

基于 SWAD 算法的空间面目标高精度跟踪技术研究

杨明冬, 王建宇, 贾建军, 张亮, 强佳

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 针对空间面目标的高精度跟踪问题, 提出一种面目标高精度跟踪方法, 该方法利用 SWAD 模板匹配算法和亚像素拟合算法提取目标精确的位置信息, 并在跟踪过程中对模板进行实时更新。对传统的无限冲击响应滤波模板更新方法进行了改进, 提出一种变系数模板更新方法, 该方法计算量小, 不需要经过复杂的置信度判断, 模板更新系数由当前模板图像和当前最佳匹配区域图像的灰度值决定; 利用不同亮度的目标, 以及对目标图像进行尺度变换模拟姿态变化的目标, 比较了该模板更新算法和传统算法的匹配误差, 结果表明: 该算法能够更好地适应目标姿态的变化; 最后通过平行光管和靶标板模拟远场非合作目标, 搭建了室内演示试验, 证明了利用模板匹配进行高精度目标跟踪的可行性。

关键词: 图像处理; 高精度跟踪; SWAD 算法; 变系数模板更新; 演示实验

中图分类号: TN911.73; TN820.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0228002

Research on technologies of space area targets high-precision tracking based on SWAD algorithm

Yang Mingdong, Wang Jianyu, Jia Jianjun, Zhang Liang, Qiang Jia

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: For the problem of high-precision tracking of space area targets, a method of tracking area targets with high-precision was proposed. Sum of weighted absolute differences (SWAD) matching algorithm and sub-pixel fitting algorithm were used to extract precise position of the target. The template was updated during tracking. The conventional infinite impulse response filter approach used for template updating was improved. A variable coefficient template updating method was proposed. This method had small amount of computations, and creditability evaluation was not needed. The template updating coefficient was determined by gray values of current template and current best matching area. Images with different target brightness, and images after scale transformation for simulating target attitude change, were used to compare matching error of proposed method and conventional method. Results show that method proposed in this paper has better adaptability to changes of target attitude. Finally, collimator and simulation target were used to simulate far-field non-cooperative target. Indoor demonstration experiment was set up and the experiment shows that high-precision target tracking with image matching is feasible.

Key words: image processing; high-precision tracking; SWAD algorithm; variable coefficient template updating; demonstration experiment

收稿日期: 2015-06-17; 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(61302181)

作者简介: 杨明冬(1988-), 男, 博士生, 主要从事利用 ATP 系统进行空间目标跟踪方面的研究。Email: ymd1006@126.com

导师简介: 王建宇(1959-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事空间光电系统、信息获取与处理技术方面的研究。

Email: jywang@mail.sitp.ac.cn

0 引言

人类空间活动日益频繁,许多应用都要求空间载荷能够在短时间内对空间面目标进行高精度的跟踪,如空间对接^[1]、空间目标抓捕^[2]、空间激光武器^[3-4]等,以激光武器为例,跟踪系统对目标的跟踪精度要达到 μrad 量级^[5],要求系统具有较高的目标位置提取精度,一般要在亚像素级别;同时为了抑制平台干扰等因素的影响,跟踪系统干扰抑制带宽要在 100 Hz 左右,探测器的帧频要达到 1kHz 或者更高^[6-7],对目标位置提取算法的实时性就有一定要求,目标位置提取算法要能够在 1 ms 或者更短的时间内计算出被跟踪区域的精确位置。国外关于如何达到高精度跟踪的实施方案报道较少,所以有必要研究空间面目标高精度跟踪技术。

SAD 算法(Sum of Absolute Differences)计算量小,易于应用在实时系统中,是面目标跟踪中常见的一种算法,但是该算法对目标光照和姿态变化比较敏感^[8-9],所以一些学者提出了基于不同加权函数的加权 SAD 算法,以减小目标姿态变化的影响,例如根据模板图像各像素到模板中心的距离构造加权函数^[10],或者利用高斯核函数构造加权函数^[11]。

