

doi:10.3788/gzxb20154404.0409001

基于光学相控阵的目标指示系统

黄应清^a, 赵哲^a, 蒋晓瑜^b, 闫兴鹏^b

(装甲兵工程学院 a. 控制工程系; b. 信息工程系, 北京 100072)

摘要:为实现对运动目标实时指示激光束的非机械电控制,建立了基于光学相控阵的目标指示系统.首先,根据光学相控阵原理和空间光调制特性,对预设指示图添加共轭对称项,利用快速傅里叶变换计算全息法生成的全息图进行制表.其次,在图像传感器采集视频下,运用基于核函数密度估计的改进 Mean-shift 目标跟踪算法,获取多目标位置信息,查表并载入全息信息,完成全息图的实时更新.最后,利用空间光滤波特性,设计光电再现环节,消除冗余项并完成全息再现过程.实验发现:对 8bit 灰度全息图,系统每秒的指示速度均在 60 帧以上,各部件效能达到最大化.满足了目标指示系统稳定性、实时性、准确性等要求,理论算法和实验结果也验证了该系统的有效性.

关键词:激光束;光学相控阵;空间光调制;快速傅里叶变换;Mean-shift;查表;空间光滤波

中图分类号:TP391;O438.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)04-0409001-6

Target Indication Based on Optical Phased Array

HUANG Ying-qing^a, ZHAO Zhe^a, JIANG Xiao-yu^b, YAN Xing-peng^b

(a. Department of Control Engineering; b. Department of Information Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to realize non-mechanical electric control for the laser beam for real-time moving target indication, a target indication system was established based on optical phased array. First, according to the principle of optical phased array and spatial light modulation characteristics, conjugate symmetric key to the default indicator diagram was added, then the calculating holography method of fast Fourier transform was used to generate holograms for tabulation. Secondly, under the charge-coupled device video capture environment, the improved Mean-shift tracking algorithm based on kernel density estimation was used to obtain information of target position, looked up in the table and loaded the holographic information to complete hologram real-time update. Finally, taking advantage of spatial light filtering characteristics, optoelectronic reconstruction step was designed, superfluous term was eliminated and the holographic reproduction process was completed. Experimental results show that the system speed is in more than 60 frames per second on 8 bit gray scale hologram and all parts to maximize effectiveness. It can satisfy the system requirements of real time, higher precision and stabilization. The theoretical algorithm and experimental results also verify the effectiveness of the system.

Key words: Laser beam; Optical phased array; Spatial light modulation; Fast Fourier transform; Mean-shift; Table look-up; Spatial light filtering

OCIS Codes: 090.1760; 090.5694; 100.4999; 110.4155

0 引言

目标指示系统是指示感兴趣目标航迹位置的装

置,它广泛应用于射击指挥系统、激光驾束制导系统、机器人自主行走装置和空间飞行器着陆辅助装置等.

光学相控阵(Optical Phased Array, OPA)来源于

基金项目:国家自然科学基金(No. 61205120)和全国优秀博士学位论文作者专项资金项目(No. 201432)资助

第一作者:黄应清(1966—),男,教授,博导,主要研究方向为模式识别与智能系统. Email:huangyingqing1105@163.com

通讯作者:蒋晓瑜(1967—),男,教授,博导,主要研究方向为信息光学与三维全息显示技术. Email:jiangxiaoyu2007@gmail.com

收稿日期:2014-09-03; **录用日期:**2014-11-10

<http://www.photon.ac.cn>

微波相控阵技术^[1-2],它作为一种新兴技术,利用其工作材料的光电特性,可实现对光束指向的非机械电控制,并通过模块复用,实现大功率、多波束的扩展功能^[3].该技术具有灵巧和快速的光束控制能力,并有着分辨率高、抗干扰和高保密性等诸多优点,对光学系统产生重要影响,越来越多地应用在激光雷达及光通信等技术领域^[4-5].基于空间光调制的方法对光束进行控制^[6],可以有效规避机械控制光束指向的缺点,包括机械转动频率限制成像速率、机械振动影响瞄准准确度、光束难驻留、产品难量化和控制方式单一,影响目标指示效果等问题^[7].欧美等国很早就对光学相控阵进行研究,美国 Raytheon 公司将光学相控阵集成到系统中以实现跟踪^[8].国内有关空间光调制器用于目标跟踪系统的实验研究鲜有报道.本文介绍了基于光学相控阵技术的目标跟踪指示系统的设计和实现方法.

