

# 一种基于惯量椭圆位姿补偿的扩展目标精确定位方法

赵汝进<sup>1</sup> 刘恩海<sup>1</sup> 张启衡<sup>1</sup> 赵连军<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 针对空间扩展目标成像纹理特征少,背景单一,以及目标旋转、平移、形变等运动特征所导致的目标定位跟踪困难的问题,研究了基于惯量椭圆位姿补偿的目标定位跟踪方法(TTBPC)。通过惯量椭圆测姿法获取目标准确俯仰角姿态,将目标位置、姿态补偿到统一的坐标系下,结合最近距离特征点匹配原则,最终实现对空间扩展目标的精确跟踪定位。通过仿真图像和实际图像对TTBPC方法的有效性进行了验证,平移目标定位误差小于0.26 pixel,旋转目标定位误差小于0.28 pixel,实际空间扩展目标定位误差小于0.3 pixel,这表明该方法应用于空间扩展目标定位的有效性和准确性。

**关键词** 图像处理;姿态测量;惯量椭圆;目标跟踪;特征点

中图分类号 TP39 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0315001

## A Method of Extended Target Tracking Based on Inertia Ellipse and Pose Compensation

Zhao Rujin<sup>1</sup> Liu Enhai<sup>1</sup> Zhang Qiheng<sup>1</sup> Zhao Lianjun<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** In order to solve the problem of space extended target tracking on the condition that the background of image is simple, the texture of target is lack, and the revolving and translating target is distorted gradually, one method of target tracking based on the inertia ellipse and pose compensation is proposed. The inertia ellipse is used to measure the pose of target accurately. The pose and location are compensated in uniform reference frame, and the principle of the closest distance is adopted to feature point matching. It is approached that the extended target is tracked accurately. Furthermore, experiments involving emulating image and real image indicate that the proposed method is effective, the error of tracking transferred target is less than 0.26 pixel, the error of tracking revolving target is less than 0.28 pixel, and the error of tracking real extended space target is less than 0.30 pixel, which indicates that the proposed method is effective on tracking the extended space target.

**Key words** image processing; pose measuring; inertia ellipse; target tracking; feature point

**OCIS codes** 100.2000; 100.3008; 100.4999; 100.5010

## 1 引言

远程扩展空间目标成像背景较单一,目标缺乏丰富的纹理特征,扩展空间目标在旋转平移运动过程中由于视角和湍流等因素影响,目标几何尺寸会发生变化,增大了目标定位跟踪难度。

针对扩展目标定位各个难点,业内开展了一系

列相关研究,采用基于相关模板匹配技术的目标跟踪方法具有平移不变性<sup>[1-2]</sup>,且具有较高运算速度,但无法解决目标运动过程中尺度变化,外形畸变等问题;基于均值平移(Mean-shift)的非刚体目标跟踪方法<sup>[3-4]</sup>,在一定程度上有效解决了目标运动过程中由于变形而导致的跟踪失效问题,但无法跟踪

收稿日期: 2013-08-22; 收到修改稿日期: 2013-11-05

基金项目: 国家 973 计划(2014CB744200)

作者简介: 赵汝进(1982—),男,博士,副研究员,主要从事基于视觉的空间光电精密测量与信号处理等方面的研究。

E-mail: zrzj0515@163.com

旋转目标;基于遗忘因子的卡尔曼滤波协方差跟踪方法在一定程度上克服了目标被遮挡的跟踪难题<sup>[5]</sup>;Liu等<sup>[6]</sup>提出对目标尺度自适应的跟踪方法,却不能根据目标姿态变化对跟踪窗口做出适应性的调整;利用目标区域的直方图特征信息,改进 Mean-shift 有效解决了目标跟踪中的旋转问题<sup>[7-8]</sup>,但对目标尺度以及外形变化难以适应;而 Lowe<sup>[9]</sup>提出的基于 SIFT 特征点的目标跟踪方法,对复杂背景下纹理特征丰富目标具有旋转、平移、尺度等多重不变性,但对缺乏丰富纹理、运动过程畸变的远程扩展空间目标成像效果有限。

