

天基非合作卫星高精度跟踪算法研究

张子玄^{1,2}, 贾建军^{1,2}, 强佳¹, 张亮^{1,2}, 李建华³

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

摘要: 空间非合作目标跟踪技术可以在多方面发挥重要作用, 目前效果较好的图像跟踪算法多是基于视频流处理, 但是由于面对的工况与航天应用面对工况不同, 在跟踪精度、运算速度、预警率和虚警率等要求上不满足空间目标跟踪需求与任务要求, 并且运算复杂难以在航天器中实现, 不适合天基卫星跟踪。为解决这一问题, 一种面向空间应用的卫星目标高精度跟踪算法被提出, 该算法以图像相关、曲线拟合、卡尔曼滤波、SURF 算法为基础, 并将预测、跟踪和矫正过程相融合, 最终获得在天基平台中具有可行性的高速稳定跟踪算法。相关实验表明, 这种算法可以对平面内自由旋转、0.4~2.1 倍尺度内缩放、有光照变化的图像进行连续跟踪, 仿真试验平均跟踪误差小于 0.9 像素且大多数工况下计算速度高于 200 帧/s, 并且算法对图像模糊、高斯噪声以及椒盐噪声都有较好兼容能力, 对于实际模型目标跟踪仍有稳定跟踪能力。

关键词: 非合作面目标跟踪; 空间目标; 图像跟踪; SURF 算法; 卡尔曼滤波

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0126004

Research on space-based high precision algorithm for non-cooperative satellite

Zhang Zixuan^{1,2}, Jia Jianjun^{1,2}, Qiang Jia¹, Zhang Liang^{1,2}, Li Jianhua³

- (1. Key Laboratory of Space Active Opto-electronic Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

Abstract: The space-based non-cooperative target tracking technology could play a crucial part in many aspects of the space application. Currently most well-behaved algorithms were based on video stream. Owing to different working conditions, their tracking precision, speed of operation, warning rate and false alarm rate were dissatisfied with the requirement of space-based satellite tracking systems and missions. Furthermore, the video stream tracking algorithms were too complicated for space-based conditions, where the processors were weaker than those on the ground. To solve these problem, an algorithm based on image correlation, curve fitting, Kalman filter, and SURF algorithm and combined with prediction,

收稿日期: 2018-08-05; 修订日期: 2018-09-03

基金项目: 中国科学院国防科技创新重点部署项目

作者简介: 张子玄(1991-), 男, 博士生, 主要从事空间目标跟踪及相关系统等方面的研究。Email: pack10045@hotmail.com

导师简介: 贾建军(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事空间遥感载荷的光机热一体化设计与空间光电跟踪技术等方面的研究。Email: jjun10@mail.sitp.ac.cn

tracking and rectification systems was proposed. The algorithm could achieve high speed and high accuracy and be satisfied with the space-based computing environment. Proved by the image simulation experiment and semi-physics simulation, this algorithm could continuously track the target rotated in in-plane arbitrary angle, scaled from 0.4 to 2.1, and handle illumination change. The mean error of image tracking simulation experiment result was lower than 0.9 pixel and frame rate was more than 200 frames per second under most conditions. This algorithm could also deal with image blur, Gaussian noise and salt and pepper noise. Satellite model tracking experiment results showed that the algorithm also had a stably tracking performance for practical satellite model.

Key words: non-cooperative area targets tracking; space targets; image tracking; SURF algorithm; Kalman filter

0 引言

随着空间技术的不断成熟，人类对于星载设备的非合作空间目标高精度高稳定跟踪需求日益迫切。在一些对非合作卫星跟踪的应用场合，如激光跟踪，毫弧度级别的跟踪误差会引起相距 1 km 的最终目标上米级别的误差，对后续任务影响较大，所以需要尽可能抑制跟踪误差。目前在高精度跟踪领域，复合轴跟踪技术是实现微弧度甚至亚微弧度级别跟踪非常有效的手段，具有高跟踪精度和响应频率。欧美、日本等国家自由空间光通信项目的成功表明复合轴系跟踪系统已经相对成熟^[1]。建立在复合轴系跟踪技术的基础上，配合合适的图像跟踪算法，可以实现高精度非合作目标跟踪。

