

文章编号 1004-924X(2010)02-0470-07

# 图像自动拼接融合的优化设计

冯宇平<sup>1,2</sup>, 戴明<sup>1</sup>, 孙立悦<sup>3</sup>, 张威<sup>1,2</sup>

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; 3. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 为了扩大摄像机拍摄图片的视场范围, 提出了一种结合频域和空域进行图像序列自动拼接融合的优化算法。基于频域相位相关方法改进排序并确定重叠区域, 使用改进的 Harris 算子在空间域提取图像角点(无需人工设定阈值), 并通过双向最大互相关系数匹配获得初始特征点对; 然后, 用 RANSAC 法实现精确匹配; 最后, 利用图像均值结合线性加权函数实现图像的整体亮度调整和融合拼接。实验结果表明, 该优化算法排序过程简单有效, 特征提取匹配过程不仅提高了拼接成功率, 其单次拼接时间较现有算法也提高了 40% 左右; 另外, 该算法较好地解决了图像间对应点难以确定的问题, 对光照变化图像的拼接融合取得了满意的效果。

**关键词:** 图像拼接; 自动排序; 角点检测; 图像融合

中图分类号: TP391 文献标识码: A

## Optimized design of automatic image mosaic

FENG Yu-ping<sup>1,2</sup>, DAI Ming<sup>1</sup>, SUN Li-yue<sup>3</sup>, ZHANG Wei<sup>1,2</sup>

1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)*

**Abstract:** In order to improve the visual field of photos, an optimized algorithm of automatic image mosaic is presented based on frequency and time domains. The frequency phase correlation is adopted to sort the unorder image sequence and to estimate the overlapping area, and an improved Harris operator is adopted to extract corners. Then, the bidirectional greatest correlative coefficient is used to obtain the initial feature point pairs, and the false feature point pairs are rejected by RANSAC. Finally, the image mean combined with the linear weight function is used to implement image mosaic. Experiment results show that this algorithm can offer a excellent sorting process and show good nomosaic results. The maching speed by proposed algorithm has improved by 40% as compared with those of traditional methods, which efficiently solves the difficulty in confirming corresponding points and achives the desired visual effect in mosaic images with notable illumination difference.

**Key words:** image mosaic; auto-sorting; corner detection; image fusion

## 1 引 言

图像拼接通过将多幅部分重叠的照片构造一个无缝、高清晰的全景图像,在不降低图像分辨率的条件下获取大视野范围的场景照片,很好地解决了广角镜等全景图获取设备的不足。目前,图像拼接技术在摄影测量、视频压缩和传输、视频的编辑和检索、虚拟现实、计算机图形学等许多领域都有着广泛的应用,具有重大的应用价值。

图像拼接算法主要在频率域和空间域<sup>[1-4]</sup>讨论。频率域方法是利用 Fourier 变换的相位相关性及其变形求解图像的变换参数;空间域方法又可以分为基于区域和基于特征的图像拼接算法。其中基于特征的方法特征匹配精确度比较高,而且它对于图像的变形、亮度变化和噪声都具有较好的适应能力,是图像拼接常用的一种方法。对基于特征的图像拼接方法的研究报道很多,如文献[5]提出在相邻帧间进行纹理特征跟踪求解参数的方法,虽然能取得较好的精度,但是纹理特征的检测跟踪计算量很大。文献[6]采用有 8 个未知参数的矩阵来描述两幅图像之间的颜色变换关系,该算法用迭代的方式解非线性方程组,所以能否正确求解完全依赖迭代初始值的设定。文献[7-8]提出的基于角点匹配的方法需要在整幅图像内提取角点和特征匹配,角点提取需要人工设定阈值,而且在拼接含有重复性纹理的图像时常会失败。上述文章都需要事先知道图像顺序或手动对图像进行排序,市场上有代表的 Panorama Maker、Photo Stitch 等全景图拼接软件也无法对顺序错乱的图像进行正确拼接,而文献[9]提出的排序算法,需要人工设定阈值,其大小难以准确估计,文献[10]的改进算法仍存在首尾图像确定过程比较麻烦,而且没有具体指定哪个为首尾图像等问题。