利用目标成像特征点、直线、曲线等特征结合目标自身几何外形可以对目标姿态进行测量<sup>[10-15]</sup>,而当成像目标没有明显直线、曲线等特征时,传统方法则并不适用。惯量椭圆是刚体动力学中一个概念,被引入图像分析领域<sup>[16]</sup>,利用惯量将目标区域构造等效椭圆,借助等效椭圆间的匹配可获得对两幅图像间几何变换关系<sup>[17]</sup>,从而也能对目标姿态进行测量,且惯量椭圆法测量目标俯仰角姿态具有全局性,不受目标旋转、平移、尺度变化影响。

通过惯量椭圆法得到扩展星际目标俯仰角姿态,对目标进行姿态和位置的补偿,转换到统一的坐标系中,在统一的坐标系下对跟踪点最近距离原则下的特征点关联和匹配,实现对目标局部特征点的精确定位,有效克服纹理单一目标在旋转、平移、运动过程畸变等条件下的精确跟踪问题,具有较强的稳健性。

## 2 惯量椭圆测姿方法原理

惯量椭圆姿态测量(PMBIE)是利用目标成像类椭圆特征,将目标所有像素点等效为惯量椭圆<sup>[16]</sup>,通过提取惯量椭圆的主轴确定原目标中轴线方向,最终确定目标俯仰角<sup>[17]</sup>。

在刚体力学中,一个刚体在转动时的惯性可以用其转动惯量来度量。将图像中目标区域看成一个刚体,目标各像素点的灰度对应此刚体各质点质量,用 $\{m_i\} i = 1, 2, \dots, N$ 表示,像素点坐标用 $\{(x_i, y_i, z_i)\} i = 1, 2, \dots, N$ 表示,刚体绕轴线 $L$ 的转动惯量 $I$ 为

$$I = \sum_{i=1}^N m_i d_i^2, \quad (1)$$

式中 $d_i$ 表示质点 $m_i$ 与旋转轴线 $L$ 的垂直距离。若 $L$ 通过坐标系原点,且其方向余弦为 $\alpha, \beta$ ,那么将(1)式写成

$$I = A\alpha^2 + B\beta^2 - 2H\alpha\beta, \quad (2)$$

式中 $A = \sum m_i y_i^2, B = \sum m_i x_i^2$ 分别为刚体绕 $X, Y$ 坐标轴的转动惯量, $H = \sum m_i x_i y_i$ 称为惯量积。则 $Ax^2 + By^2 - 2Hxy = 1$ 表示一个中心在坐标系原点的二阶曲线,若用 $r$ 表示从原点到曲线的矢量,该矢量的方向余弦为 $\alpha, \beta$ ,模为 $r$ ,可得

$$r^2(A\alpha^2 + B\beta^2 - 2H\alpha\beta) = r^2 I = 1. \quad (3)$$

由于 $I$ 总大于零,所以 $r$ 必为有限值,即闭合二阶曲线,为惯量椭圆,则任意二维图像区域都可以等效为一个惯量椭圆,如图1所示。

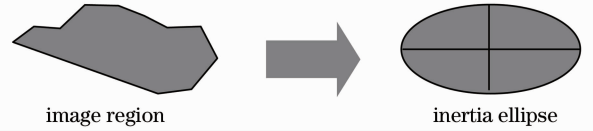


图1 惯量椭圆近似原理

Fig. 1 Theory of inertia ellipse

上述惯量椭圆两个主轴的斜率分别为 $k$ 和 $l$ ,即

$$k = \frac{1}{2H}[(A - B) - \sqrt{(A - B)^2 + 4H^2}], \quad (4)$$

$$l = \frac{1}{2H}[(A - B) + \sqrt{(A - B)^2 + 4H^2}]. \quad (5)$$

目标姿态角 $\varphi$ 用惯量椭圆长中轴的俯仰角度表示,即

$$\varphi = \begin{cases} \arctan k, & A < B \\ \arctan l, & A > B \end{cases} \quad (6)$$

利用惯量椭圆求解目标的俯仰角,不受平移、旋转和尺度变换的影响,适用于各种对称或不对称目标。

## 3 基于位姿补偿的目标定位

通过惯量椭圆法得到扩展空间目标俯仰角姿态后,对目标进行姿态和位置的补偿,转换到统一的坐标系中,对多帧图像的目标局部特征点进行关联和匹配,实现对目标局部特征的精确跟踪定位。基于位姿补偿目标定位流程图如图2所示。

