

采用 FMT 的实时景象匹配关键技术

张 叶,曲宏松,李桂菊,王延杰

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘 要: 对于具有旋转和缩放的图像,为了解决景象匹配技术在硬件平台上的实时实现问题,分别从软件和硬件两个方面对系统进行设计:软件方面,改进传统的傅里叶梅林变换(FMT),并减少细节信息对计算结果的影响;硬件方面,采用 DSP TMS320C6416 为核心处理器,利用其片内存储空间大,运算速度快的特点,并利用数字信号处理支持库中提供的一系列高效手工优化函数,如滤波器和傅里叶变换,快速完成景象匹配所涉及的复杂算法,使得算法能够实时实现。实验结果表明:基于定点 DSP TMS320C6416 的图像处理系统可以实时完成旋转和缩放下的景象匹配技术,其处理时间小于 40 ms,旋转测量精度满足要求。

关键词: 景象匹配; Fourier-Mellin 变换; 定点 DSP TMS320C6416

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2011)08-1576-06

Key technique of real-time scene matching system based on FMT

Zhang Ye, Qu Hongsong, Li Guiju, Wang Yanjie

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: In order to solve the problem of rotated and scaled scene matching in the hardware platform of real-time implementation, software and hardware design were presented for the real-time scene matching system. The traditional Fourier-Mellin transform (FMT) had been improved to suit the hardware platform, and reduce the influence of details information on the calculation results. On the other hand, using DSP TMS320C6416 processor as the core, which possessed the property of high processing speed and a large on-chip memory, it also provided a set of high efficient manual optimization functions commonly used in signal processing applications, such as filtering and FFT, it made the involved complex algorithms realize on the hardware real-time. Experimental results show that DSP TMS320C6416 based real-time scene matching processing can be realized, the processing time is less than 40 ms and the rotation measurement accuracy meets the requirement.

Key words: scene matching; FMT; fixed point DSP TMS320C6416

收稿日期:2010-12-15; 修订日期:2011-01-20

基金项目:国家自然科学基金青年基金(60902067)

作者简介:张叶(1981-),女,博士,副研究员,主要研究方向为计算机视觉与模式识别。Email: zhangye@ciomp.ac.cn

0 引言

景象匹配技术是在航天技术、卫星应用技术、计算机、图像处理、模式识别、计算机图形学的基础上发展起来的一门新技术,广泛应用于军事、民用和医学等领域,如飞机辅助导航、导弹末制导与精确打击、目标搜索与跟踪、超分辨率重构、多传感器数据融合、全景图像生成、监控系统、三维重构、有模板的目标识别、医学成像等,是一门前沿课题和交叉学科。

目前,景象匹配技术的难点是具有一定旋转和缩放的景象图像的匹配^[1-4],模板匹配是目标识别和跟踪领域中的一种重要方法,它通常是指在一幅图像中寻找已知模式的过程。经典的模板匹配算法通过计算模板与待匹配图像的某个区域的相似度来判断已知模式是否存在于目标图像中,如果存在则得到其位置。计算相似性的方法是计算其归一化互相关系数:

$$R(m,n) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M S^{mn}(i,j)T(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [S^{mn}(i,j)]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [T(i,j)]^2}} \quad (1)$$

由于相关法求解匹配问题时往往计算量很大,所以,人们提出了一些降低计算量的方法,如使用金字塔算法实现多分辨率的配准,并通过这种自顶向底的过程实现计算速度的提高;或通过定义能够快速计算的归一化相关函数来计算候选位置之间的相关值,并舍弃那些比当前位置相关值低的位置。但是,当图像中的目标发生旋转或缩放,上面的方法便无法直接应用,需要计算出目标图像和模板直接的旋转角度和缩放大小。

国内外提出的适于旋转、缩放景象匹配的比较流行的方法主要有以下3种:利用不变矩^[1]和光流法对旋转和缩放的目标图像识别能力较好,但计算量对目前的处理能力还不能满足实时景象匹配,且还不能给出旋转和缩放的大小;二是基于特征的景象匹配方法,该方法运算速度与有效特征数直接相关,受噪声影响较大;三是文中采用的傅里叶梅林变换(FMT)^[5],它是一种全局的变换方法,对照明变化、部分遮挡具有很强的鲁棒性,并可以抑制一定的加性噪声,FMT只考虑灰度分布情况而与图像具体灰

