

# 低空动态成像位移矢量探测方法

崔红霞<sup>1</sup> 刘丽<sup>2</sup> 刘畅<sup>1</sup>

<sup>1</sup>渤海大学信息科学学院, 辽宁 锦州 121013

<sup>2</sup>武汉大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430070

**摘要** 为补偿像移、提高影像的质量,需要准确探测影像间的像平面位移矢量。在给出星载相机像移矢量测量常用的联合变换相关基本原理的基础上,提出一种改进的联合变换相关的方法。提出改进的适用于低空影像的自反馈模糊边缘检测方法,以实现输入图像预处理;通过消除 0 级衍射峰,以质心法提取互相关峰的坐标,实现互相关峰高精度探测。利用仿真和真实低空成像实验对该方法的测量精度和性能进行了分析。仿真表明,该方法对于运动模糊在 0~10 pixel 范围内,高斯噪声小于等于 0.002 时,影像间像位移在 0~20 pixel 时,探测精度可控制在 0.03 pixel 以内。真实实验进一步表明,本文方法像移测量精度可达到 0.2 pixel。该方法能够高精度、稳健地探测低空影像的像位移矢量。

**关键词** 遥感; 图像处理; 联合变换相关; 像移测量; 模糊边缘检测; 低空遥感; 无人机

**中图分类号** TN751

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0904008

## Displacement Vector Detection Method for Low Altitude Dynamic Imaging

Cui Hongxia<sup>1</sup> Liu Li<sup>2</sup> Liu Chang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Information Science, Bohai University, Jinzhou, Liaoning 121013, China

<sup>2</sup>College of Resource and Environment, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** To compensate the image motion and improve the image quality, it is necessary to accurately detect the displacement vector between images. Based on the principle of image motion vector measurement with joint transform correlator, an improved method is proposed. To detect the edges of low altitude images, the improved self-feedback fuzzy edge detection method is presented to realize the input image preprocessing. By eliminating the 0th diffraction peak, the coordinates of relative correlation peaks are extracted with centroid method, and the high-precision detection of relative correlation peaks is achieved. The measurement accuracy and performance of proposed techniques are analyzed with simulation test and real low imaging experiments. Simulation tests show that the detection accuracy can be controlled within 0.03 pixel, when motion blur in the range of 0~10 pixel, Gaussian noise is less than 0.002 and the displacement between image in 0~20 pixel. Experimental results further show that the measurement accuracy of the proposed method reaches 0.2 pixel, and it can detect the image displacement vector of low altitude images with high accuracy and robustness.

**Key words** remote sensing; image processing; joint transform correlation; image motion measurement; fuzzy edge detection; low altitude remote sensing; unmanned aerial vehicle

**OCIS codes** 280.4788; 100.4145; 330.5000;

## 1 引言

近十年来,随着低空领域的逐渐开放,无人机低空遥感技术发展迅速,无人机云下低空飞行,可获取高分辨率的数字影像<sup>[1-3]</sup>。由于飞行平台相对于地面的线性运动、平台飞行姿态变化(俯仰、翻滚、偏航)、飞机发动机以及活动部件的振动等复杂的运动,相机曝光时间内获取图像的过程是个复杂动态的过程,运动导致图

**收稿日期:** 2016-05-04; **收到修改稿日期:** 2016-05-19

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(41371425)

**作者简介:** 崔红霞(1969—),女,博士,教授,硕士生导师,主要从事无人机低空遥感和摄影测量技术和应用方面的研究。

E-mail: lnchx316@sohu.com

像模糊、图像分辨率降低、图像质量恶化。调制传递函数(MTF)是描述成像分辨率的直接方式,分辨率越高,MTF受运动模糊的影响就越严重<sup>[4]</sup>。为了消除或者减小运动模糊,一个直接的方法是缩短曝光时间<sup>[3]</sup>,但缩短曝光时间会引起图像信噪比降低,图像的质量就随之下降。因此,为了补偿动态航摄曝光时间内的运动,需要采用实时的像移补偿方法。已有的像移补偿方法有:机械式像移补偿<sup>[5-6]</sup>、光学式像移补偿<sup>[7]</sup>、电子式像移补偿<sup>[8]</sup>以及图像恢复像移补偿<sup>[9]</sup>,但无论采用哪种补偿方法,准确探测像平面的运动位移矢量(以下简称像移,区别于单幅影像上的运动模糊导致的像移)是采取相应像移补偿方法的前提条件。光学联合变换相关器(JTC)是空间相机像位移测量常用的硬件装置,一般通过在相机焦面上安装高帧频的辅助面阵图像传感器,在相机运动成像时高速采集图像序列,并利用JTC对相继采集到的两幅时序图像进行相关运算,测量互相关峰,达到像移测量的目的<sup>[10-14]</sup>。JTC在星载相机位移矢量探测方面具有诸多优势,包括位移矢量测量精度高、计算速度快等优点,在仿真和地面实验方面取得了进展,但是该算法的硬件实现系统联合变换相关器在算法的检测精度、实时性、光机电的设计方面仍然存在一些问题,实际应用于星载相机图像补偿系统中尚有差距。