输入第0帧图像,提取图像中目标的质心 $p_0 = (x_0^p, y_0^p)$ ,质心坐标表征了目标的位置信息。

$$x_0^p = \frac{\sum_{i=1}^I i \cdot \sum_{j=1}^J f(i, j)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f(i, j)}, \quad y_0^p = \frac{\sum_{j=1}^J j \cdot \sum_{i=1}^I f(i, j)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J f(i, j)}. \quad (7)$$

通过 PMBIE 测量目标等效椭圆俯仰角 $\varphi_0$ , $\varphi_0$ 表征了目标的姿态信息。提取目标边缘,可设定边

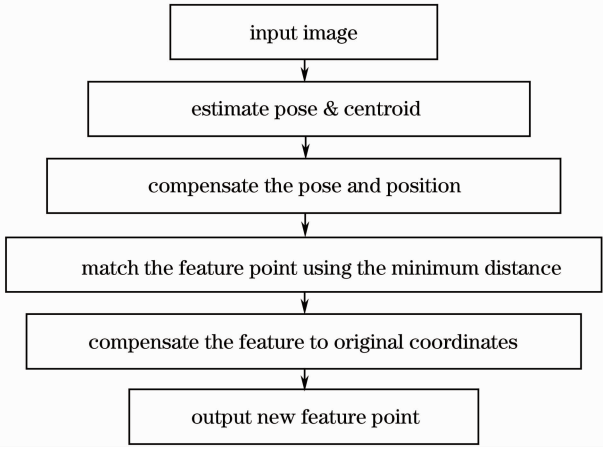


图 2 基于位姿补偿的目标定位算法流程

Fig. 2 Flow chat of the method of target tracking based on pose compensation

上任一点为待跟踪点  $q_0 = (x_0^q, y_0^q)$ 。

随后输入后续第  $k$  帧图像，同样提取图像中目标的质心  $p_k = (x_k^p, y_k^p)$ ，测量目标俯仰角  $\varphi_k$ ，提取图像中目标边缘。

将第  $k$  帧图像边缘像素坐标  $(x_k^{\text{edge}}, y_k^{\text{edge}})$  以  $\varphi_0$  和  $p_0$  为基准进行姿态和位置的补偿，如图 3 所示，虚线表示位姿补偿前第  $k$  帧目标区域，实线表示第 0 帧目标区域。得到位姿补偿后坐标系下边缘像素坐标  $(x_{k_0}^{\text{edge}}, y_{k_0}^{\text{edge}})$ ：

$$\begin{bmatrix} x_{k_0}^{\text{edge}} \\ y_{k_0}^{\text{edge}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_k - \varphi_0) & \sin(\varphi_k - \varphi_0) \\ -\sin(\varphi_k - \varphi_0) & \cos(\varphi_k - \varphi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k^{\text{edge}} \\ y_k^{\text{edge}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0^p - x_k^p \\ y_0^p - y_k^p \end{bmatrix}. \quad (8)$$

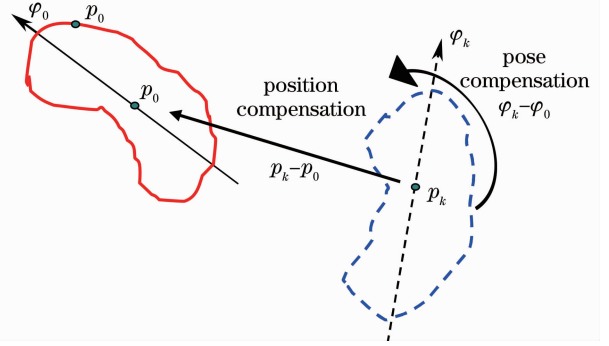


图 3 目标位置和姿态补偿

位姿补偿后，各帧图像目标均转换到以第 0 帧图像目标位置  $p_0$ 、姿态  $\varphi_0$  为基准的统一的坐标系下。而各帧图像由于湍流、视角变化等因素，目标除了位姿变化还会产生微小形变，利用最近距离匹配原则，距离  $q_0$  最近的边缘点作为第  $k$  帧图像的匹配点  $q_k$ ，如图 4 所示，虚线表示位姿补偿后第  $k$  帧目标，实线表示第 0 帧目标。

$$q_k = (x_k^{\text{edge}}, y_k^{\text{edge}}) = \operatorname{argmin} \| (x_k^{\text{edge}}, y_k^{\text{edge}}) - q_0 \|. \quad (9)$$

