

基于星点质心运动轨迹模糊星图退化参数估计

廖育富^{1,2}, 钟建勇¹, 陈 栋^{1,2}

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610200; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 当运动角速度超过允许的最大角速度时, 星敏感器工作在动态环境下, 星点的灰度特征将不再呈高斯分布, 这将影响质心计算的精度。给出了在角速度的影响下星点质心运动轨迹的解析解, 并结合曝光时间短的特点, 对轨迹的参数方程进行简化并通过仿真分析验证了其精确性。分析了退化星点灰度分布特征, 并结合星点质心运动轨迹方程提出基于质心运动轨迹对星图的退化参数进行估计的方法。通过仿真实验, 完成了对退化长度及退化方向的估计, 对退化长度的估计误差不超过 0.8 个像素, 对退化方向的估计误差不超过 2° , 并证实了该方法能有效提高质心计算精度。

关键词: 星敏感器; 动态环境; 退化长度; 退化方向; 运动轨迹

中图分类号: V241.62+3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-3162-06

Estimation of degradation parameters of smearing star image based on motion trajectory of star's centroid

Liao Yufu^{1,2}, Zhong Jianyong¹, Chen Dong^{1,2}

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610200, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Star's gray intensity wouldn't follow 2-D Gaussian distribution when the rotational velocity exceeded the highest rotational velocity which would affect the processing precision of centroid of star spot. The analytical solution of motion trajectory of star's centroid was simplified considering that the exposure time was short enough, and then the precision of the linear approximation was analyzed through simulation. The character of gray intensity of smearing star was analyzed based on the simplified trajectory, then a novel algorithm was proposed to estimate the degradation parameters of smearing star image. Through simulation and experiment, the validity of the proposed algorithm has been testified, the largest error of estimated blur length is around 0.8 of a pixel, while error of the estimated blur direction is about 2° , feasibility of the proposed method has also been validated through simulations.

Key words: star sensor; dynamic condition; blur length; blur direction; motion trajectory

收稿日期: 2014-01-10; 修订日期: 2014-02-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2014CB744200)

作者简介: 廖育富(1990-), 男, 硕士生, 主要从事图像复原、红外图像处理及工况背景下星敏感器相关技术方面的研究。

Email: sduliao yufu@163.com

导师简介: 钟建勇(1964-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事航空航天科学与工程方面的研究。Email: dlz@ioe.ac.cn

0 引言

星敏传感器是以恒星为测量对象,以光电探测器为核心器件的电子测量系统,通过对地球上的恒星进行探测来确定载体相对于惯性坐标系的三轴姿态,为载体控制系统提供准确依据^[1]。

由于自主性强、隐蔽性好、可靠性高和精度高等特点和优势,星敏传感器除了作为载体的姿态测量系统还可对惯性导航设备,如:陀螺仪,进行误差校准。但是,数据更新率低和由于载体运动角速度过大导致星点质心计算精度降低限制了星敏传感器的应用^[2]。在动态模糊星图中,星点发生畸变,光斑分布不再呈二维高斯分布,质心计算精度会降低。

为了解决运动角速度过大所导致的星点成像模糊问题,首先可以选择更具有高灵敏度的芯片^[3],但选择芯片并不能完全避免星点模糊;惯性平台在一定程度上能消除载体角速度过大带来的影响,但存在一定质量的惯性平台会增加发射成本;参考文献[4]讨论了通过稳像技术减小模糊带来的影响。参考文献[5]介绍了不同运动形式下星图的退化模型,通过连续卷积得到退化矩阵。但是,当载体绕星敏传感器视轴方向转动时退化矩阵 $h(r)$ 是沿退化轨迹所在圆弧给出,当星敏传感器存在非视轴方向的角速度时星图退化矩阵为 $h(x,y)$,而星图退化过程应该是在极短的曝光时间内不同形式运动的共同影响,简单地认为最终退化矩阵等于不同运动形式下各个退化矩阵的卷积并不准确。