度无关,可以适用于不同传感器间的图像匹配。其缺点是两幅图像间平移量不能过大。但对于在硬件系统中的实现,国内还很少有文章探讨。

1 FMT

1.1 FMT 原理

为了能够在目标图像旋转和缩放条件下依然能够进行景象匹配,采用对 Fourier 幅值进行 FMT 变换的方法,该方法可以获得两幅图像的平移不变性,使得复原旋转和比例参数成为可能,进而能够确定平移参数。

考虑两幅目标图像 $f_1(x,y)$ 和 $f_2(x,y)$, 其中 $f_2(x,y)$ 是 $f_1(x,y)$ 经过平移、旋转和一致尺度缩放(横纵轴方向尺度变换因子相等)变换后的图像,即:

$$f_2(x,y) = f_1[\sigma(x\cos\alpha + y\sin\alpha - x_0, \sigma(-x\sin\alpha + y\cos\alpha) - y_0)] \quad (2)$$

那么 $f_1(x,y)$ 和 $f_2(x,y)$ 对应的 Fourier 变换 $F_1(u,v)$ 和 $F_2(u,v)$ 之间满足:

$$|F_2(u,v)| = \sigma^{-2} |F_1[\sigma^{-1}(u\cos\alpha + v\sin\alpha), \sigma^{-1}(-u\sin\alpha + v\cos\alpha)]| \quad (3)$$

式中: $|*|$ 表示频谱幅度。可以看出:旋转角度 α 和缩放因子 σ 可以和平移量 x_0 和 y_0 进行分离计算,频谱幅度仅与旋转角 α 和缩放因子 σ 有关,而与平移量 x_0 和 y_0 无关,因此,可以通过图像幅度谱求出旋转角度 α 和缩放因子 σ 。

建立对数极坐标^[6-8]: $\ln\rho = \ln(\sqrt{u^2 + v^2})$; $\theta = \arctan(v/u)$

利用对数极坐标的性质可以得出:

$$F_2(\theta, \log\rho) = F_1(\theta - \alpha, \log\rho - \log\sigma) \quad (4)$$

则目标图像在笛卡儿坐标下的旋转和缩放变化将转化为对数极坐标下图像的平移变化。

如果目标已经提取出来,则可以利用重心的旋转和缩放不变性,以目标的重心点作为原点直接建立对数极坐标系,计算图像平移。

应用傅里叶变换位移理论:

设 $f_2(x,y)$ 为 $f_1(x,y)$ 在 x 和 y 方向分别平移 x_0 和 y_0 后的图像,即:

$$f_2(x,y) = f_1(x - x_0, y - y_0) \quad (5)$$

若 f_1 和 f_2 对应的傅里叶变换分别为 $F_1(u, v)$ 和 $F_2(u, v)$:

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) e^{-j\frac{2\pi}{N}mu} e^{-j\frac{2\pi}{N}nv} \quad (6)$$

则它们之间有如下关系:

$$F_2(u, v) = F_1(u, v) e^{-j(u x_0 + v y_0)} \quad (7)$$

则 $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 的互功率谱为:

$$\frac{F_1(u, v) F_2^*(u, v)}{|F_1(u, v) F_2^*(u, v)|} = e^{j(u x_0 + v y_0)} \quad (8)$$

式中: F_2^* 表示 F_2 的复共轭, 由此看出, 互功率谱的相位等价于图像间的相位差, 通过对公式(8)进行傅里叶逆变换, 会在 (x_0, y_0) 处形成一个脉冲函数。脉冲峰值位置即为两幅目标图像间的相对平移量 x_0 和 y_0 。

1.2 FMT 的精度分析与改进

FMT 变换是解决一幅图像或目标图像旋转和缩放的经典算法, 主要由经典的二维离散傅里叶变换、对数极坐标变换和功率谱反傅里叶变换组成, 其中二维傅里叶变换对 FMT 的精度影响是最大的, 要解决 FMT 的计算精度, 首先要从原始图像本身入手, 将原始图像转换为适于进行 FMT 变化的图像。