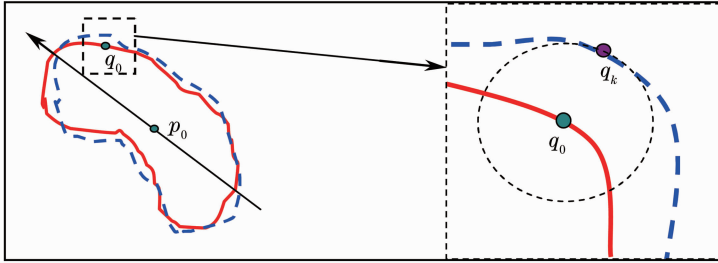


图 4 边缘匹配点策略

Fig. 4 Method of matching edge of image

最后将匹配点  $q_k$  坐标恢复到位姿补偿前的坐标系，如图 5 所示，则第  $k$  帧图像匹配点坐标为  $q_{k_0}$ 。

$$\begin{bmatrix} x_{k_0}^q \\ y_{k_0}^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_0 - \varphi_k) & \sin(\varphi_0 - \varphi_k) \\ -\sin(\varphi_0 - \varphi_k) & \cos(\varphi_0 - \varphi_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k^q \\ y_k^q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0^p - x_k^p \\ y_0^p - y_k^p \end{bmatrix}. \quad (10)$$

通过以上目标精确定位流程，对多帧图像目标局部特征点进行精确定位，输出各帧跟踪点  $q_{k_0}$ 。

针对帧数较多的图像序列，在利用上述位姿补偿方法进行目标定位跟踪时需考虑基准目标位置和

基准姿态的更新，采用了基于目标帧数值的更新策略，设定每  $n$  帧图像更新一次旋转补偿的基准位置和基准姿态，即第 1~ $n-1$  帧图像目标均转换到以第 0 帧图像目标位置  $p_0$ 、姿态  $\varphi_0$  为基准的统一的坐标系下，而第  $n \sim 2n-1$  帧图像目标均转换到以第  $n$  帧图像目标位置  $p_n$ 、姿态  $\varphi_n$  为基准的统一的坐标系下，以此类推。基于此更新策略一定程度上可避免对长时间序列目标跟踪定位残差累计所造成的跟踪漂移问题，其中  $n$  的具体数值可根据工程实践经验和实际跟踪效果来设定。

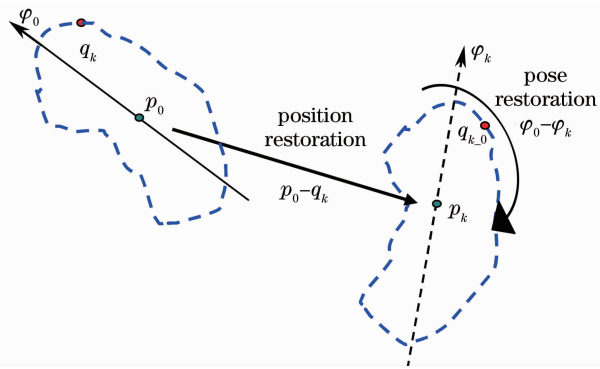


图 5 目标位置和姿态恢复

Fig. 5 Comeback of target translation and attitude

### 4 试验与讨论

为验证本文算法的有效性,利用仿真图像序列和实际图像序列分别对 TTBPC 方法进行验证实验。并采用跟踪点到质心距离的差值量化定位跟踪点误差,即:

- 1) 计算第 0 帧定位点与目标质心的距离;
- 2) 计算后续帧图像中跟踪定位点与目标质心

距离;

3) 将后续帧跟踪点到质心距离与首帧定位点到质心距离进行比较,统计差值。

考虑了目标旋转和平移量补偿,目标定位跟踪点误差越小表示后续帧跟踪点到质心距离应与首帧跟踪点到质心距离越保持一致,而后续帧跟踪点到质心距离与首帧跟踪点到质心距离的差值也反应了后续帧跟踪定位点的精度,差值越小定位精度越高。在图像目标真实旋转平移量不能定量获知的情况下,此方法提供了一种能够侧面量化定位跟踪精度的有效手段。

利用仿真平移目标图像序列进行跟踪定位实验,图 6 显示了对平移目标跟踪定位的情况,序列共 100 帧图像,目标为半圆环形非对称目标,缺乏丰富纹理,边缘较模糊,目标由左向右进行平移运动,在运动过程中对目标边缘一点持续稳定跟踪如图 6 中方框所示,并利用跟踪点与目标质心距离误差评价定位的精度。图 7 为跟踪点到目标质心距离误差,误差绝对值均值为 0.26 pixel,最大误差为 0.61 pixel。