目前对于目标跟踪，参考文献[2-3]使用基于相关滤波算法，在计算速度和精度上有较大提升，是目前较多流行算法的基础。参考文献[4]利用 SIFT 特征点和相关滤波相结合的算法，并且结合记忆曲线对目标建立模型，实现长时间跟踪。参考文献[5]提出了一种基于相关滤波的改进型算法，在相关滤波算法的损失函数中添加惩罚项，解决了边界效应问题。参考文献[6]提出了一种结合手工特征和卷积神经网络特征的相关滤波改进算法，该算法进一步完善了相关滤波算法在特征复杂度和训练方法模型更新等方面的问题获得了非常好的结果。参考文献[7]建立卷积神经网络，通过大量数据训练结合合适的训练更新得到的跟踪网络 MDNet，得到了较好的结果。

目前大多数效果较好跟踪算法多是基于视频流处理，视频流目标跟踪与天基卫星跟踪不同之处如

表 1 所示。

表 1 视频流目标跟踪与天基目标跟踪不同

Tab.1 Comparison of space target tracking with video stream target tracking

	Video stream target tracking	Compound axis area targets tracking
Image-forming condition	Colorful; large field angle; the target is not related to the background	Grayscale; small field angle; target is a part of the background
Image variability	Luminance change; scale variation occlusion; non-rigid deformation; motion blur; fast motion; out-of-plane rotation; background clutter	In-plane rotation cause by coarse tracking; motion blur caused by fine tracking; illumination change; detector noise; scale variation

天基非合作卫星高精度跟踪主要面对问题在于：(1) 应用复合轴跟踪系统时，由于粗跟踪望远镜像旋问题会带来图像在平面内的旋转；(2) 精跟踪系统具有较高响应频率，因此当精跟踪系统高速运动时会造成图像模糊，影响跟踪效果；(3) 由于距离引起的尺度变化；(4) 光照变化，相比较于地面系统，天基系统运算资源少，以及探测器产生噪声；(5) 天基卫星跟踪对实时性、预警率、虚警率要求高，假如实际任务时出现虚警或者未能预警情况时，会导致跟踪误差急剧增加，对跟踪任务执行影响严重。

为解决天基复合轴卫星跟踪系统可能面对的平面内旋转、图像模糊以及尺度变换问题，文中提出一种跟踪预测矫正相融合的算法。算法使用卡尔曼滤波器对位置进行预测克服高速运动带来的模糊，SURF 特征作为模板矫正克服旋转和尺度问题，互相

关作为跟踪准确度判别的依据。文中算法有以下优点:(1) 区别于目前现有基于视频流跟踪算法, 主要面向航天在轨高精度非合作目标跟踪, 解决跟踪中可能遇到的平面内旋转、图像模糊以及尺度缩放问题, 同时算法运算简单, 适应航天运算环境;(2) 为克服跟踪过程中会遇到的问题, 更有效地融合 SURF 算法、卡尔曼滤波算法和互相关算法, 对于 SURF 算法的特征点仅使用其主方向角度和所在尺度空间信息, 不使用位置信息, 减少计算复杂度, 使用互相关算法配合亚像素拟合实现对目标的高速且高精度跟踪, 具有较高实际意义。

为验证文中算法, 选择与当前具有较好跟踪效果与实时性的核化相关滤波算法(KCF)^[3]作比较。测试分为使用仿真旋转缩放图像以及使用半物理仿真模型分析。通过仿真图像能获得准确的亚像素位置信息, 对算法精度、速度以及抗噪声能力进行评估。通过半物理仿真模型作为算法鲁棒性评估, 半物理仿真图像为连续运动的缩放与旋转图像, 能较好地覆盖实际工况中的问题。最终通过两个实验证明文中算法有较好鲁棒性、较高运算速度与较好的精度。

