

光学小波变换在视觉系统的应用研究*

岳宏 戴士杰 崔庆华 史建儒 王仲民

(河北工业大学机器人及自动化研究所,天津 300130)

摘要 为了提高图像信息处理速度,利用光电混合实现的方法,将光学小波变换应用于视觉系统设计. 依据4f相关器光学信息处理的原理,在频域内通过计算机编码,在电寻址空间光调制器上,构建不同类型的小波函数滤波器库,对目标的图像特征进行提取与辨识. 研究表明,基于光学小波变换视觉系统正确可行. 在图像特征提取中,以光波传递信息可以提高视觉信息处理的速度.

关键词 光学小波变换;目标提取;视觉系统;空间光调制器

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A

0 引言

小波变换是一种可以用作变换域信息处理的映射. 它在时域或频域都能提供高分辨率的信息,因而可以利用小波变换实现滤波、压缩、分割、重构以及其它信号处理运算^[1-3]. 光学小波变换是利用光学技术对信号进行处理的一种手段,由于其应用的广泛性,引起各工程领域科学工作者的浓厚兴趣. T. Burns等人利用磁光效应在Vander Lugt相关器变换平面上,由计算机控制磁光空间光调制器产生Haar小波强度调制,实现了光学小波变换^[4]. Pinski等人将这一系统用于图像的分割^[5]. E. Freysz利用光寻址空间光调制器,通过图像的写入光产生折射率、反射率或吸收率的空间变化调制光学函数^[6]. 这种光学函数的调制,可以实现多通道的全息变换^[7]. 利用声光效应制成的声光空间调制器可以作为滤波器组采用时空积分结构实现混合小波变换,完成信号的重建,其主要缺点是实时性差^[8]. 在空间域的小波运算可以表示成一种信号和滤波函数的卷积积分^[9],这种实现方法利用偏振编码和滤波操作产生Haar小波函数,并通过光源照明双透镜投影变换系统(又称铸影法)实现离散Haar小波变换^[10]. 目前,在空频域实现光学小波变换的方法很多,但仍存在一些不足,如偏振法产生小波会造成较大的光能损失;运用磁光器件源生小波函数分辨率不高;全息滤波器的制备需要离线操作,且需要精确复位等等. 本文提出利用二维小波矩阵在电寻址空间光调制器上实现滤波的方法,其最大特点是通过计算机编程构建不同类型与变因子的小波滤波器库,可以方便地调用和更换小波函数滤波器,从而改善了图像处理的实时性. 光学信息处理系统具有二维、并

行、高速和大容量的特点,非常有利于二维小波变换的实现. 根据小波变换采用信号和滤波函数做卷积/相关运算的原理,笔者将4f光学相关器和匹配滤波器应用于视觉系统^[11]. 该视觉系统由目标读取装置、傅里叶变换透镜1、电寻址(EA-electro-address)空间光调制器、傅里叶变换透镜2、CCD耦合器件以及计算机等部分组成.

通过目标读取装置提取的目标信息位于傅里叶变换透镜1的前焦面上. 在两个傅里叶变换透镜的共焦面上,放置由计算机编码的电寻址空间光调制器,经傅里叶变换透镜1变换后的目标信息,由电寻址空间光调制器实现滤波运算. CCD耦合器件设置在傅里叶变换透镜2的输出平面,获取目标的傅里叶逆变换信息,并将其送入计算机. 鉴于傅里叶变换透镜焦距相对较长,为了缩短系统的结构尺寸,我们采用了对称远距型傅里叶变换透镜结构^[12].

1 目标读取装置

目标读取是基于光学小波变换视觉系统的重要组成部分. 目标读取的效果直接影响光学信息处理系统的工作质量.

1.1 目标读取原理

目标读取部分的主要器件有空间光调制器(OSLM),偏振分光棱镜、相干光准直器、写入光光源和读出光光源等,如图1.

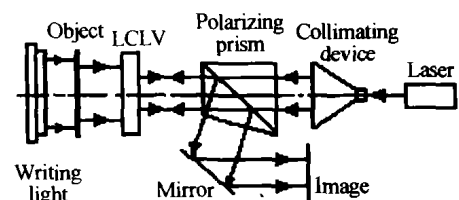


图1 视觉系统目标读取原理

Fig. 1 Object reading for vision system

目标在写入光源(白光)照射下,成像在光寻址空间光调制器上. 准直相干光作为读取光照射到光

*天津市重点自然科学基金资助项目(编号:993801411)

Tel:022-26530441 Email:hyue@hebut.edu.cn

收稿日期:2004-01-12

寻址空间光调制器后反射,这样目标信息耦合到反射光束中,即反射光携带着目标信息,反射光再经偏振分光棱镜射出,从而完成目标图像的读取.