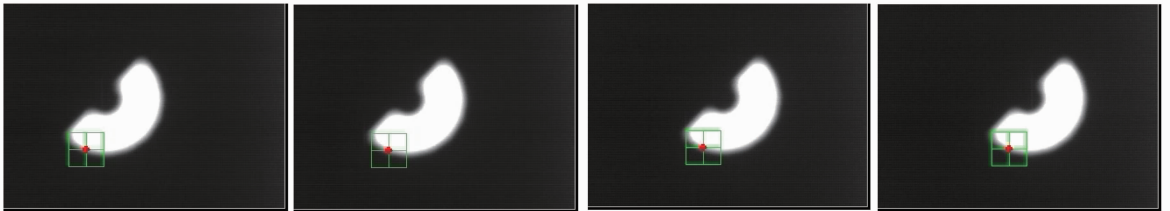


图 6 对平移目标定位

Fig. 6 Tracking the transferred target

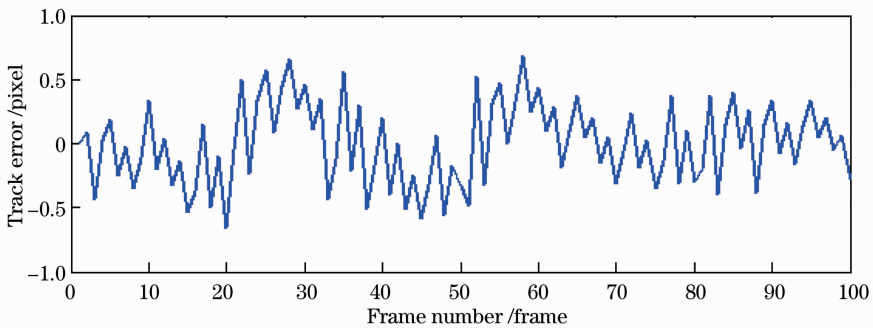


图 7 平移目标定位误差

Fig. 7 Error of tracking transferred target

随后对仿真旋转目标图像序列进行跟踪定位,图 8 为对旋转目标跟踪定位情况,序列共 100 帧图像,目标旋转运动,同样边缘模糊,缺乏丰富的纹理特征,在运动过程中对目标边缘一点持续稳定跟踪如图 8 中方框所示,跟踪点与目标质心距离误差如图 9 所示,误差绝对值均值 0.28 pixel,最大误差小

于 0.98 pixel。

最后对拍摄的实际星际卫星目标图像序列进行跟踪定位实验,图 10 为对目标进行定位的情况,目标运动包括平移、旋转,且在运动过程中产生形变,在运动过程中持续对边缘特征点稳定跟踪如图 10 方框所示,图 11 为跟踪点和目标质心距离误差,误差绝对值

均值为 0.30 pixel,最大误差小于 0.78 pixel。

三组实验分别验证了基于位姿补偿的扩展目标定位技术,实验结果如表 1 所示,对平移目标定位精度高于旋转目标,精度达到 0.26 pixel,而本文方法对实际空间目标场景目标变形条件下的跟踪定位精

度达 0.3 pixel,具有较强的稳健性。由于利用了目标整体轮廓的几何特征,将目标转换到同一坐标系下进行跟踪点匹配,对平移、旋转等目标定位均达到亚像素级精度,验证了 TTBPC 算法的有效性和稳健性。

