星图运动模糊及其复原方法

吴小娟 王新龙

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 研究了载体角运动及振动对星敏感器成像的影响,推导并建立了不同飞行状态下星图模糊的数学模型.在此基础上讨论了多重运动模糊机理,提出采用分步复原方案去除多重星图模糊,以保证高动态环境下星敏感器工作的精确性及稳定性.仿真结果表明,载体运动造成的星体质心提取误差与具体运动形式及参数有关,并通过比较复原前后星敏感器的定姿效果,验证了模糊星图分步复原方法的有效性.

关 键 词: 星敏感器; 运动; 多重模糊; 复原

中图分类号: TP 391.4; TN 379

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)11-1338-05

Motion blur of star image and restoration

Wu Xiaojuan Wang Xinlong

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The impact of vehicle angular and vibrational motion on the star imaging process was researched, and the mathematical model of motion blur corresponding to various flight states was deduced and established then. On this basis, the mechanism of multiple motion blur was discussed. In order to ensure the accuracy and stability of star sensor under high dynamic conditions, a step-by-step restoration was proposed to remove the multiple blur of star image. The simulation results indicate that the star centroiding accuracy caused by vehicle motion is related with specific motion type and parameters, and the restoration method is validated by comparing the attitude estimates before and after the restoration of blurred star image.

Key words: star sensor; motion; multiple blur; restoration

星敏感器作为天文导航系统(CNS, Celestial Navigation System)的核心部件,利用观测恒星获取运载体三轴姿态信息[1].对星敏感器拍摄的星图进行星体质心提取和定位,是进行星图匹配和姿态确定的前提条件.

星敏感器工作在静态条件下时,由于光学系统散焦得到的星点光斑为 3×3 像素或 5×5 像素的弥散圆,利用质心细分定位算法可使星体提取精度达亚像素级.然而,当捷联安装的星敏感器在动基座上进行实时动态成像,受到载体机动飞行、机体振动等的影响,在曝光时间内星点光斑被拉长变形,星图信噪比降低,这势必会影响星体质心提取的精度,甚至导致星敏感器无法正常定姿[2].而且,星点光斑运动模糊的像移随载体运动形式的不同而各异,实际载体的运动形式往往是线运动、角运动、振动相结合的复杂运动形式,在多重运动模糊因素作用下,星点光斑会发生复杂的像移,传统的机械式、光学式、电子式等补偿方法将很难对其进行有效消除[3-5].

本文针对捷联安装的星敏感器在运动时的工作环境,建立了不同运动形式下的星图退化模型,并对多重模糊机理进行分析,给出了一种多重模糊星图的分步复原方法,以提高载体在复杂运动环境下星敏感器的工作性能.

收稿日期: 2010-06-27; **网络出版时间**: 2011-11-14 17:20; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111114.1720.018

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111114.1720.018.html

基金项目: 航天支撑基金资助项目(2008)

作者简介: 吴小娟(1986-),女,河南南阳人,硕士生, dbbwuxiaojuan@yahoo.com.cn.

1　载体运动对星敏感器成像的影响

星敏感器曝光时间非常短,可以合理假设在曝光瞬间,星敏感器旋转轴指向不变,转动角速度、振动频率幅值一定.

另外,星敏感器测量坐标系 $x_s y_s z_s$ 与载体系 $x_b y_b z_b$ 重合,z_s 轴为光轴. 星敏感器性能参数(CT-601 型)见表 1.

表 1　星敏感器性能参数选择

视场大小 $F_{ovx}\times F_{ovy}$/(°)	CCD 面阵 $N_x\times N_y$	像素尺寸 d_{CCD}/μm	透镜焦距 f/ mm	曝光时间 t_e/ ms	曝光系数 K	星等阈值 m_h	高斯半径 σ_{PSF}
8×8	512×512	27	98.8	200	1	6	0.7

1.1　载体绕非光轴角运动

通常,星敏感器光学系统在 Ox_s,Oy_s 轴向是对称的,在这两个方向上的运动形式和规律一致,故以 y_s 轴向为例进行讨论.