目标跟踪过程中,目标姿态一直变化,使用单一的模板进行匹配跟踪可能会增大匹配误差,甚至导致跟踪失败,不能满足高精度跟踪的要求,传统的模板更新算法常采用无限冲击响应滤波法^[10-13],模板更新系数 α 取固定值 0.5^[11,13],或者根据十分复杂的置信度判断确定 α 的值^[10,12], α 为固定值并不能很好地反映目标相比于原模板图像变化的程度,置信度判断又需要确定判断阈值,对不同的目标图像,判断阈值不同,阈值的选取是难点。文中基于 SWAD 模板匹配跟踪算法^[11],对传统模板更新算法进行了改进,并研究了目标亮度和姿态变化情况下的匹配精度,最后通过演示试验证明了利用图像匹配进行高精度跟踪的可行性,对研究基于图像匹配的高精度面目标跟踪有一定的参考价值。

1 匹配跟踪算法

1.1 亚像素拟合算法

通过 SWAD 匹配算法得到的最佳匹配点是整

像素最佳匹配点,对于面目标高精度跟踪的情况,需要通过对匹配数据进行亚像素拟合求取亚像素最佳匹配点,亚像素最佳匹配点即为目标的精确位置,实时系统中,抛物线拟合是比较常用的一种亚像素拟合算法,其他算法像曲面拟合算法计算量太大,不适合应用在实时系统中^[14-16]。

1.2 变系数模板更新算法

常用的模板更新方法为无限冲击响应滤波法,表示如下^[10-13]:

$$T_{i+1} = \alpha T_i + (1 - \alpha) F_i \quad (1)$$

式中: T_{i+1} 为下一帧匹配时所需的模板; T_i 为当前帧匹配时使用的模板; F_i 为当前帧中,以最佳匹配位置为中心,与模板大小相同的图像区域, $\alpha(0 \leq \alpha \leq 1)$ 为模板更新系数。考虑空间目标跟踪的实际应用,文中对模板更新系数进行改进,提出一种变系数模板更新算法,改进后的模板更新系数表示如下:

$$\alpha(i, j) = 0.5 \times \left(1 - \frac{\Delta(i, j)}{\Delta_{\max}} \right) \quad (2)$$

其中,

$$\Delta(i, j) = |T_i(i, j) - F_i(i, j)| \quad (3)$$

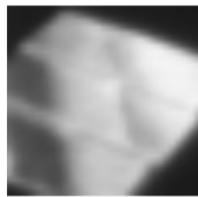
$$\Delta_{\max} = \max[|T_i(i, j) - F_i(i, j)|] \quad (4)$$

式中: $\Delta(i, j)$ 为与模板大小相同的矩阵,矩阵中的值等于对应位置处 T_i 和 F_i 差的绝对值; Δ_{\max} 为差绝对值的最大值。当位置 (i, j) 处目标相比于模板变化较大时,例如 $\Delta(i, j) = \Delta_{\max}$ 时, $\alpha = 0$,认为此时目标相对于模板发生了较大变化,用当前最佳匹配区域的像元灰度值代替该位置处像元灰度值,即当目标相比于模板变化较大时,对模板更新的幅度也大,反之则更新幅度小。模板更新系数能够根据目标相对于模板的变化情况实时调整,从而使匹配模板能更好地反映目标的变化情况。