1 系统框架

目标指示系统的功能即对机器视场内的运动物体跟踪并加以激光指示.系统选用 CCD 作为图像采集装置,对感兴趣目标进行跟踪,实时获取目标位置信息.通过基于光学相控阵的空间光调制原理生成包含指示信息的数字全息图,将其加载至空间光调制器,经参考光照射,实现光电再现,达到对指定目标的覆盖指示.当目标物体运动时,位置信息也随之改变,并再次生成与之对应的全息图.因此,只需保证目标位置信息获取的实时性和全息图生成的高效性,就可在物体运动状态下,使用该系统,实现对目标物体的实时指示.

设计中的目标指示系统主要由反射式空间光调制器、数据处理终端、激光器、光学准直扩束装置和光电再现装置等部分组成,如图 1.其中光学准直扩束装置

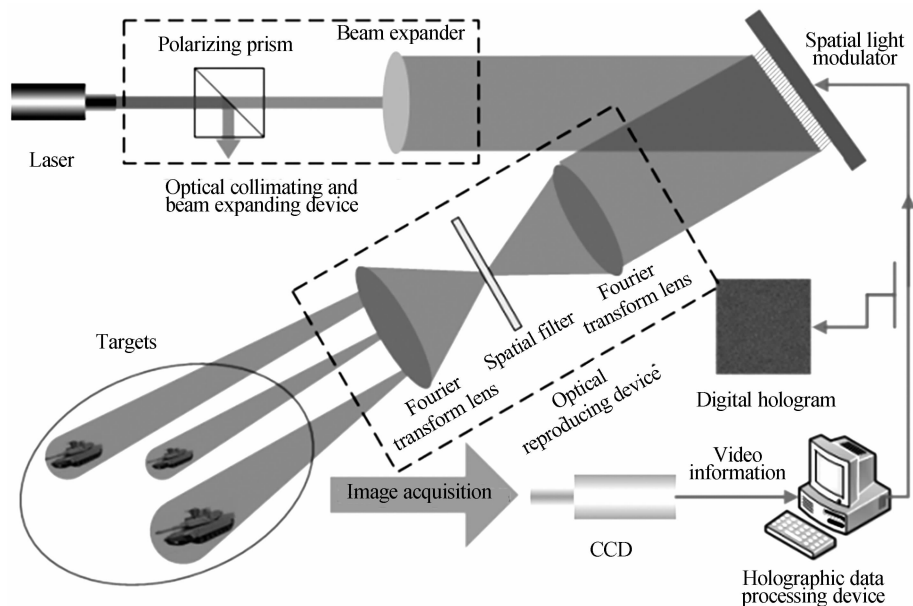


图 1 系统组成框图

Fig. 1 The system composition diagram

由偏振起偏棱镜和激光扩束器组成,光电再现装置由两个傅里叶透镜和空间滤波器组成.

2 目标跟踪指示

系统的目标跟踪算法计算效率应满足后续大量计算的实时性需要.基于核密度估计的方法已广泛被用于计算机视觉、模式识别中目标特征概率密度分布的建立. Mean-shift 目标跟踪算法是视觉跟踪领域中基于核概率密度估计的一种无参量算法^[9-10]. Mean-shift 即均值漂移,是 Fukunaga 和 Hostetler^[11]在 1975 年研究核函数的密度估计时提出的原型,计算效率出色.