1 算法原理

1.1 位置预测环节

空间目标不受大气干扰, 但是在目标跟踪过程中由于执行机构高速运动, 可能出现相机图像模糊现象。这种原因导致的模糊图像只是精跟踪系统暂时高速运动, 受控制算法影响不会连续发生, 因此模糊图像只存在少数几帧。当图像出现模糊现象时依据上一帧位置与运动状态预测模糊图像目标位置, 当图像回复正常后再稳定跟踪。为克服这一问题, 可以采用正常帧目标位置作为依据, 对模糊帧目标位置进行预测, 完成跟踪。文中使用卡尔曼算法实现对模糊帧目标位置的预测, 同时使用预测算法可以获得更为准确的目标可能存在区域, 减少跟踪环节搜索时间, 提高运算速度。

卡尔曼滤波算法应用空间模型, 以最小均方误差为准则。从第一帧开始建立对跟踪目标的 X 和 Y 方向的跟踪。考虑卡尔曼滤波器计算方程

$$X(k)=AX(k-1)+K(k)[y(k)-CAX(k-1)] \quad (1)$$

式中: $X(k)$ 为最终输出; A 和 C 为状态转移矩阵; $K(k)$ 为卡尔曼增益; $AX(k-1)$ 为计算预测项, 剩余部

分为修正项。 $X(k)$ 由上一帧的速度和当前帧的位置确定。将 $AX(k-1)$ 作为预测值, 配合互相关算法快速检测达到预测目的, 可以有效减少计算时间。

普通卡尔曼算法只适用于目标线性运动, 对于非线性运动并不适用。但是由于空间载荷跟瞄过程中相机积分时间短、拍摄帧频高, 所以位置非线性并不明显。参考文献[8]表明卡尔曼算法在图像跟踪方面有较好的应用。

将卡尔曼预测结果与跟踪环节互相关匹配度相结合得到跟踪状态更好的判断, 具体判断方法如表 2 所示, 其中阈值为经验值, 需要结合实际成像质量与亮度进行选择, 互相关匹配度计算在 1.3 节中进行表述。

表 2 互相关匹配度与卡尔曼预测结果判别

Tab.2 Tracking condition judgment based on cross-correlation coefficient and Kalman prediction

	Distance between Kalman prediction and matching result is less than threshold	Distance between Kalman prediction and matching result is larger than threshold
Cross-correlation coefficient is larger than threshold	Prediction and calculation results are close, using the calculation results	Movement with large range, using the calculation results
Cross-correlation coefficient is less than threshold	Image blurred and use the prediction result	Problems and give up this frame

如图 1 所示, 每张图片相较于上一张逆时针旋转 0.1° , 中间图像经过高斯模糊处理, 使用参数为



(a) 模糊图像前一帧 (b) 模糊图像 (c) 模糊图像后一帧
(a) Frame before blurred image (b) Blurred image (c) Frame after blurred image

图 1 图像模糊时跟踪结果

Fig.1 Tracking result with a blurred image

3×3 模板方差为 10。图中红色十字表示理论计算位置,青色十字为算法计算位置,可以看到算法计算位置与理论计算位置相差不大。

1.2 模板矫正环节

为解决跟踪中的图像平面内旋转与缩放问题,需要选择具有良好仿射不变性的算法作为辅助。较为准确的算法有 SIFT 及其改进类型 SURF^[9]算法,并有一些较好应用^[10]。它们都具有良好的仿射不变性以及对抗亮度和模糊等问题的抵抗能力。相比较于 SIFT, SURF 算法简单快速且更容易实现,所以文中选择 SURF 算法作为旋转角度和尺度变化的计算方法。

SURF 算法整体思路与 SIFT 算法类似,先提取具有一定尺度不变性的特征点并建立相关描述子与特征方向,再通过描述子对两幅图像中的特征点进行匹配。如图 2 所示为 SURF 算子对原图与逆时针旋转 120°放大 1.6 倍后的图片匹配示意。参考文献[11]已经证明 SURF 算法在嵌入式系统中的可执行性。

