

文章编号: 0258-7025(2010)06-1613-05

一种应用图像配准叠加提高成像激光雷达测距精度的方法

姚金良 严惠民 张秀达 姜燕冰

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 国家光学仪器工程技术研究中心, 浙江 杭州 310027)

摘要 介绍了一种基于增益调制测距原理的成像激光雷达, 并分析了其在散粒噪声受限时的测距精度。根据该精度模型, 针对机载应用提出了对雷达测得的距离图像序列进行配准叠加以提高测距精度的方法。由于各帧图像的距离精度不同, 在配准前进行权重处理使精度较高的图像像素获得较大的权重, 然后利用插值相位相关法进行精确配准。对于配准后的图像, 利用加权叠加使相加后的距离图像误差最小。理论分析表明, 该方法能有效整合不同帧探测到的信号, 使 n 帧距离图像配准叠加后的测距误差降低为单帧的 $1/\sqrt{n}$ 。仿真和实验验证了该方法的有效性。

关键词 图像处理; 激光雷达; 图像配准叠加; 测距精度

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1613

Image Registration and Superposition for Improving Ranging Accuracy of Imaging Laser Radar

Yao Jinliang Yan Huimin Zhang Xiuda Jiang Yanbing

(*State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, National Engineering and Technology Research Center for Optical Instrumental, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China*)

Abstract A laser radar based on ranging principle of gain modulation is introduced, and its distance measurement accuracy under shot noise limited circumstances is analyzed. According to the accuracy model, a method which uses techniques of image registration and superposition is presented to improve ranging accuracy in airborne applications. For differences of distance accuracy among range image sequences, a weighted processing before registration is used for the purpose of assigning high weights to pixels with high accuracy, and a registration method called up-sampled phase correlation is used to locate image sequences accurately. The range images after registration are weighted superposed to minimize range error. Theoretical analysis shows that this method can effectively integrate detected signals among different frames. If n frames range images are superposed, the range error will be $1/\sqrt{n}$ of one frame. Simulation and experimental results are demonstrated to verify the effectiveness of this method.

Key words image processing; laser radar; image registration and superposition; ranging accuracy

1 引 言

成像激光雷达是一种新型激光三维测量方法, 该方法利用光强面阵探测器测量多帧受不同调制(包括光源调制和探测器调制)的激光回波强度信号计算出距离图像^[1~3], 它能对视场范围内的目标成二维距离图像。成像激光雷达与点扫描激光雷

达^[4,5]相比大幅度提高了测量速率, 但同时导致其单个像素获得的回波强度相对较弱, 信噪比较低, 影响其测量精度。为了提高回波强度, 可以通过提高光源强度(如采用半导体激光器阵列)、采用大口径的光学接收器件、增加探测器积分时间和使用高信噪比的探测器, 由于小型化、成本、能耗、散热各方面

收稿日期: 2009-08-09; 收到修改稿日期: 2009-09-30

基金项目: 国家 973 计划(2009CB72400404)和国家 863 计划(2009AA12Z142)资助课题。

作者简介: 姚金良(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事三维激光雷达运动成像特性方面的研究。

E-mail: floatyjl@126.com

导师简介: 严惠民(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测、激光雷达方面的研究。

E-mail: yhm@zju.edu.cn(通信联系人)

的要求,光源输出功率和成像口径都受到限制。在一个机载移动平台上,增加探测器积分时间来提高回波强度需要补偿平台运动^[6],由于平台存在随机运动以及运动补偿装置存在补偿误差,过多地增加积分时间会导致图像模糊,引起空间分辨率降低。因此单帧信号强度的提升总是有限的。

机载成像激光雷达在进行远距离对地探测时,沿航线对地面进行探测得到连续的距离图像序列,虽然单帧图像信噪比较低,但相邻帧之间存在很大的重叠区域,将帧之间的重叠区域进行配准叠加能整合各帧探测到的信号,从而提高整体测量精度。本文依据成像激光雷达的测距误差模型提出了一种对雷达距离图像序列进行加权配准和加权叠加的方法来提高测距精度。