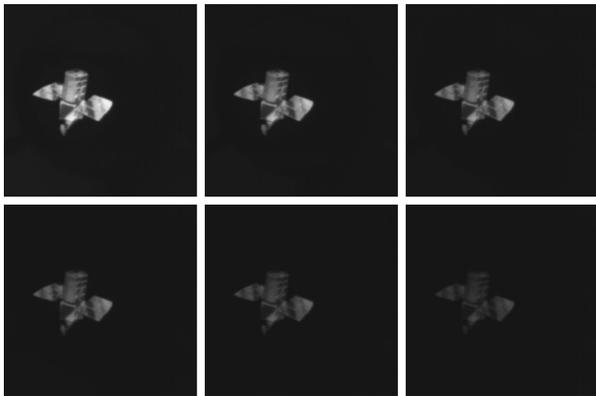
1.3 目标亮度变化时匹配误差比较

空间目标的亮度与目标表面反射率、目标姿态、目标与跟踪系统的距离等因素有关,目标跟踪过程中,目标姿态和目标离跟踪系统的距离一直处于变化状态,目标亮度可能增强也可能减弱^[17],文中所用的算法为加权的 SAD 算法,算法的匹配函数是模板图像和实时图像灰度差的绝对值和,所以利用选定模板在亮度逐渐减弱和逐渐增强的目标图像中进行匹配,得到的结果是一样的,文中以目标亮度逐渐减弱为例对匹配误差进行比较。

文中通过模拟空间不同亮度的目标比较模板更新算法匹配结果,空间不同亮度的目标图像和初始模板如图 1 所示,图 1(a)为初始模板,图 1(b)为模拟不同亮度的目标图像,在一副图像中选取一区域作为初始模板并在其余图像中匹配,模板大小为 31×31 ,比较模板不更新、模板更新系数 α 为固定值(0.5)和文中算法的匹配误差,得到的匹配误差如图 2 所示,由图可得,在进行图像匹配的过程中,如果不更新模板,匹配误差会越来越大,文中算法得到的误差比模板更新系数固定不变时的误差要小,说明了算法的有效性。



(a) 初始模板
(a) Initial template



(b) 不同亮度的目标图像
(b) Target images of different brightness

图 1 初始模板及不同亮度的目标图像

Fig.1 Initial template and target images of different brightness

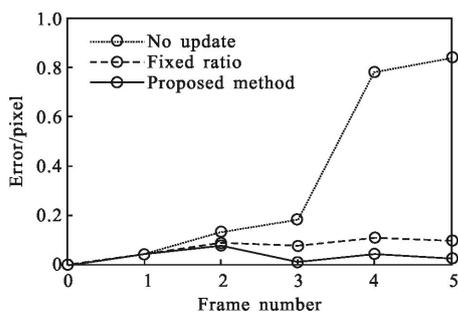


图 2 目标不同亮度的匹配误差数据

Fig.2 Matching error of different target brightness

1.4 目标姿态变化时的匹配误差比较

为了检验文中模板更新算法的有效性,同时研究姿态变化对匹配精度的影响,采用不同的图像,并利用仿射变换改变目标图像尺寸和旋转角度,模拟目标姿态变化,并在原图像中选取大小为 31×31 的图像区域作为模板,在仿射变换之后的图像中进行匹配,比较模板更新系数固定和文中提出算法的匹配精度。

空间目标跟踪过程中,目标与跟踪系统的距离随时间变化,在跟踪系统焦距不变的情况下,目标在跟踪系统探测器上成像大小也会随时间变化,可能变大也可能变小,对于加权的 SAD 算法,算法的匹配函数是模板图像和实时图像灰度差的绝对值和,利用模板在变大的目标图像和变小的目标图像进行匹配,原理相同,而且利用仿射变换将图像放大时,图像中会出现多条横竖暗条纹,与实际图像相差较大,所以文中以目标图像逐渐减小为例对匹配误差进行比较。

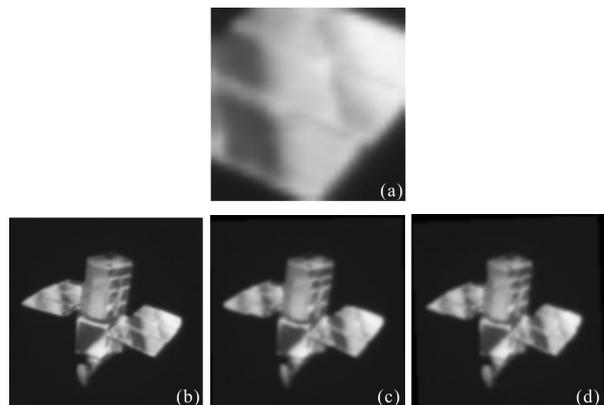
仿射变换同时对图像进行缩小和旋转变换,表达式为:

$$[u \ v] = [x \ y] \begin{bmatrix} 1/a_1 \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & 1/b_2 \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: (u, v) 为变换之后的图像坐标; (x, y) 为待变换的图像坐标; a_1, b_2 为变换因子, $a_1 = b_2 = 1 + \theta/20$; θ 为旋转的角度,单位为度。