本文运用核窗口自动选取算法以应对尺寸不断变化的刚性目标.由于刚性物体运动满足仿射模型假设,且只考虑实际运动,即物体平移和伸缩情况,目标跟踪

仿射模型为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $[x', y']^T$ 和 $[x, y]^T$ 分别为相邻帧间的目标特征点位置, s_x 和 s_y 是目标水平和垂直方向上伸缩的幅值大小, e_x 和 e_y 为平移参量.

利用连续帧对物体形心进行配准补偿空间定位偏差,采用鲁棒回归,将角点归一化到形心为原点的坐标中,再进行特征匹配.最后核窗口宽度 h 根据仿射模型伸缩幅值进行更新,即

$$h = h \cdot \sqrt{(s_x)^2 + (s_y)^2} \quad (2)$$

该方法降低了全局搜索模板匹配的高额计算代价.以单目标、视频流大小为 270×540 为例,截取 1 500 帧, Mean-shift 目标跟踪速率如图 2.

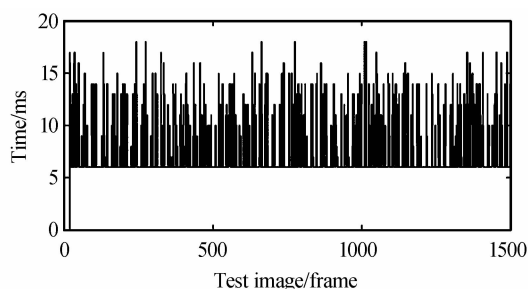


图2 Mean-shift 目标跟踪速率

Fig.2 Target tracking rate of mean-shift algorithm

3 计算全息算法设计

计算全息(Computer Generated Hologram, CGH)是数字信息和光学信息间重要的联系环节,实质就是通过计算将物光波复振幅分布转换成是实数域的透过率分布^[12-13].常规的全息计算效率过低,很难满足该系统的运动指示功能,因此应设计高速的计算全息算法以保证系统指示的实时性要求.目前,快速计算全息领域已有长足进步^[14].设计采用傅里叶变换全息,被记录的复数波面是物光波函数的傅里叶变换,傅里叶变换可借助计算机进行快速傅里叶计算实现,计算傅里叶变换全息可直接再现物光波的傅里叶频谱,经由变换透镜组成的光电再现装置实现逆变换,即可再现物光波本身.

对物光波直接进行二维离散傅里叶变换,即

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp \left(-j2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right) \quad (3)$$

$$f(x, y) = \begin{cases} A(x, y) \cdot e^{j\varphi(x, y)} & (0 \leq x \leq M, 0 \leq y \leq N) \\ A(2M-x, N-y) \cdot e^{-j\varphi(2M-x, N-y)} & (M < x \leq 2M, 0 \leq y \leq N) \end{cases} \quad (4)$$

物光波经傅里叶变换后得到了包含物光波的幅值和相位信息的二维离散实函数 $F(u, v)$.为快速生成 8 位灰度全息图,并且加载至空间光调制器,需进行全息编码,即保持 $F(u, v)$ 的线性关系进行映射,归一化至整数集 0~255 范围内.得到的全息编码图为

$$F'(u, v) = \left\lfloor \frac{255 \cdot \{ \max[F(u, v)] - F(u, v) \}}{\max[F(u, v)] - \min[F(u, v)]} \right\rfloor \quad (5)$$

显然全息图 $F'(u, v)$ 中除了包含物光波的相位和幅值信息外,还有直流分量、高阶项和共轭项.此时,需在光电再现装置中需添加空间滤波装置,用以消去零级斑、高阶光和共轭光成分.实验结果如图 4 所示,图 4(a)为原始目标覆盖图案,图 4(b)为数字再现结果.利用结构相似指数测量函数(Structural Similarity, SSIM),对原始图和数字再现图进行相似度评估,相似度为 0.8631.图 4(c)为光电再现结果,杂波较多,需在光电再现装置中需添加空间滤波装置,用以消去零级斑、高阶光和共轭光成分.

由于全息图应为实透过率函数,因此物光波需要多次迭代傅里叶变换,保证相位信息不丢失,且尽可能转化为幅值信息^[15].可知:多次迭代变换涉及到极大的计算量.快速傅里叶涉及到的矩阵分解算法,一定程度上也缩短了计算时间^[13].