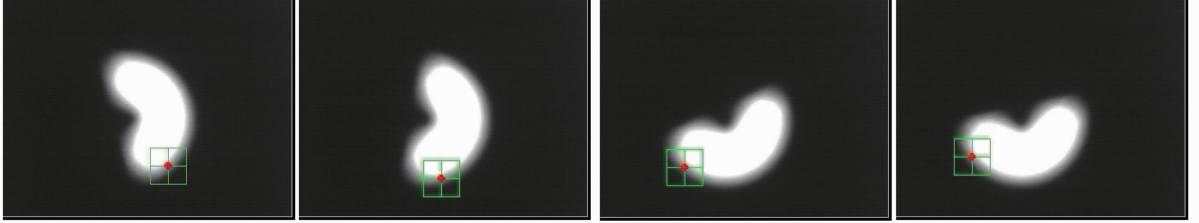


图 8 对旋转目标定位

Fig. 8 Tracking the revolving target

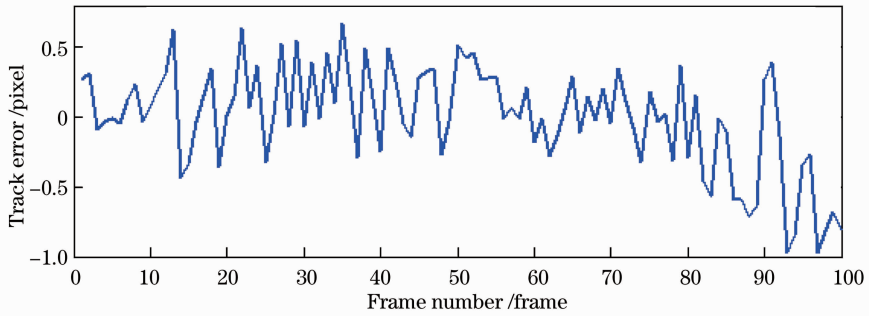


图 9 旋转目标定位误差

Fig. 9 Error of tracking revolving target

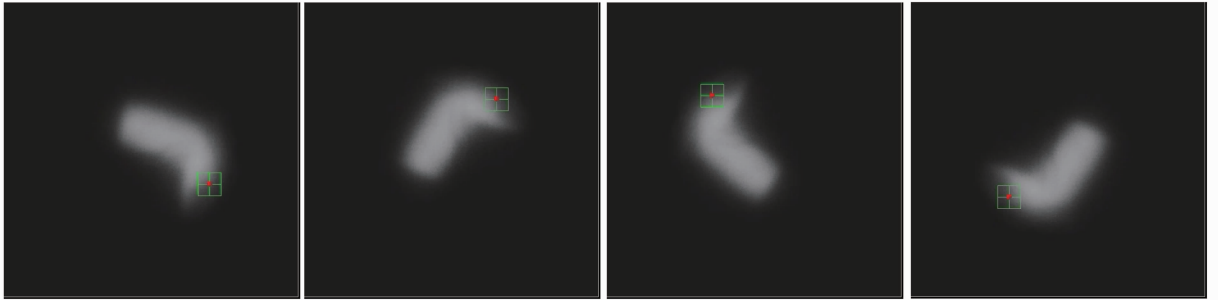


图 10 实际旋转移动目标定位

Fig. 10 Tracking the real target

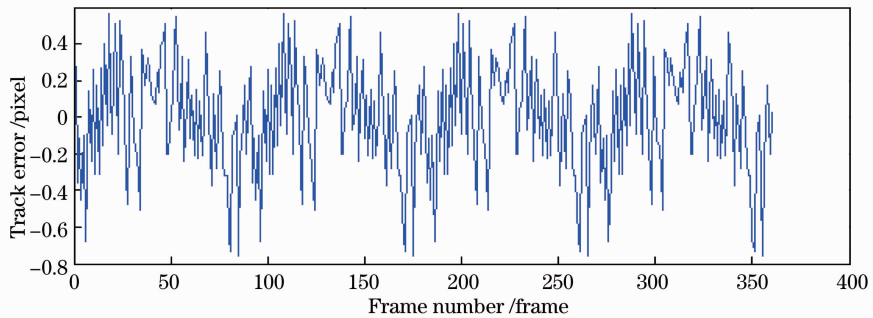


图 11 实际旋转移动目标定位误差

Fig. 11 Error of tracking real target

表 1 三种场景对 TTBC 精度对比结果

Table 1 Results of TTBC on three types of scenes

Experimental scene	Mean of error /pixel	Maximum of error /pixel
Simulated translation target	0.26	0.61
Simulated rotational target	0.28	0.98
Real space target	0.30	0.78

## 5 结 论

提出一种基于惯量椭圆姿态补偿的目标定位跟踪方法。利用目标类椭圆特征,通过惯量椭圆测姿法对目标俯仰姿态角度测量,再通过对目标位置、姿态进行补偿,并对目标特征点最近距离原则匹配,实现对目标局部特征点的精确跟踪定位。利用仿真图像序列和实际卫星图像序列,对 TTBC 方法进行验证,其中平移目标跟踪误差为 0.26 pixel,旋转目标定位误差为 0.28 pixel,而实际空间目标定位精度达 0.30 pixel,最终通过三组实验验证了算法的有效性和稳健性。