1.2 相干光准直器设计

考虑到视觉系统结构紧凑性及可靠耐用的特点,本文选择 DL-3038-033 型低电流、耐高温的半导体激光器,作为读取光光源,其波长为 $\lambda = 635 \text{ nm}$,输出功率 10 mW ,工作环境温度为 $(-10^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C})$. 由于半导体激光光束为像散椭圆高斯光束^[13],这种高斯光束经扩束透镜后,其低频部分位于光轴附近,而高频成分则远离光轴位置. 为此,在扩束透镜 L_1 的后焦点处放置一个孔径光阑(图 2),以便滤除高频成分和高频干扰噪声,进而改善相干光光束的质量.

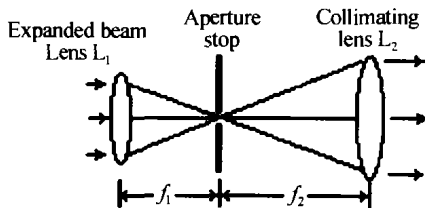


图 2 准直光束的生成
Fig.2 Generation of Collimated light beam

高斯光束束腰的宽度使激光束存在一个平均发散角,考虑发散角对聚焦光斑面积的影响,我们通过计算选用 $d = 15 \mu\text{m}$ 的孔径光阑. 根据图 2 所示相似三角形对应边的比例关系

$$f_1/f_2 = D_{L1}/D_{L2} \quad (1)$$

式中 f_1, f_2 分别为扩束透镜和准直透镜的焦距; D_{L1}, D_{L2} 分别为扩束透镜和准直透镜的通光直径.

由此可得,准直透镜焦距 $f_2 = 190 \text{ mm}$,输出的准直光光斑直径约为 32 mm . 图 3 分别为距离准直器 500 mm 处和 1000 mm 处的光束实验结果. 准直器的准直度为 0.4% ,达到了预期设计效果.

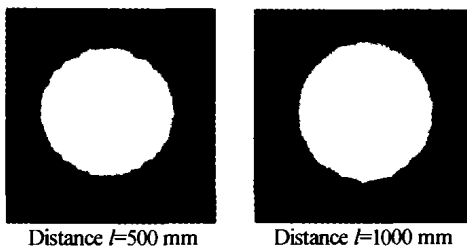


图 3 准直光束实验结果
Fig.3 Experiment results of collimated light beam

1.3 光寻址空间光调制器

光寻址空间光调制器,即液晶光阀 LCLV (Liquid Crystal Light Valve),在光源信号控制下,能对光波进行调制,将信源信号承载的信息写进入射的相干光波中. 液晶光阀 LCLV 由中国科学院西安光学精密机械研究所研制,其主要性能参数如表 1.

表 1 液晶光阀 LCLV 的特征参数

像面尺寸	$45 \times 45 \text{ mm}^2$	灰度级	7 ~ 8
写入光最低能量	$6.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	空间分辨率	55 Lp/mm
阈值曝光量	$3.7 \text{ Erg}/\text{cm}^2$	响应时间	30 ~ 40 ms
读出光最低能量	$4.0 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	对比度	150:1

1.4 目标读取效果

通过目标读取装置的实验发现,写入光的光强、液晶光阀与偏振分光棱镜的间距以及液晶光阀的工作电压和工作频率,均对读出光的信息有着明显的影响.

首先,读出光强与写入光强为非单值对应,输入输出曲线呈钟型. 在钟型曲线上上升段,读出光强随着写入光强的增强而单调地增加,液晶光阀输出正像,如图 4(a). 在钟型曲线下降段,读出光强随着写入光强的增强而单调地减弱,液晶光阀输出反转像,如图 4(b)所示.



(a)Positive image (b)Inverse image

图 4 读出光实验效果
Fig.4 Experiment results of reading light

其次,我们对工作电压和工作频率两个因素做了正交实验,结果表明,工作频率在 3.3 kHz 左右时输出效果最佳. 工作频率的影响范围为 $2.7 \text{ kHz} \leq f \leq 3.5 \text{ kHz}$. 在工作频率一定的情况下,当电压为 3.2 V 和 5.2 V 左右获得清晰的目标信息. 虽然读出的目标信息与原图像相比存在一些噪声,但所得图像效果仍然清晰.