与星载空间相机不同,无人机平台体积小、载荷和功耗有限,其携带的影像采集设备不能直接采用联合变换相关器的硬件系统探测位移矢量,本文探索软件的方法实现联合变换相关算法,达到准确探测低空动态成像位移矢量的目的,进而为像移补偿系统的构建提供技术依据,适用于面向航空摄影测量与遥感应用的离线数据处理的方式。联合变换相关算法是以前后两帧之间的互相关谱图像作为最终的输出结果,由于输入图像信噪比低、图像本身模糊以及复杂的背景干扰,常常存在较大相关旁瓣以及较宽的相关峰,造成±1级衍射效率低下,影响相关峰的探测。为解决这些问题,国内外学者提出了许多改进相关峰探测的方法,一般可分为两类,即输入图像的预处理以及联合功率谱预处理。钱义先等<sup>[12]</sup>基于Canny算法提取输入图像的边缘的预处理,取得了很好的效果;Canny算子边缘定位精确,检测效果较好,噪声抑制能力较强,但是高斯参数以及双阈值设置不当时,容易造成图像出现伪边缘和边缘细节丢失;Lei等<sup>[15]</sup>利用小波变换来提取出图像边缘特征同时抑制噪声,但边缘和噪声都属于高频信息,容易导致边缘信息丢失。Fan等<sup>[10-15]</sup>采用二值化功率谱、条纹调制、功率谱相减调制、相移相减等方法,实现对联合功率谱的预处理。上述文献都利用JTC硬件系统进行了星载相机的仿真和半实物实验,取得了很好的仿真效果,但尚缺乏真实实验验证。

## 2 传统联合相关变换方法及其分析

传统联合变换相关器像位移测量原理如图1所示,将两帧待测量图像输入于同一平面,经过两次二维傅里叶变换,即可获得同时包含了自相关信息和互相关信息的互相关谱图像。然后采用互相关峰提取算法和质心算法确定其位置,得到参考帧与目标帧图像之间的相对位移量。

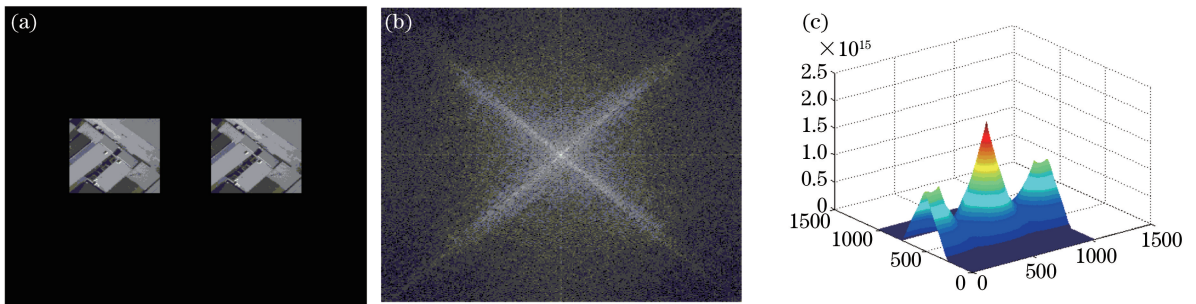


图1 联合变换相关法流程。(a) 原始输入图像; (b) 联合功率谱; (c) 三维相关输出

Fig. 1 Flow chart of joint transform correlation method. (a) Original input image; (b) joint power spectrum; (c) three-dimensional correlation output

参考帧和目标帧的灰度分布函数分别用  $f_1(x, y)$  和  $f_2(x, y)$  表示,参考图像和目标图像分别置于输入平面上坐标原点两侧,参考帧图像以  $(-a, 0)$  为中心坐标位置,目标帧图像以  $(a, 0)$  为中心坐标位置,目标帧图像  $f_2(x, y)$  相对于参考帧图像  $f_1(x, y)$  沿  $x$  和  $y$  方向的位移量分别是  $\Delta x$  和  $\Delta y$ ,则形成的联合输入函数形式为

$$f(x, y) = f_1(x + a, y) + f_2(x - a - \Delta x, y - \Delta y) \quad (1)$$

联合输入函数  $f(x, y)$  进行第一次傅里叶变换, 得联合频谱函数为

$$T(u, \nu) = \iint [f_1(x + a, y) + f_2(x - a - \Delta x, y - \Delta y)] \exp[-j2\pi(xu + y\nu)] dx dy = T_1(u, \nu) \cdot \exp(j2\pi ua) + T_2(u, \nu) \cdot \exp\{-j2\pi[u(a + \Delta x) + \nu\Delta y]\}, \quad (2)$$

式中  $T_1(u, \nu)$  和  $T_2(u, \nu)$  分别是  $f_1(x, y)$  和  $f_2(x, y)$  的傅里叶频谱。

联合频谱取模获得联合功率谱, 即联合输入函数  $f(x, y)$  的傅里叶频谱模的平方:

$$|T(u, \nu)|^2 = T_1(u, \nu) \cdot T_1^*(u, \nu) + T_2(u, \nu) \cdot T_2^*(u, \nu) + T_1(u, \nu) \cdot T_2^*(u, \nu) \exp\{j2\pi[u(2a + \Delta x) + \nu\Delta y]\} + T_1^*(u, \nu) \cdot T_2(u, \nu) \exp\{-j2\pi[u(2a + \Delta x) + \nu\Delta y]\}. \quad (3)$$

联合功率谱  $|T(u, \nu)|^2$ , 进行第二次傅里叶变换, 相关输出为

$$c(x, y) = \iint |T(u, \nu)|^2 \exp[-j2\pi(ux + \nu y)] du dv = m(x, y) \otimes m(x, y) + n(x, y) \otimes n(x, y) + m(x, y) \otimes n(x, y) * \delta(x - 2a - \Delta x, y - \Delta y) + n(x, y) \otimes m(x, y) * \delta(x + 2a + \Delta x, y + \Delta y), \quad (4)$$