(1) 图像 1

图像 1 通过平行光管模拟远场得到,具体实现方法见文中第 2 小节演示实验部分,对图像做尺度变换并利用 16 均值滤波进行模糊化处理,原图像及不同变换尺度下的模糊图像和初始模板如图 3 所示,图 3(a)为初始模板,图 3(b)为原图像,图 3(c)为



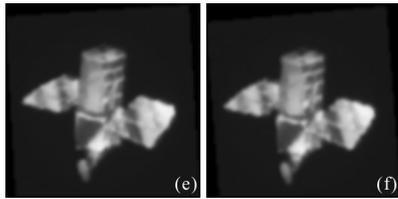


图 3 初始模板及不同变换尺度下的图像

Fig.3 Initial template and images under different transformation scales

旋转 1°、缩小 1.05 倍的图像,图 3(d)为旋转 2°、缩小 1.1 倍的图像,图 3(e)为旋转 3°、缩小 1.15 倍的图像,图 3(f)为旋转 4°、缩小 1.2 倍的图像。

利用文中算法和传统算法($\alpha=0.5$)进行比较,得到的不同变换尺度下的匹配误差如图 4 所示,由图可得,文中算法误差比传统算法误差小,当目标旋转 5°,同时缩小 1.25 倍时,文中算法的匹配误差比传统算法误差约小 0.1 pixel。

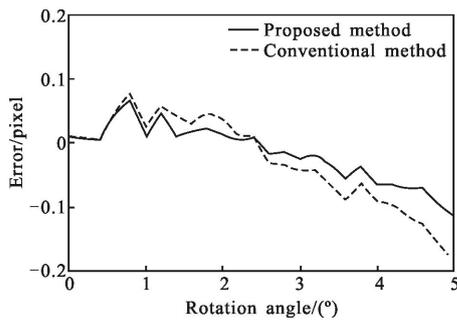


图 4 不同变换尺度下的匹配误差

Fig.4 Matching error under different transformation scales

(2) 图像 2

图像 2 为空间载荷实际拍摄到的空间目标图像,原图像及不同旋转角度下的图像如图 5 所示,图 5(a)为原始模板,图 5(b)为原图像,图 5(c)为旋转 1°、缩小 1.05 倍的图像,图 5(d)为旋转 2°、缩小 1.1 倍的图像,图 5(e)为旋转 3°、缩小 1.15 倍的图像,图 5(f)为旋转 4°、缩小 1.2 倍的图像。

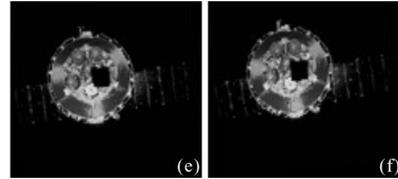
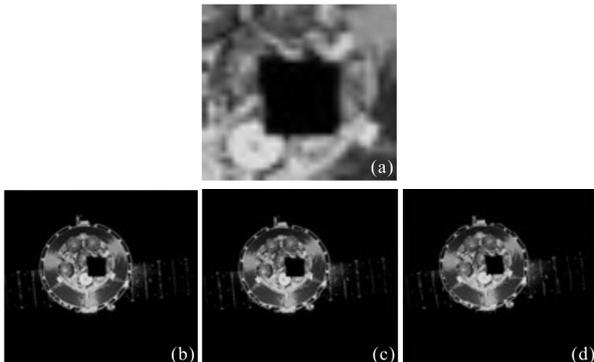


图 5 初始模板及不同变换尺度下的图像

Fig.5 Initial template and images under different transformation scales

利用文中算法和传统算法($\alpha=0.5$)进行比较,得到的不同尺度变换下的匹配误差如图 6 所示,由图可得,文中采用的算法得到的匹配误差更小,当目标旋转 5°,同时缩小 1.25 倍时,文中算法的匹配精度比传统算法约提高 0.1 pixel。