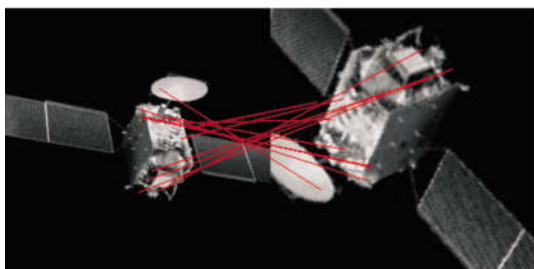


图 2 SURF 算法匹配结果
Fig.2 Matching result of SURF

1.2.1 SURF 算法对旋转角度计算

SURF 算法在建立特征点时会建立该点的主方向,可以通过计算匹配特征点主方向的旋转来判断图像旋转。单个特征点得到结果并不准确,可以利用多个匹配特征点,剔除角度偏差较大的角度,求剩余平均值,得到较为准确结果。如图 3 所示为利用 SURF 算法计算从 0°转到 360°间隔 1°的连续旋转图像计算角度与实际角度之间的关系。

从图中可以看到计算旋转角度误差较小,对跟踪环节影响较小。根据旋转仿射变化公式,其中 θ 为逆时针旋转角度,配合线性差值可以计算得到旋转后的模板图。

$$[x, y, 1] = [x_0, y_0, 1] \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

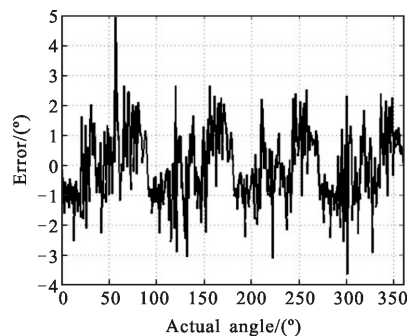


图 3 利用 SURF 算法角度计算误差
Fig.3 Error of angle calculation with SURF

1.2.2 SURF 算法计算尺度变化

在目标跟踪过程中由于目标距离变化等原因会出现图像缩放问题,缩放时 X 方向和 Y 方向变化相同倍数,所以可以根据相匹配的特征点所在尺度空间比值计算缩放比值。剔除尺度偏差较大的点,求剩余平均值,得到较为准确结果。如图 4 所示为倍数从 0.5~2,间隔 0.05 连续变化的图像与原始幅度计算倍数偏差。由图可见计算误差大致在正负 0.1 之内,对跟踪环节精度影响不大。

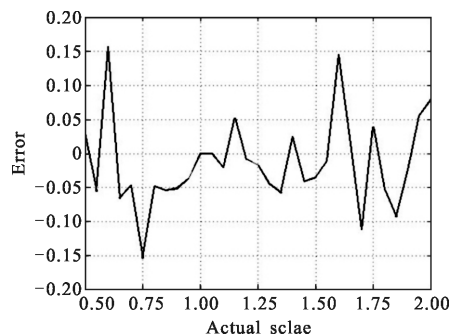


图 4 利用 SURF 算法尺度计算误差
Fig.4 Error of scale calculation with SURF

根据这一误差对模板进行变化,变化公式如下,其中 S 为计算得到的变化倍率。配合线性差值可以计算得到旋转后的模板图。

$$[x, y, 1] = [x_0, y_0, 1] \begin{bmatrix} S & 0 & 0 \\ 0 & S & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.3 图像跟踪环节

跟踪环节是在每一帧图像的感兴趣区域中使用互相关算法寻找模板所在的位置。其优点为在模板准确的条件下计算准确,运算简单,参考文献[12-

13]中算法可以实现亚像素级的跟踪。缺点在于抗干扰能力差,对成像要求高,当图像出现旋转和模糊后会不能跟踪。这些问题可以通过预测环节和矫正环节进行改善。跟踪环节算法如下:

$$R(x,y)=\frac{\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}f(x+i,y+j)g(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}f^2(x+i,y+j)\sum_{i=0}^{m-1}\sum_{j=0}^{n-1}g^2(i,j)}} \quad (4)$$

式中: $f(x,y)$ 表示图像在 (x,y) 处的像素值; $g(x,y)$ 表示模板在 (x,y) 位置的像素值; m,n 分别表示模板的宽度和高度。互相关算法计算得到的数值小于1大于0,数值越大,表明两幅图像相关性越大。与其他算法相比,互相关算法可以有一个较好的统一性度量来确定匹配的结果是否正确。

