

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

航空成像像移模糊恢复技术

贾 平^{1,2}, 张 葆¹, 孙 辉¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:分析了航空成像系统像移模糊产生的机理;通过建立运动模糊的数学模型,构建二维运动模糊点扩散函数;采用维纳滤波方法,消除了航空成像系统图像像移模糊;通过加窗技术,有效地抑制和减小了边缘误差。实验结果表明,该方法效果较好,可以实现 1 个像元的恢复精度。

关键词:航空成像;图像模糊;像移模糊;Wiener 滤波;点扩散函数(PSF)

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Restoration of motion-blurred aerial image

JIA Ping, ZHANG Bao, SUN Hui

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences Changchun 13002, china; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The mechanism of a motion-blurred image generated from aerial imaging system was introduced. The mathematical model of motion-blurred image was established to give the point spread function of 2-dimensional motion blur, and the Wiener filter was utilized to remove image blur for aerial image. By the window technique, the edge error was restrained or reduced. The simulation results show that the Wiener filtering is effective in precision, which can get the restoration precision of 1 pixel.

Key words: aerial imaging; image blur; motion-blurred; wiener filtering; Point Spread Function (PSF)

1 引言

由于航空成像系统是在动基座上进行动态成像,其效果必然受到气流扰动、载体振动、飞行速度、飞行高度的影响,从而使图像模糊。为获取良好的成像效果,必须采取有效措施来隔离气流扰动、载体振动或对图像进行清晰化处理^[1-3]。

在动载体上摄像或在静载体上摄取动态目标

时,目标像移是一种必然结果。通过像移补偿技术可以消除像移对图像的影响,获得清晰图像。传统的像移补偿方法有移动像面式、摆动镜头式、旋转光楔式和旋转反射镜式等。这些方法由于结构复杂,体积较大,重量较重,功耗大等因素,不适合弹载、轻型飞机、星载等要求。

计算机技术和大规模集成电路技术的迅猛发展,为数字图像处理的发展提供了良好的条件,采用图像清晰化技术进行图像恢复的研究是当前像

移补偿研究发展的趋势。与传统的光学补偿、机电结合的补偿方法相比,图像清晰化技术具有易于操作,更精确,更灵活,体积小以及价格低,能耗小等特点,图像清晰化技术将是观瞄或摄像系统中的更新换代的像移补偿方法^[4-5]。

图像清晰化技术研究在国内基本是刚刚起步,而且前景看好,作为航空成像装备,需求潜力很大。它的应用前景主要体现在航空航天成像等领域,用于补偿像移对像质的影响,其目的是提高光电系统的动态分辨率,拓宽图像技术的应用领域。

本文首先介绍像移模糊产生的机理,结合航空成像系统特点,提出一种像移模糊图像恢复技术。

2 运动像移模糊图像恢复原理

应用图像恢复技术的目的是消除运动载体带来的像移,从而提高动载体成像系统的清晰度与分辨能力。

2.1 运动像移模糊图像的产生

在机载、星载等动基座成像系统中,由于摄像设备与目标景物之间的相对运动,单个物点(Object point)在 CCD 靶面上成像瞬间会在若干个图像像素上扩散,造成像点模糊,拍摄结果不是真实的清晰图像 $f(x,y)$,而是具有像移效果的运动模糊图像 $g(x,y)$ 。图像像移量 δ_{shift} 与飞行速度 V 、飞行高度 H 、摄像机曝光时间 t 及焦距 f 关系如下:

$$\delta_{\text{shift}} = f \frac{V}{H} t, \quad (1)$$

进一步表示成像元个数为

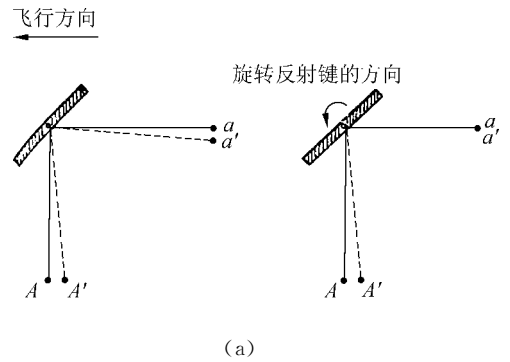
$$M = \frac{\delta_{\text{shift}}}{S_{\text{CCD}}}, \quad (2)$$