为了克服现有算法的种种不足,本文提出了结合频域和空域方法进行图像自动拼接融合的优化方法。在频率域通过分析相位相关的峰值大小和位置,对图像进行排序,同时估计重叠区域,用来指导空间域的角点提取和局部匹配,从而避免对整幅图像进行观测而带来的计算量大的问题。然后,用改进的 Harris 算子提取图像角点,稳健的随机采样算法(RANSAC)剔除伪特征对的干

扰,实现精匹配。最后针对普遍采用的线性加权函数对光照不一致图像处理欠佳的情况,提出用图像的均值进行图像光差调整。与前述算法相比,优化后的算法排序过程简单有效,匹配拼接成功率高,速度快,图像效果好,适应性强。

## 2 基于频域的图像序列自动排序和平移参数估计

相位相关法是基于二维傅里叶变换的性质:空间域上的平移等价于频域相位的平移。两幅图像的平移矢量可以通过它们互功率谱的相位直接计算。假设图像  $f_1(x, y)$  和  $f_2(x, y)$  简单的平移相关:

$$f_1(x, y) = f_2(x - x_0, y - y_0), \quad (1)$$

相应的傅里叶变换:

$$F_1(u, v) = F_2(u, v) e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)}, \quad (2)$$

定义它们的归一化互功率谱:

$$\frac{F_1(u, v) F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v) F_2^*(u, v)|} = e^{-j2\pi(ux_0 + vy_0)}, \quad (3)$$

其中  $F_2^*$  为  $F_2$  的复数共轭,对(3)进行傅立叶逆变换,在  $(x, y)$  空间的  $(x_0, y_0)$  处将形成一个脉冲函数  $\delta(x - x_0, y - y_0)$ ,脉冲峰值(记为  $P_{f_1 f_2}$ )位置即为两幅图像间的平移量  $x_0$  和  $y_0$ 。相位相关峰值的大小反应了两幅图像的相关性大小,两图完全相似时,其值为 1,反之为 0。如果两幅图像除平移外拥有其它的变换关系和噪声干扰时,冲激函数的能量将从单一峰值分散到若干小峰值,但其最大峰值的位置却变化很小,具备稳定性,能够为后面的角点匹配过程提供一个初始的搜索范围。相位相关可以使用 FFT 快速算法。图 1 为后面图 2 图像序列中的两幅含有平移和小角度旋转的风景照片,而且亮度差异明显,其中图像 A 人工加入了噪声,计算得到最大峰值位置即平移量  $x_0 = 117, y_0 = 5$ ,结果基本正确,另有水平平移参数  $x_0$  值大于零,说明图 A 为左图像,图像 B 为右图像。当计算出的平移参数大于图像宽度和高度的一半时,即可用该值减去图像的宽度或高度值,为真实的平移参数。

下面给出根据相位相关信息提出的改进排序方法:

(1)对给定的有  $N$  幅图像的序列,计算任一



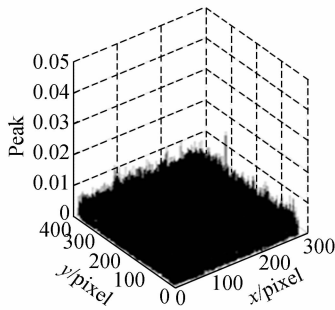
(1) 图像 A

(1) Image A



(2) 图像 B

(2) Image B



(3) 相位相关峰值图

(3) Peak of phase correlation

图 1 频域相位相关估计平移参数

Fig. 1 Translation parameter estimation by using phase correlation

两幅的互功率谱峰值大小和平移参数,其中任一图像均可得到  $N-1$  个相关度,一共有  $2N$  个相关度;

(2) 因为两图像相关峰值越大相关性越高,重叠部分越大,故寻找与每幅图像具有最大峰值的图像,根据水平平移参数  $x_0$  的正负来对两图排序,这样会得到  $N$  个排序结果(部分可能一样),然后将该结果串行连接,即可得到最后的排序结果,如果不行则对串连结果计算可能的连接顺序,

根据相关峰值的大小关系即可得到最终结果。

这样就完成了图像的自动排序,整个过程无需人工设定阈值,避免了首尾图像的复杂确定,速度快,具体见后面的实验结果分析。

### 3 空间域角点提取和匹配

#### 3.1 角点检测

特征点提取算法要求其具有很强的抗干扰能力和鲁棒性,现行的特征点提取算法比较多<sup>[11]</sup>。由于 Harris 角检测器在一致性和有效性方面均具有优良的性能,所以本算法采用 Harris 角检测器作为特征点的提取工具。基本思想是:通过在图像中平移一个小窗口,计算窗口模板内的灰度变化特性,进而检测出角点。定义图像某像素点  $(x, y)$  在偏移  $(u, v)$  下的亮度变化量  $E(u, v)$  为:

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y) [I(x+u, y+v) - I(x, y)]^2, \quad (4)$$

其中  $I(x, y)$  是图像灰度函数,  $w(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/2\sigma^2]$  是二维高斯窗口模板。将  $I(x+u, y+v)$  关于  $(x, y)$  泰勒展开,去掉高阶项,可以将  $E(u, v)$  写作:

$$E(u, v) \cong [u \quad v] \mathbf{M} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix},$$

其中

$$\mathbf{M} = \sum_{x, y} (x, y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

这里  $I_x$  和  $I_y$  分别代表图像中该点的水平和垂直方向上的导数。记  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为自相关矩阵的两个特征值,对于存在角点的区域,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的值都比较大,在任何方向平移  $E$  都会增加,由此定义角点响应函数:

$$R = \det \mathbf{M} - k(\text{trace} \mathbf{M})^2, \quad (6)$$

其中  $\det \mathbf{M} = \lambda_1 \lambda_2$ ,  $\text{trace} \mathbf{M} = \lambda_1 + \lambda_2$ ,  $k$  是尺度因子,通常  $k = 0.04 \sim 0.06$ 。这样当  $R$  取局部极大值且  $R$  大于给定阈值时的位置就是角点。

#### 3.2 改进的 Harris 算法

现有的 Harris 算法存在以下几点弊端:尺度因子  $k$  虽然有一定的经验范围,但选取仍存在一定的随机性,在图片状况不一的情况下,角点提取效果差别较大,影响到角点提取的可靠性和准确性;  $R$  阈值过小会产生过多的特征点,使匹配计算

量增加,而且有些点的特征不足,影响匹配,阈值过大特征点数目太少,影响匹配的准确性,即使  $R$  阈值大小合适,但是针对不同类型的图片,图像纹理和结构特征相差很大,导致合适的  $R$  阈值大小也相差很多,难于自动选取。针对上述情况,从以下几点提出改进:

(1)计算图像每一点水平和垂直方向上的导数以及两者的乘积,这样可以得到3幅新的图像。因图像处理中不易求偏导数,利用  $x$  和  $y$  方向梯度算子与原图像做卷积便可求得图像每一点的偏导数。针对普遍采用的  $x$  方向梯度算子  $(-1,0,1)$ ,本文采用改进形式  $(-2,-1,0,1,2)$  来代替,对灰度变化更敏感,定位更加准确, $y$  方向梯度算子则相应为  $x$  方向的转置。然后对3幅图像进行高斯滤波,减少噪声影响,对结果构造自相关矩阵  $M$ 。

(2)改进 Harris 角点响应函数:考虑原  $R$  实际为矩阵  $M$  的行列式减去  $M$  的迹,为一差值信号,由数学原理可以改为比值法来表示:

$$R = \det M / (\text{trace} M + \epsilon), \quad (7)$$

注意要在分母中加入一个极小量以防止除数为零时溢出(可取  $\epsilon = 10^{-6}$ ),比值法形式无需选取  $k$  值,避免了  $k$  选择的随机性,具有实用性,可靠性好。

(3)根据首图像自动确定  $R$  阈值:对图像序列的首图像先设定一个比较小的初始阈值  $R_0$ ,对大于  $R_0$  的点取局部极大值,然后对结果进行排序,根据要求选取最大的若干个像素点作为最后结果,同时记录该结果角点提取的最小  $R$  值,作为后续图像角点提取的阈值。这样提取的特征点的数目比较合理, $R$  阈值也可以自动选取。另外为了使每个特征点周围能提供足够的用于判定匹配的信息,靠近图像边缘的特征点应该得到剔除,同时也加快了提取速度。整个角点提取过程在前面估计的重叠区域内进行。