为得到亚像素级跟踪结果,在互相关计算得到最佳匹配位置处使用曲线拟合获得结果,公式如下:

$$X_{\text{bia}}=\frac{f(1)-f(-1)}{2[f(0)-f(1)-f(-1)]} \quad (5)$$

式中: $f(1)$ 为最佳匹配点左侧点匹配度; $f(-1)$ 为最佳匹配点右侧点匹配度; $f(0)$ 为最佳匹配点匹配度,这样计算得到在X方向亚像素偏离,同理对于Y方向用相同计算方法,最终得到更准确结果。

由于实际情况中帧频较高,且与目标相对运动速度较慢,所以跟踪环节使用互相关算法为在当前跟踪预测位置附近一定区域进行螺旋扫描捕获,当出现相关度大于一定阈值时认为当前目标位置,提高运算速率。当矫正环节计算得到目标角度旋转时,可以对模板进行相应的仿射变换获得新模板,通过新模板实现对旋转目标的跟踪。

2 算法总流程

算法流程如图5所示,使用互相关算法得到的匹配度作为跟踪结果可信度的判断依据,并与预测和矫正环节相结合。其中 $T1,T2,S$ 为阈值,受成像条件与成像系统环境等影响,有所变化。文中 $T1$ 选择0.98, $T2$ 选择0.945, S 选择5。