式中 S_{CCD} 表示 CCD 成像单元尺寸。

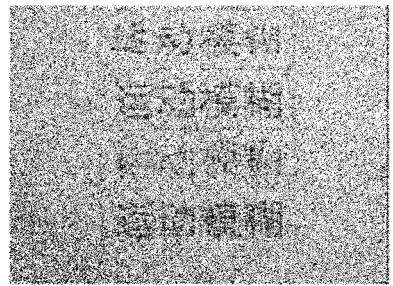
在一般情况下,由于曝光时间很短,可以认为在曝光瞬间,速度、高度不变,这样产生的图像模糊主要是由匀速直线运动造成的。

从式(1)看出,可用两种方法来减少或消除像移。一种方法为减小 t ,另一种方法为减小 V 或使其为零,即像移补偿法。由于受目标照度和探测器灵敏度的限制,减小 t 可能导致曝光不足,所以一般都采用像移补偿法。常用的旋转扫描反射

镜式的方法如图 1 所示:



(a)



(b)

图 1 反射镜像移补偿

Fig. 1 Image motion compensation of mirror

图 1(a)中 A 点经反射镜及镜头成像在 a ,在相机积分时间内,由于飞行的运动,景物 A 相对飞机运动到 A' ,像点运动到 a' 造成图像位移。如果在积分成像过程中,旋转反射镜,只要反射镜转动的角速度适当,则可以使像点 a 相对静止不动。反射镜的旋转方向如图(b)。当反射镜旋转式像点产生的补偿速度等于像移速度而方向与之相反时,即图像静止不动,从而达到像移补偿的目的。

2.2 运动像移模糊图像的数学模型

在线性平移空间像移模糊模型中,模糊图像 $g(x,y)$ 可以表示为清晰图像 $f(x,y)$ 和点扩散函数(Point Spread Function, PSF) $h(x,y)$ 的二维卷积^[6]:

$$g(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\alpha,\beta)h(x-\alpha,y-\beta)d\alpha d\beta + n(x,y), \quad (3)$$

式中 $n(x,y)$ 表示加性噪声。对上式两边进行傅里叶变换,有

$$G(u,v) = F(u,v)H(u,v) + N(u,v), \quad (4)$$

其中 $F(u,v)$ 、 $G(u,v)$ 、 $H(u,v)$ 和 $N(u,v)$ 分别表

示 $f(x, y)$ 、 $g(x, y)$ 、 $h(x, y)$ 和 $n(x, y)$ 傅里叶 (Fourier) 变换, 称为滤波函数。

2.3 运动像移模糊图像的恢复—维纳滤波

在式(4)中, 如果忽略噪声影响, 可以直接计算 $F(u, v)$ 的近似值 $\hat{F}(u, v)$:

$$\hat{F}(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)}$$

这就是逆滤波 (Inverse filter) 恢复方法。很明显, 因为噪声影响, 逆滤波计算误差为

$$E(u, v) = \hat{F}(u, v) - F(u, v) = \frac{N(u, v)}{H(u, v)}$$

在退化系统中, $H(u, v)$ 在高频附近衰减为零, 所以逆滤波方法计算误差较大。为减小计算误差, 通常采用维纳 (Wiener) 滤波方法计算 $F(u, v)$:

$$F(u, v) = \frac{H^*(u, v)}{H(u, v)H^*(u, v) + \gamma} G(u, v), \quad (5)$$

其中 $H^*(u, v)$ 表示 $H(u, v)$ 的复共轭, γ 是噪声对信号的功率密度比, 近似为一个适当的常数, 取值范围一般在 0.000 1~0.01。

解出 $F(u, v)$ 后, 就可以通过 Fourier 逆变换, 计算清晰图像 $f(x, y)$:

$$f(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} F(u, v) \exp(j2\pi(ux + vy)) du dv, \quad (6)$$

