

一种基于目标角点特征的光学系统复合稳定成像实现方法

周海渊 孙晓东 赵李健 刘程浩 徐如祥
中国卫星海上测控部 江苏 江阴 214431

摘要: 针对近距离飞机或者船舶目标的光学系统稳定成像是光学系统设计的难点。基于上述问题,提出了一种基于目标角点特征的复合稳定成像实现方法。该方法在光学系统硬件中加入了成像快速反射镜同时选取高帧频探测器,在算法方面基于目标角点特征获取目标特征点,最后通过脱靶量闭环控制光学系统成像快速反射镜偏转,实现目标稳定成像。该方法对于边沿清晰、棱角分明具有明显角点特征的目标,可以实现良好的图像稳定跟踪,具有较强的应用价值。

关键词: 复合稳定成像; 目标角点特征; 快速反射镜; 闭环控制

1 引言

现代光学应用领域,目标稳定成像都极为关键。目前光学系统稳定成像控制常用的方法有以下,一是机械稳定,该方法成本低,但是对高频振动抑制能力有限,而且体积重量较大,影响系统机动性;二是光学稳像,该方法响应速度快,但是系统设计复杂、成本高,而且存在较多的能量损耗;三是电子稳像方法,该方法能同时处理多个目标,但是实现需要依赖强大算力,而且图像分辨率和帧频会受到影响。

在复合稳像的思想基础之上,针对飞机、船舶等具有明显角点特征目标,提出了一种基于目标角点特征的光学系统稳定成像实现方法。该方法对于边沿清晰、棱角分明具有明显角点特征的目标,可以实现良好的图像稳定跟踪,具有较强的应用价值。

2 复合稳定成像实现方法设计

在光路设计中加入成像快速反射镜,确保目标在主系统的光轴上保证跟踪精度^[1]。依据光学系统焦距 f ,传感器像元个数 n ,不考虑目标弥散情形下,结合目标大小 S 和目标距离光学系统距离 L 估算成像尺寸 d 。

$$d = \frac{Sf}{nL} \quad (1)$$

光学系统焦距 $f = 1.92\text{m}$,设定精跟踪图像传感器像元尺寸 $s = 10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$,对于 1.5km 处 0.4m 目标像元数为52,满足光学系统设计的要求,为了实现高帧频成像,探测器选择VSP800探测器^[2]。

3 目标角点特征点判定

3.1 目标角点特征判定基本原理

利用含角点的窗口图像沿任意方向移动灰度变化量较大这一特性,提取角点特征,该灰度变化量表示为:

$$E(x, y) = \sum_{u, v} w_{u, v} |I_{u+x, v+y} - I_{u, v}|^2 \quad (2)$$

式中: $E(x, y)$:角点灰度值变化量; $w_{u, v}$:高斯窗口函数; $I_{u, v}$:坐标 (u, v) 点的图像灰度值; (u, v) :图像坐标; (x, y) :为坐标偏移量。

3.2 目标角点特征判定过程

将 $I_{u+x, v+y}$ 用一阶泰勒级数近似,忽略高阶项,则有:

$$E(x, y) = \sum_{u, v} w_{u, v} [xX + yY]^2 \quad (3)$$

$$X = \frac{\partial I}{\partial x} = I \otimes (1, 0, -1) \quad Y = \frac{\partial I}{\partial y} = I \otimes (0, 1, -1)^T \quad (4)$$

式中: $E(x, y)$:角点灰度值变化量; $w_{u, v}$:高斯窗口函数; x, y :为坐标偏移量; I :图像灰度值; ∂ :求导数; \otimes :求张量积。

定义矩阵 A 、 B 、 C 和 M :

$$A = X^2 \otimes w \quad B = Y^2 \otimes w \quad C = XY \otimes w \quad (5)$$

$$M = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: w :高斯窗口函数。

$$E(x, y) = (x, y)M(x, y)^T \quad (7)$$

可以看出,灰度变化量 E 是由自相关矩阵 M 确定。

定义角点响应函数 $R(x, y)$:

$$R(x, y) = \det(M) - k \times \text{trace}(M)^2 \quad (8)$$

$$\det(M) = AB - C^2 \quad (9)$$

$$\text{trace}(M) = A + B \quad (10)$$

式中: \det :行列式符号; trace :矩阵的迹算法符号。

如果 $R(x, y)$ 大于一定阈值且为局部极大值点,认为点 (x, y) 即为角点。

上述确定的角点 (x, y) 无法达到像素级精度。

进一步采用帧间匹配的方法,以角点为中心选择模

板区域,下一帧通过模板匹配方法得到匹配点,该匹配点是同一角点的帧间位移变化,反映了目标区域的帧间位移^[3]。考虑到精跟踪图像传感器高帧频特性和实时性需求,模板匹配准则选择绝对误差和函数,即:

$$SAD(i, j) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |I(x+i, y+j) - IM(x, y)| \quad (11)$$