在有限图像中, 几何变换可以将一些图像中的像素移入或移出原始图像的范围, 由此会改变 Fourier 变换的幅值和频谱中的独立分量, 由有限图像的二维离散 Fourier 变换产生的不连续性会在 Fourier 频谱中增加一个高幅值且比例不变的“+”形特征, 它的出现会对后续的处理带来干扰, 因此, 有必要选择一种滤波器, 在对配准图像的 Fourier 频谱进行后续处理之前通过滤波来减小由于有限变换而造成的伪像。参考文献[2]和[6]中建议使用一个旋转对称的图像范围来消除这个伪像, 采用一个圆形掩膜来实现, 在内接圆半径之外取 0 值, 如图 1(b)所示。

由于圆周边界尖锐的灰度变化仍会引起频率空间域的频谱泄露, 一些伪能量会集中在高频区, 从而会随旋转变换而产生很强的混淆现象, 并且噪声明显, 不适于后续匹配工作。这种由于边界效应而产生的频谱泄露现象可以使用加窗的方式减少或消除。这里使用 Harris 介绍的一个 Blackman 窗来实现, 通过实验可以看出: 它比不加窗或只加圆形掩膜所得

到的结果好很多, 如图 1 所示, (a)为原始图像条件下进行傅里叶变换, 幅度谱有明显的加性特征, 而且噪声点很多, 旋转不明显, (b)为加圆形掩膜后图像进行傅里叶变换, 可以看到加性特征干扰被减小, 但仍然有很多噪点, 旋转表现不明显。(c)为加 Blackman 窗后进行傅里叶变换, 可以看到加性特征完全被抑制, 噪声点影响很小, 旋转表现明显, 展现了更好的图像质量, 利于后续处理。

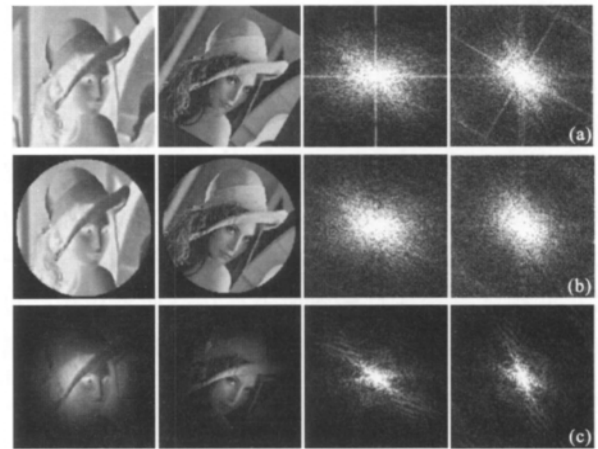


图 1 旋转并反色前后两幅图像

Fig.1 Original image and its rotated inverted image

Blackman 窗如图 2 所示, 表达式为:

$$W(n) = 0.42 + 0.50 \cos\left[\frac{2\pi}{N}n\right] + 0.08 \cos\left[\frac{2\pi}{N}2n\right] \quad (9)$$

式中: $n = -\frac{N}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{N}{2}$ 。

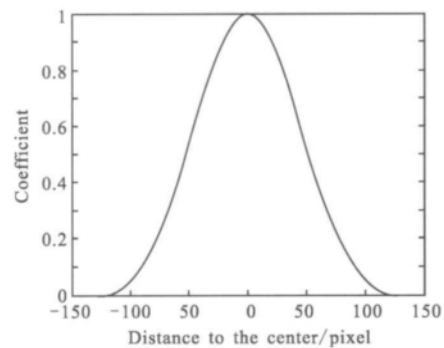


图 2 Blackman 窗

Fig.2 Blackman window

1.3 去细节纹理方法改善平移求解

相位相关是可以抗光照变化的, 但无论是相位相关还是灰度差方法, 对平移的求解都受高频细节信息的影响, 比如人脑分析平移也都是根据比较明

显的大块的低频信息来判断,倘使纹理特别细,再加上采样的不连续,很多细节信息在两幅同场景的图像中不对应,影响匹配精度,因此,在 FMT 之前需要减少图像中过多的细节对平移量计算的影响。