3 运动像移模糊图像恢复技术

3.1 构建二维运动点扩散函数

点扩散函数表示数字图像每个像素点在积分时间内的扩散, 反映了图像模糊特性, 与图像实际运动密切相关, 并且影响到图像复原的精度。其 Fourier 变换即为滤波函数。

二维运动是指运动方向与 CCD 成像靶面水平边缘呈一定的角度 θ , 如图 2 所示。相对于一维 (水平或垂直) 运动模糊而言, 消除二维运动模糊更具有实际意义和使用价值。根据文献[7]分析, 在运动模糊模型中, 二维运动模糊仍然是在运动方向上的一维运动模糊。所以消除二维运动模糊不能先处理水平方向, 再处理垂直方向, 只能直接进行二维恢复, 即通过构建二维运动点扩散函数或滤波函数直接进行恢复。

在一般情况下, 点扩散 PSF 或 $H(u, v)$ 都是

根据先验知识或实验测定来获得。根据运动图像特点, 根据成像分析, 文献[8]介绍了 5 种典型的一维点扩散函数。其中方波点扩散函数为 $h(x)$:

$$h(x) = \begin{cases} \frac{1}{M} & x \in (0, M-1) \\ 0 & \text{其它} \end{cases}, \quad (7)$$

式中, M 表示根据公式(3)计算得到的运动量。

在此基础上, 根据成像系统特性及运动特点确定二维运动模糊的点扩散函数。

设系统在积分时间 t 内移动量为 M , 与 CCD 靶面水平方向夹角为 θ , 则二维运动点扩散函数 $h(x, y)$ 为:

$$h(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{M} & y = x \tan \theta, x \in (0, M \cos \theta) \\ 0 & \text{其它} \end{cases}, \quad (8)$$

对 $h(x, y)$ 进行 Fourier 变换, 计算可得滤波函数 $H(u, v)$ 为:

$$H(u, v) = \frac{t \sin(\pi u M \cos \theta)}{\pi u M \cos \theta} \exp(-j \pi u M \cos \theta) + \frac{t \sin(\pi v M \sin \theta)}{\pi v M \sin \theta} \exp(-j \pi v M \sin \theta), \quad (9)$$

$H(u, v)$ 如图 3 所示:

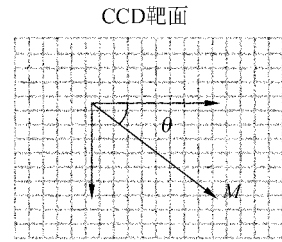


图 2 二维运动

Fig. 2 2-Dimension motion

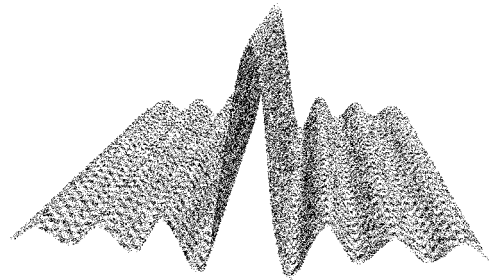


图 3 方波的传递函数

Fig. 3 MTF of the square pulse

同其它滤波一样, $H(u, v)$ 的解析公式有若干个零点, 因此在构建滤波公式时必须考虑 $H(u, v)$ 在零点附近的奇异点或病态条件。

3.2 快速 Fourier 变换技术

Fourier 变换是数字信号、图像处理的一个最重要的工具, 它把空间域变换到频率域处理, 可以完成数字滤波等许多功能。传统的离散 Fourier 变换(Discrete Fourier Transformation, DFT)算法简单, 但运算量较大; 快速 Fourier 变换(Fast Fourier Transformation, FFT)虽然可以减少运算量, 但处理数据长度必须满足 2 的幂次, 所以对于计算 768×576 图像不能直接应用快速 Fourier 变换。

为解决上述问题, 本文采用了文献[9]介绍的 Cooley-Tukey 混合基算法, 结合 DFT 与 FFT, 解决了对 768×576 图像进行 Fourier 变换问题。与 DFT 相比, 可以提高计算速度近 50 倍。

