基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统设计*

刘飞[1)2)] 魏雅喆[1)] 韩平丽[1)] 刘佳维[1)] 邵晓鹏[1)†]

1) (西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

2) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

(2018 年 12 月 18 日收到; 2019 年 1 月 15 日收到修改稿)

针对实时广域高分辨率成像需求, 充分利用具有对称结构的多层共心球透镜视场大且各轴外视场成像效果一致性好的特点, 设计基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统. 该系统基于计算成像原理, 通过构建像差优化函数获得光学系统设计参数, 结合球形分布的次级相机阵列进行全局性优化, 提高系统性能的同时有效简化光学设计过程、降低系统设计难度. 系统稳定性测试结果表明, 该成像系统的 MTF (modulation transmission function) 值在截止频率处接近衍射极限, 弥散斑均方根恒小于探测器像元尺寸, 整机实景实时成像效果良好, 无视觉可见畸变. 该系统不仅有效解决了传统成像中广域和高分辨率成像矛盾的问题, 而且为计算光学成像系统设计奠定了一定研究基础.

关键词: 广域高分辨率系统, 计算成像, 光学设计, 多尺度成像

PACS: 42.15.Eq, 42.15.Fr, 42.30.–d, 42.79.–e **DOI:** 10.7498/aps.68.20182229

1 引 言

广域高分辨率光电成像系统能够捕捉到大空间范围内的目标信息, 且作为最直接的信息获取手段能提供符合人眼视觉特性的直观探测结果[1–3], 在无人机侦察与防控、环境监控及海上搜救等众多领域应用广泛[4–9].

传统广域光电成像系统所采用的小视场高分辨率扫描成像方式[10] 主要依靠转台的机动性和灵活性来增大成像系统的侦测和监视范围, 以实现系统广域高分辨成像. 然而受光机结构所限, 该类系统普遍存在实时性差的问题, 无法对空间信息进行实时获取和精确判读. 相比之下, 凝视型广域成像系统在实时性方面性能更佳, 但由于凝视型光电成像系统中广域范围成像和高分辨率信息的获取本身存在一定程度的相互制约关系, 即凝视型成像系统在增大光学系统成像视场的同时提高成像分辨率较难实现. 目前同时实现广域和高分辨率成像需求的凝视型光电成像系统主要为鱼眼透镜凝视成像系统[11, 12]、环带凝视全景成像系统等新型光学成像系统[13–15]. 上述成像方式虽然能一定程度上解决广域和高分辨率相互制约这一问题, 但场景信息损失率高、视场受杂散光影响较大、图像畸变大及图像存在中心盲区等问题依然存在, 难以实现光电成像装备的实际应用, 因此发展新体制凝视型广域高分辨率成像系统是新型光电成像装备的迫切需求.

* 中国博士后科学基金 (批准号: 2017M613063)、中央高校基本科研业务费 (批准号: JB170503)、中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室基金 (批准号: CS16017050001) 和国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61705175) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xpshao@xidian.edu.cn

© 2019 中国物理学会 Chinese Physical Society

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

利用中心对称结构的球透镜大视场、小几何畸变且不易产生轴外像差的特点, 文献 [16—20] 中提出利用球透镜和球面探测器阵列实现大视场高分辨率凝视成像. 但上述系统中大面阵球面探测器拼接难度大, 光学设计过分依赖设计软件, 导致系统设计难度大, 成像质量受限. 针对以上问题, 本文设计了一种基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统, 该系统不仅有效地解决了凝视型光电成像系统中大视场和高分辨率难以统一的问题, 而且通过引入计算成像技术有效地简化了传统光学系统的设计难度.

基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统从光学系统设计原则出发, 以像差优化理论为基础, 充分利用球透镜视场大、各轴外视场成像效果一致性好的特点, 设计以球透镜为大尺度主物镜、小尺度相机阵列为次级成像系统的多尺度成像结构. 此外, 利用计算成像方法构建系统像差优化函数, 通过求解最优化函数快速获取系统的结构参数. 系统稳定性分析结果及样机最终成像效果证明, 该成像系统不仅实现了大视场和高分辨率的统一, 而且具有良好的成像稳定性.

2 多尺度广域高分辨率计算成像系统设计

多尺度广域高分辨率计算成像系统主要利用大尺度球透镜对称性好且与视场相关的几何像差小的特点[3, 21], 实现场景的大视场成像和高效率能量收集; 而小尺度相机阵列所具有的中继转换能力则能够将球透镜所成的像转接到二次像面, 为广域高分辨率成像提供了新的可能. 基于上述原理, 本文设计了由一级大尺度四层共心球透镜 (主成像系统) 和次级中继小尺度相机阵列 (次级成像系统) 级联构成的二级广域高分辨率计算成像系统, 系统成像原理如图 1 所示. 该系统集成了球透镜的大视场能量收集能力和次级中继小尺度相机阵列的局部视场校正能力, 共心球透镜将观测场景成像于球形一次像面, 通过球形排布的小尺度相机阵列进行转接形成一系列子图像, 结合计算成像方法将共心球透镜所获取的场景信息重建为一幅广域高分辨率图像.

