

光电混合机器人视觉系统中光寻址 空间光调制器的噪音处理*

戴士杰^{1a,2}, 周国香^{1b}, 岳宏^{1a}, 邓志鹏^{1a}, 蔡鹤皋²

(1 河北工业大学 a. 机器人及自动化研究所; b. 理学院, 天津 300130)

(2 机器人技术与系统国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150080)

摘 要:分析了光寻址空间光调制器对连续图像采样产生的噪音和假频,利用采样理论,提出设置光学去假频前置滤波器抑制噪音和假频的方法.理论分析得出去假频前置滤波器为矩形窗函数的基础上,根据视觉系统中光寻址空间光调制器的参量,计算出了本系统所用的去假频前置滤波器的结构尺寸.视觉系统图像特征提取试验结果表明效果良好.

关键词:机器人视觉;噪音分析;光寻址空间光调制器;采样理论;去假频前置滤波器

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)01-0209-5

0 引言

随着机器人应用领域的不断扩大,人们对其性能要求不断提高,并逐渐向智能化方向发展^[1].视觉将赋予机器人一种高级感觉功能,对其周围环境进行感知,为其进行智能作业提供决策依据.视觉做为当前的研究热点,虽然取得了许多具有重要价值的成果,但实现起来还存在许多问题,特别是机器人视觉信息的处理速度成为急待解决的一个瓶颈问题^[2].

光学信息处理以其丰富的信息量和快速性、并行性的优点而受到广泛关注,而空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)的出现又为其发展注入了新鲜的血液,为光电混合系统的研究创造了条件.由此提出了基于小波变换的光电混合实现机器人视觉系统^[3-5],此系统可以实现图像的快速实时处理.系统中电寻址(Electro Address, EA)空间光调制器用来加载小波滤波函数,以实现滤波.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^[6]. Pinski 等人将这一系统用于图像的分割^[7]. 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^[8].这种光学函数的调制,可以实现多通道的全息变换^[9].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^[10].系统中光寻址空间光调制器(Optical Address Spatial Light Modulator, OA-SLM)使非相干图像转为相干图像以光速实现;然而,其分辨率无法与光的波长相媲美,在其对目标图像进行空间分割时就不可避免的引入假频,对图像的能量进行量化时必然产生量化噪音等.因此在图像处理过程中,消除干扰噪音是必须解决的重要问题.王湘晖等根据矢量衍射理论,提出了一种设计纯相位型光瞳滤波器的新方法^[11].徐可欣等研究了使一般声光可调谐滤波器晶体两束衍射光波长相等的方法^[12].潘炜等结合 Mach-Zehnder 干涉原理和多模干涉(MMI)耦合器的散射矩阵,从理论上推导出梯形干涉链可调谐光滤波器(LTOF)输出光场的表达式^[13].叶雪华等构造了三区振幅型和相位型滤波器,用矢量衍射理论分析了两种滤波器对固体浸没透镜显微系统透射场的优化作用^[14].本文根据系统中 OA-SLM 的参量,设计了前置去假频滤波器.

1 光电混合机器人视觉系统

为了实现机器人视觉图像的实时处理,设计了机器人视觉光学小波变换系统,如图 1.外界物体成像在空间光调制解调器(SLM)上,然后再利用相干光读出,实现由非相干光向相干光转换.其过程如下:激光器发出激光经准直透镜变为平行光照射在偏振棱镜上,将光偏振折射到 SLM 上. SLM 的读出光沿原路返回,再通过偏振棱镜入射第一个傅里叶

*河北省科学技术研究与发展计划(05547003D-2),河北省自然科学基金(F2007000118),河北省教育厅科学研究计划(2007315)和机器人技术与系统国家重点实验室开放基金(SKLR200716)资助

Tel: 022-60202388 Email: dsj@hebut.edu.cn

收稿日期: 2007-08-20

透镜 L_1 这样, 根据 $4f$ 系统原理实现滤波, 即 EASLM(由计算机控制输入选取的滤波函数的频谱)放在 L_1 的后焦平面上, 在此完成与读出图像频谱的乘积, 由于 EASLM 又处在 L_2 的前焦平面上, 这样再经过 L_2 后, 由频域转变回空间域, 在此过程中完成了用所选函数滤波目的。