如图 1 所示,假定曝光前恒星星光方向与光轴夹角为 θ_0,在 CCD 面阵上 P 点成像. 载体以角速度 ω_y 绕 y_s 轴顺时针转动,在曝光时间 t_e 内转过的角度为 $\Delta\theta=\omega_y\cdot t_e$,可等效为星光方向绕 y_s 轴逆时针转过 $\Delta\theta$,而星点光斑则在像平面内沿 x_s 轴从 P 点运动到 P'点. 由几何关系易得星像点的像移量为

$$L_x=\frac{f\cdot[\tan(\theta_0+\Delta\theta)-\tan\theta_0]}{d_{CCD}} \tag{1}$$

式中,f 为星敏感器透镜焦距.

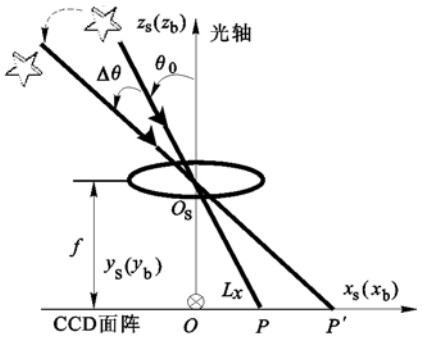

图 1　载体绕 y_s 轴角运动产生的星图模糊

对式(1)中 $\tan(\theta_0+\Delta\theta)$ 项进行泰勒级数展开,并取 $\Delta\theta$ 的一次项,得

$$\tan(\theta_0+\Delta\theta)\approx\tan\theta_0+(1+\tan^2\theta_0)\Delta\theta \tag{2}$$

将式(2)代入式(1),可得

$$L_x=f\cdot(1+\tan^2\theta_0)\cdot\Delta\theta/d_{CCD} \tag{3}$$

当载体绕 x_s,y_s 轴同时存在转动角速度 ω_x,ω_y 时,星点光斑将沿合成角速度 ω_{xy} 的垂线方向发生像移 L_{xy}:

$$L_{xy}=f\cdot(1+\tan^2\theta_0)\cdot\Delta\theta'/d_{CCD} \tag{4}$$

式中,$\Delta\theta'=\omega_{xy}t_e$ 为小量;$\omega_{xy}=\sqrt{\omega_x^2+\omega_y^2}$;$\theta_0\in[0,F_{ov}/2]$.

若视场角 $F_{ov}\leqslant10°$,则 θ_0 亦为小角度,式(4)可进一步简化为

$$L_{xy}=f\cdot\Delta\theta'/d_{CCD}=f\cdot\omega_{xy}\cdot t_e/d_{CCD} \tag{5}$$

在曝光瞬间可认为 ω_{xy} 保持不变,由式(5)易知,星点光斑在像平面上近似作匀速直线运动,且沿运动方向的模糊尺度为 L_{xy}.

而一维匀速直线运动的点扩散函数 PSF(Point Spread Function)是一个矩形函数:

$$p_1(x)=\begin{cases}1/L & 0\leqslant x<L\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{6}$$

式中,L 为图像模糊尺度.

若星点光斑运动方向与 x_s 轴夹角为 α,结合式(5)及式(6),可得载体绕非光轴角运动时的星图模糊 PSF $h_1(x,y)$:

$$h_1(x,y)=\begin{cases}\dfrac{1}{L_{xy}} & x\sin|\alpha|-y\cos|\alpha|=0\\ & 0\leqslant x<L_{xy}\cos|\alpha|\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{7}$$

1.2　载体绕光轴角运动

由于机动及姿态调整,载体往往存在绕光轴的角运动. 如图 2 所示,若载体以角速度 ω_z 绕 z_s 轴逆时针转动,在曝光时间 t_e 内转过的角度为 $\Delta\theta=\omega_z\cdot t_e$,可等效为星光方向绕 z_s 轴顺时针转过 $\Delta\theta$,而星点光斑则在像平面内沿半径为 r 的圆(模糊路径)从 P 点运动到 P'点. 此时,星像点的像移量为

$$L_z=r\cdot\omega_z\cdot t_e=\sqrt{x^2+y^2}\cdot\omega_z\cdot t_e \tag{8}$$

式中,(x,y)为恒星在像平面上的坐标位置.