目前普遍采用模拟参考光和物光波干涉实现全息图生成过程.设计不引入干涉过程,利用共轭对称复函数的傅里叶变换为实函数这一熟知特性,添加一个物光波共轭对称项,一次傅里叶变换后,经适当编码后即生成实数全息图^[15].将该全息图加载至空间光调制器,经扩束激光照射,即可再现物光波,得原始物光波与共轭物光波共存的实像,完成特定信息场覆盖目标.流程如图 3.

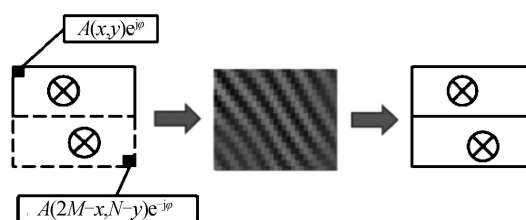


图3 共轭对称傅里叶计算全息流程

Fig.3 Conjugate symmetry Fourier CGH flow diagram

获取的视频流为 $M \times N$ 的二维实函数,将灰度值作为物光波 $f(x, y)$ 的幅度 $A(x, y)$,添加范围在 $[-\pi, \pi]$ 内的随机数为物光波 $f(x, y)$ 的相位因子 $\varphi(x, y)$,使物光波频谱变得更宽,控制了整体全息图的动态范围.由于添加了共轭对称项,则物光波表示为

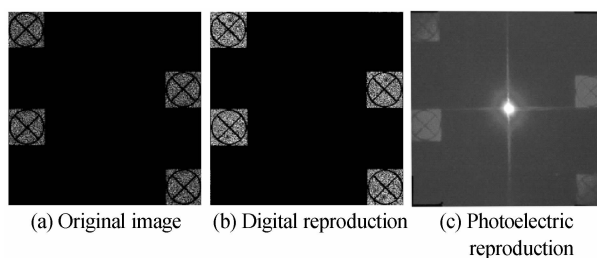


图4 实验结果

Fig.4 Experimental result

4 试验结果与改进

4.1 试验结果

对目标跟踪算法采用多线程方式,即可实现多目标的跟踪.实验采用英特尔 Core i7 处理器和 16G 内存,在 Visual Studio2010 平台上,进行 C++ 多线程编程,OpenCV 库支持图形图像处理,FFTW 库支持二维快速傅里叶变换.系统选用德国 Holoeye 公司的反射

表 1 PLUTO 参量表
Table 1 PLUTO parameters

Type	Parameter value
Effective area	15.36 mm×8.64 mm
Number of pixels	1 920×1 080
Modulator type	Reflection type and only phase modulation
Phase change range	2π radians
Pixel interval	8 μm
Refresh frame rate	60 Hz