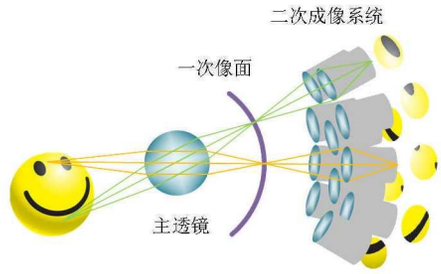

图 1 基于共心球透镜的广域高分辨率成像原理图

Fig. 1. Schematic of monocentric wide field of view (FOV) and high-resolution computational imaging system.

2.1 共心球透镜设计

2.1.1 数学模型

光学系统中的几何像差会影响系统最小可分辨光斑尺寸, 并决定系统的成像分辨率及最终成像质量. 根据 Seidel 像差理论, 基于共心球透镜的广域高分辨率光学成像系统的单色初级像差系数 (球差 (B)、像散 (C)、场曲 (D)、畸变 (E) 和彗差 (F)) 可表示为[22]

$$
\begin{cases}
B=\dfrac{1}{2}\sum\limits_{i}h_i^4\left[\dfrac{b_i}{r_i^3}(n_i-n_{i-1})+k_i^2\left(\dfrac{1}{n_is_i{}'}-\dfrac{1}{n_{i-1}s_i}\right)\right],\\
C=\dfrac{1}{2}\sum\limits_{i}H_i^2h_i^2\left[\dfrac{b_i}{r_i^3}(n_i-n_{i-1})+k_i^2\left(\dfrac{1}{n_is_i{}'}-\dfrac{1}{n_{i-1}s_i}\right)\right],\\
D=\dfrac{1}{2}\sum\limits_{i}H_i^2h_i^2\left[\dfrac{b_i}{r_i^3}(n_i-n_{i-1})+k_i^2\left(\dfrac{1}{n_is_i{}'}-\dfrac{1}{n_{i-1}s_i}\right)-K_i(K_i-L_i)\left(\dfrac{1}{n_it_i{}'}-\dfrac{1}{n_{i-1}t_i}\right)\right],\\
E=\dfrac{1}{2}\sum\limits_{i}H_i^3h_i\left[\dfrac{b_i}{r_i^3}(n_i-n_{i-1})+L_i^2\left(\dfrac{1}{n_is_i{}'}-\dfrac{1}{n_{i-1}s_i}\right)-L_i(K_i-L_i)\left(\dfrac{1}{n_it_i{}'}-\dfrac{1}{n_{i-1}t_i}\right)\right],\\
F=\dfrac{1}{2}\sum\limits_{i}H_ih_i^3\left[\dfrac{b_i}{r_i^3}(n_i-n_{i-1})+K_iL_i\left(\dfrac{1}{n_is_i{}'}-\dfrac{1}{n_{i-1}s_i}\right)\right],
\end{cases}
\tag{1}
$$

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中各项参数见图 2 所示, r_i为共心球透镜成像系统的曲率半径; n_2和v_2分别为外层玻璃的折射率和阿贝常数; n_3和v_3分别为内层玻璃的折射率和阿贝常数, b_i为常数[22, 23]; h_i为物方高度; s_i和$s_i{}'$分别表示第i个曲面顶点到物平面和第i个像面的距离, $H_i = t_i/n_{i-1}$表示入射光瞳中心出射光线与第i个面交点的高度; t_i和$t_i{}'$分别表示第i个曲面顶点到入射光瞳和第i个面入瞳所成像的距离; K_i和L_i表示如下:

$$\begin{cases} K_i = n_i\left(\dfrac{1}{r_i} - \dfrac{1}{s_i{}'}\right) = n_{i-1}\left(\dfrac{1}{r_i} - \dfrac{1}{s_i}\right), \\ L_i = n_i\left(\dfrac{1}{r_i} - \dfrac{1}{t_i{}'}\right) = n_{i-1}\left(\dfrac{1}{r_i} - \dfrac{1}{t_i}\right). \end{cases} \tag{2}$$

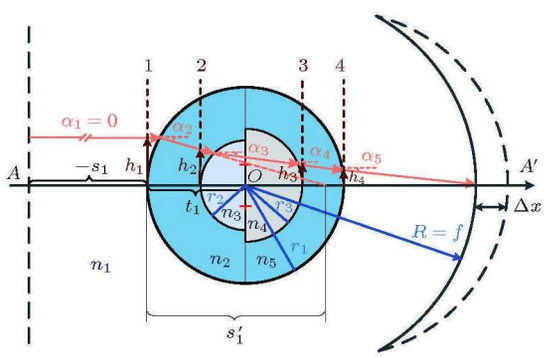

图 2 共心球透镜成像光路图

Fig. 2. Ray diagram of themonocentric multi-scale ball-lens.