文中提出对感兴趣区域(星点能量分布区域)进行局部退化参数估计,构造退化矩阵。尽管用于传统图像退化参数估计的算法已经很成熟。参考文献[10]介绍了如何通过正则化的方式估计退化参数;通过边缘信息估计退化参数的方法在参考文献[11]中也有讨论。但是,上述方式要么需要将图像由空间域转换到频域,要么需要利用多帧图像信息。在星敏传感器应用背景下,以处理多帧图像为前提不能保证实时性;将图像转换到频域进行参数估计后变换到空间域进行质心计算是一项既耗时且消耗硬件资源的过程。所以,建立在角速度影响下星图退化模型,针对星图数据的稀疏特征并结合运动星点特征在空间域利用单帧图像对退化参数进

行估计。

1 动态环境下星点特征

在静态工作条件下,由于离焦和光学系统衍射共同作用光斑为爱里光斑,在工程光学中,星点光斑分布可用高斯分布来近似。计算星点质心可以采用质心法及其改进形式^[6-7],也有一些文献讨论通过拟合高斯曲面来获得星点质心信息^[8]。然而,角速度过大时星点会被拉伸甚至畸变,星点光斑服从高斯分布的假定不再合理。

若要求质心计算精度为 0.1 个像素,可估计达到该精度允许载体运动的最大角速度 w_{max} ^[9]。星敏传感器的角速度大于 w_{max} 时质心计算精度会降低,星图匹配识别的成功率也随着降低。

若以探测器像平面所在的平面建立 XOY 平面,垂直于 XOY 平面的视轴方向为 Z 轴正方向,且 XYZ 构成的坐标系符合右手法则,如图 1 所示。

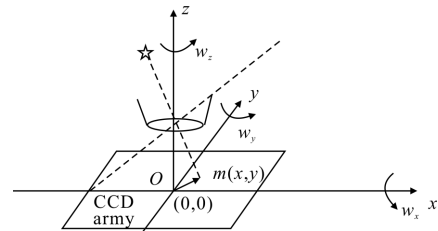


图 1 XYZ 坐标系示意图

Fig.1 XYZ coordinate

星敏传感器绕 X 轴、 Y 轴及 Z 轴旋转角速度分别记作: w_x 、 w_y 及 w_z ,星点质心运动的轨迹^[3]为:

$$x(t) = C_1 \cos(w_z t) + C_2 \sin(w_z t) + f \frac{w_x}{w_y} \quad (1)$$

$$y(t) = C_3 \cos(w_z t) + C_4 \sin(w_z t) + f \frac{w_y}{w_z} \quad (2)$$

式中: C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 均为依赖于初始条件的常数; f 为星敏传感器光学系统焦距。假设,当时 $t=0$, $x(0)=x_0$, $y(0)=y_0$, $x'(0)=fw_y - y_0w_z$, $y'(0)=fw_x - x_0w_z$ 。代入上述初始条件,可以推导出:

$$x_{ci} = \frac{\sum_j jG(i,j)}{\sum_j G(i,j)} \quad (3)$$

$$y_{ci} = \frac{\sum_i iG(i,j)}{\sum_i G(i,j)} \quad (4)$$

通常星敏感器的曝光时间 t_e 很小 (50~200 ms), 近似看作 0 时可对表达式(1)和(2)进行简化。当 $t_e \rightarrow 0$ 时, $\cos(w_z t) \approx 1$, $\sin(w_z t) \approx w_z t$, 表达式(1)和表达式(2)简化为:

$$\begin{cases} x = C_1 + C_2 w_z t + f \frac{w_x}{w_z} \\ y = C_3 + C_4 w_z t + f \frac{w_y}{w_z} \end{cases} \quad (5)$$

通过上述分析可以看出, 在角速度的影响下星点质心的运动轨迹可近似为一条直线。文中将在仿真分析部分对直线近似进行精度分析。

2 星图退化参数估计

依据上述星点质心运动轨迹的简化模型, 若能够从退化的灰度信息中估计得到质心运动轨迹的长度及方向, 便可以估算出星图的退化参数。结合上述分析, 下面介绍一种基于星点质心运动轨迹的星图退化参数估计方法。