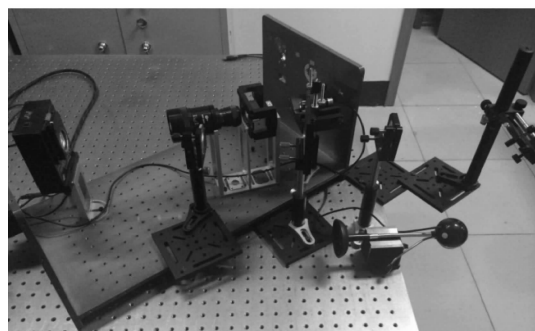


图 5 系统搭建实物图

Fig. 5 System building diagram in kind

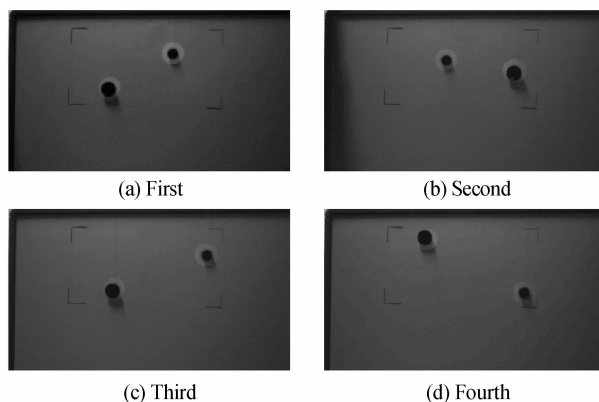
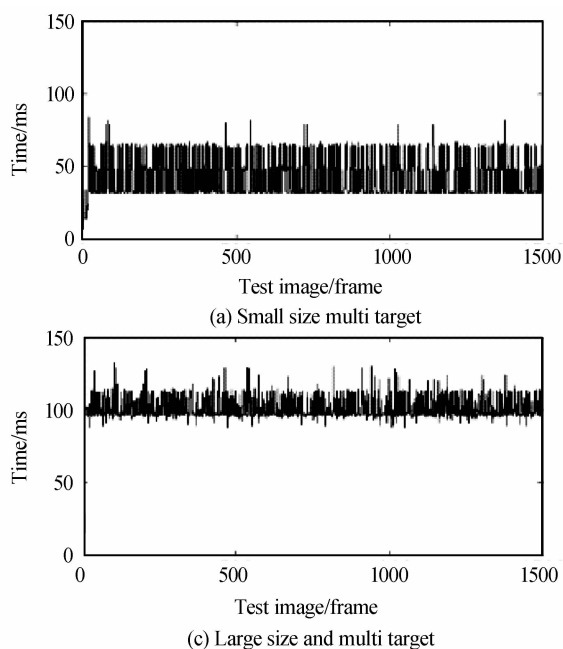


图 6 运动目标指示图

Fig. 6 Moving target indication diagram

型硅基液晶纯相位空间光调制器(LCoS-SLM)系统(型号:PLUTO)作为多目标指示系统的核心部件,参量如表 1. 系统搭建和指示效果分别如图 5、图 6 所示.

对单/多目标、不同尺寸全息图,进行系统跟踪指示速率测量,系统跟踪指示速率主要由 Mean-shift 跟踪速率和计算全息速率构成,影响系统速率的因素还包括指示图像矩阵与数组互相转化的过程等. 实验数据如图 7 所示. 其中图 7(a)、(b)分别为 540×540 全

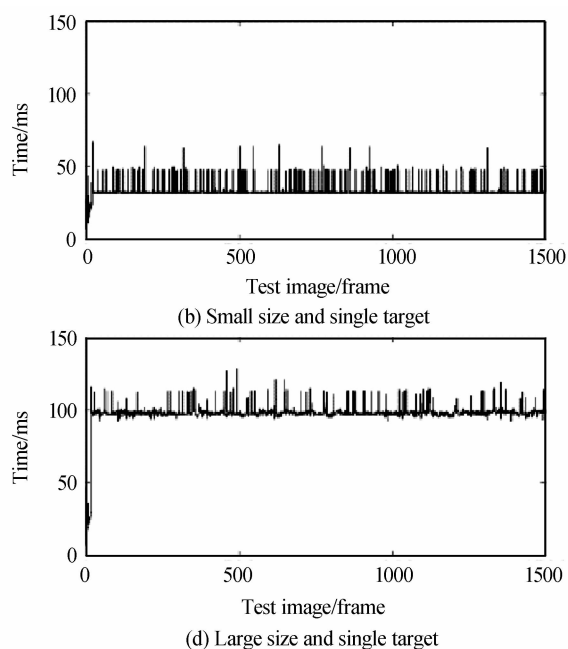


图 7 不同尺寸全息图的单/多目标情况下的系统跟踪指示速率数据

Fig. 7 In case of single/multiple target tracking and indication system data rate of different sizes of hologram

息图的多目标和单目标情况下的系统跟踪指示速率,图 7(c)、(d)分别为 $1\ 080\times 1\ 080$ 全息图的多目标和单目标情况下的系统跟踪指示速率.