2 雷达系统原理

图1为基于双通道增益调制测距原理的成像激光雷达系统结构图。激光二极管(LD)阵列产生脉冲光源,通过照明光学系统照射到视场范围内的目标物体,并由成像光学系统成像,分束镜将入射光分成两束,分别通过两个像增强器[由光电阴极、微通道板(MCP)、荧光屏组成]增益后被两个 CCD 分别接收,一个像增强器的 MCP 其增益在选通时间内不随时间变化,另一个随时间线性变化^[1]。

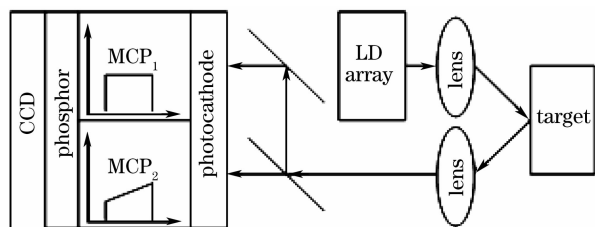


图1 双通道增益调制激光雷达系统结构

Fig. 1 Block diagram of two channel gain modulation imaging laser radar

两路 CCD 强度信号相除即为对应像素点两个增益的比值,由于一路为恒定增益,则可求得另一路增益大小,根据第二路的线性增益曲线反解出各个像素点到达 MCP 的时间,从而求出各个像素所对应目标的距离

$$z = z_0 + \alpha \left(\frac{E_2}{E_1} - \beta \right), \quad (1)$$

式中 z 为目标到雷达之间的测量距离, z_0 为门选通开始时的距离, E_1, E_2 分别为通过恒定和线性增益后两个 CCD 对应像素接收到的光强, α, β 为根据两路增益方式标定的两个常数。

3 测距精度分析

对于如图1所示的系统,采用门选通方案和窄带滤光片可有效抑制背景光和后向散射光进入探测系统, MCP 对光电子的增益放大使 CCD 的暗电流噪声和读出噪声可以忽略。系统的主要噪声来源于像增强器:像增强器的光电阴极由于其量子效率不高,在光子转化为光电子时引入呈泊松分布的散粒噪声;而 MCP 在光电子放大过程中使信噪比恶化。

假设某次探测对应单个像素接收到的光子数为 N , 经过分束镜后,两个通道各为 $N/2$ 个光子。射到量子效率为 η 的光电阴极后获得的光电子带有呈泊松分布的散粒噪声,其信噪比为

$$R_{SN}^{pc} = \sqrt{\frac{\eta N}{2}}. \quad (2)$$

经过 MCP 倍增后,信噪比恶化。信噪比的恶化程度可表示为引入 N_f 的噪声因子^[7](MCP 像增强器的噪声因子随增益的提高缓慢变大,这里假设两路增益大小基本一致,具有相同的噪声因子),通过 MCP 后的信噪比为

$$R_{SN}^{MCP} = \frac{R_{SN}^{pc}}{\sqrt{N_f}} = \sqrt{\frac{\eta N}{2N_f}}. \quad (3)$$

忽略其他噪声来源,则两路 CCD 接收到的信号的信噪比相同

$$R_{SN} = \frac{\tilde{E}}{\Delta E} = R_{SN}^{MCP} = \sqrt{\frac{\eta N}{2N_f}}, \quad (4)$$

式中 \tilde{E} 为测量光强的均值, ΔE 为测量光强的标准偏差。

将(1),(4)式代入误差传递公式

$$\Delta z^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial E_1} \right)^2 \Delta E_1^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial E_2} \right)^2 \Delta E_2^2, \quad (5)$$

得到散粒噪声受限下的测距误差表达式

$$\Delta z = (\tilde{z} - z_0 + \alpha \beta) \sqrt{\frac{4N_f}{\eta N}}, \quad (6)$$