2 小波滤波器的加载与实验

前已述及,在谱频面上填加光学小波滤波器就可以改变频谱,从而达到图像处理的目的. 为此,选用了英国 CRL 公司的 SVGA1 型电寻址空间光调制器作为小波滤波器的加载平台. 通过计算机编程的方法将小波滤波器加载到电寻址空间光调制器上,实现图像信息的光电混合处理.

2.1 电寻址空间光调制器

SVGA1 型电寻址空间光调制器的写入信号为电信号. 电信号是一个时间序列,依次输送到空间光调制器的各个像素上,属于串行编址方式. 它主要由驱动卡和液晶盒 (Liquid Crystal Device, LCD)

组成. 驱动卡由 12 V 电源供电, 并与 PC 机的接口连接, 而 LCD 与驱动卡之间采用 30 针插头的专用扁平电缆相连接, 其空间分辨率 $\mu_{\max} = 30 \text{ Lp/mm}$.

液晶盒 LCD 的两基片内表面有照相平版印刷成的平行正交栅状透明电极, 中间封装液晶层, 印刷在前表面的水平走向栅条是扫描电极, 而印刷在后表面的竖直栅条是信号电极. 如果忽略液晶对外电场响应的滞后, 对扫描电极和信号电极相交处的液晶像素来说, 其透射率取决于两条电极间的电压大小. 这样, 扫描电极和信号电极将 LCD 分割成矩阵形式排列的像素元, 即薄膜晶体管 (Thin Film Transistors, TFT) 阵列. 这些薄膜晶体管及其电极阵列, 可以在强光下用显微镜观测. 液晶材料是电-光型的, 它对施加的电压产生响应. 每个液晶像素元的透射率, 即像素的灰度由扫描电极和信号电极的极间电压控制.

SVGA1 型空间光调制器像素阵列如图 5(a) 所示. 在宽度方向上具有 800 个像素, 高度上具有 600 个像素, 跨距为 $33 \mu\text{m}$. 每个像素是一个可控制单元, 其尺寸为 $24 \mu\text{m}$ (高) $\times 26 \mu\text{m}$ (宽). LCD 完全不同于模拟显示装置, 如像素与信号数据没有单值关系的 CRT. 尽管电寻址空间光调制器接收的信号是模拟的, 而 LCD 显示的则是施加确定像素决定的样本信号. 透射率对电压的响应特性是非线性的, 如图 5(b), 这种非线性可以采取相应措施进行补偿^[14].

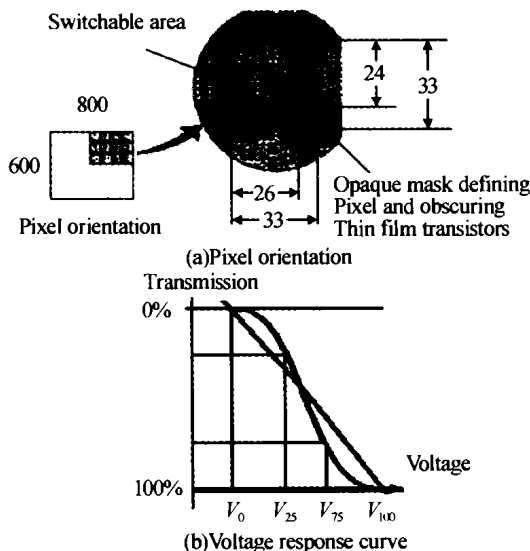


图 5 LCD 像素阵列和电压响应特性曲线
Fig. 5 Pixel orientation and voltage response curve of LCD

2.2 光学小波滤波器

小波函数具有 Morlet 小波、Haar 小波、Mexican-hat 小波、样条小波及 Daubechies 小波等形式^[15]. 在实际工程中, Haar 小波和 Mexican-hat 小波获得了广泛的应用. 这里, 讨论利用计算机编程在电寻址

空间光调制器上构造光学小波滤波器.

2.2.1 光学 Haar 小波滤波器

一维 Haar 小波是双极台阶型函数, 二维组合有水平边小波、垂直边小波和角 Haar 小波三种形式. Haar 小波的重要特征是其正交性, 因此, 常用于二值图像函数边角特征的提取.

二维 Haar 小波函数可以表示为

$$\Psi(x, y) = \text{rect}(x \pm 0.5, y \pm 0.5) - \text{rect}(x \pm 0.5, y \mp 0.5) \quad (2)$$

它由两对双极性二维矩形函数交错组成. 显而易见, Haar 小波函数是不连续的, 它的不同形式的组合, 在提取图像边角特征时具有良好的效果. 采用计算机编程方法构造光学 Haar 小波滤波器时, 必须先对 Haar 小波函数进行抽样, 然后再对抽样点进行傅里叶变换, 最后, 得到离散的 Haar 小波函数频谱. 只要抽样点足够多, 我们就可以设计出所需要的光学 Haar 小波滤波器. 图 6 是抽样点为 100 时的 Haar 小波频谱. 由图 6 可见, 计算机编程方法获得的 Haar 小波频谱, 比物理方法的更规范, 并且操作灵活方便.