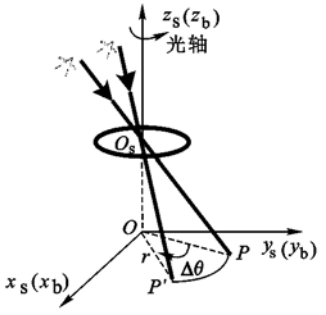

图 2　载体绕光轴角运动产生的星图模糊

将 L_z 离散化处理,用 a_r 表示模糊路径上的

星像点的模糊宽度,则有

$$a_r = 1 + \lfloor L_z \rfloor \tag{9}$$

式中,$\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整.

结合旋转运动模糊图像的退化模型[6]可知:

$$g_r(i) = \frac{1}{a_r}\sum_{x=0}^{a_r-1} f_r(i-x) \tag{10}$$

式中,$i=0,\cdots,N_r-1$;$N_r = \lfloor 2\pi r \rfloor$ 为模糊路径的长度;$g_r(i)$,$f_r(i)$ 分别为模糊路径上像素的模糊灰度值序列及原灰度值序列.

令

$$h_r(x) = \begin{cases} 1/a_r & 0 \leqslant x < a_r - 1 \\ 0 & a_r \leqslant x \leqslant N_r - 1 \end{cases} \tag{11}$$

则式(10)可用离散卷积的形式表示为

$$g_r(i) = \sum_{x=0}^{N_r-1} f_r(x)h_r(i-x) = f_r(x) * h_r(x) \tag{12}$$

式中,$h_r(x)$ 即为模糊路径上的 PSF.

1.3 载体角振动

载体的振动振源包括大气湍流,发动机组振动、低频热动力现象等. 如图 3 所示,若载体存在振幅为 A_{ng}、相位为 φ 的角振动,将导致星敏感器成像系统的抖动,等效为恒星光线相对于光轴的角振动,有

$$\Delta\theta = A_{ng}\cos\varphi = A_{ng}\cos(\omega_0 t + \phi_0) \tag{13}$$

式中,ω_0 为振动频率;ϕ_0 为初始相位.

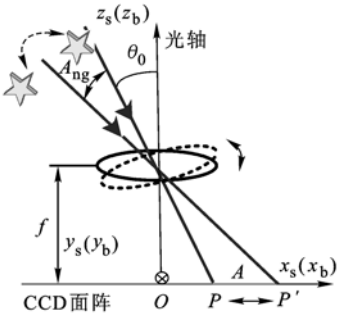

图 3 载体绕 y_s 轴角振动

通常,由于载体高频振动的周期 $T_0 \ll t_e$,振动的非整数周期部分对星光能量积分过程的影响可忽略不计,令 $\phi_0 = 0$,则有

$$\Delta\theta = A_{ng}\cos(\omega_0 t) \tag{14}$$

将式(14)代入式(5),可得载体高频角振动时星像点在像平面上的运动形式:

$$x_v(t) = \frac{f \cdot A_{ng}}{d_{CCD}}\cos(\omega_0 t) = A_v\cos(\omega_0 t) \tag{15}$$

式中,A_v 为简谐振动 $x_v(t)$ 的振幅. 由式(15)知,恒星光斑在像平面内作近似快速简谐振动.

而一维快速简谐振动的 PSF 与振动频率无关,可表示为[7]

$$p_v(x) = \begin{cases} \dfrac{1}{\pi\sqrt{A^2 - x^2}} & -A \leqslant x \leqslant A \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{16}$$

式中,A 为简谐振动 $x(t)$ 的振幅.

若星点光斑振动方向与 x_s 轴的夹角为 β,结合式(15)及式(16),振动方向上的星图模糊 PSF 可表示为

$$H_3(x_v) = \begin{cases} \dfrac{1}{\pi\sqrt{A_v^2 - x_v^2}} & -A_v \leqslant x_v \leqslant A_v \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{17}$$

2 星图多重模糊及复原

2.1 星图多重模糊

通常,串联光学系统是对各个分系统的光学传递函数 OTF(Optical Transfer Function)连乘来求取整体系统的 OTF 值[8]. 若用点扩散函数表示总系统的成像质量,则

$$I = I_0 * h_a * h_b * \cdots * h_c \tag{18}$$

式中,I_0 为原始图像;h_a,h_b,$\cdots$,h_c 表示各光学子系统的 PSF. 由于在概念上,模糊 PSF 类似于光学系统的 PSF,两者对图像的模糊效果相同. 因此,式(18)也可看作多个模糊因素 h_a,h_b,$\cdots$,h_c 同时作用下模糊图像 I 的表达式.