式中  $\otimes$  代表相关运算,  $*$  代表卷积运算。从(4)式可以看出, 第一项和第二项分别表示参考影像以及目标影像的自相关项; 第三项和第四项表示两影像之互相关, 其中心分别处于输出平面的  $(\pm 2a \pm \Delta x, \pm \Delta y)$  处, 其中包含参考影像和目标影像之间的相对位移量  $(\Delta x, \Delta y)$ ,  $2a$  是互相关峰离开中心原点的距离, 与输入平面上参考影像与目标影像的相对位置有关, 通过求出其与理想位置  $(\pm 2a, 0)$  的偏移量, 即可求出两幅影像的相对位移量。

显然, 联合变换相关法测量像位移的基本原理是探测图像间的相关性获取所需的像位移量。联合变换相关算法取决于输入图像的频域特征, 当背景复杂或者运动成像时, 图像信噪比下降, 导致互相关峰钝化, 且自相关峰与互相关峰的旁瓣会影响影像间像位移的高精度探测。

### 3 联合变换相关方法的改进

为了提高像位移矢量的测量精度。一种是对待输入影像进行预处理, 如钱义先等<sup>[12,15]</sup>采用边缘图像替代原始影像; 另一种对联合变换过程中获得的功率谱进行增强处理, 如 JTC 硬件系统中常采用时间调制的光学相关法、条纹调制滤波、振幅调制、功率谱相移法、功率谱二值化等<sup>[12,16]</sup>。提出一种改进的联合相关变换方法, 包括改进的 Pal、King 边缘检测算法进行图像预处理, 自相关峰的消除以及互相关峰的亚像素高精度提取方法, 如图 2 所示。

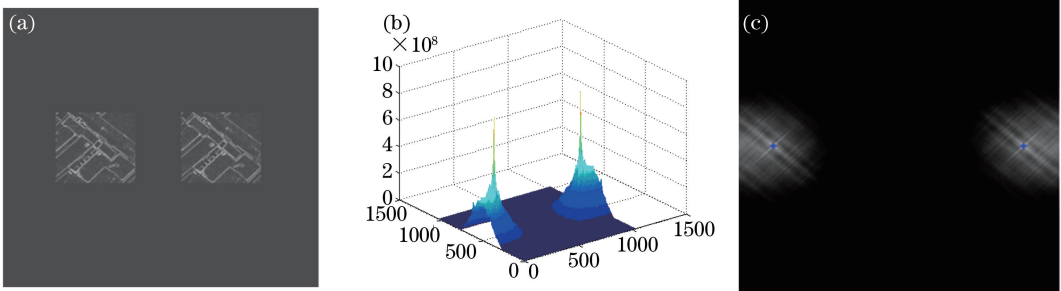


图 2 改进的联合相关变换流程。(a) 输入图像; (b) 三维相关输出; (c) 互相关峰质心探测

Fig. 2 Flow chart of the improved joint transform correlation. (a) Input image; (b) three-dimensional correlation output; (c) detection of central points for cross-correlation peaks

#### 3.1 改进的 Pal、King 模糊边缘检测方法

基于模糊理论的模糊边缘检测算法, 其中最具代表性的是由 Pal 和 King 提出的模糊边缘, 即 Pal 算法<sup>[17-18]</sup>。其主要思想是用隶属度函数将图像映射成一个模糊隶属度矩阵; 在模糊空间进行增强运算, 即为提高影像边缘附近像素灰度的对比度, 对  $P_{ij}$  进行迭代的非线性增强变换得到  $P'_{ij}$ ; 利用逆变换  $x'_{ij} = G^{-1}(P'_{ij})$  实现模糊特征空间到图像空间域的转换; 利用 min 或 max 算子提取边缘。当图像的边缘存在模糊不确定性时, 该算法优于传统边缘检测算法; 此外, 提出了改进的算法, 即以简单的隶属函数替代传统 Pal、King 方法

的隶属度函数,代表函数有简单函数<sup>[19-20]</sup>和简单 S 型函数<sup>[21]</sup>。

传统 Pal 隶属度函数复杂,原图像中大量灰度值被切削及简单线性函数容易导致图像层次模糊,隶属度函数中的参数设置没有理论指导规则,随机性大等<sup>[19-21]</sup>。本文提出改进的 Pal、King 模糊边缘检测法,具体算法步骤如下:

1) 定义新的隶属度函数

$$P_{ij} = \left\{ \log_2 \left[ 1 + \left( \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \right)^{F_e} \right] \right\}^{F_e}, x_{\min} \leq x_{ij} \leq x_{\max}, \quad (5)$$

式中  $P_{ij}$  为模糊隶属度值,  $x_{\min}$  为最小灰度级,  $x_{\max}$  为最大灰度级,  $F_e$  为指数因子且  $F_e \geq 2$ 。显然,整幅图像的隶属度值属于  $[0, 1]$ ,所有的灰度信息都能进行模糊增强。

如图 3 所示,  $f_0$  为 Pal、King 模糊隶属度函数<sup>[17-18]</sup>、 $f_1$  为简单隶属函数 1<sup>[19-20]</sup>以及  $f_2$  为简单隶属函数 2<sup>[21]</sup>,  $f_3$  为(5)式隶属度函数,其中  $f_3$  更接近 Pal、King 隶属度函数形态,其值域为  $[0, 1]$ 弥补了 Pal、King 算法值域为  $(a, 1]$  ( $a > 0$ )导致低灰度值被硬性切削的不足,属于 Pal 隶属度函数的改进算子。