### 3.3 特征点匹配和参数估计

角点提取之后,需要找出两幅图像角点之间的对应关系。采用归一化互相关法(NCC)进行角点匹配,相关系数定义为:

$$\rho_{\text{NCC}} = \frac{\sum_{x=1}^{2N+12N+1} \sum_{y=1}^{2N+12N+1} [I_1(x,y) - \bar{I}_1][I_2(x,y) - \bar{I}_2]}{\sqrt{\sum_{x=1}^{2N+12N+1} \sum_{y=1}^{2N+12N+1} [I_1(x,y) - \bar{I}_1]^2} \sqrt{\sum_{x=1}^{2N+12N+1} \sum_{y=1}^{2N+12N+1} [I_2(x,y) - \bar{I}_2]^2}}, \quad (8)$$

式(8)中  $\bar{I}_1$  和  $\bar{I}_2$  为相关窗口内像素灰度的平均值。对于相关系数最大且大于一定阈值的角点对作为初始匹配点集,然后用双向匹配方法得到最终粗匹配结果。

说明的是此处角点匹配过程,用前面已知的全局平移参数去指导局部特征匹配,具体是根据平移量和第1幅图像中的角点位置,计算出第2幅图像中对应匹配角点的大致位置,在该点  $40 \times 40$  的邻域窗口内搜索可能匹配的点。这样不仅大大减少了搜索区域,提高了运算速度,同时也使得成功匹配的命中率大大提高,较好地避免了图像噪声、重复性纹理的影响。经过上面的特征点粗匹配,仍存在少量的伪特征对,如果直接用最小二乘法来估计模型参数,会带来比较大的配准误差,所以采用 RANSAC 法实现精匹配,精匹配过程可见参考文献[7]。

## 4 图像的拼接融合

由于曝光补偿和光照强度变换等一些因素,采集的原始图像会有不同程度的亮度差异,直接拼接会有明显的接缝,目前大都采用线性加权函数对重叠区进行渐进渐出操作来实现拼接融合,设重叠区  $x$  和  $y$  轴最大和最小值是  $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$  和  $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$ ,则融合图像  $I$  在重叠区的颜色值为:

$$I(x,y) = dI_1(x,y) + (1-d)I_2(x,y), \quad (9)$$

其中  $d = (x_{\max} - x) / (x_{\max} - x_{\min})$ ,为线性加权因子。当2幅图像的亮度差异比较明显时,此方法得到的图像在重叠区域会有亮度跳变,给人不真实的感觉,本文提出利用图像均值平衡两帧之间光差的方法,具体处理过程如下:

(1)设重叠区像素的均值为  $\bar{M}_1$  和  $\bar{M}_2$ ,计算公共均值  $\bar{M}$ ,即

$$\bar{M} = \frac{\bar{M}_1 + \bar{M}_2}{2}, \quad (10)$$

(2)利用上面得到的结果,对  $I_1$  和  $I_2$  进行处理,得到拼接所需图像  $\bar{I}_1$  和  $\bar{I}_2$ ,有

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = I_1 - (\bar{M}_1 - \bar{M}) \\ \bar{I}_2 = I_2 - (\bar{M}_2 - \bar{M}) \end{cases}, \quad (11)$$

经过上面的处理,即可使待拼接图像的整体亮度保持一致,不会明显偏亮或者暗,然后再用线性加权法进行融合处理。

## 5 实验结果及分析

实验机器硬件配置为 P4 CPU 2.4 G, 内存 1 GB, MATLAB 6.5 编程环境。图 2 是一组  $280 \times 385$  的顺序错乱的图像序列, 分别计算两两图像的相位相关峰值和平移参数, 结果如表 1。根据前面所讲的排序过程, 寻找与每幅图像具有最大峰值的图像及水平平移参数的正负, 进行排序得到的串连结果为 52 和 341, 又因为  $P_{15}$  明显大于  $P_{23}$ , 且有平移量  $x_{0(1,5)} = 115 \text{ pixel} > 0$ , 所以有最终排序结果为 34152。用本文的方法对文献