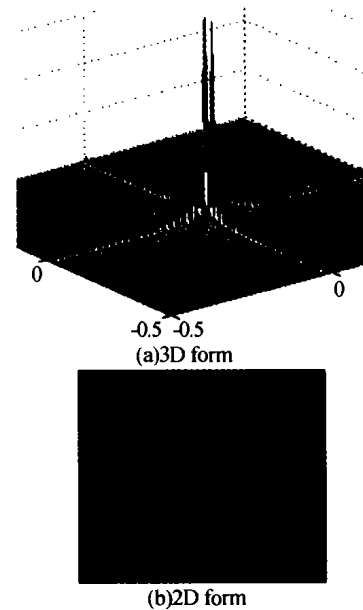


图 6 抽样点为 100 时的 Haar 小波函数频谱图
Fig. 6 Frequency spectrum of Haar wavelet when sample points are 100

将 Haar 小波函数频谱图进一步灰度化, 可构造出双十字结构的光学 Haar 小波滤波器.

2.2.2 光学 Mexican-hat 小波滤波器

二维 Mexican-hat 小波的空域和频域形式分别为

$$h(x, y) = [1 - (x^2 + y^2)] \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2}\right] \quad (3)$$

$$H(u, v) = 4\pi^2(u^2 + v^2) \exp[-2\pi(u^2 + v^2)] \quad (4)$$

式(3)、(4)均为实偶函数, 其形貌如图 7(a). 在

光学系统中,Mexican-hat小波常常被近似为频域的环带滤波器^[16],由此构成的小波滤波器如图7(b).

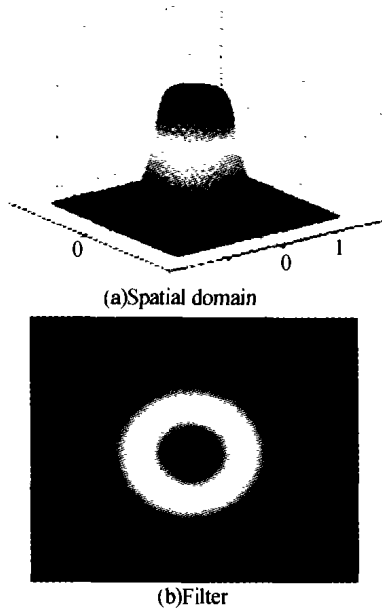


图7 Mexican-hat小波形貌图与滤波器
Fig.7 Figure of Mexican-hat wavelet

2.3 实验结果

在光学平台上构建了基于光学小波变换光电混合实现视觉系统实验装置. 实验中采用了不同类型和不同因子的光学小波函数滤波器,对相应的目标进行图像特征提取实验,以验证系统方案的正确性. 图8给出了采用Mexican-hat小波滤波器分别对L

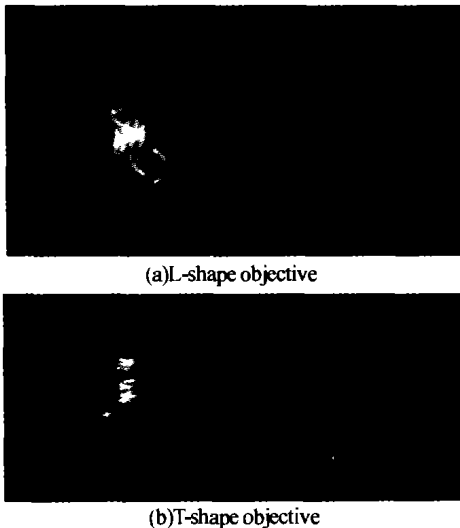


图8 图像边缘特征提取结果
Fig.8 Results of image feature extracting

型和T型目标所提取出的图像边缘特征.

3 结论

理论分析与实验表明,基于光学小波变换视觉系统充分发挥了电信号处理和光学信号处理的优越性,视觉系统原理正确,方案可行,图像特征提取的效果良好,能够适于不同目标图像边缘特征的实时提取. 利用电寻址空间光调制器构建不同类型与变

因子的小波函数滤波器库,可以方便地调用和更换小波函数滤波器,改善了图像处理的实时性. 另外,光电混合实现的图像信息处理时间得以减少,因为它主要取决于液晶光阀和电寻址空间光调制器的响应,因而,提高了图像特征提取的速度.