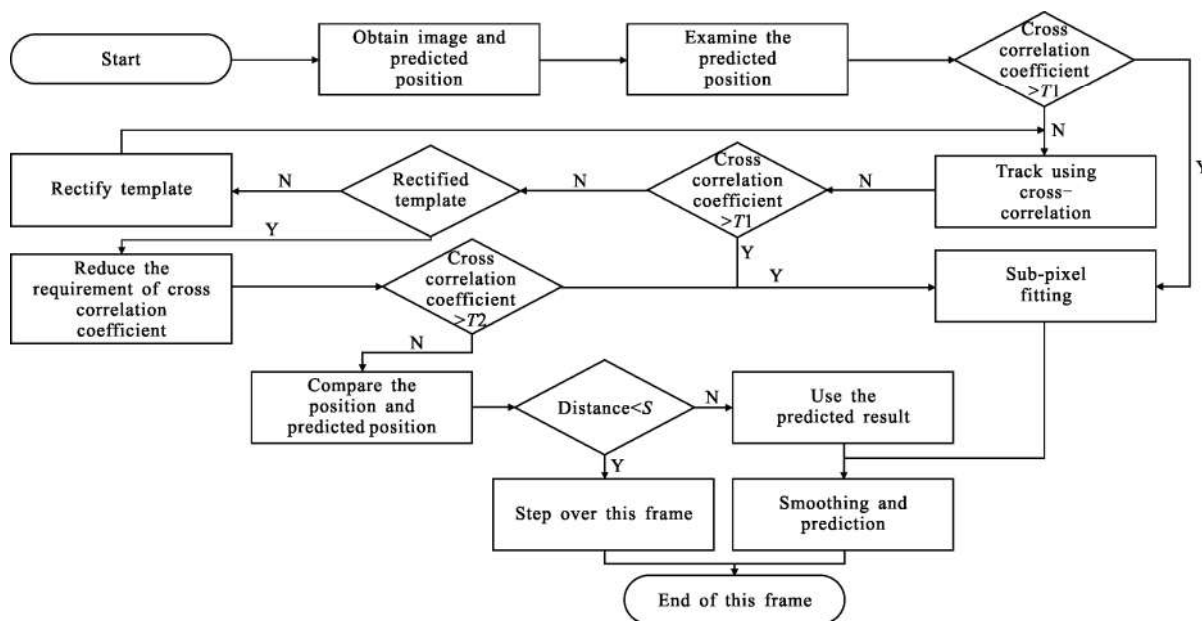


图5 算法流程

Fig.5 Procedure of algorithm

3 算法仿真试验分析

将较为流行且具有一定可移植性的核相关滤波(KCF)^[3]算法作为比较对象进行仿真图像与半物理两个比较试验。KCF算法流程简单,抗干扰能力强,

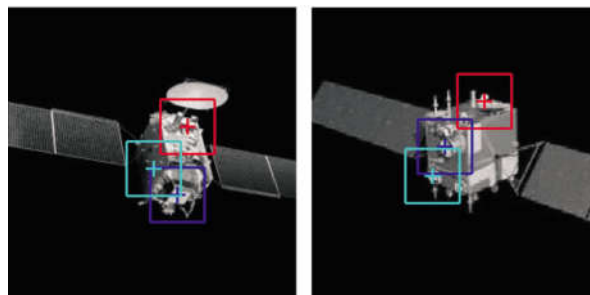
运算速度快,是目前很多目标跟踪的研究基础^[14-15]。但是需要多次使用离散傅里叶变换以及使用HOG特征,计算复杂,运算资源需求高,所以在嵌入式系统中移植难度较大。但是KCF算法相较于其他当前较为先进的算法更具代表性,同时也更符合天基环

境。文中先利用仿真图像验证算法的精度,后通过半物理图像验证文中算法的稳定性。其中 KCF 选择高斯内核,特征选择为 HOG 特征。

3.1 仿真图像跟踪

仿真试验力求模拟真实环境。采用仿真卫星图像当做模拟目标,对其进行变换,同时对图像添加噪声仿真探测器噪声以及亮度变化仿真光照变化。

对算法从计算精度、计算速度两方面进行考量。对同一张图片三个位置进行跟踪。位置如图 6 所示,青色为模板一,蓝色为模板二,红色为模板三,选择依据在于模板一亮度较低,模板二与周围对比度较高,模板三亮度较高。图片二模板位置选择位置在于相对位置。对图像做平面内旋转和旋转缩放两种变化,保持中心位置不变,统计跟踪到中心与理论位置之间的距离平均值。并且对图像添加四种干扰,分别是均值为 10,方差 100 的高斯噪声,密度为 0.01 的椒盐噪声以及亮度增大与减小 5%,对算法进行评估。



(a) 图片 1 (b) 图片 2
(a) Picture 1 (b) Picture 2

图 6 图像与模板示意

Fig.6 Picture and template

生成图像为从-125 逆时针步进 0.1°~125°共 2501 帧图像,并且使用系数从 1~2 再到 0.5 步进 0.001 的缩放系数对图像进行缩放变化,再对图像添加四种干扰后结果如表 3 所示,其中误差为计算位置距离中心位置平均误差。选取文中算法与 KCF 算法比较,结果汇总如表 3 所示。

表 3 同时发生尺度与平面内旋转时算法的表现

Tab.3 Algorithm performance under scaling and in-plane rotation

		Picture 1						Picture 2					
		Location 1		Location 2		Location 3		Location 1		Location 2		Location 3	
		Ours	KCF	Ours	KCF	Ours	KCF	Ours	KCF	Ours	KCF	Ours	KCF
Common image	Error/pixel	0.41	16.36	0.38	21.04	0.81	26.08	0.52	13.51	0.51	16.97	0.43	Failure
	Rate/Hz	308.31	177.09	195.09	178.13	250.65	176.51	403.91	177.83	465.56	176.99	207.83	Failure
Gaussian noise	Error/pixel	0.41	18.57	0.38	16.20	0.61	26.08	0.46	11.54	0.51	16.97	0.4	Failure
	Rate/Hz	311.65	179.91	156.26	180.01	147.57	179.02	300.02	177.10	403.58	177.13	106.39	Failure
Salt & pepper noise	Error/pixel	0.52	16.55	0.35	19.51	0.53	26.08	0.42	10.26	0.42	16.97	0.41	Failure
	Rate/Hz	232.46	177.80	93.38	177.38	42.07	173.51	130.75	176.61	304.85	176.32	36.23	Failure
Increased 5% brightness	Error/pixel	0.41	16.73	0.39	21.04	0.82	26.08	0.50	13.52	0.54	16.97	0.42	Failure
	Rate/Hz	325.99	173.02	206.64	175.88	237.78	173.32	443.99	173.14	474.93	172.91	211.13	Failure
Decreased 5% brightness	Error/pixel	0.43	16.73	0.40	21.04	0.87	26.08	0.51	13.52	0.54	16.97	0.43	Failure
	Rate/Hz	295.17	170.53	190.12	175.75	246.21	174.71	410.07	173.82	443.68	171.90	203.14	Failure