式中: (x, y) :角点坐标; (i, j) :匹配点坐标; $I(x, y)$:图像灰度值; $IM(x, y)$:模板灰度值; $SAD(i, j)$:绝对误差和函数。

在搜索范围内逐一计算 SAD ,并寻找最小 $SAD(i, j)$ 所对应的坐标点 (i, j) 作为模板匹配点。为了高效完成模板匹配的搜索过程,本方案采用六边形搜索方法,如图1所示。

首先按六边形搜索模板大范围搜索,计算中心点和六边形的六个顶点的 SAD ,如果最小 SAD 不处于中心点,则以最小 SAD 的顶点作为中心点继续六边形搜索^[4];否则转成图2的菱形搜索模板小范围搜索,计算中心点和菱形的四个顶点 SAD ,如果最小 SAD 处于中心点,则该点作为模板匹配点;否则以最小 SAD 的顶点作为中心点再进行一次菱形搜索,并将最小 SAD 点作为模板匹配点。

3.3 目标角点特征提取仿真结果

以实际目标跟踪视频作为输入数据,对目标特征提取方法进行仿真,得到结果如图3所示。图中白色方框表示当前帧图像提取的角点位置,十字标记表示前一帧角点区域在当前帧的匹配点位置^[5]。从仿真结果可以看出,各帧图像提取的角点数量和角点位置均有变化,但角点的帧间匹配精度很高,前一帧的角点位置和当前帧的角点区域匹配点位置准确反映了目标的帧间位移变化。

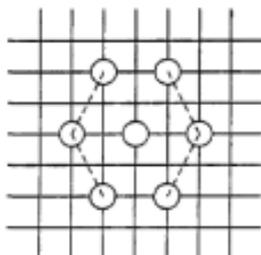


图1 六边形搜索方法

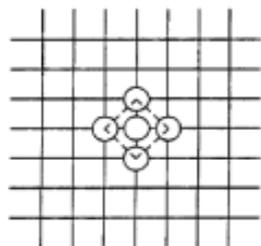


图2 菱形搜索方法

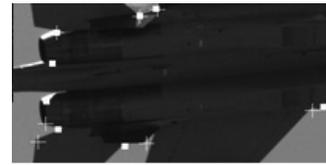


图3 目标角点特征提取仿真结果

综上,对于目标,提取特征为目标角点位置及角点区域帧间匹配点位置。

4 跟踪脱靶量计算

4.1 脱靶量计算参考点选择

为了让尽量多的角点处于视场中,设置参考点为图像中心点。初始跟踪点为角点群中心位置,如图4所示。

4.2 初始脱靶量计算原理

设有 N 个角点坐标为 (x_i, y_i) ,角点群中心位置 (x_c, y_c) 为:

$$x_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad y_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (12)$$

式中: (x_i, y_i) :第 i 个角点坐标; N :角点数量; (x_c, y_c) :角点群中心位置。

初始跟踪脱靶量即为:

$$\Delta x_0 = x_c - x \quad \Delta y_0 = y_c - y \quad (13)$$

式中: $\Delta x_0, \Delta y_0$:初始跟踪脱靶量。

4.3 约束坐标系poq构建

从 N 个角点中任选3个不共线的角点组成约束坐标系 poq ,则图像坐标系下任意点坐标可以换算至 poq 坐标系下坐标值,相反也可以同样换算,如图5所示。刚性目标的帧间图像存在平移、缩放、旋转变化时,在图像坐标系下,相同图像点的坐标值会发生变化,在约束坐标系 poq 下相应点坐标值则保持不变。