3.3 边缘误差处理—最优窗边缘处理技术

边缘效应是指在图像边缘像素灰度值变化较大, 而且呈周期性, 出现一些等间距的带状图像块, 降低了图像恢复精度, 影响图像视觉效果。其主要原因是 Fourier 变换要求数据具有周期性, 而实际图像几乎都不能满足周期性条件, 所以在运动方向上, 边缘附近恢复误差较大^[10]。

为减小边缘误差, 文献[11]对此进行了进一步研究, 提出一种最优窗图像恢复方法。即根据运动量分割图像, 计算图像各个区域的窗口函数 $\omega(x, y)$, 在计算模糊图像 $g(x, y)$ 的离散 Fourier 变换时, 用窗口函数 $\omega(x, y)$ 作为加权因子进行计算。

设二维图像宽度为 W , 高度为 H , dx, dy 分别表示在积分时间内图像在水平和垂直方向上的运动分量, 最优窗 $\omega_{p,q}$ 将图像平面分成 9 个区域, 如图 4 所示。

其中, 未标号区域在图像中央, $\omega_{p,q} = 1$ 。在水平方向上, 区域 1、7 和 8 中取值范围为 $[0, dx-2]$, 区域 2、6 和未标号的中央区域中取值范围为 $[dx-1, W-dx]$, 区域 5、4 和 3 中取值范围为 $[W-dx+1, W-1]$ 。在垂直方向上, 区域 1、2 和 3 中取值范围为 $[0, dy-2]$, 区域 4、8 和未标号的中央区域中 k 取值范围为 $[dy-1, H-dy]$, 区域 5、6 和 7 中 k 取值范围为 $[H-dy+1, H-1]$ 。

最优窗 $\omega_{p,q}$ 按式(10)取值:

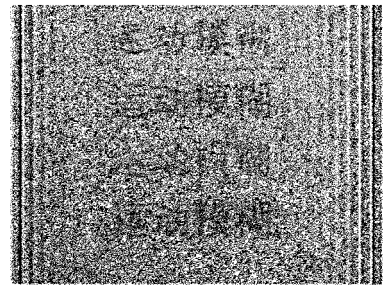
7	6	5
8		4
1	2	3

图 4 最优窗分割

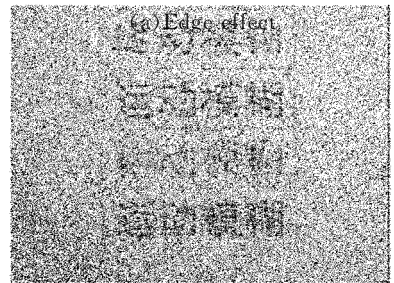
Fig. 4 Region of optimal window

$$\left(\begin{array}{ccc} \sum_{p=i+dy-H}^{dy-1} \sum_{q=0}^k h_{p,q} & \sum_{p=i+dy-H}^{dy-1} \sum_{q=0}^{dx-1} h_{p,q} & \sum_{p=i+dy-H}^{dy-1} \sum_{q=k+dx-W}^{W-1} h_{p,q} \\ \sum_{p=0}^{dy-1} \sum_{q=0}^k h_{p,q} & 1 & \sum_{p=0}^{dy-1} \sum_{q=k+dx-W}^{dx-1} h_{p,q} \\ \sum_{p=0}^i \sum_{q=0}^k h_{p,q} & \sum_{p=0}^i \sum_{q=0}^{dx-1} h_{p,q} & \sum_{p=0}^i \sum_{q=k+dx-W}^{dx-1} h_{p,q} \end{array} \right), \quad (10)$$

根据上述分析, 进行了对比实验, 图 5 显示了对比结果图像, (a) 可以看出有明显的边缘效应。(b) 是最优窗处理结果。对比图像可以看出, 采用最优窗技术可以很好地抑制边缘效应, 在图像边缘像素灰度平滑条件下, 可以收到近乎完美的恢复效果^[12]。



(a) 边缘效应



(b) 最优窗处理结果

(b) Result of optimal window

图 5 边缘对比

Fig. 5 Dege contrast

4 仿真实验与结果

在航空成像系统中飞行速度和飞行高度是产生视频图像运动模糊的主要外界因素。为在实验室条件下最大限度地模拟实际运动效果,本文设计制作了一台运动仿真装置。通过该装置,获取一维和二维运动模糊图像,并进行了算法测试和清晰化恢复实验。