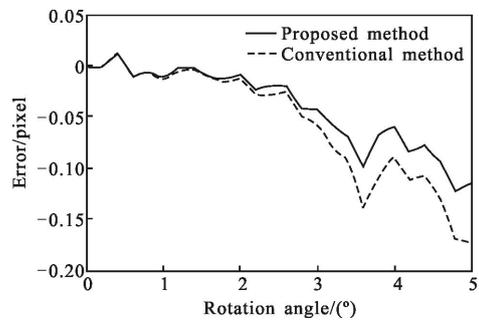


图 6 不同变换尺度下的匹配误差

Fig.6 Matching error under different transformation scales

2 空间面目标跟踪演示实验

为了验证利用图像匹配提取目标精确位置,并利用伺服机构进行跟踪的可行性,文中利用平行光管和靶标板模拟远场空间目标,跟踪系统采用 ATP 系统中的精跟踪环路,进行了实验室演示试验,实验系统由均匀照明光源、靶标板、平行光管、干扰镜、跟踪镜及精跟踪相机组成。靶标为一透明板,板上印有目标图像,目标图像周围为不透明区域,均匀照明光源照明靶标上的目标图像来模拟待跟踪目标,试验中通过不同方向转动靶标,模拟空间目标姿态变化。干扰镜为系统中引入干扰,通过分析加干扰时的跟踪数据可以分析系统的抗干扰能力。精跟踪相机用来对模拟目标成像并提取目标位置,提取的目标位置信息传递给精跟踪控制器,精跟踪控制器做闭环 PID 控制驱动跟踪镜偏转,从而抵消外界干扰,跟踪镜和干扰镜采用的都是 PI 公司生产的 S-330.8SD 快速反射镜。实验原理图和实物图如图 7 所示,图 7(a)

为实验原理图,图 7(b)为实验实物图。

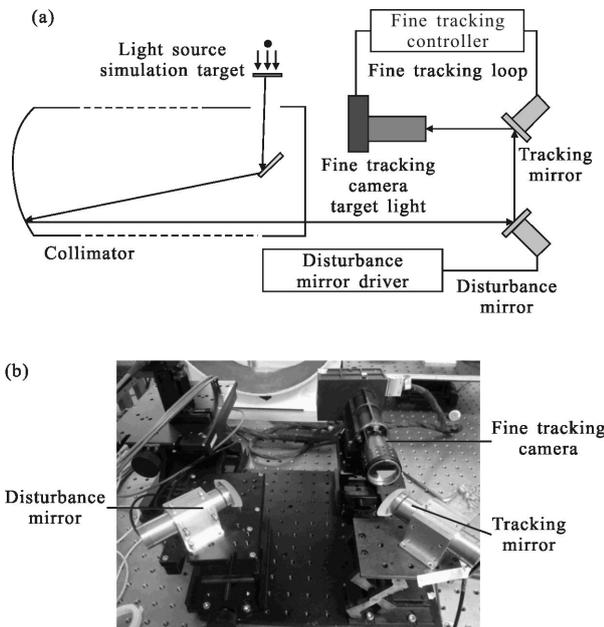


图 7 实验室演示实验原理图及实物图

Fig.7 Schematic diagram of demonstration experiment and picture of real product

假设目标在精跟踪相机上成像占 100×100 个像元,相机焦距为 $f=375 \text{ mm}$,探测器单个像元的尺寸为 $d=15 \mu\text{m}$,模拟目标的尺寸为 $s \times t=5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,则要模拟的目标距离为:

$$l' = \frac{s}{100 \times d} \times f = 1.250 \text{ m} \quad (6)$$

根据上述分析,以模拟产生 $1.25 \text{ km}, 5 \text{ m}$ 尺寸的目标为例。平行光管焦距为 5 m ,采用光学成像原理,焦距 $f'=5$,像距 $l'=1.250$,像大小 $A'=5$,则靶标上模拟目标的尺寸为:

$$A = A' = \frac{1}{l'(1/f' + 1/l')} \approx 1.99 \text{ cm} \quad (7)$$

实验中精跟踪相机开窗大小为 128×128 ,帧频为 500 Hz ,在一帧图像中提取模板,并在后续图像中通过模板匹配提取目标位置,设定跟踪中心并跟踪目标,同时通过干扰镜加入干扰,通过跟踪过程中探测器上目标位置数据来评价跟踪性能。