采用均值滤波、中值滤波和形态学的方法对图像进行滤波,达到去除细节纹理的效果,可以使狄拉克峰值提高 5%,抑制噪声和低频细节纹理对平移计算的影响,如图 3 所示。

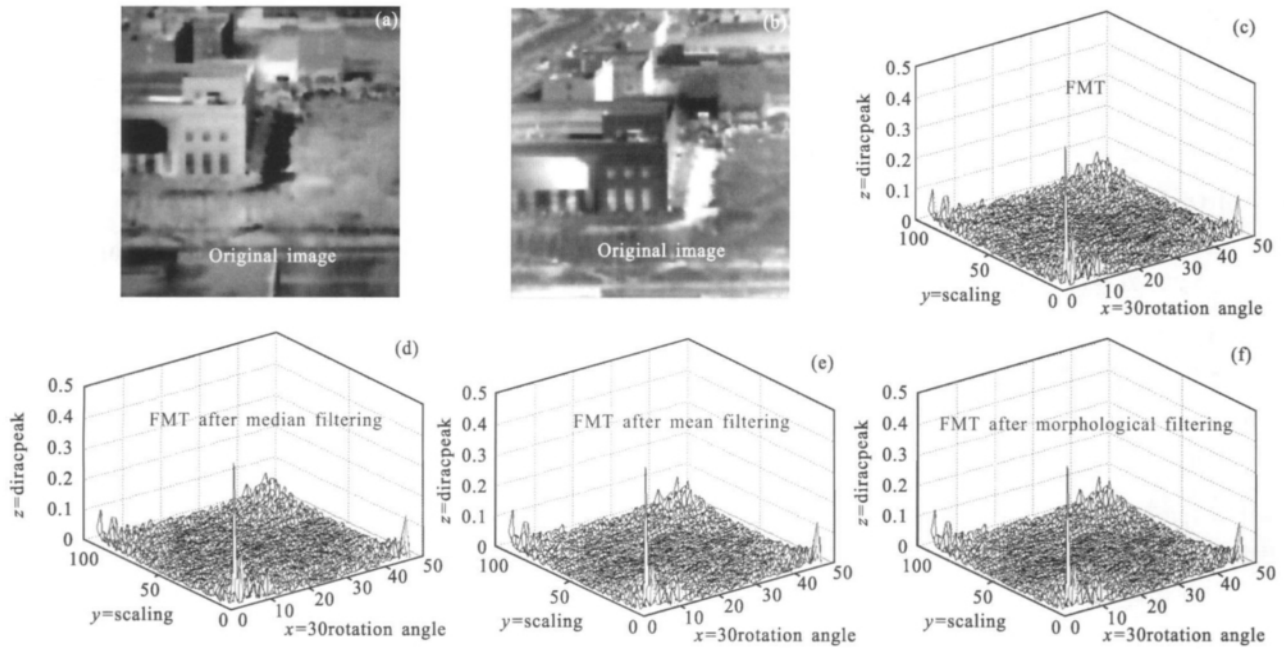


图 3 采用中值滤波、均值滤波和形态滤波学方法对图像进行滤波
Fig.3 FMT after median filtering, mean filtering and morphological filtering

2 多传感器图像镶嵌技术

目前,主要解决的是由旋转和一致尺度缩放所引起的图像刚性变换,令 $X=[x,y]^T$:

$$\hat{X} = \alpha \begin{bmatrix} \cos\theta, -\sin\theta \\ \sin\theta, \cos\theta \end{bmatrix} X + b \quad (12)$$

该式有 3 个自由度,其中 $\alpha \in R$ 表示一致尺度缩放大小, $\theta=(0, 2\pi)$ 表示旋转角度, $b \in R^2$ 表示平移量。经过之前的 Fourier-Mellin 变换,可以得到前两个参数,平移量可以通过平面相似度测量的方法求得,使用相位相关与模板归一化相关系数相结合的方法。