表中数据表明,文中算法对于目标在跟踪过程中发生的平面内旋转、尺度缩放以及光照变化和添加椒盐、高斯噪声均有较好抵抗力,且预警率为 1 虚警率为 0。噪声对于文中算法的主要影响在于对计算速率的影响。由于噪声加入使得算法更多地调用模板矫正环节提高匹配度,因此算法速度下降。文中算法计算速率以及计算精度均优于使用 HOG 特征高

斯内核的 KCF 算法。由于 KCF 算法使用 HOG 特征在 4 个像素内统计,所以其最终结果距离真实位置差别较大,而且 HOG 计算复杂所以计算速度较慢。

同时利用仿真图像对文中算法边界条件进行测试。首先单独对旋转与缩放进行测试,文中算法对于±180°以及 0.4~2.1 缩放均能很好处理。当综合应用缩放与旋转变换时,对连续旋转缩放-140°~140°

和缩放 0.5~2 倍图像跟踪能获得较好效果。对于运行速度,在上述变化中,当目标运行速度大于 15 pixel/帧时会降低运算速度和精度。

3.2 半物理卫星图像跟踪

由于真实星间目标跟踪环境建立困难且成本代价较大,所以为验证文中算法能力使用半物理仿真试验进行替代。所使用卫星模型为 XX 型号卫星 1:100 真实缩比仿真模型,其敏感部位较为真实。使用拍摄

照片进行仿真,会产生相应的探测器噪声。在拍摄照片时对图像进行相应的旋转与缩放,模仿真实观测时会遇到的旋转与缩放问题,并且改变图像强度模拟光照强度变化。

对上述图像序列中卫星的敏感位置进行跟踪,结果如图 7 所示。其中红色为十字 KCF 跟踪结果,绿色十字为文中跟踪结果。当存在旋转与缩放问题时能够很好地完成跟踪要求。结果表明文中算法可