综上分析可知,载体在运动条件下绕非光轴、光轴角运动及绕非光轴的角振动是造成星图模糊并影响星敏感器测量精度的主要因素. 利用式(7)、式(11)、式(17)可分别得到对应的运动模糊点扩散函数 $h_1(x,y)$,$h_2(x,y)$,$h_3(x,y)$,结合式(18),则星图的多重运动模糊模型可表示为

$$g = f_0 * h_1 * h_2 * h_3 \tag{19}$$

式中,$g(x,y)$ 为模糊星图;$f_0(x,y)$ 为静态条件下的星敏感器成像;$*$ 表征二维卷积运算.

考虑星图噪声 $\eta(x,y)$,则有

$$g = f_0 * h_1 * h_2 * h_3 + \eta \tag{20}$$

2.2 星图复原

星图复原是星图模糊的反过程. 若能基于星图模糊的物理过程估计出运动模糊 PSF,就可以通过图像复原技术恢复星图.

由于星敏感器存在数据输出率低等缺点,通常与 SINS 组合使用,因此可通过 SINS 提供载体速度、角速度等运动信息;而振动参数可通过捷联安装的振动传感器提供. 将星敏感器性能参数、载体运动参数代入式(7)、式(11)、式(17),分别得到运动模糊 PSF $h_1(x,y)$,$h_2(x,y)$,$h_3(x,y)$,即

可引入约束最小二乘(CLS, Constraint Least Square)滤波器,采用分步复原[8]的方法恢复星图. 其中,CLS 滤波公式[9]如下所示:

$$F(u,v) = \frac{G(u,v)H^*(u,v)}{|H(u,v)|^2 + \gamma |P(u,v)|^2} \tag{21}$$

式中,$G(u,v)$,$P(u,v)$,$H(u,v)$分别为模糊图像,二阶差分算子及模糊 PSF 的离散傅里叶变换;$H_r^*(u)$为$H_r(u)$的复数共轭;γ 是优化过程中需要确定的参数,可通过迭代过程得到. 对 $F(u,v)$进行傅里叶逆变换即可获取复原图像.

3　仿真验证与分析

3.1　仿真条件设定

曝光前,星敏感器的偏航角、俯仰角和滚动角$(\alpha_0,\delta_0,\kappa_0)$分别为(50°,50°,90°);

假设 1　载体同时存在 3 种不同单一运动形式,对应的模糊 PSF 参数设置如下:

Ⅰ) $h_1(x,y)$:$L_{xy}=10$,$\alpha=0°$;

Ⅱ) $h_2(x,y)$:$\omega_z=25(°)/s$;

Ⅲ) $h_3(x,y)$:$A_v=5$,$\beta=0°$.

另外,$\eta(x,y)$选用均值为 0,方差为 0.02 的高斯白噪声.

3.2　运动模糊对星体质心提取精度的影响

考虑模糊 PSF $h_1(x,y)$,图 4 反映了模糊尺度 L_{xy}(正比于 ω_{xy})和模糊方向 α 变化对质心提取精度的影响. 可见,模糊尺度越大,质心提取误差越大;模糊方向的变化主要影响质心提取误差在 x,y 轴上的分配.

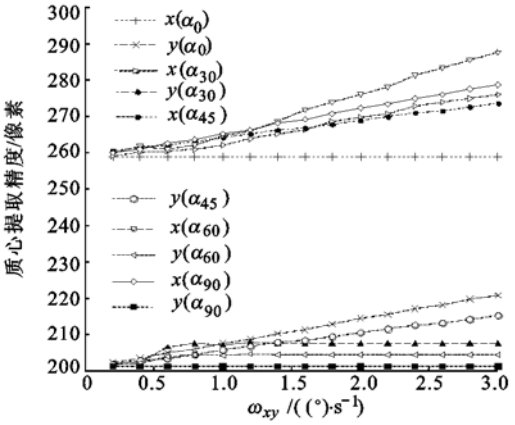

图 4　质心提取精度随 ω_{xy}及 α 的变化

考虑模糊 PSF $h_2(x,y)$,图 5 反映了不同星体 $S_a \sim S_e$ 的质心定位误差随 ω_z 的变化,各个星体距离 CCD 面阵中心点的距离 $r_b > r_d > r_c > r_e > r_a$. 可见,角速度 ω_z 越大、星点距离面阵中心点的距离越远,星体质心提取的误差越大;并且,在运动模糊比较剧烈的情况下,星点分布较为密集的区域中不同的星点光斑会相互连通,导致星体质心提取误差存在震荡现象.