2.1 退化长度估计

由于星点质心近似沿直线运动, 可通过在质心提取窗口中计算每列和每行的质心来逼近 $x(t)$ 和 $y(t)$ 。质心提取窗口应比模糊星点粗提取后所处像素范围稍大, 文中窗口大小比提取范围大 2 个像素。首先, 利用公式(6)和公式(7)在质心提取窗口内沿着运动轨迹方向计算每行和每列的质心, 分别记作: $\{x_{cm}\}$ 和 $\{y_{cn}\}$ 。

$$x_{ci} = \frac{\sum_j jG(i,j)}{\sum_j G(i,j)} \quad (6)$$

$$y_{ci} = \frac{\sum_i iG(i,j)}{\sum_i G(i,j)} \quad (7)$$

式中: $G(i,j)$ 为位于坐标 (i,j) 处的灰度值, $i=1,2,\dots,m$, $j=1,2,\dots,n$ 。

$\{x_{cm}\}$ 及 $\{y_{cn}\}$ 中连续稳定变化的变量, 分别对应

着 $x(t)$ 和 $y(t)$ 。如果能够有效估算稳定连续变化的长度, 便可估计出沿 X 轴和 Y 轴的退化长度 L_x 和 L_y , 则退化长度为:

$$L_s = \sqrt{L_x^2 + L_y^2} \quad (8)$$

$\{x_{cm}\}$ 及 $\{y_{cn}\}$ 中连续稳定变化的变量可用来估算退化长度和退化方向, 但需要鉴别连续稳定变化的起始位置及结束位置。在曝光时间内, 角速度视为不变, 星点质心在像平面上做匀速直线运动。从星点质心稳定连续变化开始到结束, $\{x_{cm}\}$ 及 $\{y_{cn}\}$ 中差值变化波动很小。

基于这些特征, 文中采用如下方法鉴别轨迹的起始时刻和结束时刻:

(1) 分别计算质心序列的变化间隔 Δx_i 和 Δy_j :

$$\Delta x_i = x_i - x_{i+1}, \quad i=1,2,\dots,m-1 \quad (9)$$

$$\Delta y_j = y_j - y_{j+1}, \quad j=1,2,\dots,n-1 \quad (10)$$

(2) 基于序列 Δx_i 和 Δy_j 的均值和标准差, 设定用于拟合质心运动轨迹的点的波动区间:

$$\Delta_{left} = \text{mid}(\Delta x_{m-1}) - \alpha \sigma \quad (11)$$

$$\Delta_{right} = \text{mid}(\Delta x_{m-1}) + \alpha \sigma \quad (12)$$

由于 Δx_i 和 Δy_j 的波动范围可能比较大, 选用数学意义上的均值并不合理。为了保证计算所得区间的实际意义, 利用质心运动轨迹的位置处于质心提取窗口中间位置, 且愈是中心行列, 其质心变化愈为稳定的特点, 有:

$$\text{mid}(\Delta x_{m-1}) = \begin{cases} \Delta x_{\frac{m}{2}} & m \text{ is odd} \\ \Delta x_{\frac{m+1}{2}} & m \text{ is even} \end{cases} \quad (13)$$

式中: σ 为序列的标准差; α 为一个常系数, 依据经验值取 0.8~1.5。

(3) 在序列中 Δx_i 沿轨迹运动方向搜索, 当第一次出现: $\Delta x_k \in [\Delta_{left}, \Delta_{right}]$, $k=1,2,\dots,m-1$, 同时, 满足 $\Delta x_{k+1} \in [\Delta_{left}, \Delta_{right}]$, $k=1,2,\dots,m-2$ 时, 判定 Δx_k 为对应 $x(t)$ 的起始点, 若上述条件最后一次不被满足, 可以判断为对应的终点 Δx_l 。用同样的方式可以判断 Δy_k 和 Δy_l 。

星点质心运动的起始位置及结束位置能够确定后, 文中总结了如下算法估计退化长度 L_s :

(1) 在星图中确定质心提取窗口的位置;