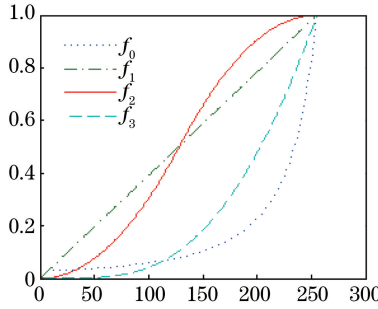


图 3 模糊隶属度函数形态

Fig. 3 Shape of fuzzy membership function

2) 自适应的模糊增强方法

根据 Pal、King 模糊边缘检测的流程,要求图像在模糊特征空间进行非线性增强处理,且经过这种非线性处理的模糊增强过程后必须增大(当  $P_{ij} \geq P_e$  时)或减少(当  $P_{ij} \leq P_e$  时),其中渡越值  $P_e$ 。一般设置为 0.5 且固定不变,不能满足不同类型图像边缘检测的要求,使用该算法对不同图像进行边缘检测时效果存在很大差异<sup>[19-21]</sup>。本文首先基于 Otsu 算法的区域分割来确定最佳分割阈值  $T$ ,并计算渡越值的初值  $P_e^0 = F(x_e)$ ;定义模糊增强算子如下:

$$\begin{cases} T_r(P_{ij}) = \frac{P_{ij}^2}{P_e}, 0 \leq P_{ij} \leq P_e \\ T_r(P_{ij}) = \frac{2P_{ij} - P_{ij}^2 - P_e}{1 - P_e}, P_e \leq P_{ij} \leq 1 \end{cases}, \quad (6)$$

令  $P_e = P_e^0 + 0.05k$ , 其中  $k \in [-10P_e^0, 20(1 - P_e^0)]$ 。利用(7)式进行迭代运算,即

$$P'_{ij} = T_r(P_{ij}) = T_1 [T_{r-1}(P_{ij})], r = 1, 2, 3 \dots, \quad (7)$$

式中  $r$  一般取 3。

3) 模糊特征空间转换到图像空间域:对  $P'_{ij}$  做逆变换,获得模糊增强后的影像像素  $(i, j)$  的灰度值为  $x'_{ij}$ ,即

$$x'_{ij} = G^{-1}(P'_{ij}) = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min}) [(2P'_{ij}/F_e - 1)^{1/F_e}]. \quad (8)$$

4) 建立基于联合相关变换的自适应反馈评价准则:提出联合变换相关的输出互相关峰值与自相关峰的比值作为判别边缘检测效果是否理想的准则,定义如下:

$$E_k = \max \left( \frac{Cp_i}{Ap_i} \right), \quad (9)$$

式中  $Cp_i$  是第  $i$  次迭代处于理想互相关峰  $(\pm 2a, \pm 2b)$  邻域窗口内(窗口大小为 50 pixel  $\times$  50 pixel)的频谱的幅度最大值,  $Ap_i$  是处于自相关峰邻域内频谱幅度的最大值;一般来说,  $E_k$  越大,联合变换相关算法的检测精度越高,检测结果越稳健;再次调整  $P_e$ ,并重复以上边缘检测和联合相关变换的过程;  $P_e$  由小到大变

化,  $E_k$  随之变化, 当  $E_k$  的值由大变小时, 参数调整结束, 获得较为理想的边缘检测结果、联合功率谱以及进入联合变换相关峰。为了进一步探测得到高精度的联合变换相关峰, 利用得到的较为理想的联合功率谱, 继续进行消除自相关峰、高精度提取互相关峰的工作。

### 3.3 联合变换功率谱的互相关峰的高精度提取

图 1 为联合变换相关方法得到的相关输出图像, 绝大部分能量(80%以上)集中于两幅影像的自相关峰区域, 自相关峰的存在不仅会干扰互相关峰的精确定位, 而且自相关峰的强度越大, 其旁瓣也会越宽, 对互相关峰的干扰就越严重, 不利于像位移的精确探测。为此, 采用功率谱相减的方法, 消除自相关峰, 再取其质心作为相关峰的中心。

设输入影像的联合功率谱  $|T(u, \nu)|^2$ , 参考影像与目标影像的功率谱分别用  $|T_1(u, \nu)|^2$  和  $|T_2(u, \nu)|^2$  表示, 则根据功率谱相减法有

$$T_s(u, \nu) = |T(u, \nu)|^2 - |T_1(u, \nu)|^2 - |T_2(u, \nu)|^2 = T_1(u, \nu) \cdot T_2^*(u, \nu) \exp\{j2\pi[u(2a + \Delta x) + \nu\Delta y]\} + T_1^*(u, \nu) \cdot T_2(u, \nu) \exp\{-j2\pi[u(2a + \Delta x) + \nu\Delta y]\}, \quad (10)$$

式中  $T_s(u, \nu)$  表示从联合功率谱中减去输入影像中参考影像和目标影像的功率谱之后得到的联合功率谱。对  $T_s(u, \nu)$  执行第二次傅里叶变换, 则在输出平面上显示的相关输出为

$$c'(x, y) = m(x, y) \otimes n(x, y) * \delta(x - 2a - \Delta x, y - \Delta y) + n(x, y) \otimes m(x, y) * \delta(x + 2a + \Delta x, y + \Delta y). \quad (11)$$

可以看出, 在相关输出平面上只存在两个含有相对位移量的互相关峰, 因此, 可提高像位移探测精度和效率。再进一步使用质量中心算法计算出相关峰坐标, 用该坐标值与理论相关峰位置相减, 得到位移量。如图 2 所示, 自相关峰被滤除, 互相关峰更尖锐, 质心提取精度更高。