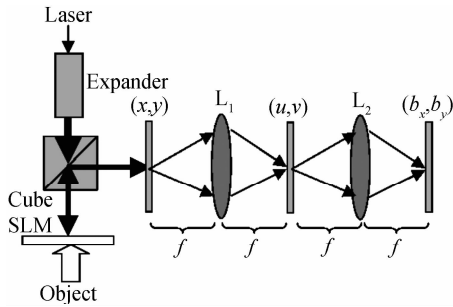


图 1 光学小波变换系统原理图
Fig. 1 Optical wavelet transform system

2 采样理论

光波的频率高达 10^{14} Hz 以上, 而目前光寻址空间光调制器的分辨率最高达 60 lp/mm, 可以认为是利用空间光调制器对一幅连续的图像的采样。采样过程为每经过 T 秒对模拟信号 $x(t)$ 的抽样, 时间 t 被离散化为采样间隔 T 的单元, $t = nT$, $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ 。这样, 不可避免地在频域内引入大量的伪高频成分, 而这些成分是有规律的, 即每一频率成分是原始信号在整个频率轴上周期性 ($f_s = 1/T$) 的复制。若以单一频率 f 的正弦信号 $x(t) = \exp(2\pi jft)$ 为例, 在采样前其频率为 f , 而采样后则变为 $x(nT) = \exp 2\pi(fnT)$, 即以间隔为 f_s 周期性的复制原始频率, 可以表示为 $f' = f + mf_s, m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ 。其结果必然是对原始信号增加混淆, 引入了假频。为了避免干扰, 需要满足采样理论。

空间光调制器进行的空间采样与之类似, 是对空间连续图像 $f(x, y)$ 进行采样, OA-SLM 的分辨率为 35 lp/mm, 见表 1。则采样频率 $f_s = 35$ kHz, 再由 $f_s \geq 2f_{\max}$ 可知, 最大频率 $f_{\max} = 17.5$ kHz, 即能够处理图像的空间频率最高为 17.5 kHz。

表 1 光寻址空间光调制器的主要参量

有效口径	$\phi 50$ mm
白光写入能量	$6.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2 - 150 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
读出光最低能量	$(\lambda = 632.8 \text{ nm}) 4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
空间分辨率	平均为 35 lp/mm(标准分辨率卡)
对比度	$> 120:1$
响应时间(上升)	30 ms
响应时间(下降)	40 ms

3 去假频前置滤波器设计

为了对一信号在理想下采样并且满足采样理论

的条件, 信号必须被一个模拟低通前置滤波器—去假频前置滤波器 (Antialiasing Pre-filters) 滤波, 前置滤波器的截止频率 f_{\max} 至少为 $f_s/2$, 采样过程引起的频谱复制 (Spectrum Replication) 如图 2。

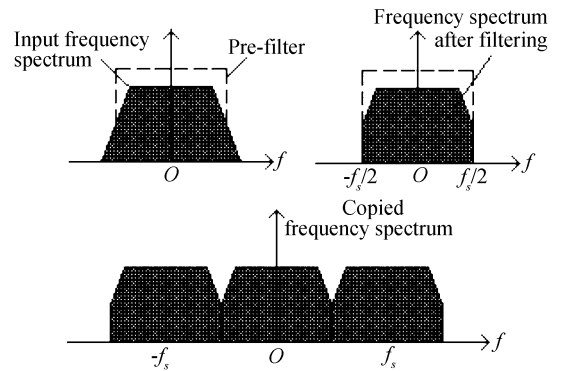


图 2 去假频前置滤波器
Fig. 2 Antialiasing pre-filters

运用傅里叶变换分析, 采样器的输出可以认为由采样点的脉冲组成, 其权值为相应的采样值, 这样, 采样信号为

$$\hat{x}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT)\delta(t-nT) \quad (1)$$

其频谱为

$$\hat{X}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{x}(t) \exp(-2\pi jft) dt = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{\infty} X(f-mf_s) \quad (2)$$