(2) 在质心提取窗口中沿着星点质心运动轨迹方向利用公式(6)和公式(7)求得各行和各列的质心

$\{x_{cm}\}$ 和 $\{y_{cm}\}$;

(3) 利用上面讨论的方法,在 $\{x_{cm}\}$ 和 $\{y_{cm}\}$ 中提取稳定连续变化的点;

(4) X 轴方向退化长度 $L_x=|x_k-x_l|$, Y 轴方向退化长度 $L_y=|y_k-y_l|$ 。利用公式(8)可以估计退化长度。

2.2 退化角度估计

当利用上节给出的方法估算出 X 轴方向退化长度 L_x 和 Y 轴方向的退化长度 L_y 后,一般情况下,星敏感器成像系统的曝光时间已知,利用估算退化长度所求得 x_k, x_l 及 y_k, y_l 可以提取 $\{\Delta x_k, \Delta x_{k+1}, \dots, \Delta x_l\}$ 和 $\{\Delta y_k, \Delta y_{k+1}, \dots, \Delta y_l\}$, 并推断出相应每个元素对应的时间间隔 Δt_x 和 Δt_y :

$$\Delta t_x = \frac{t_e}{|x_k - x_l|} \quad (14)$$

$$\Delta t_y = \frac{t_e}{|y_k - y_l|} \quad (15)$$

得到点 $(x_{ck}, 0), (x_{ck+1}, \Delta t_x), \dots, (x_{cl}, (l-k)\Delta t_x)$ 。基于最小均方误差准则估计直线 $l_x: x = \hat{a}_x t + \hat{b}_x$ 在最小均方误差意义上接近 $x(t)$; 同理,求得直线 $l_y: y = \hat{a}_y t + \hat{b}_y$ 在最小均方误差意义上接近 $y(t)$ 。

联合基于最小均方误差准则得到的两条直线 l_x 和 l_y , 可以推导出 y 关于 x 的表达式:

$$y = \frac{\hat{a}_y}{\hat{a}_x} x + \hat{b}_y - \frac{\hat{b}_x}{\hat{a}_x} \quad (16)$$

通过 $\phi = \arctan \frac{\hat{a}_y}{\hat{a}_x}$ 及 \hat{a}_x, \hat{a}_y 的符号关系可以求出退化的角度 θ 。

3 仿真实验

全文分析均是基于质心运动轨迹的直线近似,为了分析该简化处理所产生的误差,假定星敏感器的相关参数如下:像元尺寸 $10 \mu\text{m}$ 、系统焦距 60.0 mm 、曝光时间 100 ms 。

在仿真实验中,理论轨迹与直线近似轨迹间的最大误差可以用来描述偏差:

$$x_{\text{error}} = \max(\text{abs}(x(t) - x_s(t))) \quad (17)$$

$$y_{\text{error}} = \max(\text{abs}(y(t) - y_s(t))) \quad (18)$$

绕视轴方向的角速度使得星点质心运动轨迹呈某段“圆弧”,对应的近似误差是由 w_z 产生。当 w_z 从 $0.5^\circ/\text{s}$ 递增至 $20.0^\circ/\text{s}$, 对应的 x_{error} 及 y_{error} 如图 2 所示。

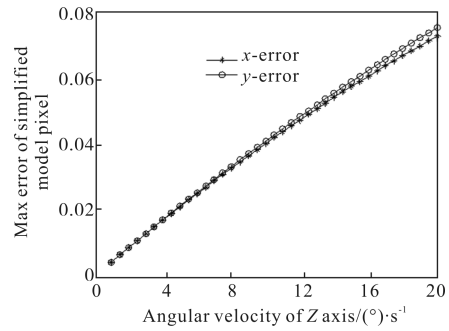


图 2 直线近似误差分析

Fig.2 Error analysis of liner approximation

由仿真结果可以看出,误差随着 w_z 增大而变大,当 w_z 达到 $20.0^\circ/\text{s}$ 时, x_{error} 及 y_{error} 分别约为 0.072 个像素及 0.075 个像素。而实际情况中, w_z 远小于 $20.0^\circ/\text{s}$, 所以,对轨迹作直线近似满足工程需要。