式中 $\tilde{z} = z_0 + \alpha \left(\frac{\tilde{E}_2}{E_1} - \beta \right)$, 表示测量距离的均值,趋向于探测器到目标的实际距离, Δz 是该距离的测量误差。由(6)式可知在确定系统选通距离、增益函数以及像增强器的性能后,测距误差取决于探测器接收到的光子数。测量得到的距离围绕实际距离 \tilde{z} 上下波动,波动范围取决于 Δz 。可以近似认为,测量得到的距离成均值为 \tilde{z} , 方差为 Δz^2 的正态分布

$$P(z) = N(\tilde{z}, \Delta z^2), \quad (7)$$

也可以表示成

$$z = \tilde{z} + e\Delta z, \quad (8)$$

式中 e 表示标准正态分布 $N(0,1)$ 。

距离图像加权配准和加权叠加以测距误差公式(6)~(8)式为依据。

4 距离图像加权配准方法

机载成像激光雷达在测量时沿飞行方向对地面进行二维成像,如图2所示。

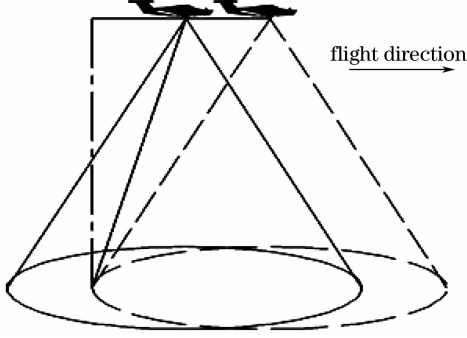


图2 机载成像激光雷达沿航线探测示意图

Fig.2 Airborne imaging laser radar survey along air route

相邻的帧之间存在相交区域。在机载平台水平飞行的情况下,不同帧对地面相同点探测到的距离投影到飞行平台的垂直距离不变。垂直距离可以通过每个像素点对应的视场角 θ 计算出

$$z_{\perp} = z \cos \theta =$$

$$\tilde{z}_{\perp} + e(\tilde{z}_{\perp} - z_0 \cos \theta + \alpha \beta \cos \theta) \sqrt{\frac{4N_f}{\eta N}}. \quad (9)$$

应用垂直距离在多帧之间不变的特性,可以进行距离图像序列的配准。但是由(9)式可知,垂直距离的误差项与实际距离 \tilde{z}_{\perp} 和接收的光子数 N 相关。由于雷达光源照明存在不均匀性以及目标反射面具有方向性,同一目标点在图像序列中的光子数起伏较大,致使其距离误差在多帧图像中各不相同。为了提高配准精度,误差较小的距离像素点应该给予较大的权重,定义

$$z_c = \frac{z_{\perp} \sqrt{E_1}}{(\tilde{z}_{\perp} - z_0 \cos \theta + \alpha \beta \cos \theta)} \approx \frac{z_{\perp} \sqrt{E_1}}{(z_{\perp} - z_0 \cos \theta + \alpha \beta \cos \theta)}, \quad (10)$$

$$\tilde{z}_c = \frac{\tilde{z}_{\perp} \sqrt{E_1}}{(\tilde{z}_{\perp} - z_0 \cos \theta + \alpha \beta \cos \theta)}, \quad (11)$$

则(9)式变成

$$z_c = \tilde{z}_c + e \sqrt{4kN_f}, \quad (12)$$

式中 $k = \frac{E_1}{\eta N}$, 由于像增强器通道1增益恒定,所以 k

为常值。

由(10)式可知,垂直距离 z_{\perp} 根据其距离误差赋予不同权重得到 z_c , 并且由(12)式可知 z_c 的误差项恒定。

对 z_c 采用相位相关法^[8~10]进行配准, $z_c(k)$ 表示第 k 帧经过(10)式变化后的距离图像, $z_c(k+1)$ 表示第 $k+1$ 帧与第 k 帧相交的区域,其归一化互功率谱的相位为

$$\frac{\mathcal{F}[z_c(k)]\mathcal{F}[z_c(k+1)]^*}{|\mathcal{F}[z_c(k)]\mathcal{F}[z_c(k+1)]^*|} = \exp[2\pi i(ux_0 + vy_0)], \quad (13)$$