## 参 考 文 献

- Guo Wei, Zhao Yigong, Xie Zhenhua. An improved normalized cross-correlation for template matching of infrared image [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(1): 189-193.  
郭 伟, 赵亦工, 谢振华. 一种改进的红外图像归一化互相关匹配算法[J]. 光子学报, 2009, 38(1): 189-193.
- Yin Songfeng, Wang Yicheng, Cao Liangcai, *et al.*. Fast correlation matching based on fast Fourier transform and integral image [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(12): 2246-2250.  
殷松峰, 王一程, 曹良才, 等. 基于快速傅里叶变换和积分图像的快速相关匹配[J]. 光子学报, 2010, 39(12): 2246-2250.
- D Comaniciu, V Ramesh, P Meer. Real-time tracking of non-rigid objects using mean shift [C]. Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2000: 142-149.
- P Li. An adaptive binning color model for mean shift tracking [J]. IEEE Trans Circuits Syst Video Technol, 2008, 18(9): 1293-1299.
- Zhang Xuguang, Zhang Yun, Wang Yanning, *et al.*. Covariance tracking based on forgetting factor and kalman filter [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2317-2323.  
张旭光, 张 云, 王艳宁, 等. 基于遗忘因子与卡尔曼滤波的协方差跟踪[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2317-2323.
- C Y Liu, N Yung. Scale-adaptive spatial appearance feature density approximation for object tracking [J]. IEEE Trans Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(1): 284-290.
- Wang Changjun, Zhu Shan'an. Mean-shift based targets' rotation and translation tracking [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(8): 1367-1371.  
王长军, 朱善安. 基于 Mean Shift 的目标平移与旋转跟踪[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(8): 1367-1371.
- J Draréni, S Roy. A simple oriented mean-shift algorithm for tracking [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2007, 4633: 558-568.
- D G Lowe. Distinctive image features from scale-invariant key points [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.
- Zhao Rujin, Zhang Qiheng, Zuo Haorui, *et al.*. A method of improving the measuring accuracy of the pose of targets based on outliers-removal [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2463-2467.  
赵汝进, 张启衡, 左颀睿, 等. 基于去离群点策略提高目标位姿测量精度[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2463-2467.
- Zhao Rujin, Zhang Qiheng, Xu Zhiyong, *et al.*. A method of measuring attitude based on inclined angle of the line between feature points [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(2): 320-324.  
赵汝进, 张启衡, 徐智勇, 等. 一种基于特征点间线段倾角的姿态测量方法[J]. 光子学报, 2010, 39(2): 320-324.
- Zhao Rujin, Zhang Qiheng, Wu Mingjun, *et al.*. Pose estimation based on the constraints of inner angles and areas of triangles [C]. SPIE, 2009, 7384: 738411.
- Miao Xikui, Zhu Feng, Ding Qinghai, *et al.*. Monocular vision pose measurement based on docking ring component [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412006.  
苗锡奎, 朱 枫, 丁庆海, 等. 基于星箭对接环部件的飞行器单目视觉位姿测量方法[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412006.
- Zhao Rujin, Zhang Qiheng, Zuo Haorui, *et al.*. A mono-vision method of measuring pose based on line features [J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2010, 21(6): 894-897.  
赵汝进, 张启衡, 左颀睿, 等. 一种基于直线特征的单目视觉位姿测量方法[J]. 光电子·激光, 2010, 21(6): 894-897.
- Chao Zhichao, Fu Sihua, Jiang Guangwen, *et al.*. Mono camera and laser rangefinding sensor position-pose measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0312001.  
晁志超, 伏思华, 姜广文, 等. 单目摄像机-激光测距传感器位姿测量系统[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312001.
- Zhang Yujin. Image Engineering (II): Image Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 317-319.  
章毓晋. 图像工程(中册): 图像分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 317-319.
- Peng Xiaodong, Zhou Sizhong, Liu Bo, *et al.*. Application of ellipse of inertia in measuring the object's 3D pose from mono-view [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(3): 568-573.  
彭晓东, 周泗忠, 刘 波, 等. 惯量椭圆法在单站光测目标三维姿态测量中的应用[J]. 光子学报, 2007, 36(3): 568-573.

栏目编辑: 李志兰