参考文献

- Decusatis C, Koay J, Das P. Hybrid optical implementation of discrete wavelet transforms: a tutorial. *Optical & Technology*, 1996, **28**(2): 51 ~ 58
- Cai Xiaou, Wang Hui, Li Yong, et al. The application of wavelet analysis in hologram compression. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(6): 739 ~ 743
- Zhao Jianwei, Wang Peng, Liu Chongqing. Watershed image segmentation based on wavelet transform. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 601 ~ 604
- Burns T, Feilding K, Rogeers S, et al. Optical haar wavelet transform. *Optical Engineering*, 1992, **31**(6): 1852 ~ 1858
- Pinski S D, Rogers S K, Welsh D M, et al. Image segmentation using optical wavelets. *SPIE*, 1992, Orlando, **1702**: 11 ~ 19
- Freysz E. Optical wavelet transform of fractal aggregates. *Phys Rev Lett*, 1990, **64**: 7745 ~ 7748
- Sheng Y, Lu T, Roberge D. Optical N^4 implementation of a two-dimensional wavelet transform. *Optical Engineering*, 1992, **31**(6): 1859 ~ 1864
- Decusatis C, Kony J, Das P. Hybrid optical implementation of discrete wavelet transforms: a tutorial. *Optics & Laser Technology*, 1996, **28**(2): 51 ~ 58
- 马晶, 谭立英, 冉启文. 小波分析在光学信息处理中的应用. *物理学报*, 1999, **48**(7): 1123 ~ 1129
Ma J, Tan L Y, Ran Q W. *Acta Physica Sinica*, 1999, **48**(7): 1223 ~ 1229
- Shen Y L, Roberge D, Szu H. Optical wavelet transforms. *Optical Engineering*, 1992, **31**(9): 1840 ~ 1844
- 岳宏, 邓志鹏, 史建儒, 等. 基于小波变换光学实现机器人视觉传感器[中国专利]. 中国知识产权局发明专利公报, 2001, **17**(30): 33
Yue H, Deng Z P, Shi J R, et al. Robotics Vision Sensor Based on Wavelet Transform with Optical Implementation. Bulletin of Invention Patent, State Intellectual Property Office of P R China, 2001, **17**(30): 33
- 岳宏, 戴士杰, 王仲民, 等. 机器人视觉用双远距傅里叶变换透镜. *光电工程*, 2003, **30**(1): 38 ~ 41
Yue H, Dai S J, Wang Z M, et al. *Journal of Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(1): 38 ~ 41
- 郭福源, 翁开华, 邱锦辉. 半导体激光束的成形变换. *光电子·激光*, 1998, **9**(1): 43 ~ 45
Guo F Y, Wong K H, Qiu J H. *Journal of Optoelectronic Laser*, 1998, **9**(1): 43 ~ 45
- SVGA1 Spatial Light Modulator PCB Revision 2. 0

- Operation Documentation . Central Research Laboratories Limited, UK, 1998
- 15 杨福生. 小波变换的工程分析与应用. 北京: 科学出版社, 2000. 23 ~ 31
- Yang F S. Engineering Analysis and Application of Wavelet Transform. Beijing: Science Press, 2000. 23 ~ 31
- 16 Tripathi R, Singh K. Pattern discrimination using a bank of wavelet filters in a joint transform correlator. *Optical Engineering*, 1998, 37(2): 532 ~ 538

Research of Applying Optic Wavelet Transform to Vision System

Yue Hong, Dai Shijie, Cui Qinghua, Shi Jianru, Wang Zhongmin

Hebei University of Technology, Tianjin 300130

Received date: 2004-01-12

Abstract In order to enhance the speed of image processing, the optic wavelet transform is applied to design of vision system based on the method of photoelectric hybrid implementation. Using the theory of optical information processing of 4f correlator, a library of wavelet function filters on the spatial light modulator with electro-address is constructed. It is achieved by computer programming in the spatial frequency domain, so the features of object can be extracted and recognized. The research results show the optic wavelet transform based vision system is reasonable and feasible. Optical information based image feature extraction will enhance the speed of vision information processing.

Keywords Optic wavelet transform; Objective extraction; Vision system; Spatial light modulator

Yue Hong a director of the Research Institute of Robotics and Automation. Now he is also a professor and Ph. D. advisor in School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, member of ASME. He served as a visiting professor at F H Munich, Germany in 1989 ~ 1990. The main area of interest and expertise is robotics and vision, etc.