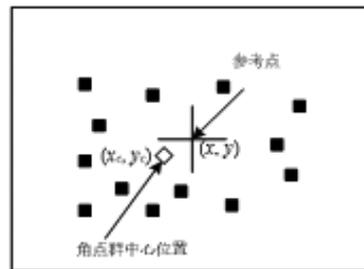


图4 参考点位置和初始跟踪点位置示意图

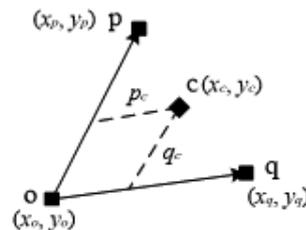


图5 角点组成约束坐标系

4.4 脱靶量求解过程

计算初始跟踪点坐标 (x_c, y_c) 和跟踪脱靶量 $(\Delta x_0, \Delta y_0)$ ；任选3个不共线的角点设为p、o、q组成约束坐标系，根据它们的坐标值和跟踪点坐标计算出跟踪点在约束坐标系下的坐标值 (p_c, q_c) ；下一帧根据p、o、q角点区域的匹配点坐标值和 (p_c, q_c) 计算出该帧图像的跟踪点坐标 (x_{c1}, y_{c1}) ，和图像中心点相差得到该帧跟踪脱靶量 $(\Delta x_1, \Delta y_1)$ ；重复执行上述步骤。

5 图像稳定跟踪闭环控制

伺服系统采用一阶校正方式设计，快速反射镜伺服系统为一阶无差度系统，使系统没有静态误差，并且对低频信号有强抑制能力。选择PI压电陶瓷驱动平台。成像快速反射镜驱动器选择S330.8，以PI公司P-T04K003快速反射镜驱动器进行光闭环控制试验。

计算闭环后和闭环前的目标脱靶量比值作为输入误差抑制值，得到的相关试验结果如图7所示。

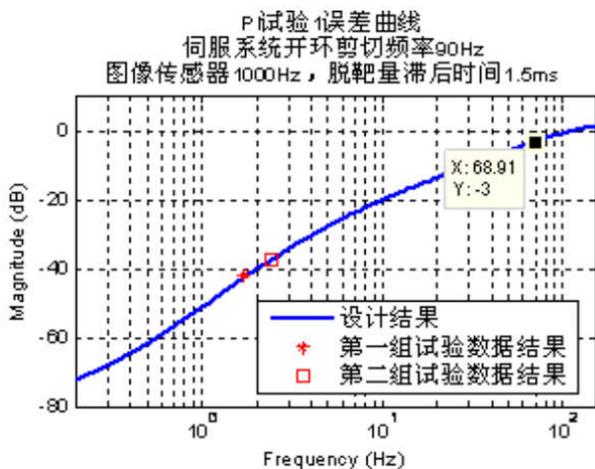


图7 快速反射镜光闭环伺服系统实验结果
输入误差抑制结果数据与理论设计曲线匹配度较高，

这表明伺服系统能够实现角点特征目标图像稳定跟踪。

6 结束语

基于复合稳像思想，在光学系统设计中加入成像快速反射镜同时选取适配的高帧频探测器；通过对角点目标特征的判断和仿真，提取角点目标精确的跟踪脱靶量，最后通过设计合理的伺服系统，依据脱靶量闭环控制成像快速反射镜偏转，最终实现角点目标稳定成像跟踪^[7]。该方法对于边沿清晰、棱角分明具有明显角点特征的目标，具有良好的图像稳定跟踪性能，具有较强的应用价值。

参考文献

- [1]王义敏.光电成像系统稳定成像与运动补偿控制的研究[D].内蒙古科技大学,2020.DOI:10.27724/d.cnki.gnmkg.2020.000407.
- [2]任永梅,蔡理昌,龙亚,等.基于点特征直方图的道路场景点云目标识别方法[J].电脑知识与技术,2024,20(17):36-38.DOI:10.14004/j.cnki.ckt.2024.0955.
- [3]高帅,贺伟,李涛,等.改进的Harris角点检测目标识别方法[J].探测与控制学报,2022,44(06):81-86.
- [4]邢晴.基于视觉显著性的海上目标检测方法研究[D].国家海洋技术中心,2020.DOI:10.27074/d.cnki.ghygy.2020.000001.
- [5]顾丹妮,张乐,白明健.基于角点特征提取算法的目标识别方法研究[J].科技创新导报,2021,18(06):55-57. DOI:10.16660/j.cnki.1674-098X.2101-5640-7995.
- [6]刘美枝,杨磊,高海.结合角点特征的CamShift目标跟踪算法研究[J].山西大同大学学报(自然科学版),2019,35(05):14-18.
- [7]李智斌,李亮,张建强.快速反射镜的复合快速非奇异终端滑模控制[J].中国光学(中英文),2024,17(04):959-970.