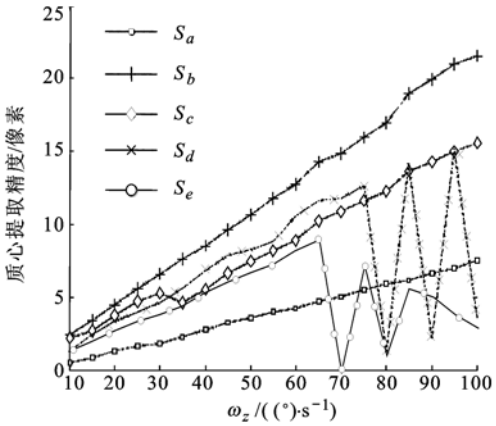

图 5　不同星体质心定位误差随 ω_z 的变化

考虑模糊 PSF $h_3(x,y)$,图 6 表明振幅 A_v 越大,星体质心提取误差越大;而振动方向 β 的变化会影响质心提取误差在 x,y 轴上的分配.

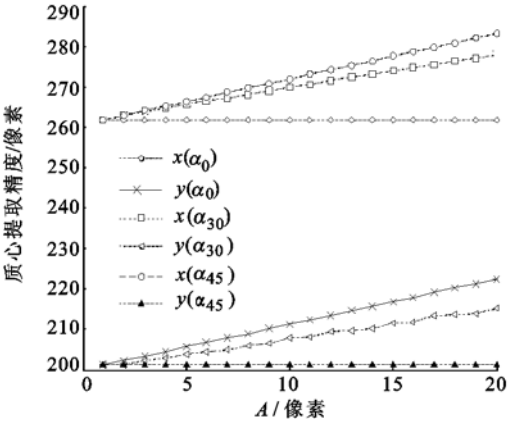

图 6　质心提取精度随振幅及振动方向的变化

3.3　模糊星图复原前后定姿效果比较

基于假设 1,分以下两种情况进行讨论:

1) 若Ⅱ)中ω_z变化. 表2数据表明,若直接

表 2　模糊星图及复原星图的定姿效果比较 *a*

ω_z	定姿误差(模糊星图)/(°)			定姿误差(复原星图)/(°)		
	$\Delta\alpha_0$	$\Delta\delta_0$	$\Delta\kappa_0$	$\Delta\alpha_0$	$\Delta\delta_0$	$\Delta\kappa_0$
35	0.1995	0.0004	−4.1307	0.1959	−0.0088	−0.2389
40	0.1895	−0.0032	−4.2095	0.2069	−0.0021	−0.3335
45	0.1998	0.0031	−5.6183	0.1956	−0.0035	−0.1539
50	0.1950	−0.0041	−4.6757	0.1891	−0.0125	0.1764
55	0.1192	−0.0774	−17.172	0.1920	−0.0087	−0.1262
60	0.1944	−0.0035	−5.5754	0.2030	−0.0053	−0.0751
65	0.1819	−0.0064	−5.7192	0.1879	−0.0066	−0.5629
70	0.7588	−0.5939	2.9283	0.1897	−0.0071	0.1341
75	失败	失败	失败	0.1928	−0.0064	0.0098
80	失败	失败	失败	0.2003	−0.0071	−0.0512
85	失败	失败	失败	0.1956	−0.0059	0.1342
90	失败	失败	失败	0.1962	−0.0032	−0.0365

对模糊星图进行质心提取、匹配识别等一系列定姿操作，ω_z 的变化主要影响滚转角的精度，当 $\omega_z \geqslant 75$ (°)/s 时，定姿误差已超出允许范围，甚至无法定姿；若预先实施了星图复原处理，载体运动参数 ω_z 变化对星敏感器姿态确定的影响不大，定姿误差能够稳定在一定范围内.