为验证基于质心运动轨迹对星图退化参数进行估计的准确性,选择一幅实拍外场星图如图 3(a)所示。基于 MATLAB R2010 在 PC 机上对星图作不同程度退化,在退化的星图中矩形框标识的星点灰度信息对该星点所在区域的退化参数进行估计,并和标准值进行比较。

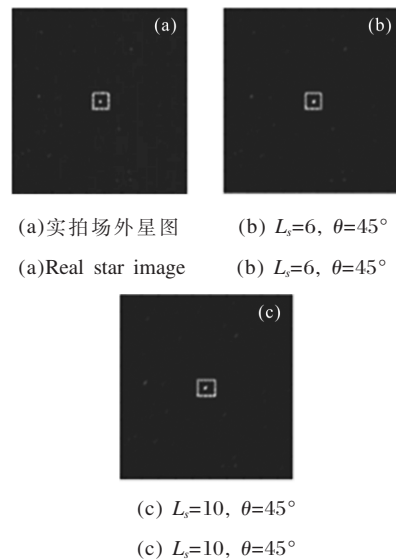


图 3 实拍星图及退化星图

Fig.3 Real star image and smearing images

从图 3(b)和图 3(c)可以看出,退化长度 L_s 越大,退化程度越严重。在实验中,实拍场外星图的退化角度恒定 $\theta=45^\circ$, 当退化长度 L_s 逐渐增大并对图 3(a)所示的场外星图进行退化。利用编号为(1)的星点被

退化的灰度信息对其所在区域的退化结果进行了估算,其和标准值比较结果如表 1 所示。

表 1 退化长度估计结果和标准值比较

Tab.1 Comparison between estimated blur length and standard value

L_s and θ	Estimated L_s	Estimated θ
$L_s=4.0, \theta=45^\circ$	3.828 4	44.466 5
$L_s=5.0, \theta=45^\circ$	5.656 9	44.991 2
$L_s=6.0, \theta=45^\circ$	6.403 1	45.802 0
$L_s=7.0, \theta=45^\circ$	7.071 1	47.124 4
$L_s=8.0, \theta=45^\circ$	7.810 2	43.920 0
$L_s=9.0, \theta=45^\circ$	8.485 3	41.663 6
$L_s=10.0, \theta=45^\circ$	9.219 5	45.090 3

从实验结果可以看出:当退化方向保持不变,文中提出的算法能够有效估计出退化长度 L_s 。当 $L_s=10.0, \theta=45^\circ$ 时,估计误差最大为 0.8 pixel。为了验证文中提出的算法对退化方向估计的有效性,退化长度 $L_s=8.0$ 不变,退化方向角变化,并和标准值进行对比,结果如表 2 所示。

表 2 退化方向估计结果和标准值比较

Tab.2 Comparison between estimated blur direction and standard value

L_s and θ	Estimated θ	Estimated L_s
$L_s=8.0, \theta=30^\circ$	29.742 0	8.062 3
$L_s=8.0, \theta=40^\circ$	39.803 2	7.810 2
$L_s=8.0, \theta=50^\circ$	50.196 6	7.810 2
$L_s=8.0, \theta=60^\circ$	56.310 1	7.211 1
$L_s=8.0, \theta=70^\circ$	68.198 6	7.641 2

由实验结果可以看出:文中提出的算法进行退化方向估计取得了较好的结果,最大估计误差不超过 2° 。

针对上述退化星图,利用参数估计结果构建退化矩阵 H ,通过维纳滤波复原对退化星图局部进行复原并利用一阶矩质心算法进行质心亚像素精度计算。提取结果存在的误差记作: xr_error 及 yr_error ,而将一阶矩算法直接用于未经过参数退化估计和图像复原的星图中,质心计算误差记作: xr_error 及 yr_error 。仿真结果如图 4 和图 5 所示。