## 4 实 验

为评估所提像位移测量方法的性能, 进行了相应的仿真和真实实验。令传统的联合相关变换法为方法 I; Canny 的边缘检测图像作为输入图像, 为方法 II; 本文方法的边缘检测作为输入图像, 为方法 III。仿真实验以像位移测量值与真值的绝对误差作为定量精度评价指标; 真实实验中像位移矢量的真值未知, 以相邻 3 幅影像作为一组, 令  $(\Delta x_{j,k}, \Delta y_{j,k})$  为影像  $j, k$  间的像位移矢量, 单位为 pixel; 测量误差定义为

$$\nu_{xj} = \Delta x_{j,j+1} + \Delta x_{j+1,j+2} - \Delta x_{j,j+2}, \quad \nu_{yj} = \Delta y_{j,j+1} + \Delta y_{j+1,j+2} - \Delta y_{j,j+2}. \quad (12)$$

理想状态下,  $\nu_{xj} = 0, \nu_{yj} = 0$ 。假如有  $n$  个像对, 则像位移探测总体的相对误差为

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\nu_{xj})^2}, \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\nu_{yj})^2}, \quad (13)$$

式中  $\sigma_x, \sigma_y$  分别为  $x, y$  (列、行) 方向的像位移测量中误差。

### 4.1 仿真实验

仿真中使用的影像是一幅低空遥感影像, 分辨率大小为  $4368 \text{ pixel} \times 2912 \text{ pixel}$ , 如图 4 所示。选取图片中央区域模拟生成时序影像, 对原始影像以相同的坐标偏移量(1 pixel)截取大小为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  的 41 幅子影像, 任选两幅影像  $P_i$  和  $P_j, i=1, 2, \dots, j=1, 2, \dots$ , 组成相对像移为 20 pixel 的 20 个像对; 利用仿真的方法, 对上述子影像加入高斯噪声(方差为 0.002)、先后加入 1~10 pixel 的前向运动模糊(航空摄影主要的模糊来源), 得到不同信噪比的 10 组影像。利用方法 I、方法 II 和方法 III 测定 10 组影像的像位移矢量, 仿真实验证明, 对于理想像对(没有添加高斯噪声和运动模糊), 三种方法的测量误差都小于 0.03 pixel。

在低信噪比时, 方法 I 的抗噪能力差, 图 1 为高斯噪声方差为 0.001, 运动模糊干扰为 1 pixel 的图像, 其两个互相关峰都钝化, 检测失败; 方法 II、方法 III 的抗噪能力强, 检测精度高, 没有明显的差异, 检测精度不随相对像移、运动模糊而变化, 各像对的相对像移检测误差都小于 0.03 pixel。如图 5 所示, 理论相对像位移为 20 pixel, 人为添加的运动模糊为 10 pixel, 高斯噪声为 0.002 时, 方法 II、方法 III 的边缘图像; 图 6 为对应两种方法的互相关峰输出, 相关峰都尖锐, 没有明显差异。但是, 飞行平台低空运动形式复杂、除线运动、角运动还有复杂的振动, 很难用仿真的形式模拟各种运动的复合影响。因此, 继续采用真实实验验证方法的可行性。

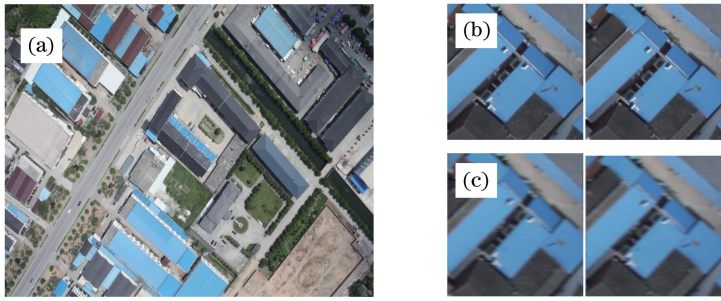


图 4 低空影像。(a) 原始低空影像；(b) 原始子影像对；(c) 仿真有噪声和运动模糊的影像对

Fig. 4 Low altitude images. (a) Original image; (b) sub-image pair; (c) simulated images with noise and blur

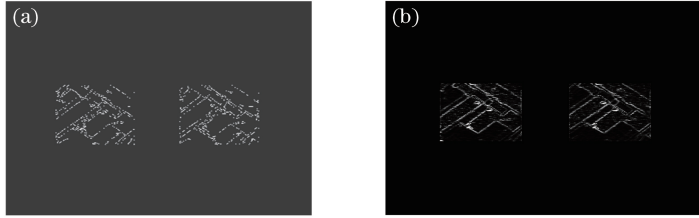


图 5 边缘提取。(a) Canny 边缘提取；(b) 改进 Pal, King 边缘提取

Fig. 5 Edge detection. (a) Edge from Canny method; (b) edge from the improved Pal, King method