4.1 运动仿真装置

运动仿真装置如图 6 所示,包括传动、速度控制器、通信及图像采集四个单元。工作时,传动单元带动摄像机转动,速度控制器单元调节转动速率,角速率数据通过串口发送到系统机,图像采集单元捕获图像。运动速率可以模拟载体飞行速度,摄像机与目标距离模拟飞行高度。在前端,转动状态下的像机实时摄取目标图像,视频信号传送到系统机,系统机通过图像卡采集数字图像。由于像机焦距、曝光时间都是已知的,再加上飞行速度与高度,就可以计算出运动图像像移等运动参数,这样产生的图像模糊是实际运动造成的,比较接近真实运动效果。

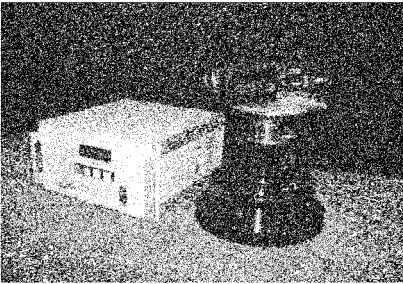


图 6 运动仿真装置

Fig. 6 Motion simulation device

4.2 一维运动图像模糊恢复实例

实验条件:能见度 15 km,镜头焦距 $f=125$ mm,转台旋转角速度 $\omega=2.5^\circ/\text{s}$,其余主要实验参数见表 1。

选择式(7)表示的方波点扩散函数, $M=5$, $\gamma=0.001$ 。

使用 PIV 计算机,主频 1.7 GHz,内存 512 M,图像分辨率 $768 \times 576 \times 8$ bit,处理时间 1.0 s。

表 1 一维运动目标参数

Tab. 1 Parameters of 1-dimension motion

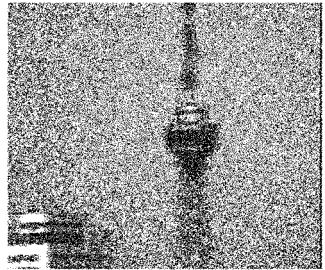
速度(km/h)	距离(km)	积分时间(s)	像移(mm)
390	2.5	1/125	0.044

实验结果如图 7 所示,图像恢复效果良好。



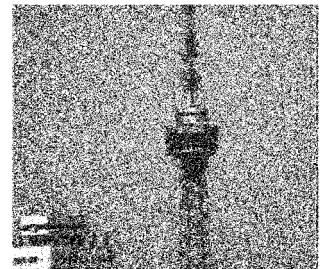
(a) 原始清晰图像

(a) Original image



(b) 运动模糊图像

(b) Blurred-image



(c) 复原结果图像

(c) Image restored with a square-pulse PSF of 5-pixel

图 7 一维运动模糊图像及恢复结果

Fig. 7 1-D motion-blurred image and its restoration

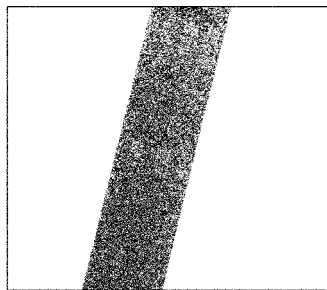
4.3 二维运动图像模糊恢复实例

实验条件:已知 CCD 靶面尺寸 $1/2''$,像元尺寸 $8.3 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$,焦距 $f=125$ mm,其余主要实验参数见表 2。

表2 二维运动目标参数

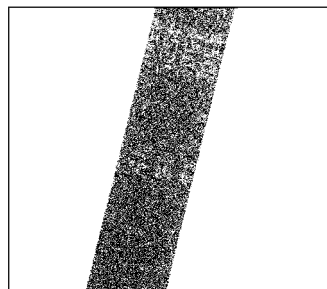
Tab.2 Parameters of 2-dimension motion

速度(mm/s)	距离(mm)	积分时间(s)	像移(mm)
170	1 000	1/125	0.17



(a) 模糊图像

(a) Motion-blurred image



(b) 恢复图像

(b) Restored image

图8 二维运动模糊图像及恢复结果

Fig.8 2-D motion-blurred image and its restoration

根据式(2),在 CCD 靶面上像移量 $\delta_{\text{shift}} = 0.17$ mm,数字图像在水平和垂直方向分别产生约 5 个像元和 20 个像元像移,运动模糊图像如图 8(a)所示。