如图 2 所示, 共心球透镜的光阑位于球心, 以实现其结构对称性. 为便于计算, 利用 (3) 式所示的 Seidel 波像差系数表示共心球透镜的像差[24, 25],

$$W(R,\rho,\phi) = \sum_{\lambda,j,k} W_{\lambda jk} R^{\lambda} \rho^{j} \cos^{k}\phi, \tag{3}$$

其中 $\rho \in [-1, 1]$, $\phi \in [0, \pi]$构成表示光程差 OPD (optical path difference) 的二维极坐标函数, $W_{\lambda jk}$为像差系数, R 为径向坐标, λ, j和k是非负整数, λ表示径向坐标参量, j表示径向分量最高阶数, k为正弦分量的角向频率数. 由于共心球透镜具有对称性且一次像面与主物镜为共心球面, 故轴外像差较小[23]. 因此, 影响球透镜成像质量的因素主要为球差以及复色光成像过程中由光波波长差异所引起的系统色差.

由于光学成像系统中的光线参数无法直观衡量系统优化结果, 因此在设计中用光学系统的结构参数代替光线参数. 通过 (4) 式中平行光线追迹法实现光线参数与光学系统结构参数间的转化,

$$\begin{cases} \alpha_{i+1} = \dfrac{n_i}{n_{i+1}}\alpha_i + h_i\dfrac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1} r_i}, \\ h_{i+1} = h_i - \alpha_{i+1} d_i, \end{cases} \tag{4}$$

其中d_i表示透镜表面 i 和 $i+1$间的距离, 对于共心球透镜则存在$d_1 = d_3 = r_1 - r_2$, $d_2 = r_2$. 因此, 对文中系统从位置$h_1 = f \times NA$且$\alpha_1 = 0$处开始光线追迹分析残留像差, 其中系统像方焦距 f 如 (5) 式所示. 对该系统中的多层共心球透镜的每个光学表面应用阿贝不变式, 利用透镜的结构参数来代替物像参数, 并通过 (4) 式和 (5) 式迭代可得球差的波像差系数如 (6) 式所示.

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{r_1}\left(1 - \frac{1}{n_2}\right) + \frac{2}{r_2}\left(\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_3}\right), \tag{5}$$

$$W_{040} = h_1^4 \left(\begin{array}{l} -\dfrac{(n_2^2 - 3n_2n_3 + n_3^2)}{32f^3(n_2 - n_3)^2} - \dfrac{(n_2 - 1)(n_2^2 - n_3)(n_3 - 1)}{4n_2^2(n_2 - n_3)^2 r_1^3} \\ + \dfrac{(n_2 - 1)^2(n_2^2 + n_2n_3 + n_3^2)}{8fn_2^2(n_2 - n_3)^2 r_1^2} - \dfrac{(n_2 - 1)(n_2^2 + n_2n_3 + n_3^2)}{16f^2 n_2(n_2 - n_3)^2 r_1} \end{array} \right). \tag{6}$$

同理, 系统色差可表示为

$$W_{020} = \frac{1}{2}h_1^2\left(\frac{(n_2 - 1)(2f(1 - n_3) + n_3r_1)}{f(n_2 - n_3)r_1n_2v_2} - \frac{(n_3 - 1)(2f(1 - n_3) + n_3r_1)}{f(n_2 - n_3)r_1n_3v_3}\right). \tag{7}$$

上述分析表明, 共心球透镜系统的设计参数直接决定了其像差分布情况, 因此建立如 (8) 式所示的像差优化函数进行全局像差最优化计算.

$$E(r_1) = \arg\min\{|W_{040}| + |W_{020}|\}. \tag{8}$$

该像差评价函数为一阶连续函数且只存在一个最小值, 求解可得共心球透镜的曲率半径r_1, 结合 (5) 式可计算球透镜的曲率半径r_2, r_3及r_4, 即通过上述计算可以确定该多尺度广域高分辨率计

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

算成像系统中共心球透镜的初始设计参数.

2.1.2 共心球透镜性能分析

通过 2.1.1 节中建立的像差优化函数可以确定多尺度广域高分辨率计算成像系统中的多层共心球透镜参数的最佳理论设计值, 结果如表 1 所列.

表 1 共心球透镜初始结构参数

Table 1. Structural parameters of the monocentric ball-lens.

面序号	曲率半径/mm	厚度/mm	玻璃	半口径/mm
1	56.90	31.89	H-ZF12	51.516
2	25.01	25.01	H-BAK8	23.238
STO	Infinity	32.20	H-BAK8	6.4240
4	−32.20	24.70	H-ZF12	28.975
5	−56.90	40.135		50.247

图 3(a) 为利用表 1 所列数据确定的共心球透镜二维成像结构图, 其像面为与所有光学表面共心的球面. 图 3(b) 为共心球透镜的调制传递函数曲线, 各个视场 MTF (modulation transmission function) 曲线平直, 且趋势基本一致, 即各视场像差近似相同, 从而可用相同小尺度相机校正不同视场处残余像差, 并实现中继成像.

图 3(c) 为共心球透镜的点列图, 各个视场弥散斑 80% 能量均在艾里斑内, 表明共心球透镜各视场成像效果相近, 且具有较好的能量收集能力. 图 3(d) 为共心球透镜的光线像差图, 各视场曲线均通过坐标零点, 不存在离焦; 各曲线两端点连线与坐标轴交于原点, 不存在子午彗差. 以上结果表明, 本文提出的基于计算成像原理建立像差优化函数来获取光学系统设计参数的方法能够快速有效地获得良好的光学系统设计结果.