式中上标 $*$ 为复共轭运算, x_0, y_0 为两帧图像的相对位移,当两帧图像的重叠区域完全相同时,取到等式右侧的频域相位值,将其进行二维傅里叶逆变换得到一个位于 (x_0, y_0) 的冲击函数,判断其尖峰位置从而确定两帧之间的位移。在实际中由于噪声和接收到的光子数目的影响,两帧的重叠区域并不完全相同,两帧图像的互功率谱 $\mathcal{F}[z_c(k)]\mathcal{F}[z_c(k+1)]^*$ 在时域上可表示成两帧图像的互相关运算 $z_c(k) \otimes z_c(k+1)$, 由(12)式可知,误差项与 \tilde{z}_c 以及相邻两帧的误差项之间不相关,所以

$$z_c(k) \otimes z_c(k+1) \approx \tilde{z}_c(k) \otimes \tilde{z}_c(k+1), \quad (14)$$

由(14)式可知用相位相关法对 z_c 进行配准具有较高的抗噪声干扰能力。

选取的相交区域 $z_c(k+1)$ 的大小影响到配准精度,区域越大精度越高,可以采用多次配准的方法:根据飞机航速或GPS坐标确定一个较小的相交区域进行配准来更精确计算两帧之间的位移;然后根据该位移选取一个较大的相交区域来进行配准。

将 $\mathcal{F}[z_c(k)]$ 和 $\mathcal{F}[z_c(k+1)]$ 进行插值,然后对(13)式求傅里叶逆变换并确定其峰值位置,能将配准精确到亚像素级别。利用文献[11]介绍的插值相位相关快速算法,在进行大量插值的前提下可以快速精确计算出两帧之间的位移。

5 距离图像加权叠加方法

对于配准后的距离图像序列中同一目标点,由于在各帧图像中距离误差不同,叠加时根据其误差设置不同的权重。

经过精确配准后,对图像序列中同一目标点的垂直距离分量进行加权叠加

$$z_{\perp} = \sum_{k=1}^K a_k z_k \cos \theta_k, \quad (15)$$

式中 a_k 为第 k 帧图像垂直距离的权重。

根据(7)式及高斯分布的线性组合定理,其测距精度为

$$\Delta z_{\perp}^2 = \sum_{k=1}^K (a_k \Delta z_k \cos \theta_k)^2 = \frac{4N_f}{\eta} \sum_{k=1}^K (\tilde{z}_{\perp} - z_0 \cos \theta_k + \alpha \beta \cos \theta_k)^2 \frac{a_k^2}{N_k}, \quad (16)$$

式中 N_k 为第 k 帧图像测量时雷达系统从同一目标点接收到的光子数。

在实际应用中,各个像素对应的视场角较小,(16)式可化简为

$$\Delta z_{\perp}^2 = \frac{4N_f}{\eta} (\tilde{z}_{\perp} - z_0 + \alpha \beta)^2 \sum_{k=1}^K \frac{a_k^2}{N_k}. \quad (17)$$

对于(17)式,当

$$a_k = \frac{N_k}{\sum_{k=1}^K N_k} = \frac{N_k}{N_{\text{total}}} \quad (18)$$

时(N_{total} 为所有配准帧从同一个目标点接收的光子数总和), Δz_{\perp} 取到最小值

$$\Delta z_{\perp} = (\tilde{z}_{\perp} - z_0 + \alpha \beta) \sqrt{\frac{4N_f}{\eta N_{\text{total}}}}. \quad (19)$$

对于(18)式,由于散粒噪声的存在,无法确切知道从目标点获得的光子数,但 N_k 的观测值 \hat{N}_k 正比于经像增强器通道 1 恒定增益后 CCD 测得的光强 E_{1k} ,将(18)式中光子数的真实值用测量值代替,可得

$$a_k = \frac{\hat{N}_k}{\sum_{k=1}^K \hat{N}_k} = \frac{E_{1k}}{\sum_{k=1}^K E_{1k}}. \quad (20)$$