从中可以看到频谱的复制。

理想的滤波器如图 2。去掉了模拟输入信号中超过 $|f_s/2|$ 的所有部分。但在实际应用中, 去假频前置滤波器并不是理想的, 并且不能完全滤掉大于 $|f_s/2|$ 的所有频率, 必然引入假频。为了解决这一问题, 可以通过对前置滤波器的合适设计来达到工程上能够容许的范围。实际的去假频低通滤波器如图 3, 其中带通 $[-f_{\text{pass}}, f_{\text{pass}}]$ 是重要的频率范围, 且必须在 $[-f_s/2, f_s/2]$ 中。在光学系统中, 可以利用菲涅耳衍射 (远场衍射), 实现去假频滤波。由于在频谱前, 亦可称为“去假频前置滤波器”。

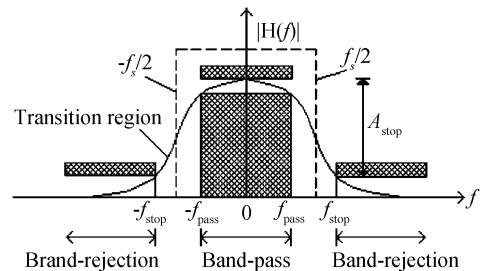


图 3 实际去假频低通前置滤波器
Fig. 3 The practical antialiasing lowpass pre-filter

由于此系统采用激光器作为光源, 故可以在分析时考虑单色平面波投射到一个开孔 Σ 上的衍射, 如图 4。设开孔平面为 xy 平面, 观察平面为在距离 z

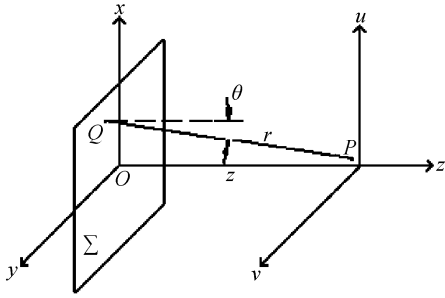


图 4 衍射示意
Fig. 4 The sketch map of diffraction

处的 uv 平面, x, y 轴分别平行于 u, v . 如果 Q 点和 P 点的坐标分别为 (x, y) 和 (u, v) , 那么这两点的距离 r 可以写为

$$r = \sqrt{z^2 + (u-x)^2 + (v-y)^2} \quad (3)$$

如果观察平面与孔的距离远大于孔的线度, 而且在观察平面上只考虑一个对衍射孔上各点张角都不大的范围(傍轴附近). 这时, $\cos\theta \approx 1$ (θ 不超过 18° 时误差不超过 5%), 可以将 r 写成

$$r = z \left[1 + \left(\frac{u-x}{z} \right)^2 + \left(\frac{v-y}{z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中 $\left(\frac{u-x}{z} \right)^2 + \left(\frac{v-y}{z} \right)^2 \ll 1$, 对上式中的根式作二项式展开得到

$$r = z \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{u-x}{z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{v-y}{z} \right)^2 - \frac{1}{8} \left[\left(\frac{u-x}{z} \right)^2 + \left(\frac{v-y}{z} \right)^2 \right]^2 + \dots \right\} \quad (5)$$

进一步略去二次方以上的项, 可以得到

$$r = z \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{u-x}{z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{v-y}{z} \right)^2 \right] \quad (6)$$

将式(6)代入到 $\exp(ikr)$ 中整理后为

$$\exp(ikr) = e^{ikz} \cdot e^{i \frac{k}{2z} [(u-x)^2 + (v-y)^2]} \quad (7)$$

因此, 由基尔霍夫衍射公式

$$\tilde{E}(p) = \frac{1}{i\lambda r} \times \frac{1 + \cos\theta}{2} \iint_{\Sigma} \tilde{E}(Q) \exp(ikr) d\sigma \quad (8)$$

可以得到

$$\tilde{E}(u, v) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_{\Sigma} \tilde{E}(x, y) \exp \left\{ \frac{ik}{2z} [(u-x)^2 + (v-y)^2] \right\} dx dy \quad (9)$$

上式积分域是孔径 Σ , 在孔径 Σ 之外, 复振幅 $\tilde{E}(x, y) = 0$.