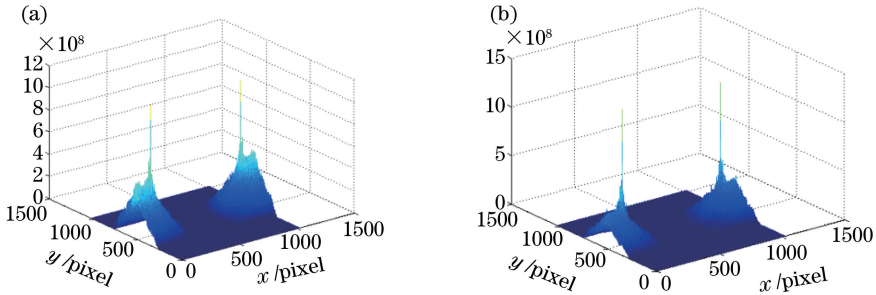


图 6 互相关峰输出。(a) 方法 II；(b) 方法 III

Fig. 6 Output of cross-correlation peaks. (a) Method II; (b) method III

## 4.2 真实实验

无人直升机携带高清视频摄像机(采集频率为 50 frame/s,分辨率为 1920 pixel $\times$ 1080 pixel)采集广州某地区的视频序列,由于未采用任何像移补偿装置,各种复杂的运动导致影像模糊、图像信噪比低。利用本文方法探测相对像移矢量,以分析直升机的运动对高分辨率影像的影响,并为像移补偿系统的设计提供技术参考。选取相邻的 50 frame 影像,分别截取中央相同区域的 256 pixel $\times$ 256 pixel 大小的子影像实施实验。

1) 基于方法 II 和方法 III 分别测量相邻影像的像位移,测量结果如图 7(a)、(b)所示,两种方法  $x$ 、 $y$  方向的较差如图 7(c)所示。

由图 7(a)~(c)可知,两种方法测定的 26 个像对  $x$ 、 $y$  方向的测量结果基本一致,两个方向的较差均小于 0.2 pixel; 12 个像对的  $x$  或  $y$  方向的较差大于 5 pixel,10 个像对  $x$  或  $y$  方向的较差为 0.2~5 pixel 范围内。由于两种方法测定的 26 个像对的像移矢量一致,可认为其接近真值,且测量精度可达 0.2 pixel。其他像对的测量结果存在差异,其原因是其中方法 II 的抵抗运动模糊、噪声的能力较低,导致测量的可靠性差。

2) 为进一步分析像移矢量探测方法的可靠性,将每三幅影像组成一组进行相对校验。如图 8(a)、(b)所示分别为方法 II、方法 III 探测的 49 组三影像的  $x$ 、 $y$  方向误差残差对比。

对比分析图 8(a)、(b)可知,对三像探测时,方法 II 和方法 III 之间的探测结果存在较大的差异,其原因在于,低空动态航摄时,线运动、角运动、复杂振动导致隔帧(第一帧和第三帧)影像之间的相关性比相邻影像之间的相关性减弱,导致方法 II 或者方法 III 输出的互相关峰钝化,无法探测到相对像移矢量。方法 II 的  $x$ 、 $y$  方向的相对测量误差极不稳定,波动较大;方法 III 的  $x$ 、 $y$  方向的相对测量误差稳定,在第 20 个三像对出

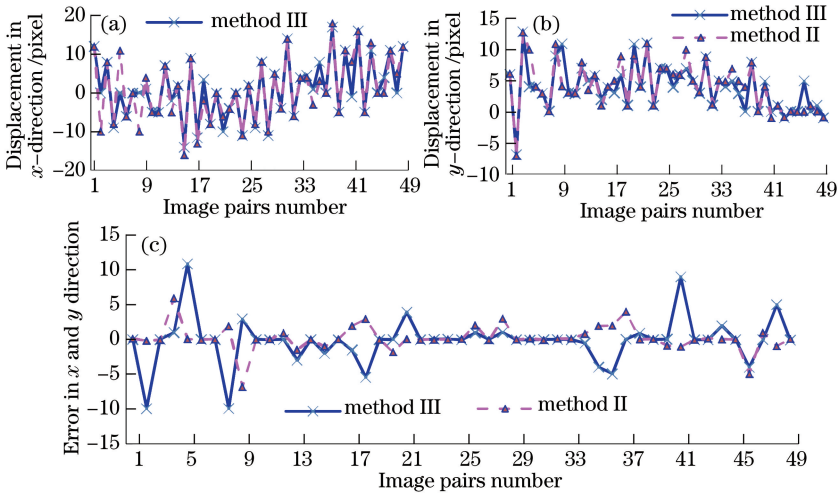


图 7 像移矢量对比。(a)  $x$  方向测量值；(b)  $y$  方向测量值；(c) 两种测量方法的较差

Fig. 7 Comparison of image motion vector. (a) Measurement value in  $x$ -direction; (b) measurement value in  $y$ -direction; (c) relative difference of two methods

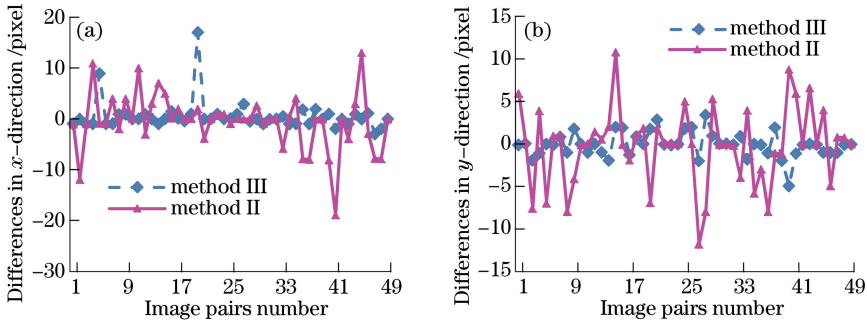


图 8 三影像探测较差。(a)  $x$  方向的较差；(b)  $y$  方向的较差

Fig. 8 Relative differences of three images. (a) Differences in  $x$ -direction; (b) differences in  $y$ -direction