2) 若Ⅲ)中 A_v 变化. 从表 3 可见，若直接利用模糊星图进行定姿，当振动振幅 $A_v \geqslant 10$ 像素时，已无法正常定姿；而若利用复原后星图进行一系列的定姿操作，在载体振动剧烈，星点光斑弥散剧烈的情况下，仍然能够保证星敏感器的正常定姿.

表 3 模糊星图及复原星图的定姿效果比较 *b*

A_v	定姿误差(模糊星图)/(°)			定姿误差(复原星图)/(°)		
	$\Delta\alpha_0$	$\Delta\delta_0$	$\Delta\kappa_0$	$\Delta\alpha_0$	$\Delta\delta_0$	$\Delta\kappa_0$
3	0.1444	0.0024	−2.1993	0.1504	−0.0012	−0.3039
5	0.1958	−0.0030	−2.7001	0.1929	−0.0049	−0.4252
8	0.2792	−0.0045	−2.7799	0.2995	−0.0042	0.3043
10	失败	失败	失败	0.3345	−0.0047	0.3104
12	失败	失败	失败	0.4704	0.0032	0.1132

以上仿真结果表明：经星图复原后，可以克服载体运动对星敏感器的不利影响，保证高动态条件下星敏感器工作的稳定性.

4 结 论

本文研究了各种形式的载体运动对星敏感器成像的影响，建立了相应的运动模糊数学模型，并进一步讨论了星图多重运动模糊的产生机理. 载体不同形式的运动会对星敏感器的成像产生不同的影响，从而使星点光斑发生变形，星体质心提取得到的星点坐标与真实的星像中心存在偏差. 通常情况下，载体运动越剧烈，星点光斑弥散就越剧烈，星体质心提取误差随之变大，并可能出现误提取，从而无法得到准确的载体姿态信息. 本文结合星图运动模糊的数学模型及星图多重模糊的产生机理，从数字图像处理的角度，引入分步复原方法有效地去除了星图运动模糊，保证了高动态环境下星敏感器工作的稳定性.

参考文献 (References)

[1] Liebe C C. Accuracy performance of star trackers—a tutorial [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 2002, 38(2): 587 – 599

[2] Liebe C C, Gromov K, Meller D M. Toward a stellar gyroscope for spacecraft attitude determination[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2004, 27(1): 91 – 99

[3] Pasetti A, Habine S, Creasey R. Dynamical binning for high angular rate star tracking [C]//The 4th ESA International Conference on Spacecraft Guidance, Navigation and Control Systems. Netherlands: [s. n.], 1999

[4] Van Bezooijen R W H. Performance of the AST-201 star tracker for the microwave anisotropy probe[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Monterey, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002

[5] 龚德铸，武延鹏，卢欣. 一种提高星敏感器动态性能的方法[J]. 空间控制技术与应用，2009，35(6)：19 – 23
Gong Dezhu, Wu Yanpeng, Lu Xin. An attempt at improving dynamic performance of star tracker by motion compensation[J]. Aerospace Control and Application, 2009, 35(6): 19 – 23 (in Chinese)

[6] Hong Hanyu, Zhang Tianxu. Fast restoration approach for rotational motion blurred image based on deconvolution along the blurring paths [J]. Optical Engineering, 2003, 42 (12): 3471 – 3486

[7] 温昌礼. 平台角振动对图像测量系统的影响[D]. 长沙：国防科学技术大学光电科学与工程学院，2006
Wen Changli. The influence of measuring system of picture caused by angular oscillation of platform[D]. Changsha: School of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, 2006 (in Chinese)

[8] 李仕，张葆，孙辉. 航空多重模糊图像的恢复[J]. 光学精密工程，2009，17(5)：1161 – 1170
Li Shi, Zhang Bao, Sun Hui. Restoration of aerial multiple blurred images [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 1161 – 1170 (in Chinese)

[9] Hadar O, Adar Z, Cotter A, et al. Restoration of images degraded by extreme mechanical vibrations [J]. Optics & Laser Technology, 1997, 29(4): 171 – 177

(编 辑：张 嵘)