2.2 小尺度相机设计及整体系统优化

球透镜将场景成像于与自身共心的球形一次像面上, 此时通过探测器直接接收将会由于探测器在像面位置占空比过低导致目标场景信息丢失, 故设计与球透镜共心的二次小尺度相机阵列转接系统, 将一次像面中继成像至多个探测器从而获取完整目标场景信息, 实现广域高分辨率成像. 此外, 由图 3(c) 可见, 经优化设计后球透镜与视场相关的像差较小, 主要影响成像质量的为球差和色差, 且像差优化函数已确保仅存在小部分残余像差, 降低了后续像差校正难度. 可通过对小尺度相机阵列进行特定设计同时校正中继成像过程中球透镜所产生的残余像差, 其结构如图 4 所示. 为实现二次

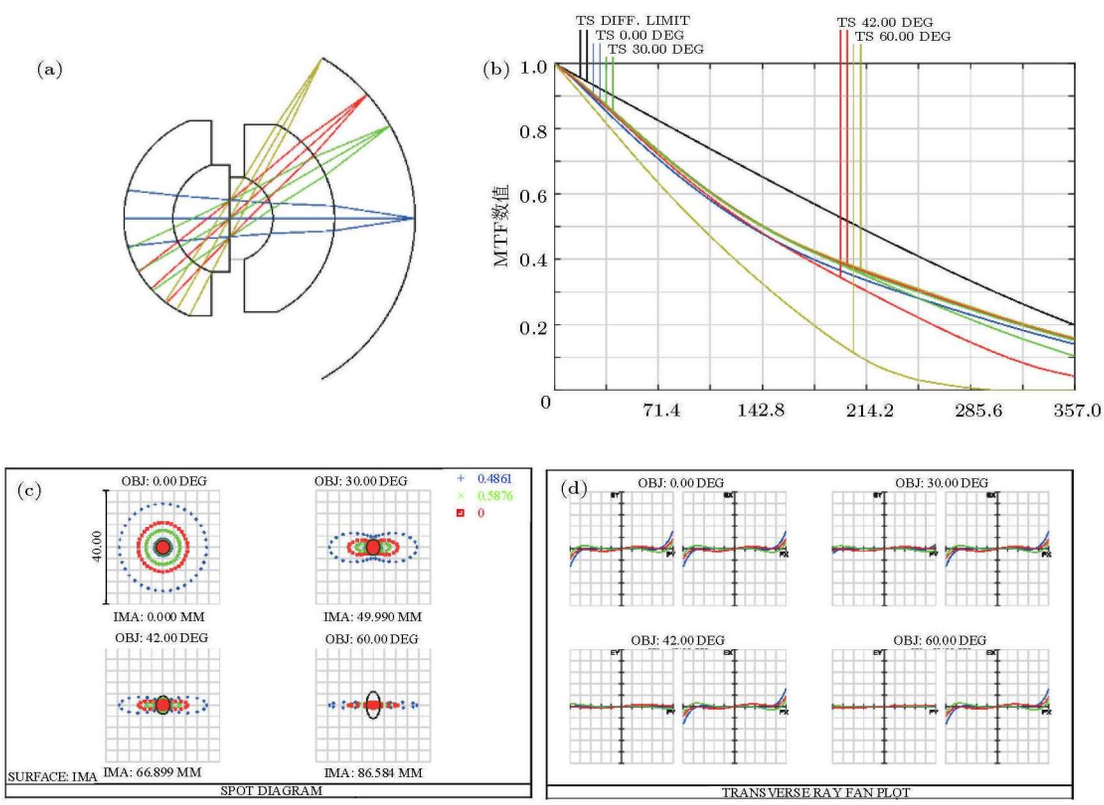

图 3 (a) 共心球透镜二维成像结构图; (b) 调制传递函数曲线图; (c) 共心球透镜点列图; (d) 共心球透镜光线像差图

Fig. 3. (a) Structure of the designed monocentric ball-lens; (b) MTF curves; (c) the spot diagram; (d) the ray fan curves.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中继成像系统自身像差及球透镜残余像差的校正, 本文采用具有对称结构的双高斯系统. 该系统能够通过正负透镜组合设计校正球差, 而通过在厚透镜中引入胶合面来校正色差.

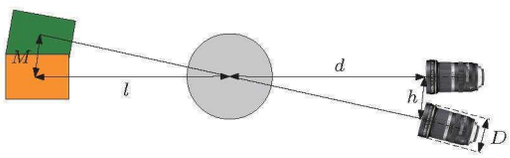

图 4 相邻小尺度相机视场重叠对应关系示意图

Fig. 4. Schematic showing the FOV overlapping betweenthe adjacent micro cameras.