现粗差时(此时,方法 II 也出现了粗差),都围绕中心轴微小波动。误差大于 2 倍中误差的点视为粗差,排除粗差后重新统计两种方法的测量精度为:方法 III,  $\sigma_x = 1.199649$  pixel,  $\sigma_y = 1.364993$  pixel;方法 II,  $\sigma'_x = 5.292215$  pixel,  $\sigma'_y = 4.310584$  pixel。实验结果表明,方法 II 和方法 III 都可以用来进行相对像移的探测,但方法 III 的测量精度高于方法 II,且适应性更强,稳健性更高,测量结果更可靠。选取相邻的三幅影像  $I_1, I_2, I_3$  组成三个像对  $I_{1,2}, I_{2,3}, I_{1,3}$  原始影像如图 9(a)所示。图 9(b)为改进 Pal、King 边缘探测方法获取的边缘,图 9(c)为三个像对的三维互相关峰输出,其相关峰尖锐。利用质心法探测三个相关峰的坐标,进而计算三个像对的像移矢量;利用(12)式计算其相对测量误差,  $\nu_x = -0.94876$  pixel,  $\nu_y = 0.02542$  pixel;其中  $y$  方向的相对测量精度可达 0.02 pixel,  $x$  方向的相对测量精度较低,仍小于 1.0 pixel。

## 5 结 论

无人机平台体积小、载荷、功耗有限,不能直接采用联合变换相关器探测低空运动影像间的像平面位移矢量,基于面向航空摄影测量与遥感应用的离线数据处理方式,提出一种适用于低空运动成像的软联合相关变换器。针对高分辨率航空影像地物复杂、纹理丰富、灰度层次丰富、背景噪声以及密度大、可能存在模糊的边缘特性的特点,提出一种新的隶属函数。该函数形态接近于 Pal、King 的隶属函数,但弥补了 Pal、King 隶属函数灰度覆盖空间不足的缺陷,以及其他改进算法隶属函数简单可能导致某些图像区域灰度层次模糊的不足。通过建立最佳隶属度阈值的判别规则,形成自反馈的模糊边缘检测方法;通过消除 0 级衍射的自相关峰,减少互相关峰提取的噪声干扰,提高互相关峰自动提取的精度。对比仿真实验证明,本文方法(方法 III)与已有的基于 Canny 边缘检测的联合相关变换方法(方法 II)具有同等的精度,都优于基于原始图像输入的

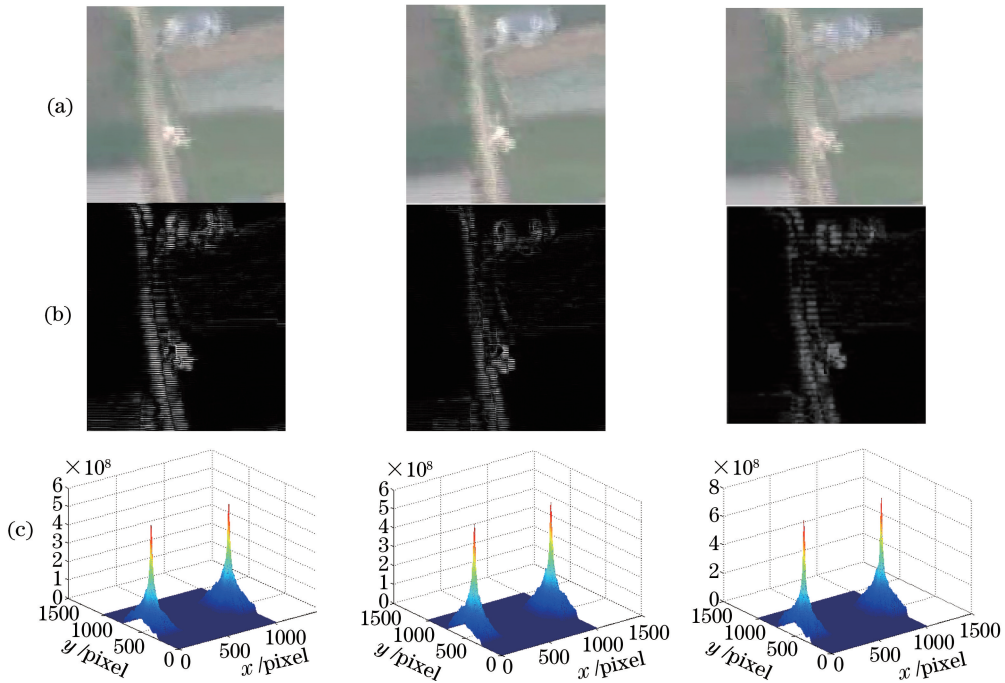


图 9 利用方法 III 的三个像对的联合变换相关。(a) 真实子影像; (b) 改进的 Pal、King 边缘; (c) 互相关峰输出  
 Fig. 9 Joint transform correlation results of three image pairs based on method III. (a) Real sub-images; (b) improved Pal, King edge; (c) output of cross-correlation peaks

联合相关变换方法(利用傅里叶变换镜的光学联合相关变换器)。由于飞行平台低空运动形式复杂,除线运动、角运动还有复杂的振动,很难用仿真的形式模拟各种运动的复合影响,将本文方法应用于无人直升机携带高清视频摄像机采集的 50 帧视频序列影像间的相对像移矢量探测,其中 26 个像对的探测精度与方法 II 一致,小于 0.2 pixel;三影像的对比实验则表明,本文方法在低空复杂运动导致的影像信噪比差异较大、图像间相关性减弱时,其适应性和稳健性优于基于 Canny 边缘检测的联合变换相关方法。利用该方法,项目组正在进行无人机运动成像平台的像移补偿技术和实用系统的研究。