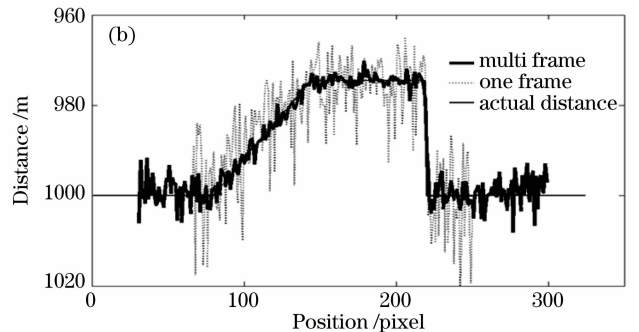
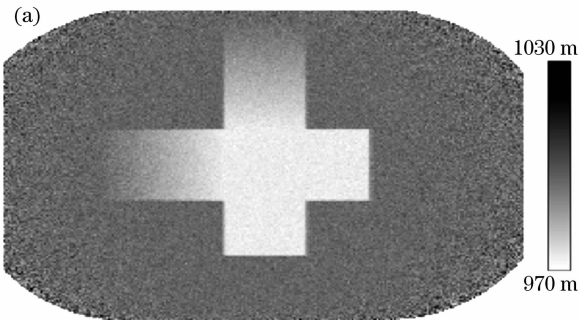


图 3 机载成像激光雷达仿真效果图。(a) 多帧叠加得到的距离图;(b) 距离图中轴线剖面

Fig. 3 Simulation image of airborne laser radar. (a) multi-frame superposition; (b) range image profile

由图 3(a)可看出,由于中间重叠的帧数较多,中间距离误差比边缘小。统计图 3(b)中粗实线和虚线在中心区域的距离分布,所有 25 帧像在中心区域都有重叠部分,该处为完全漫反射体,其在各帧中

比较(6)和(19)式可知,在精确配准的前提下,利用(20)式为权重系数,可以有效整合各帧图像对同一目标点探测到的光子数来提高测距精度。

假设同一目标点在连续帧中接收到的光子数 N 都相同,则对 n 帧距离图像配准叠加后,距离误差变为

$$\Delta z_{\perp} = (\tilde{z}_{\perp} - z_0 + \alpha \beta) \sqrt{\frac{4N_f}{\eta N}} \sqrt{\frac{1}{n}}, \quad (21)$$

由(21)式可知,多帧叠加的距离误差降低为单帧距离误差的 $1/\sqrt{n}$ 。

6 仿真及实验结果

针对带斜坡十字架形目标进行仿真,测量平台在离地面 1000 m 高处沿水平中线方向以 50 m/s 速度飞行,飞行过程中平台伴有振幅为 0.5 m 的随机振动;成像光学系统焦距 0.1 m,视场 10° ;像增强器量子效率为 10%,噪声因子为 1.4;门选通开始、结束对应的距离分别为 950 m 和 1050 m;通道 1 恒定增益为 300,通道 2 增益从选通开始到结束由 50 线性变化到 500;CCD 像素间隔 $200 \mu\text{m}$;对地面沿航线测量共生成 25 帧带有散粒噪声引起测距误差的距离像;每个 CCD 视场内的像素平均获得 1000 个光子,由(4)式可以计算得到 CCD 接收到的信号平均信噪比 8.5,由(6)式理论计算单帧距离图像平均误差为 9.1 m。图 3(a)为 25 帧图像经配准叠加后得到的距离图,图 3(b)中的粗实线表示图 3(a)水平中线的剖面,细实线为该形状沿水平中线的剖面,灰色的虚线表示单帧距离图在该位置的剖面。

的光子数近似相同,配准后图像在中心区域的距离误差为单帧误差的 $1/5.13$,接近于 $1/\sqrt{n}$ 。

图 4 为用 15 帧实际测量的雷达距离图像配准叠加的效果图。雷达光源脉冲峰值功率为 800 W,

脉宽为500 ns,脉冲重复频率为15 kHz;利用多脉冲曝光来增强单帧信号强度,曝光时间为0.6 s;成像系统口径为60 mm,焦距为150 mm;像增强器门选通时间为3 μ s;图像像素为800 pixel \times 600 pixel.雷达静止不动对约1000 m远处目标探测得到15帧距离图像,在该图像序列上从左到右依次截取尺寸为400 pixel \times 400 pixel大小的15帧小图像来仿真实际航拍得到的连续图像序列,并且在帧与帧之间添加水平和垂直方向的随机位移来模拟实际平台的随机运动。这里采用的图像序列为固定点拍摄,在实