共轭对称法计算全息的速度虽达不到对多目标的实时跟踪指示的要求,但大幅度提高了全息计算的速率. 由于每一帧检测视频流,数据处理终端都生成一幅大尺寸的计算全息图,即每帧的系统跟踪过程均要进行耗时较长的计算全息过程. 针对图 6 的系统跟踪指

示速率情况,虽然小尺寸的全息图跟踪指示速率大幅提升,但并非为解决实时性的最优方案,由此可知:重复的计算全息次数过多,运算量大,不适于大尺寸实时目标跟踪指示. 由此,提出查表改进方案.

4.2 全息图查表法

本文提出的全息查表法即预先进行计算全息过程,生成全部全息图存储于内存中,系统程序运行时直接调用对应运动目标位置的指示全息图,达到快速生

成全息图的目的,可极大地节省算法时间。

针对获取像素数为 $M \times N$ 的视频流进行跟踪试验,每张全息图包含的内容是逐个像素点位置覆盖有特定信息场,全息图数量共计 $M \times N$ 个。由于全息图的共轭对称性,每张全息图尺寸为 $2M \times N$ 。根据全息图的中心对称性,无需逐点覆盖信息场生成全息图,一半尺寸像素点覆盖图即可表示全部全息图集信息。制作 8bit 灰度全息图,因而所占存储空间大小为 $(M \times N/2) \cdot (2M \times N)$ byte。

以视频流大小为 512×256 为例,全部全息图信息储存空间为 16GB。如果系统采用常规 Visual C++ win32 运行库,则无法调用如此大的内存。因为 32 位 windows 系统程序所能调用内存的动态数据不得超过 2GB。选用采用 x64 位编译器对程序进行编译,调用动态数据上限可达 8TB。需对包括 OpenCV 及 FFTW 函数库在内的所有 lib 库重新编译 x64 格式函数库,相应的环境变量中关于各个函数库中 dll 动态链接库也需要相应的修改。经此改进,系统可满足较大内存的调用需求,但是内存占用过大仍会对运行速度造成影响。因此设计目标覆盖图与目标大小成一定比例 α ,每 2×2 像素单元共用一幅全息图,细微覆盖差异可以忽略不计,则存储空间为 4GB,缩小了四倍。基于此,对加入查表算法的全息算法各项数据进行实测,包括已内嵌 Mean-shift 跟踪算法的图像获取速率、制表时间和申请空间时间等,如图 8 所示。其中图 8(a)为 2×2 像素单元全息图更新速率,图 8(b)为 4×4 像素单元全息图更新速率。对比不同像素点等效 1 个像素点的实验数据,如表 2 所示。

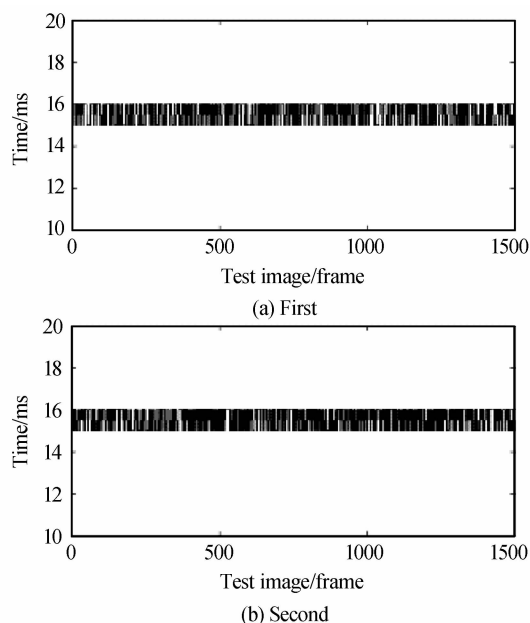


图 8 不同像素单元全息图的更新速率
Fig. 8 Refresh rate of different unit pixel hologram

表 2 不同像素单元实验数据对比
Table 2 Experiment data comparison between different pixel unit

Size of hologram /pixel	Pixel size /pixel	Application of space time/ms	Tabulation time/ms	Indication accuracy
512×512	1×1	Overflow	Overflow	100%
	2×2	783 1	141 929	99.87%
	4×4	224 6	377 83	99.63%
	8×8	692	107 03	99.47%