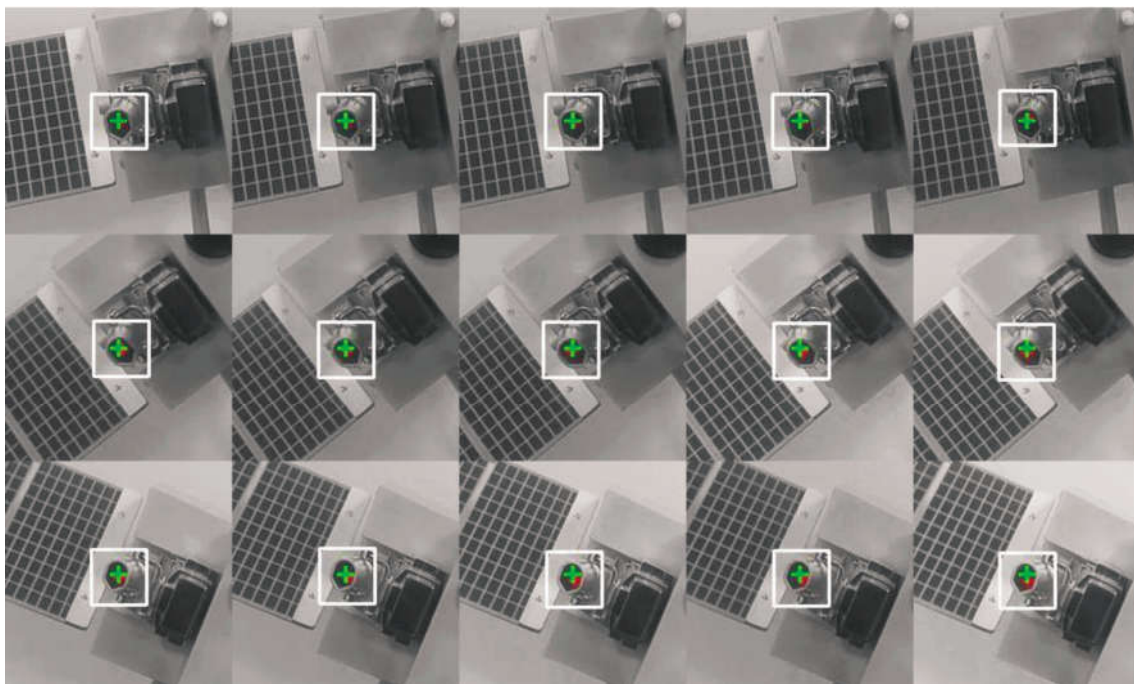


图 7 卫星模型敏感部位跟踪结果

Fig.7 Satellite model important part tracking results

以完全覆盖整个过程。

星间合作卫星相互通信时通常会使用信标光建立光链路。复合轴系统对信标光跟踪一般使用质心算法可达到较高的精度和速度,较文中算法而言更加有效。

4 结论

文中提出了一种适用于航天场景高精度的卫星跟踪算法,可以解决目标出现短时模糊、平面内旋转以及尺度变化问题,对高斯噪声、椒盐噪声以及光照变化都有较好抵抗能力。算法将预测、跟踪、矫正相融合,其中预测环节使用卡尔曼算法,根据之前运动状态预测目标在当前帧中位置,可以排除图像模糊

影响并且有效提高运算速度;矫正环节根据目标平面内旋转角度和图像尺度变化对模板进行矫正,仅使用 SURF 算法特征点的主方向与尺度空间,对目标状态作出准确判断;跟踪环节使用互相关算法进行亚像素级别的高精度高速跟踪。最终算法实现跟踪精度低于 0.9 pixel,无噪声时平均运算速度 280 帧/s,预警率为 1,虚警率为 0 的算法,可以同时应对 $\pm 125^\circ$ 旋转以及 0.5~2 倍缩放,具有较高可行性,可以用于天基复合轴面目标跟踪系统之中。

参考文献:

- [1] Liu L R. Laser communications in space I optical link and terminal technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34 (1): 3-20. (in Chinese)

- [2] Henriques J F, Rui C, Martins P, et al. Exploiting the circulant structure of tracking-by-detection with lernels [C]// Computer Vision–ECCV 2012, 2012: 702–715.
- [3] Henriques J F, Caseiro R J, Martins, et al. High-speed tracking with kemelized correlation filters [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2015, 37(3): 583–596.
- [4] Hong Z, Chen Z, Wang C, et al. Multi-store tracker (MUSTer): A cognitive psychology inspired approach to object tracking [C]//IEEE, Computer Vision and Pattern Recognition, 2015: 749–758.
- [5] Danelljan M, Hager G, Khan F S, et al. Learning spatially regularized correlation filters for visual tracking [C]// IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE, 2015: 4310–4318.
- [6] Danelljan M, Bhat G, Khan F S, et al. ECO: efficient convolution operators for tracking [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2017: 6931–6939.
- [7] Nam H, Han B. Learning multi-domain convolutional neural networks for visual tracking [C]//Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2016: 4293–4302.
- [8] Huang H B, Ai Y, Chen J, et al. Image recognition and tracking system for high frame frequency object based on Kalman predictor and fuzzy PID technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(12): 3295–3300.
- [9] Bay H, Tuytelaars T, Gool L V. SURF: speeded up robust features [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346–359.
- [10] Shen T S, Zhang J, Lou S L. Precise registration of space observation images for target detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2205–2213. (in Chinese)
- [11] Zhou Yuhaowei. Embedded multichannel real-time images processing system based on DSP platform [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 61–63. (in Chinese)
- [12] Yang M D, Jia J J, Qiang J, et al. Study of image matching algorithm and sub-pixel fitting algorithm in target tracking [C]//Conferences of the Photoelectronic Technology Committee of the Chinese Society of Astronautics 2014. 2015, 9521: 95211M.
- [13] Yang Mingdong, Wang Jianyu, Jia Jianjun, et al. Research on technologies of space area targets high-precision tracking based on SWAD algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0228002 (in chinese)
- [14] Xing Yunlong, Li Aihua, Cui Zhigao, et al. Moving target tracking algorithm based on improved Kernelized correlation filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (s1): S126004. (in Chinese)
- [15] Zhang Lei, Wang Yanjie, Sun Honghai, et al. Adaptive scale object tracking with kernelized correlation filters [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 448–459. (in Chinese)