此外, 二次成像系统的口径、视场、焦距及二次成像系统与球透镜的中心距离等均是影响像面拼接的制约条件, 因此需在小尺度相机阵列设计时考虑系统像差与视场重叠的平衡问题. 为保证相邻小尺度相机间的视场重叠并提高视场利用率, 相机阵列采用正六边形几何排布方式, 各镜头物方视场重叠情况如图 5 所示, 其中 M 和 N 分别表示物方横向和纵向有效视场长度.

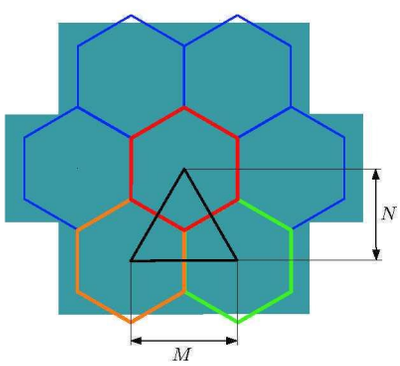

图 5 小尺度相机排布示意图

Fig. 5. Distribution of the small-scale micro camera.

相邻小尺度相机视场重叠关系可简化为图 4 所示形式, 图中 l 表示成像距离, d 表示球透镜中心到小尺度相机的距离, h 表示相邻小尺度相机的中心距离, D 表示小尺度相机的封装口径.

根据成像视场与分辨率需求, 取小尺度相机有效全视场为 $\theta_0 \times \theta_1$, 单个小尺度相机对应物方视场范围为 $2l \cdot \tan\dfrac{\theta_0}{2} \times 2l \cdot \tan\dfrac{\theta_1}{2}$, 要实现相邻小尺度相机视场重叠, 各参数需满足下述条件:

$$\begin{cases} \dfrac{h}{d} \leqslant 2\tan\dfrac{\theta_0}{2}, \\ \dfrac{h}{d} \leqslant 2\tan\dfrac{\theta_1}{2}. \end{cases} \tag{9}$$

(9) 式等号成立的条件为相邻小尺度相机视场恰好重叠, 此外还需满足 $h > D$, 以保证相邻小尺度相机有足够的排列空间. 满足视场重叠条件和成像质量需求时, 物方横向和纵向有效视场长度为:

$$\begin{cases} M = \dfrac{h \cdot l}{d}, \\ N = \dfrac{\sqrt{3}h \cdot l}{2d}. \end{cases} \tag{10}$$

若需达到的物方成像视场范围为 $m \times n$, 则所需小尺度相机的数量为

$$T = \left\lceil \frac{m}{M} \times \frac{n}{N} \right\rceil = \left\lceil \frac{m \cdot d}{h \cdot l}, \frac{2n \cdot d}{\sqrt{3}h \cdot l} \right\rceil. \tag{11}$$

结合上述约束条件并优化光学系统, 最终确定小尺度相机封装后口径 $D = 14$ mm, 相机到球透镜中心距离 $d = 175.9$ mm. 当成像距离 $l = 2$ km时, 通过 (9) 式—(11) 式计算可得, 横向张角 $4.5614° < \theta < 6.4829°$, 纵向张角 $3.9500° < \theta_1 < 5.6138°$, 相邻相机中心间距 $14.0000\ \text{mm} < h < 19.9240\ \text{mm}$. 为保证 $120° \times 90°$成像视场下分辨率为 6 cm, 所需小尺度相机数量至少 19×17 个, 最多 25×23 个.

基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统整体光学结构如图 6 所示, 整体光学系统长 295 mm, 其中共心球透镜直径为 113.8 mm, 二级成像系统为 6 组 9 片、长度为 62 mm 的双高斯结构. 该系统球透镜焦距 103.02 mm, 小尺度相机焦距 20.83 mm, 像方 F#为 3.30, 入瞳直径约 14.24 mm, 单路次级小尺度相机全视场 8°. 由小尺度相机构成的二级光学系统将共心球透镜视场均分为若干个等大的子视场, 通过子视场拼接设计实现获取共心球透镜大视场范围内的高分辨率图像.

为明确系统的整体成像情况, 分析系统 MTF 曲线、点列图、及表征各个小视场内成像差异性的场曲畸变图和光线像差图分布情况, 结果如图 7

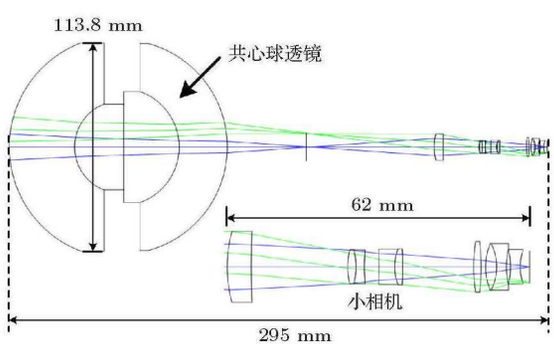

图 6 光学系统结构图

Fig. 6. Structure of the whole optical system.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