恢复实验中选择式(8)表示的二维方波点扩散函数, $M=21$,选择 $\gamma=0.005$,处理时间 3.5 s,恢复结果如图 8(b)所示。

5 结 论

为解决飞机在高空飞行时,由于成像系统与地面目标景物的相对运动产生的图像模糊问题,本文提出了一种图像恢复技术,通过 Wiener 滤波及最优窗技术,有效减小边缘误差,提高图像恢复质量。

实验结果表明,通过图像复原技术,可以实现 1 个像元的恢复精度,有效地解决航空成像系统由于运动造成的视频图像模糊问题,较好地恢复原始清晰图像,有效地提高和改善图像质量。在运算时间方面,由于计算复杂,运动模糊图像清晰化处理时间较长,通过算法优化和采用硬件 DSP 处理技术,可以进一步提高图像处理速度,满足实时要求。

参考文献:

- [1] 贾平,张葆. 航空光电侦察平台关键技术与发展[J]. 光学 精密工程,2003,11(1):82-88.
JIA P,ZHANG B. Critical technologies and their development for airborne opto-electronic reconnaissance platforms [J]. *Optics and Precision Engineering*,2003,11(1):82-88. (in Chinese)
- [2] 谷口庆治. 数字图像处理[M]. 北京:科学出版社,2002.
TANIGUCHI K. *Digital image processing*[M]. Beijing:Science Press,2002. (in Chinese)
- [3] 李智勇等. 动态图像分析[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
LI ZH Y,*et al.* *Moving image analysis*[M]. Beijing:National Defence Industry Press,1999. (in Chinese)
- [4] 沈宏海,刘晶红,贾平. 摄像稳定技术[J]. 光学 精密工程,2001,9(2):115-120.
SHEN H H,LIU J H,JIA P. Overview of image stabilization[J]. *Optics and Precision Engineering*,2001,9(2):115-120. (in Chinese)
- [5] 容观澳编著. 计算机图像处理[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
RONG G A. *Computer image processing*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)
- [6] A. Murat tekalp 著,崔之祜,译. 数字视频处理[M]. 北京:电子工业出版社,1998.
A. Murat tekalp. *Digital video processing*[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [7] 王晓红,赵蓉椿. 任意方向运动模糊的消除[J]. 中国图像图形学报,2000;5(6):525-529.

WANG X H, ZHAO R CH. Restoration of arbitrary direction motion-blurred images[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2000, 5(6): 525-529. (in Chinese)

- [8] TAN K C, LIM H, TAN B T G. Restoration of real-world motion-blurred images[J]. *CVGIP*, 1991, 53: 291-299.
- [9] 孙仲康 编著. 快速傅里叶变换及其应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1982.
SUN ZH K. *Fast Fourier transform and its application*[M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 1982.
- [10] LIM H, TAN K CH, TAN B T G. Edge errors in inverse and Wiener filter restorations of motion-blurred images and their windowing treatment[J]. *CVGIP*, 1991, 53: 186-195. (in Chinese)
- [11] TAN K CH, LIM H, TAN B T G. Windowing techniques for image restoration[J]. *CVGIP*, 1991, 53: 491-500.
- [12] 孙辉, 张葆, 刘晶红. 基于维纳滤波的运动模糊消除算法及其在航空成像系统中的应用[J]. *光学 精密工程*. 2005, 13(6): 735-740.
SUN H, ZHANG B, LIU J H. Restoration of motion-blurred image based on Wiener filter and its application in aerial imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*. 2005, 13(6): 735-740. (in Chinese)

作者简介: 贾 平(1964—)男, 吉林延吉人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员, 主要研究方向为航空成像与测量仪器技术。