由实测数据可知:系统每秒处理达到 60~70 帧。目标实时跟踪系统的速率要求为每秒 30 帧,目前通用的 LCoS 空间光调制器的更新频率为 60Hz 左右,满足了系统各功能部件的工作效率最大化。

5 结论

本文针对运动目标的实时跟踪指示系统的算法问题,提出了一种自适应核宽的 Mean-shift 跟踪算法获取位置信息,共轭对称傅里叶查表算法生成全息图的系统算法框架。采用该算法在不损失相位信息的基础上,提高了全息计算效率,实现了对动态多目标的光学相控阵指示。

参考文献

- [1] MCMANAMON P F, BOS P J, ESCUTI M J, *et al.* A review of phased array steering for narrow-band electro optical systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, **97**(6): 1078-1096.
- [2] FENN J, TEMME D H, DELANEY W P, *et al.* The development of phased-array radar technology[J]. *Lincoln Laboratory Journal*. 2000, **12**(2): 321-340.
- [3] ZHAO Lin, ZHAO Chang-ming, YANG Su-hui, *et al.* Performances analysis of optical phased array scanning based blazed phase grating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(2): 341-346.
赵彬,赵长明,杨苏辉,等. 利用相位闪耀光栅的光学相控阵扫描性能分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(2): 341-346.
- [4] LINNENBERGER A, SERATI S, STOCKLEY J. Advances in optical phased array technology[C]. SPIE, 2006, **6304**: 63040T21- 9.
- [5] MCMANAMON P F. An overview of optical phased array technology and status[C]. SPIE, 2005, **5947**: 59470I21-10.
- [6] WANG B, ZHANG G Q. Stressed liquid-crystal optical phased array for fast tip-tilt wave front correction[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(36): 7754-7759.
- [7] ZHANG Jian, XU Lin, WU Li-ying, *et al.* Programmable beam steering based on liquid crystal optical phased array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1497-1502.
张健,徐林,吴丽莹,等. 液晶光学相控阵可编程光束偏转研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1497-1502.
- [8] ZHANG Jian, FANG Yun, WU Li-ying, *et al.* Liquid crystal beam steering technologies[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(2): 325-334.
- [9] WANG Shou-feng, BAI Jun-qi. Bandwidth-adaptive mean shift infrared target tracking algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0510003.

- 王寿峰, 白俊奇. 带宽自适应的均值漂移红外目标跟踪算法[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0510003.
- [10] WANG Ming-jia, WU Zhi-guo, HAN Guang-liang, *et al.* Mean-shift object tracking of adaptive tracking window[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1):67-71.
王明佳, 武治国, 韩广良, 等. 自适应窗口选取的 Mean-Shift 目标跟踪[J]. 光子学报, 2012, **41**(1): 67-71.
- [11] LI Yun-dong, ZHAO Wei-gang. Adaptive updating of kernel band-width for mean-shift tracking [J]. *Journal of Computational Information Systems*, 2012, **22**(8): 9569-9579.
- [12] 徐显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2011.
- [13] BAI Xiao-hui, WAN Lin, REN Ya-ping, *et al.* Reflection holography for three-dimensional display based on computer-generated holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 591-595.
拜晓慧, 万琳, 任亚萍, 等. 利用反射全息实现计算全息三维显示[J]. 光子学报. 2012, **41**(5): 591-595.
- [14] HUCBSCHMAN M, MUNJULURI B, GARNER H. Dynamic holographic 3-D image projection [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(5): 437445.
- [15] HUANG Su-juan, WANG Shuo-zhong, YU Ying-jie. Computer generated holography based on Fourier transform using conjugate symmetric extension [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(2):952-958.
黄素娟, 王朔中, 于瀛洁. 共轭对称延拓傅里叶计算全息[J]. 物理学报, 2009, **58**(2): 952-958.