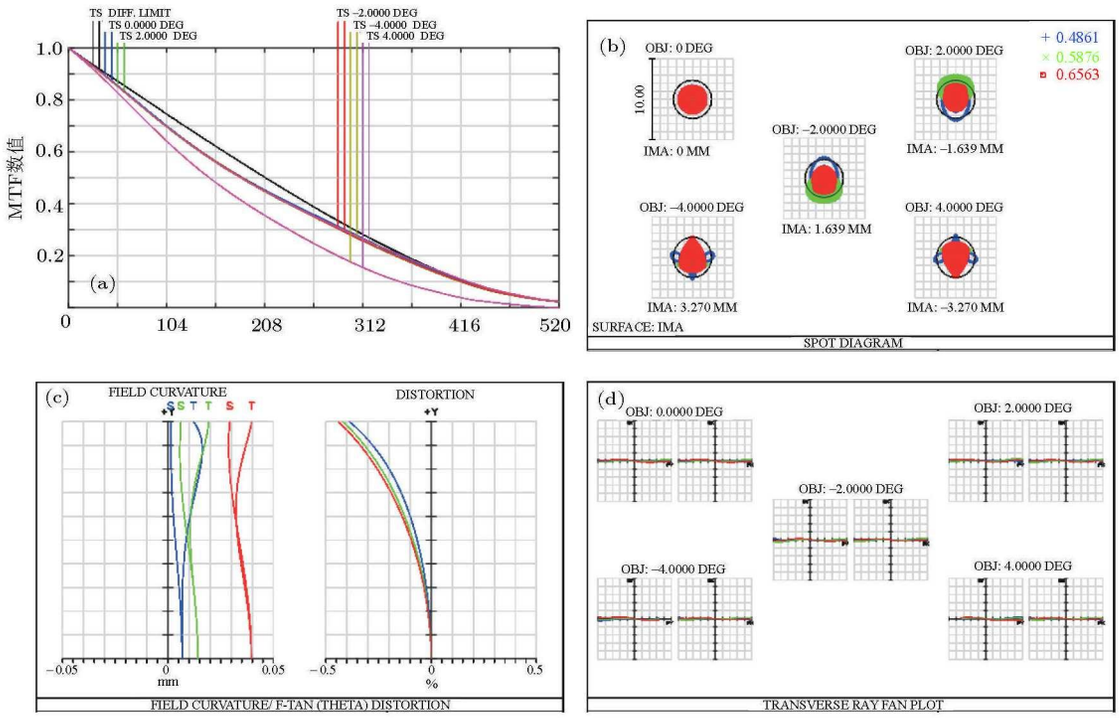

图 7 (a) 系统 MTF 曲线图; (b) 系统点列图; (c) 系统场曲和畸变图; (d) 系统光线像差图

Fig. 7. (a) MTF curves of the whole system; (b) the spot diagram; (c) the field-curve and distortion; (d) the ray fan of the system.

所示. 图 7(a) 表明该系统在截止频率 357 lp/mm 处, 系统的 MTF 值在 0.2 左右, 且全波段 MTF 曲线变化趋势一致, 均接近衍射极限; 系统的零度视场、半视场和全视场 MTF 曲线变化趋势一致且均接近系统衍射极限, 表明各视场成像质量良好. 图 7(b) 所示的系统点列图中, 全波段的系统弥散斑均方根半径 RMS 的最大值为 1.145 μm, 恒小于探测器像元尺寸 1.4 μm, 满足系统与探测器匹配的要求. 图 7(c) 所示的系统场曲和畸变曲线显示系统的场曲值在 ± 0.04 范围内, 畸变值保持在 0.5% 以内, 二者都控制在光学系统设计有效范围内, 表明系统设计合理有效. 图 7(d) 为系统整体光线像差图, 结果显示各视场中子午和弧矢方向上曲线变化情况较小, 且整体变化贴合坐标轴, 球差和像散校正效果较好, 且该曲线在坐标原点附近曲线斜率为 0, 说明像面无离焦现象. 上述分析结果表明, 优化后的多尺度广域计算成像系统各参数均满足设计要求, 成像效果良好.

3 系统性能分析

为避免光学系统在加工时由于公差分配而导致的成像性能下降的问题, 本文利用反敏感度分析法对多尺度广域高分辨率计算成像系统的成像稳定性进行分析, 以确保该光学成像系统的 MTF 曲线分布满足成像需求. 图 8 所示为利用 1000 次 Monte Carlo 分析方法在不同公差分配情况下该成像系统 MTF 曲线分布情况, 以此来分析多尺度广域高分辨计算成像系统的成像稳定性.

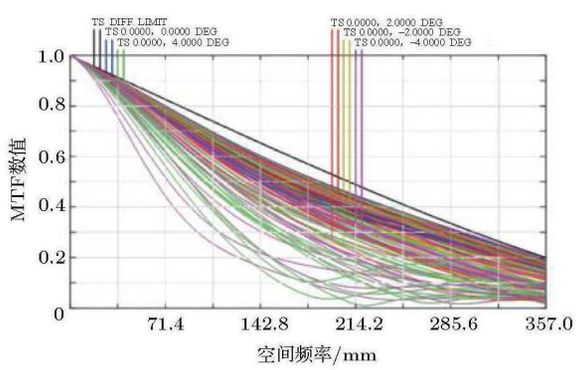

图 8 不同公差分配时的 MTF 叠加曲线

Fig. 8. MTF curves at different tolerance values.