3 实验结果

3.1 静态条件

静态下不施加任何人为干扰,测得的目标位置数据

如图 8 所示,此时跟踪误差平均值约为 0.005 pixel ,误差峰峰值约为 0.4 pixel ,跟踪误差标准差约为 0.07 pixel 。

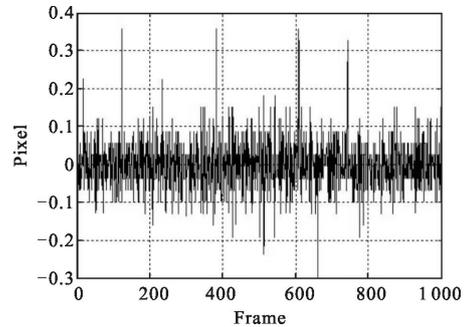


图 8 静态跟踪误差数据

Fig.8 Static tracking error

3.2 施加正弦波干扰

相机焦距为 $f=375 \text{ mm}$,探测器单个像元的尺寸为 $d=15 \mu\text{m}$,单个像元对应的角度为 $40 \mu\text{rad}$,干扰镜上施加 $2 \text{ Hz}-8 \text{ Vpp}$ 正弦波干扰,干扰镜偏转角度峰峰值约为 $800 \mu\text{rad}$,光束偏转角度峰峰值为 1.6 mrad ,对应探测器 40 个像元。实验中通过转动靶标来模拟空间目标姿态变化,采用文中模板更新算法测得的跟踪数据如图 9 所示,此时跟踪误差峰峰值约为 1 pixel ,跟踪误差标准差约为 0.35 pixel ,干扰抑制到

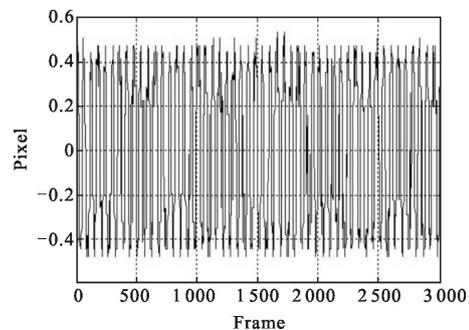


图 9 $2 \text{ Hz}-8 \text{ Vpp}$ 正弦波干扰下的跟踪误差数据

Fig.9 Tracking error under interference of $2 \text{ Hz}-8 \text{ Vpp}$ sine wave

$40 \mu\text{rad}/1.6 \text{ mrad}$,为 $1/40$,干扰抑制带宽约为 $2 \text{ Hz}/(1/40)$,即 80 Hz ;采用传统的模板更新算法测得的跟踪误差峰峰值约为 1.1 pixel ,跟踪误差标准差约为 0.55 pixel ,干扰抑制到 $1.1 \times 40 \mu\text{rad}/1.6 \text{ mrad}$,约为 $1/36$,干扰抑制带宽约为 72 Hz ;比较上述数据,通过文中模板更新算法得到的跟踪精度和干扰抑制带宽比传统算法要高。