际中,运动平台拍摄得到的图像是从不同位置获得的,但是在平台平移的情况下到像面的垂直距离并不会因为拍摄位置的变化而改变,由于该配准叠加方法是针对垂直距离进行的,这样仿真跟实际情况具有一定的相似性。图4(a)为其中单帧距离图,散粒噪声引起很强的呈颗粒状的距离起伏,配准叠加后如图4(b)所示,距离起伏变小,并且中央的距离起伏比四周小。由于帧与帧之间由软件生成位移,该位移与配准获得的帧间位移相比平均误差为0.24 pixel。

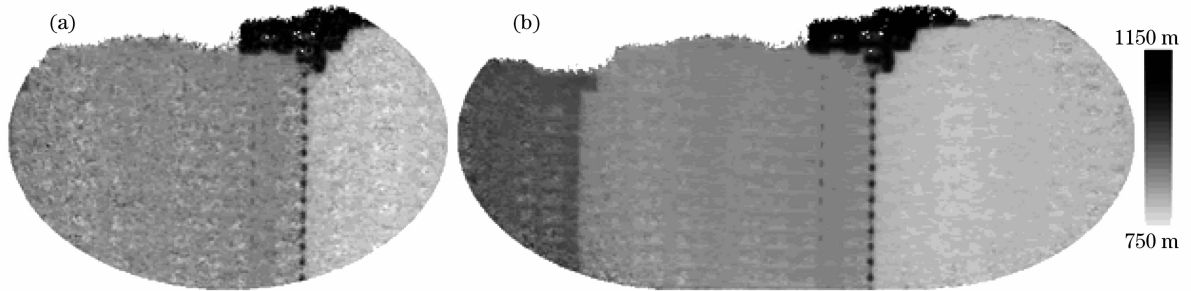


图4 实际成像激光雷达图像配准叠加效果图。(a)单帧距离图;(b)多帧叠加得到的距离图

Fig. 4 Raw laser radar range image. (a) one frame; (b) multi-frame superposition

7 结 论

在双通道增益调制成像激光雷达测距误差模型基础上,提出了应用加权配准和加权叠加方法整合多帧距离图像来提高测距精度的方法。通过仿真和实验表明,该方法具有较高的配准精度,使距离误差大约降低为单帧图像的 $1/\sqrt{n}$ 。该方法在不需增加光源光强、提高雷达接收口径和改用高性能探测器的前提下,通过图像处理方法来获得测距精度的提升。

参 考 文 献

- Zhang Xiuda, Yan Huimin, Jiang Yanbing. Pulse-shape-free method for long-range three-dimensional active imaging with high linear accuracy [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(11):1219~1221
- Martin Laurenzis, Frank Christnacher, David Monnin. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(21):3146~3148
- Pierre Andersson. Long-range three-dimensional imaging using range-gated laser radar images [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(3):034301
- Wang Jianyu, Hong Guanglie, Bu Hongyi *et al.*. Study on airborne scanning lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9):

2584~2589

- 王建宇,洪光烈,卜弘毅等. 机载扫描激光雷达的研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9):2584~2589
- Kong Lingjiang, Yi Wei, Yang Jianyu *et al.*. Reseach on scanning accuracy of liquid crystal phased array component of laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5):1080~1085
- 孔令讲,易伟,杨建宇等. 激光雷达液晶相控阵组件扫描精度分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5):1080~1085
- Tong Zilei. Compensation technology for the image motion of CCD camera [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(9):628~632
- 童子磊. CCD相机的像移补偿技术[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(9):628~632
- S. E. Moran, B. L. Ulich, W. P. Elkins *et al.*. Intensified CCD (ICCD) dynamic range and noise performance [C]. *SPIE*, 1997, **3173**:430~457
- Barbara Zitova, Jan Flusser. Image registration methods: a survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, **21**(11):977~1000
- Juanjuan Zhu, Baolong Guo. Video stabilization with sub-image phase correlation [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(9):553~555
- A. Murat Tekalp. Digital Video Processing [M]. Cui Zhiku *et al.* Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998. 90~93
- 泰卡尔普. 数字视频处理[M]. 崔之枯等译. 北京:电子工业出版社, 1998. 90~93
- Manuel Guizar-Sicarios, Samuel T. Thurman, James R. Fienup. Efficient subpixel image registration algorithms [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(2):156~158