Monte Carlo 仿真结果表明系统 MTF 在截止频率 357 lp/mm 处取值不低于 0.05, 其中超过 0.053 的概率可达 98%, 而该系统 MTF 值在截止频率处大于等于 0.2 的概率约为 75%, 表明系统具有良好的成像稳定性.

经光机电联合调试, 加工完成基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统, 整机实物如

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 9(a) 所示. 图 9(b) 为半径 $R = 56.8$ mm 的系统主物镜, 为四层三胶合共心球透镜. 实际中为了便于装配, 外侧两层结构设计为扇面结构. 根据设计需求, 在球透镜一次像面后设计次级成像系统, 由呈六边形排布的 399 个小尺度相机构成, 实现视场拼接获取大视场高分辨率图像, 如图 9(c) 所示. 小尺度相机阵列外观和工作方式如图 9(d) 和图 9(e) 所示, 每个相机单独封装为独立单元, 方便装调. 考虑到其相邻视场重叠, 采用如图 9(c) 中橘色六边形框所示的正六边形排布设计, 这种排布不仅能够充分利用光能量, 还可以减少次级成像光学系统引入的像差, 简化整体设计和装调的复杂度, 提升最终成像质量.

为验证该光学成像系统的可靠性, 搭建图 10 所示实验测试平台, 图 10(a) 为测试平台结构示意图, 图 10(b) 为测试平台实物实际测量光学系统整机分辨率信息, 采用 550 mm 平行光管和 N3 靶标板对所设计系统分辨率进行测量, 拍摄到的靶标板图像如图 10(c) 所示, 实际测量时可以清晰分辨 23 组线对. 查阅如图 10(d) 所示的分辨率图案参数表中单元号与板号对应的空间频率 (lp/mm) 可得, N3 靶标板中 23 组对应 44.5 lp/mm, 其中所设计光学系统的焦距为 47 mm, 因此系统成像分辨率约 520.7 lp/mm, 由图 7(a) 光学系统仿真 MTF 曲线可知系统成像理论截止频率在 520 lp/mm 左右, 系统实测分辨率与理论设计基本相符.

基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统的部分成像效果图如图 11 所示, 该成像系统在 5 km 探测距离时具有 15.4 km × 7.5 km 的成像幅宽, 整幅照片像素数量可达 32 亿. 图 11 所示的成像结果取自本系统整体成像结果的 1/10, 视场范围约为 70° × 17.5°. 以距离覆盖范围从近距 0.6 km 到远距 4.1 km 处为例, 在该范围内分别选择四个不同距离处的建筑物作为目标, 目标的距离通过地图距离测量工具得到, 从而分析该系统成像质量情况. 图中给出的三列成像结果分别对应原图 (下), 一级放大效果 (中) 和二级放大效果 (上). 首先以 0.6 km 处近目标为例, 一级放大效果图中清晰显示了建筑物中的窗户等结构, 二级放大后则能够清晰分辨长度 20 cm、高度 7 cm 左右的墙砖信息, 表明该系统在近景范围内成像效果良好; 当目标距离较远时, 以距离 2.1 km 处建筑物为例, 一

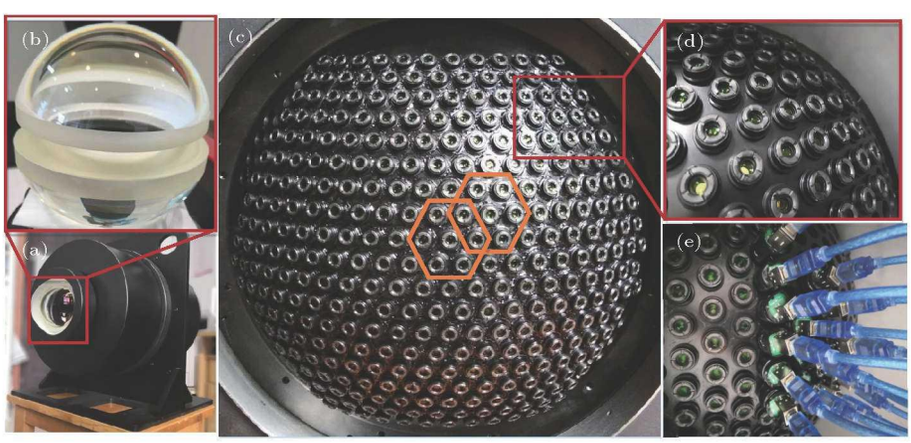

图 9 多尺度广域高分辨率计算成像系统结构图

Fig. 9. Prototype of the multi-scale wide FOV high-resolution computational imaging system.