4 结论

文中提出一种基于 SWAD 算法的空间目标跟

踪方法,利用 SWAD 算法和亚像素拟合算法求出亚像素精度的目标位置,并利用文中提出的变系数模板更新算法对匹配模板进行更新;通过模拟目标亮度变化,和对目标图像进行仿射变换模拟目标姿态变化,比较了文中算法和传统算法的匹配误差,结果表明:文中算法误差比传统算法误差小,当目标旋转 5° ,同时缩小 1.25 倍时,文中算法的匹配误差比传统算法误差小 0.1 pixel,说明文中算法更能适应目标姿态变化。最后搭建实验室演示系统,模拟空间目标跟踪,文中模板更新算法得到的跟踪误差标准差为 0.35 pixel,干扰抑制带宽为 80 Hz,传统算法得到的跟踪误差标准差为 0.55 pixel,干扰抑制带宽为 72 Hz,实验结果证明了文中算法的有效性,表明利用图像匹配提取目标精确位置,并利用伺服机构跟踪目标方案可行,可以达到较高的跟踪精度。由于实验条件限制,文中的实验仅验证了采用改进算法在干扰条件下的系统跟踪精度,而针对目标灰度、大小、角度同时变化并同时施加干扰的条件,文中验证尚不充分;实际目标跟踪中,为了提高跟踪精度,ATP 系统粗精跟踪子系统要联合工作,而文中实验室演示试验中只利用了精跟踪子系统,干扰也只是简单的加入正弦干扰,所以文中在 ATP 系统进行面目标跟踪性能测试和平台干扰模拟方面还有一定欠缺。

参考文献:

- [1] Geller D. Analysis of the relative attitude estimation and control problem for satellite inspection and orbital rendezvous [J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 2007, 55(2): 195-214.
- [2] Noriyasu INABA, Mitsushige ODA, Mitsugu ASANO. Rescuing a stranded satellite in space-experimental robotic capture of non-cooperative satellites [J]. *Trans Japan Soc Aero Space Sci*, 2006, 48(162): 213-220.
- [3] Steven E L. The airborne laser[C]//SPIE, 2002, 4760: 25-33.
- [4] Jim F R. An overview of the Space-Based Laser (SBL) program[C]//SPIE, 2002, 4632: 181-186.
- [5] Nie Guangshu, Liu Min, Nie Yiwei, et al. Accuracy, error sources and control of tracking and pointing of airborne laser weapons[J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(1): 73-77. (in Chinese)
- [6] Charles Higgs, Barclay Herbert T, Murphy Daniel V, et al. Atmospheric compensation and tracking using active illumination[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1998, 11(1): 5-26.
- [7] Russell Donald, Ansari Homayoon, Chen Chien-C. LaserCom pointing acquisition and tracking control using a CCD-based tracker[C]//SPIE, 1994, 2123: 294-303.
- [8] Song Renting, Yang Weiping, Yang Mingyue. Improved template matching algorithm for moving target tracking [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 197-200. (in Chinese)
- [9] Wang Lucai, Yi Xinian, Chen Xiaotian, et al. Fast template matching algorithm based on AMSP and initial threshold estimation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 1106-1111. (in Chinese)
- [10] Jia Guimin, Wang Xiangjun, Zhang Shihai. Target tracking algorithm based on adaptive template update in complex background [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 659-663. (in Chinese)
- [11] Caterina G D, Soraghan J J. Adaptive template matching algorithm based on SWAD for robust target tracking [J]. *Electron Lett*, 2012, 48(5): 261-262.
- [12] Ji Shupeng, Zhang Guilin, Ding Xiaoqing. Study on image correlation tracking algorithm in the condition of complicated ground background[J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(6): 428-430. (in Chinese)
- [13] Fan Baojie, Du Yingkui, Zhu Linlin, et al. A robust template tracking algorithm with weighted active drift correction [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, 32: 1317-1327.
- [14] Xiao Zhitao, Lu Xiaofang, Geng Lei, et al. Sub-pixel matching method based on epipolar line rectification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S): 225-230. (in Chinese)
- [15] Hitoshi Nishiguchi, Yoshihiko Nomura. A study on SSD calculation between input image and subpixel translated template images and its applications to a subpixel image matching problem[C]//SPIE, 2009, 7252, 72520R: 1-8.
- [16] Pan Bing, Xie Huimin, Xu Boqin, et al. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation [J]. *Meas Sci Technol*, 2006, 17: 1615-1621.
- [17] Chen Rongli, Han Le, Che Chicheng, et al. Research on un-illuminant space target visual detection technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(9): 1438-1440. (in Chinese)