在光学小波变换系统中, 如图 5, 输入平面 xy 位于透镜 L 前 d_1 处, 输出平面 uv 位于 L 后的 d_2 处. 设光波在 d_1 和 d_2 范围内的传播满足菲涅耳近似条件, 则透镜前表面的场 $\varphi_l(x, y)$ 可表示为

$$\varphi_l(x, y) = \frac{e^{ikd_1}}{i\lambda d_1} \iint_{-\infty}^{\infty} \varphi_o(x, y) \cdot \exp \left\{ i \frac{k}{2d_1} [(\zeta-x)^2 + (\eta-y)^2] \right\} dx dy \quad (10)$$

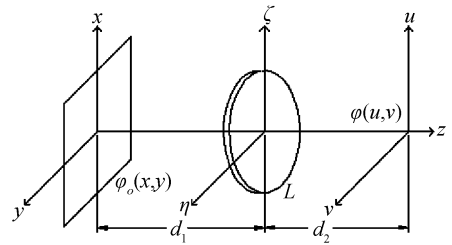


图 5 透镜的变换效应
Fig. 5 The transform effect of lens

透镜的相位变换效应可表示为

$$\varphi'_l(\zeta, \eta) = t_l \cdot \varphi_l = \frac{1}{f} e^{-ikf} \cdot \exp \left[i \frac{k}{2f} (\zeta^2 + \eta^2) \right] \varphi_l(x, y) \quad (11)$$

在其中略去了常量相位项 $\exp(ik\Delta)$.

再用一次菲涅耳变换的公式, 得到输出平面 (u, v) 上的场

$$\varphi(u, v) = \frac{e^{ikd_2}}{i\lambda d_2} \iint_{-\infty}^{\infty} \varphi'_l(\zeta, \eta) \cdot \exp \left\{ i \frac{k}{2d_2} [(u-\zeta)^2 + (v-\eta)^2] \right\} d\zeta d\eta \quad (12)$$

将式(10)、(11)代入式(12), 得

$$\varphi(u, v) = -\frac{1}{\lambda^2 d_1 d_2 f} e^{ik(d_1+d_2-f)} \cdot e^{i \left[\frac{k}{2d_2} (u^2+v^2) \right]} \times \iint_{-\infty}^{\infty} \varphi_o(x, y) \cdot \exp \left[i \frac{k}{2d_1} (x^2+y^2) \right] \Lambda(x, y) dx dy \quad (13)$$

$$\text{式中: } \Lambda(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ i \frac{k}{2} \left[\left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} - \frac{1}{f} \right) (\zeta^2 + \eta^2) - 2 \left(\frac{x}{d_1} + \frac{u}{d_2} \right) \zeta - 2 \left(\frac{y}{d_1} + \frac{v}{d_2} \right) \eta \right] \right\} d\zeta d\eta$$

令 $d_1 = d_2 = f$, 则可得

$$\varphi(u, v) = \frac{e^{ikf}}{i\lambda f^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \varphi_o(u, v) \cdot \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (xu + yv) \right] dx dy \quad (14)$$

进而将 Σ 限制为矩形孔, 并且长和宽分别为 b 和 a , 取坐标原点位于矩形孔中央, 设 $l = \frac{u}{f}$, $m = \frac{v}{f}$, 令

$$C = \frac{e^{ikf}}{i\lambda f^2} \varphi_o(u, v), \text{ 则(14)式变为}$$

$$\varphi(u, v) = C \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \exp(-ik(lx + my)) dx dy = C \cdot ab \cdot \left(\sin \frac{k l b}{2} / \frac{k l b}{2} \right) \cdot \left(\sin \frac{k l a}{2} / \frac{k l a}{2} \right) \quad (15)$$

令 $\alpha = \frac{k l b}{2}$, $\beta = \frac{k l a}{2}$, 则 P 点的光强度为

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \quad (16)$$

式中 I_0 为光轴上 P_0 点的光强度.

下面以一维情况分析光强的分布, 不妨以 y 轴

为例,此时 $I = I_0 \left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2$, 显而易见,当 $\beta=0$ 时, $I = I_0$, 所以 P_0 点有极大强度, 而当 $\beta = \pm\pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi \dots$ 时, $I=0$, 与这些值对应的为暗点.