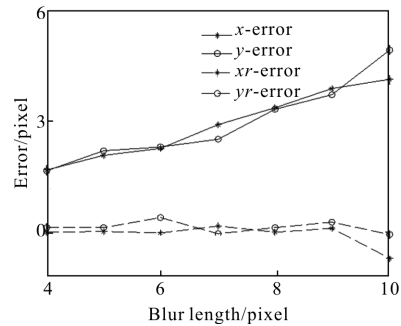


图 4 退化长度变化时处理前后误差对比

Fig.4 Errors comparison before and after processing when blur length varies

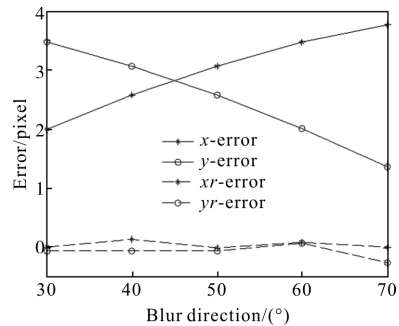


图 5 退化方向变化时处理前后误差对比

Fig.5 Errors comparison before and after processing when blur direction varies

在图 4 中,退化角度 $=45^\circ$ 保持不变,仅退化长度递增;在图 5 中,退化长度 $L_s=8.0$ pixel 固定不变,而角度递增;静态情况下星点质心坐标为(539.0629,468.1868),并以此作为理论坐标。由仿真结果可以看出:文中提出的方法能有效提高星点质心计算精度;相反,若直接对退化星图进行计算,误差会伴随着角速度增大而增加。

4 结论

文中首先给出在要求精度下星敏感器允许的最大角速度。当星敏感器的角速度超过最大角速度时,星点灰度信息将不再呈高斯分布。曝光时间固定时,星敏感器角速度越大灰度值越稀薄,意味着星点退化长度越长。从工程应用的角度,对质心理论轨迹简化,并作了精度分析。基于模糊星点的灰度特征提出了一种基于星点质心运动轨迹的星图退化参数估计方法。在仿真实验中,文中提出的算法能对星点所处位置的局部退化参数进行估计,退化长度估计的误差最大在 0.8 个像素左右;而退化方向的估计误差不超过 2° 。并证实了利用估计得到的

参数建立退化矩阵可以对模糊星图进行局部复原,提高质心计算的精度。

参考文献:

- [1] Liebe C C. Accuracy performance of star tracks—a tutorial[J]. *Aerospace and Electrical System*, 2002, 38(2): 587–599.
- [2] Wang Haiyong, Zhou Wenrui, Cheng Xuan, et al. Image smearing modeling and verification for strapdown star sensor [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2012, 25(1): 115–123.
- [3] Samaan M A, Pollock T C, Junkins J L. Predictive centroiding for star trackers with the effect of image smearing [J]. *The Journal of Astronautical Sciences*, 2002, 50(1): 1–14.
- [4] Zhang Weina, Quan Wei, Guo Lei. Blurred star image processing for star sensor under dynamic conditions [J]. *Sensor*, 2012, 12(5): 6712–6726.
- [5] Wu Xiaojuan, Wang Xinlong. Multiple blur of star image and the restoration under dynamic conditions [J]. *Acta Astronautica*, 2011, 68(11–12): 1903–1913.
- [6] Irwan R, Lane R G. Analysis of optimal centroid estimation applied to Shack–Hartman sensing [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(32): 6737–6743.
- [7] Arines J, Ares J. Minimum variance centroid thresholding [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(7): 497–499.
- [8] Anup Bharat Katake. Modeling, image processing and attitude estimation of high speed star sensors [D]. US: Texas A&M University, 2006: 91–93.
- [9] Samaan M A. Toward faster and more accurate star sensors using recursive centroiding and star identification [D]. US: Texas A&M University, 2003: 95–97.
- [10] Yitzhaky Y, Mor I, Lantzman A, et al. Direct method for restoration of motion-blurred images [J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science*, 1998, 15: 1512–1519.
- [11] Levin A. Blind motion deblurring using image statistics [C]// NIPS, 2007: 841–848.