参 考 文 献

- 1 Cui Hongxia, Lin Zongjian, Sun Jie. Research on UAV remote sensing system[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2005, (5): 11-14.  
 崔红霞, 林宗坚, 孙 杰. 无人机遥感监测系统研究[J]. 测绘通报, 2005, (5): 11-14.
- 2 Cui Hongxia, Lin Zongjian, Yang Hong, et al. Multiview photogrammetry using low altitude digital images from unmanned airship[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(7): 73-78.  
 崔红霞, 林宗坚, 杨 洪, 等. 无人飞艇低空数码影像多视摄影测量[J]. 光电工程, 2008, 35(7): 73-78.
- 3 Lin Zongjian, Xie Feifei, Su Guozhong. Accuracy analysis of low altitude photogrammetry with wide-angle camera[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(10): 991-997.  
 林宗坚, 解斐斐, 苏国中. 宽角相机低空航测的精度分析[J]. 测绘学报, 2014, 43(10): 991-997.
- 4 Du Yanlu, Ding Yalin, Xu Yongsan, et al. Dynamic modulation transfer function analysis and research under sinusoidal vibration[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0711001.  
 杜言鲁, 丁亚林, 许永森, 等. 正弦振动下动态调制传递函数分析与研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0711001.
- 5 Li Yanwei, Yuan Guoqin. Accuracy analysis of forward image displacement compensation device for aerial scan color CCD camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2439-2443.  
 李延伟, 远国勤. 面阵彩色航空遥感相机前向像移补偿机构精度分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2439-2443.
- 6 Zhang Yuxin, Liu Yu, Ge Wenqi. Development and prospect of image motion compensation technology[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(2): 112-118.  
 张玉欣, 刘 宇, 葛文奇. 像移补偿技术的发展与展望[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 112-118.
- 7 Zhao Junli, Wu Yiming, Gao Limin, et al. Technology research on image motion compensation of the rotating double



- optical wedge[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1506-1511.
- 赵军丽, 吴易明, 高立民, 等. 旋转双光楔系统用于像移补偿的技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(5): 1506-1511.
- 8 Zhang Dexin. System design and image mosaicing for array aerial reconnaissance CCD camera [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.  
张德新. 面阵航侦 CCD 相机系统设计及其图像拼接技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- 9 Hu Lin. Algorithms of motion estimation based on correlation speed measurement and IMC for remote sensing images [D]. Xi'an: Xidian University, 2010.  
胡 琳. 基于相关测速的二维遥感图像运动估计和像移补偿算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- 10 Janschek K, Tchernykh V. Optical correlator for image motion compensation in the focal plane of a satellite camera[J]. *Space Technology*, 2001, 21(4): 127-132.
- 11 Fan Chao, Li Yingcai, Fu Hongliang, *et al.* Research on measurement method of image motion of space camera based on optical correlator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0712006.  
樊 超, 李英才, 傅洪亮, 等. 光学相关法测量空间相机像移的性能研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0712006.
- 12 Qian Yixian, Hong Xueting, Jin Weimin. Motion measurement of dual-CCD imaging system based on optical correlator [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0708002.  
钱义先, 洪雪婷, 金伟民. 光学相关的双 CCD 成像系统图像运动位移测量[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0708002.
- 13 Ge Renwei, Wu Qingwen, Wang Yun, *et al.* The study of image motion measurement based on joint transform correlator [J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(3): 215-219.  
葛任伟, 吴清文, 王 运, 等. 基于联合变换相关器的像移测量方法研究[J]. *计算机仿真*, 2010, 27(3): 215-219.
- 14 Janschek K, Tchernykh V, Dyblenko S, *et al.* Compensation of focal plane image motion perturbations with optical correlator in feedback loop[J]. *Proceeding of SPIE*, 2004, 5570: 280-288.
- 15 Lei F, Iton M, Yatagai T. Adaptive binary joint transform correlator for image recognition[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(35): 7416-7421.
- 16 Fan Chao, Sun Ningning, Liang Yitao, *et al.* Measurement of the sub-pixel image drift based on time modulated optical correlator[J]. *Electronics optics & Control*, 2010, 17(1): 73-76.  
樊 超, 孙宁宁, 梁义涛, 等. 基于时间调制的光学相关法测量亚像元像移研究[J]. *电光与控制*, 2010, 17(1): 73-76.
- 17 Pal S K, King R A. On edge detection of X-ray images using fuzzy sets[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1983, 5(1): 69-77.
- 18 Pal S K, King R A. Image enhancement using fuzzy sets[J]. *Electronics Letters*, 1980, 16(10): 376-378.
- 19 Luo Yuling, Tang Xianying. Fuzzy edge detection algorithm based on threshold optimization[J]. *Control & Management*, 2007, 23(2-3): 286-288.  
罗玉玲, 唐贤英. 基于阈值化的图像边缘检测算法[J]. *微计算机信息*, 2007, 23(2-3): 286-288.
- 20 Liu Jinhua, Tang Jingxin. An improved fast edge detection based on fuzzy sets[J]. *Journal of System Simulation*, 2003, 15(2): 273-274.  
刘金华, 唐竞新. 一种改进的模糊边缘检测快速算法[J]. *系统仿真学报*, 2003, 15(2): 273-274.
- 21 Wu Degang, Zhang Yubo, Cao Libo. Improved algorithm of fuzzy edge detection[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(12): 1374-1377.  
吴德刚, 张宇波, 曹立波. 一种改进的模糊边缘检测算法[J]. *激光与红外*, 2010, 40(12): 1374-1377.