在两强度极小之间有一个强度次极大, 这些极大的位置可由下式求出

$$\frac{d}{d\beta} \left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2 = 0 \quad \text{即} \quad \text{tg}\beta = \beta \quad (17)$$

从图 6 中可见, 选择合适的 a 和 b 可以让极大强度作为前置去假频滤波器, 根据上述分析计算得 a 和 b 相等且为 14 mm.

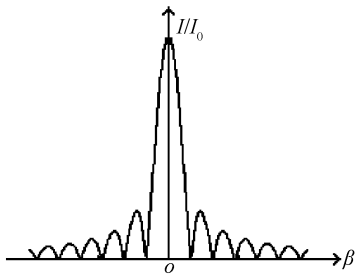


图 6 衍射的光强度

Fig. 6 The optical intensity diffraction

4 试验研究

在光学平台上构建基于光学小波变换光电混合实现机器人视觉系统试验装置. 试验中去假频前置滤波器按照前文分析的结果设计, 另外采用不同类型和不同因子的光学小波函数滤波器, 对相应的目标进行了图像特征提取试验, 进而验证所提出的系统方案的正确性. 图 7 为“L”形目标的试验结果, 试验中“L”形目标的总体高度为 7 mm, 宽度为 6 mm. 图中左端为原始图像, 后面三幅为采用 Mexican-hat 小波滤波器在不同尺度因子情况下的图像特征提取图.

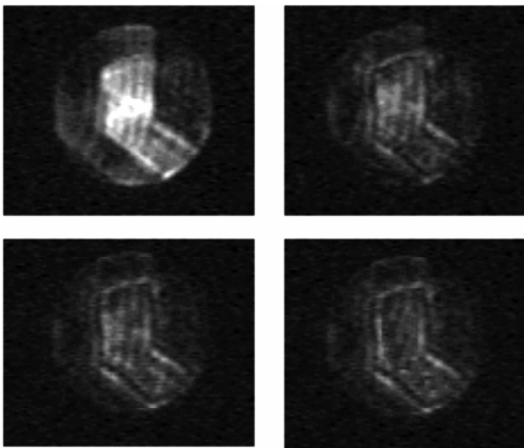


图 7 “L”形目标图像特征提取实验结果

Fig. 7 The results of image feature extracting of “L”

5 结论

理论分析与试验表明, 基于光学小波变换光电混合实现机器人视觉系统原理正确, 方案可行, 能够实现不同目标边缘特征的实时提取. 而在透镜前设置去假频前置滤波器可以较好地实现对 OA-SLM 产生的噪声的去除, 理论分析获取的去假频前置滤波器参量正确, 且试验效果良好. 为获取质量较好的实时图像特征提取奠定了基础.