[9-10] 的图像数据进行排序均可得到正确的结果, 且有本文算法的排序时间仅为文献 [10] 的 50%。

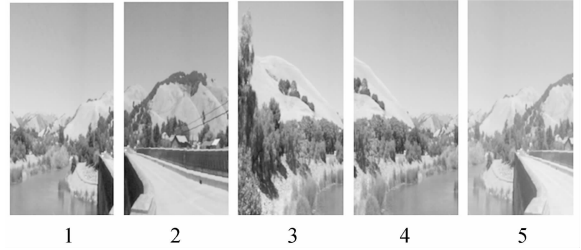


图 2 顺序错乱的图像序列

Fig. 2 Unordered image sequence

表 1 图像相位相关峰值和水平平移参数

Tab. 1 Image phase correlation peak and horizontal offset

排序比较次数	图像序号				
	1	2	3	4	5
(1)	*	0.027 6	0.016 6	0.084 2(-136)	0.068 2(115)
(2)	0.027 6	*	0.017 0	0.021 1	0.141 7(-129)
(3)	0.016 6	0.017 0	*	0.079 0(122)	0.015 6
(4)	0.084 2(136)	0.021 1	0.079 0	*	0.015 7
(5)	0.068 2	0.141 7(129)	0.015 6	0.015 7	*

接下来进行角点检测, 对排序后的首图像进行角点提取 100 个点, 设初始阈值  $R_0 = 4\ 000$ , 高斯窗口模板的大小为  $7 \times 7$ , 标准偏差  $\sigma = 2$ , 得到的  $R$  阈值为 4 255.5, 这样根据该阈值对后续图像进行角点检测, 图 3 是对序号 5 和 2 图像在估计的重叠区域角点检测的结果, 各得到 41 和 40 个角点。然后用本文的方法进行匹配和融合拼接。图 4(a) 是直接拼接的结果, 存在明显的光照不一致, 图 4(b) 是用本文的方法拼接得到的全景图, 图像光滑真实无缝, 光照整体一致。

比较单次角点提取匹配的时间, 图 2 序列图



图 3 角点检测图

Fig. 3 Corner detection



(a) 直接拼接结果

(a) Result of direct mosaic



(b) 本文改进方法拼接结果

(b) Result of improved mosaic

图 4 图像序列拼接图

Fig. 4 Mosaic results for image sequence

像的时间平均为 1.052 s,文献[8]的平均时间为 2.048 s,提高了将近 50%,对 30 组其它不同类型大小的图像进行实验,本文方法较文献[7-8]的方法平均所用时间提高了 40%左右。图 5 是用本文方法得到的全景图,而用文献[8]的方法因为纹理重复出现了错误匹配,不能成功拼接。



图 5 拼接全景图

Fig. 5 Mosaic panorama

## 参考文献:

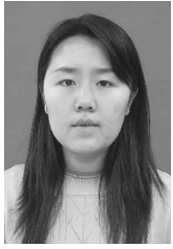
- [1] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods; a survey[J]. *Image and Vision Computing*, 2003,21(11):977-1000.
- [2] 蔡丽欢,廖英豪,郭东辉. 图像拼接方法及其关键技术研究[J]. *计算机技术与发展*,2008,18(3):1-4.  
CAI L H, LIAO L H, GUO D H. Study on image stitching methods and its key technologies [J]. *Computer Technology and Development*, 2008, 18 (3):1-4. (in Chinese)
- [3] 陈世哲,胡涛,刘国栋,等. 基于光栅的快速精确图像拼接[J]. *光学精密工程*,2006,14(2):242-246.  
CHEN S ZH, HU T, LIU G D, et al.. Fast and precision image mosaic based grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(2):242-246. (in Chinese)
- [4] 高莹莹,杨建峰,马晓龙,等. 基于 Fourier - Mellin 算法的干涉图像配准[J]. *光学精密工程*,2007,15 (9):1415-1420.  
GAO Y Y, YANG J F, MA X L, et al.. Interference image registration based on Fourier - Mellin algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1415-1420. (in Chinese)
- [5] STEIN G. Accurate internal camera calibration using rotation, with analysis of sources of error[C]. *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision, Cambridge, Massachusetts, USA*, 1995:230-236.
- [6] 漆驰,刘强,孙家广. 摄像机图像序列的全景图拼接[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*,2001,13(7):605-609.  
QI CH, LIU Q, SUN J G. Video mosaic for panoramic image[J]. *Journal of Computer-aided De-*