改进的 FMT 方法具有很好的灰度无关的性质,如两种灰度不相同,但像素灰度分布相同的图像,其傅里叶幅度谱是大致相同的。如反色或加亮的两幅图像,与原图像具有大致相同的幅度谱。可利用 FMT 灰度无关的特点,进行红外图像与可见图像的匹配与镶嵌。实验结果如图 4 所示。

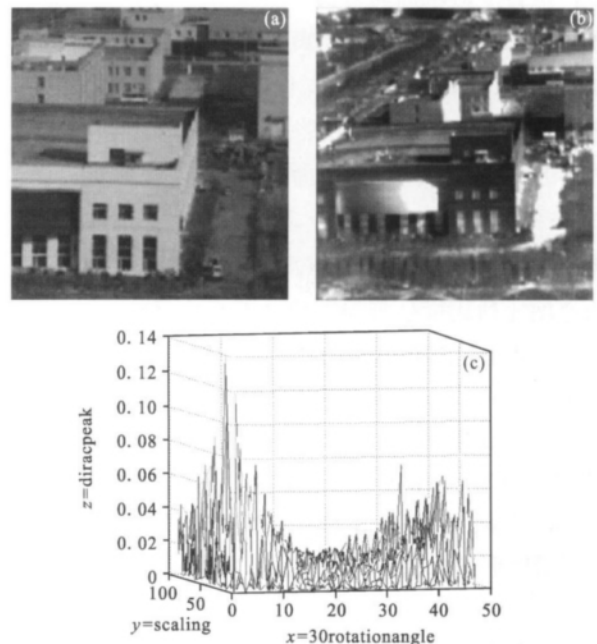


图 4 可见与红外图像间的景象匹配
Fig.4 Visual and infrared images matching

由实验可以看出:两幅图像是由可见和红外两

种不同类型的传感器采集的,存在灰度、旋转、缩放和分辨率的不同,应用文中介绍的改进的 FMT 方法,可以得到非常明显的 Dirac 峰值,从而准确得到两幅图像间旋转和缩放的大小以及相似度。

3 硬件系统与软件优化

景象匹配系统以 32 位定点 DSP TMS320C6416 为核心进行硬件系统设计,TMS320C6416 工作主频 600 MHz~1 GHz,1 MByte 片内 RAM。

数字信号处理器中的操作具有高效重复的特点,与通用的微处理器相比,DSPs 在寻址和计算能力等方面做了扩充和增强,由于 DSPs 的功能特点,乘法操作是 DSPs 的一个重要任务,而在通用微处理器内通过微程序实现的乘法操作往往需要 100 多个时钟周期,而 DSPs 内都设有硬件乘法器来完成乘法操作,以提高乘法速度。硬件乘法器是 DSPs 区别于通用微处理器的一个重要标志^[9];DSP 内部具有多功能单元,并行操作使得 DSP 在相同时间内能够完成更多的操作,从而提高了程序的完成速度。传统的微处理器通常采用冯·诺曼总线结构,拥有统一的程序和数据空间,共享程序和数据总线,因而程序指令只能串行执行。对于面向数据密集型算法的 DSPs 采用了数据总线和程序总线分离的哈佛总线结构,这样 DSPs 可以同时取指和取操作数了。灵活的总线结构大大缓解了数据瓶颈对系统性能的限制;此外,专用的寻址单元,片内存储器的设置,以及流水处理都对 DSPs 完成简单而大量的运算处理提供了帮助。在相同的时钟频率和芯片集成度下,DSPs 完成 FFT 算法的速度比通用微处理器要快 2~3 个数量级。

DSP TMS320C64x 的数字信号处理芯片支持库提供了一系列高度优化的函数,包括一些滤波函数和快速傅里叶变换,如 DSP_fft()和 DSP_fft16x16t()都是针对 6416 手工优化的,前者必须是 4 的整数次幂点的 Fourier 变换,后者是 2 的整数次幂点的 Fourier 变换。600 MHz 时钟的 C64x 完成 1 024 点定点 FFT 的时间只要 10 μs,比传统 DSPs 要快 1 到 2 个数量级。因此,在军事通信、电子对抗、雷达系统和制导武器等需要高度智能化的领域,这种芯片的高速处理能力具有很好的优势。