参考文献

- [1] CAI He-gao. Robot will be a hot spot of technological development in the twenty first century[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, **11**(1-2): 58-60.
蔡鹤皋. 机器人将是 21 世纪技术发展的热点[J]. *中国机械工程*, 2000, **11**(1-2): 58-60.
- [2] STANLEY K, WU J Q M, JERBI A. Neural Network-based Vision Guided Robotics [C]. *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Detroit, Miching: IEEE Robotics & Automation Society, 1999. 281-286.
- [3] DAI Shi-jie, YUE Hong, DENG Zhi-peng, et al. Design of a robot vision sensor based on optical wavelet transform[J]. *Opto-electronic engineering*, 2004, **31**(1): 52-54.
戴士杰, 岳宏, 邓志鹏, 等. 基于光学小波变换的机器人视觉传感器设计[J]. *光电工程*, 2004, **31**(1): 52-54.
- [4] WANG Ying-zong, HUO Yi-ping, DU Yan-li, et al. An photric hybrid system for recognition of nearly identical images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(9): 1143-1145.
王应宗, 霍义萍, 杜艳丽, 等. 一种用于相似图像识别的光电混合处理系统[J]. *光子学报*, 2002, **31**(9): 1143-1145.
- [5] HE Jun-fa, ZHAO Xuan-ke, WANG Hong-xia, et al. Joint-transform correlation recognition based on optical Wavelet-transform differentiation-preprocessing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(12): 1538-1541.
何俊发, 赵选科, 王红霞, 等. 基于光学小波微分预处理的联合变换相关目标识别[J]. *光子学报*, 2002, **31**(12): 1538-1541.
- [6] BUMS T, FEILDING K, ROGEERS S, et al. Optical haar wavelet transform [J]. *Optical Engineering*, 1992, **31**(6): 1852-1858.
- [7] PINSKI S D, ROGEERS S K, WELSH D M, et al. Image segmentation using optical wavelets[C]. *SPIE*, 1992, **1702**: 11-19.
- [8] FREYSZ E. Optical wavelet transform of fractal aggregates [J]. *Phys Rev Lett*, 1990, **64**(7): 745-748.
- [9] SHENG Y, LU T, ROBERGE D. Optical N4 implementation of a two-dimensional wavelet transform [J]. *Optical Engineering*, 1992, **31**(6): 1859-1864.
- [10] DECUSATIS C, KONY J, DAS P. Hybrid optical implementation of discrete wavelet transforms: a tutorial [J]. *Optics & Laster Technology*, 1996, **28**(2): 51-58.
- [11] WANG Xiang-hui, LIN Lie, YANG Yong, et al. Design of phase-only pupil filters based on vector diffraction theory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1378-1381.

- 王湘晖,林列,杨勇,等.基于矢量衍射理论的相位型光瞳滤波器设计[J].光子学报,2003,32(11):1378-1381.
- [12] XU Ke-xin, HE Zhong-hai, XUE Bin. Theoretical analysis to acousto-optic tunable filter system with normal phase match condition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(8): 1047-1050.
- 徐可欣,贺忠海,薛彬.一般相位匹配条件下声光可调谐滤波器系统的理论分析[J].中国激光,2006,33(8):1047-1050.
- [13] PAN Wei, ZHANG Xiao-xia, LUO Bin, *et al.* Design of tunable optical filter using ladder-interference-type structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(6): 627-632.
- 潘伟,张晓霞,罗斌,等.一种梯形干涉链可调谐光滤波器的设计与研究[J].光学精密工程,2005,13(6):627-632.
- [14] YE Xue-hua, ZHANG Yao-ju. Optimizing the optical field distribution of solid immersion lens microscopy systems using the three-zone amplitude-only and phase-only filters[J]. *Laser Journal*, 2007, 28(1): 68-69.
- 叶雪华,张耀举.用三区振幅和相位滤波器优化固体浸没透镜显微系统的光场分布[J].激光杂志,2007,28(1):68-69.

Eliminating Noise of Optical Address Spatial Light Modulator for Photoelectric Hybrid Robot Vision System

DAI Shi-jie^{1a,2}, ZHOU Guo-xiang^{1b}, YUE Hong^{1a}, DENG Zhi-peng^{1a}, CAI He-gao²

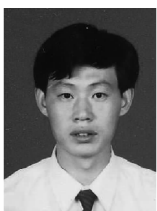
(1 a. Research Institute of Robotics and Automation; b. School of Sciences, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

(2 State Key Laboratory of Robotics and System (HIT), Harbin 150080, China)

Received date: 2007-08-20

Abstract: In view of the photoelectric hybrid robot vision system, the sources of noise and the artificial frequency in the process of the continuous image being sampled by the optical addressing spatial light modulator were analyzed. By using the sampling theory, the method of restraining the sources of noise and the artificial frequency by the eliminating artificial frequency light pre-filter was put forward. On the base of the eliminating artificial frequency light pre-filter being the rectangular window function by the theoretical analysis and according to the parameters of the optical addressing spatial light modulator in the robot vision system, the structure and the size of the eliminating artificial frequency light pre-filter used in this system was calculated out. The experiment of the image character pick-up of the vision system was carried out and the experimental results show that the light pre-filter has good effect.

Key words: Robot vision; Noise analysis; Optical address spatial light modulator; Sampling theory; Antialiasing pre-filter



DAI Shi-jie was born in 1970. He received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2003. Now he is an professor at School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology. His research interests focus on robotics and vision, etc.