## 6 结 论

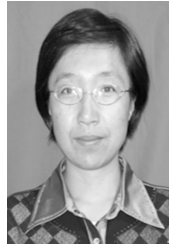
本文提出了一种结合图像频域和空域特性的自动排序拼接融合优化算法。在图像序列自动排序、角点提取匹配和图像融合几个方面均做出了优化改进。排序过程无需人工设定阈值,根据首图像自动确定角点提取阈值的方法简单实用,特征局部匹配速度快,基于图像均值的光差均衡保证了图像整体亮度的一致性。实验结果表明,不仅拼接速度较现有算法提高了 40%,而且拼接的稳健性、清晰度和自动化程度均有较大改善。

- sign & Computer Graphics*, 2001, 13(7):605-609. (in Chinese)
- [7] 赵向阳,杜利民. 一种全自动稳健的图像拼接融合算法[J]. *中国图象图形学报*,2004,9(4):417-422.  
ZHAO X Y, DU L M. An automatic and robust image mosaic algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004,9(4):417-422. (in Chinese)
- [8] 付朝霞,韩焱,咎波. 基于角点检测的图像镶嵌算法[J]. *光电工程*,2007,34(5):126-130.  
FU ZH X, HAN Y, ZAN B. Method of image mosaic based on corner detection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007,34(5):126-130. (in Chinese)
- [9] 赵辉,陈辉,于泓. 一种改进的全景图自动拼接算法[J]. *中国图象图形学报*,2007,12(2):336-342.  
ZHAO H, CHEN H, YU H. An improved fully-automatic image mosaic algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007,12(2):336-342. (in Chinese)
- [10] 赵万全,龚声蓉,刘全,等. 一种用于图像拼接的图像序列自动排序算法[J]. *中国图象图形学报*, 2007,12(10):1861-1864.  
ZHAO W J, GONG SH R, LIU Q, et al.. An auto-sorting arithmetic for image sequence used in image mosaic [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007,12(10):1861-1864. (in Chinese)
- [11] 王崴,唐一平,任娟莉,等. 一种改进的 Harris 角点提取算法[J]. *光学精密工程*,2008,16(10):1995-2001.  
WANG W, TANG Y P, REN J L, et al.. An improved algorithm for Harris corner detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10):1995-2001. (in Chinese)

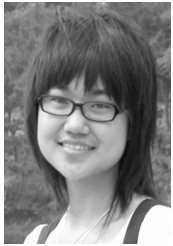
## 作者简介:



冯宇平(1982—),女,吉林伊通人,博士研究生,2005年于长春理工大学获得学士学位,主要从事视频图像信号处理及图像配准、拼接融合方面的研究。E-mail: gjsfengyuping@163.com



张 威(1974—),女,吉林人,博士研究生,主要从事视频图像处理及视频图像压缩算法等方面的研究。E-mail: zhangweijlc@yahoo.com.cn



孙立悦(1987—),女,吉林长春人,吉林大学通信工程学院在读本科生,研究方向为通信工程及计算机网络系统的研究及信息的传输、交换、处理等。E-mail: sunlina0431@sina.com

## 导师简介:



戴 明(1965—),男,湖北潜江人,研究员,博士生导师,1993年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电平台稳定技术、图像稳定技术及航空光电成像技术方面的研究。E-mail: daim@vip.sina.com

## ● 下期预告

## 高精度位移传感器的新型减振平台

宁大勇<sup>1,2</sup>,高云国<sup>1</sup>,刘稀凤<sup>3</sup>

- (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; 3. 大连教育学院,辽宁 大连 116021)

为了保证光学精密仪器工作基础的高稳定性,设计了一种新型的减振平台。该减振平台采用精度为 10 nm 的位移传感器作为测量装置,通过位移传感器测量隔振平台支撑弹簧的长度变化,计算出支撑力的变化,然后调整电磁驱动器的电磁力,使光学精密仪器受力平衡,达到减振的目的。经过理论分析及仿真分析,采用这种减振方式能够到达减振要求,同时,这种减振方式有利于多级减振,每级减振装置之间是彼此相互独立的。实验结果表明:基座振幅为 0.22 mm 时,减振台支撑面振幅为 1.6  $\mu\text{m}$ ;基座振幅为 0.20 mm 时,减振台支撑面振幅为 1.4  $\mu\text{m}$ ;基座振幅 0.18 mm 时,减振台支撑面振幅为 1.2  $\mu\text{m}$ ;基座振幅为 0.15 mm 时,减振台支撑面振幅为 1.0  $\mu\text{m}$ 。能够起到有效的减振作用。