera and LIDAR measurement model was built. By tracking image feature points with depth information, extended Kalman filter was used to estimate the spin angular velocity, spin axis direction, position and velocity of small body. Secondly, a feature fusion matrix was designed to achieve real-time updates of image feature points, point clouds, and fused feature points. Thirdly, the effectiveness of this algorithm and the impact of the number of feature points, observation height, and noise on the algorithm were analyzed. Simulation results show that the accuracy of the proposed algorithm is significantly higher than that of the spin parameter estimation algorithm of small bodies based on monocular camera.

**Keywords:** information fusion; small body; motion state estimation; extended Kalman filtering

## Highlights:

- A method for estimating motion state of small body by fusing camera and LIDAR is proposed.
- The accuracy of the method of fusing image depth information and image feature information as observations to estimate the motion state of small body is higher than that of a single sensor.
- The effectiveness of the algorithm in this paper and the influence of noise size, observation height, and number of feature points on the accuracy of the algorithm are analyzed.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]