对于其所需要的浮点运算,如 cos, sin 运算等,皆可使用查表的方法来解决,减少浮点运算耗费的时间。

表 2 为算法步骤与运行时间对照表。

表 2 算法步骤与运行时间对照表
Tab.2 Algorithm routine and the corresponding processing time

Algorithm routine	Processing time/ms
Image preprocessing	1
Remove image detail information	2
2D FFT	5
Amplitude spectrum calculation	6
Polar image transform	10
Cross power spectrum calculation	6
2D inverse Fourier transform	2
Other processes, including initialization	5
In total	37

4 结论

对实时采集的视频图像进行仿真测验,仿真效果较好,对数字相机采集图像进行 512×512 的采样计算图像旋转角度,计算时间约为 37 ms,对于 25 Hz 的相机,可以在一帧之内完成,评价旋转角度测量优于 0.3°。

参考文献:

- [1] Hu Ming Kuei. Visual pattern recognition by moment invariants [J]. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 1962, 8(2): 179-187.
- [2] Stone H S, Tao Bo, McGuire M. Analysis of image registration noise due to rotationally dependent aliasing [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2003: 114-135.
- [3] Yu Hongchuan, Bennamoun M. Complete invariants for robust face recognition [J]. *The Journal of the Pattern Recognition Society*, 2006: 1-13.
- [4] Ghorbel F. A complete invariant description for gray-level images by the harmonic analysis approach [J]. *Pattern Approach Letter*, 1994, 15(10): 1043-1051.
- [5] Morandi DeCastro C. Registration of translated and rotated images using fast Fourier transforms [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, 9(5): 700-703.
- [6] Jin Yongjun, Li Yanjun, Zhang Ke, et al. Scene matching using log-polar transform in missile guiding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 539-542. (in Chinese)

- 金勇俊, 李言俊, 张科, 等. 对数极坐标变换在景象匹配制导中的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 539-542.
- [7] Zhang Ye, Qu Hongsong, Zhao Jian, et al. Log-polar image matching for moving target gesture recognition [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(6): 11-14. (in Chinese)
张叶, 曲宏松, 赵建, 等. 对数极坐标图像匹配在目标姿态测量中的应用[J]. 光电工程, 2007, 34(6): 11-14.
- [8] Zhang Ye, Qu Hongsong, Wang Yanjie. Scene matching algorithm based on rotation invariant keylines, optics and precision engineering [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(7): 1759-1765. (in Chinese)
张叶, 曲宏松, 王延杰. 运用旋转无关特征线实现景象匹配[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(7): 1759-1765.
- [9] Li Fanghui, Wang Fei, He Peikun. DSPs Principle and Application of TMS320C6000 Series[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003. (in Chinese)
李方慧, 王飞, 何佩琨. TMS320C6000 系列 DSPs 原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

下期预览

共口径多波段复合场景仿真技术

虞 红¹, 费锦东¹, 张 盈¹, 高 阳¹, 康为民², 丁 铂²

(1. 导弹控制系统仿真国防科技重点实验室, 北京 100854 ;

2. 哈尔滨工业大学 光学目标仿真与测试技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 以多波段光学成像制导武器系统的半实物仿真需求为牵引, 探讨了多波段、多目标复杂场景仿真系统的实现方法, 系统包括多波段投影系统和目标大视线角显示系统, 重点研究了共口径多波段投影系统的设计方法。通过采用可见光投影系统、近红外投影系统、中波红外投影系统和长波红外投影系统分别产生各单波段仿真场景, 经过反射式耦合光学系统将各波段场景进行复合与输出, 再由目标大视线角显示系统的机械运动形成大视线角的仿真。设计结果表明: 文中的技术途径可行, 像差结果能够满足使用要求。该系统具有宽波段、多目标、大出瞳距、大视线角仿真等特点, 为建立复杂光电对抗环境的半实物仿真系统提供了理论基础。