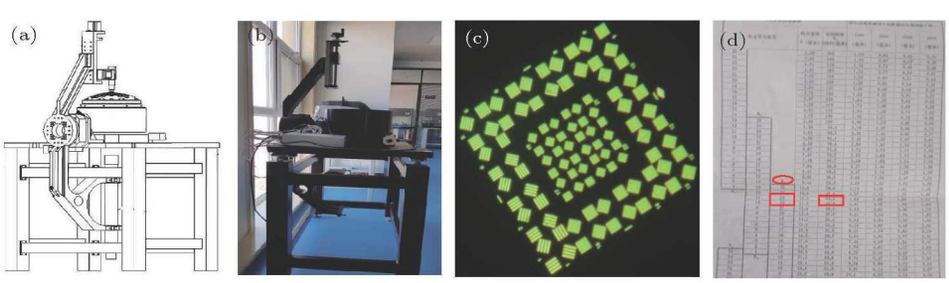

图 10 (a) 测试平台结构示意图; (b) 测试平台实物; (c) 靶标板图像; (d) 分辨率图案参数表

Fig. 10. (a) Test platform structure diagram; (b) test platform; (c) the image of target plate; (d) resolution pattern parameters table.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

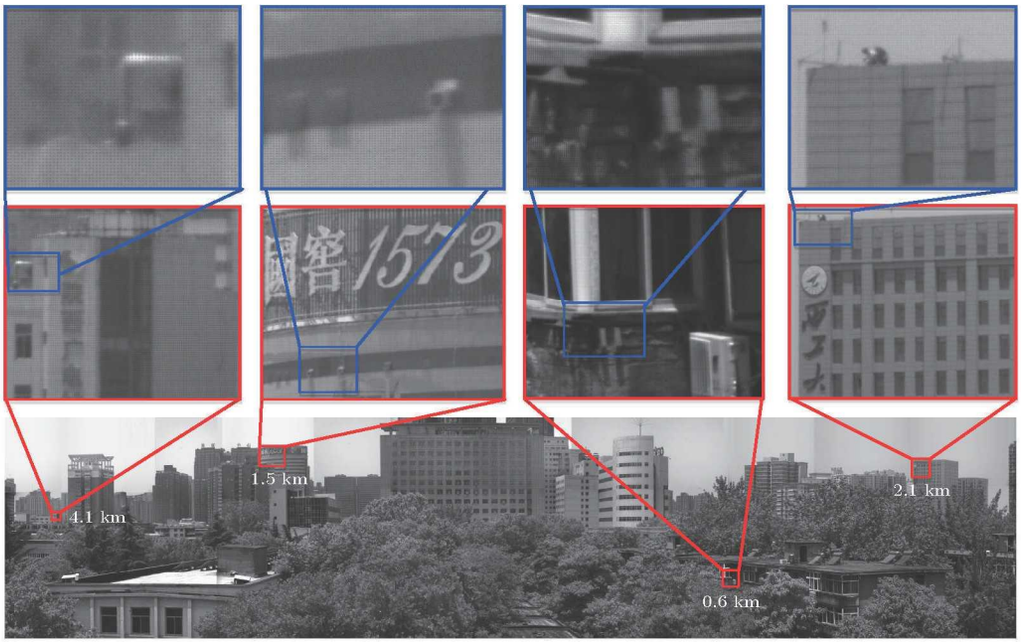

图 11 系统成像效果图(部分)

Fig. 11. Imaging results of the designed system (partial result).

级放大图像提供了清晰的目标建筑物的整体结构信息和包括窗户、文字标语等在内的细节信息, 而同样观测距离下人眼视觉系统已无法分辨此量级信息, 经二级放大后, 系统成像结果甚至能够准确提供置于建筑物顶部的直径 10 cm 左右的避雷针的形状轮廓信息; 在远距离成像中, 以 4.1 km处建筑物为例, 此时人眼仅能捕捉有限的建筑物轮廓, 而系统成像结果经过一级放大仍能提供建筑物目标的窗户等细节信息, 在经过二级放大的图像中清晰可辨大小约为 0.5 m × 0.4 m 的空调外挂机, 并能够辨别其左侧墙壁上直径 5 cm 左右的空调排水管, 该结果表明该系统能够在远距离条件下获得良好的成像结果. 对于图中选取的不同距离分布的目标, 该系统均能实现高清晰度、高分辨率成像, 系统稳定性良好、适应性强. 此外, 如图所示的视场跨度约为 7 km 的成像结果中, 任意视场位置和成像距离处均不存在视觉可见的图像畸变, 主要原因在于系统主物镜的对称结构无固定光轴、轴外像差相对较小, 因此具有所见即所得、无需校正畸变的优势.

4 结 论

为适应大视场、高分辨率实时成像探测需求, 针对传统光电成像探测系统大视场和高分辨率难以同时获得这一不足, 利用共心球透镜的结构对称性, 提出了一种基于共心球透镜的多尺度广域高分辨率计算成像系统. 该系统利用四层共心球透镜有效减小了与视场有关的像差, 通过计算成像原理构建像差优化函数对光学系统的设计参数进行计算, 并结合基于球形分布的次级相机阵列的设计有效地消除了残余像差. 此外, 利用反敏感度分析法对于不同公差分配时系统的稳定性进行分析可知, 在截止频率 357 lp/mm 处的 MTF 值几乎都能稳定在系统衍射极限 0.2 以上, 且弥散斑 RMS 半径恒小于探测器像元尺寸, 满足设计要求. 系统成像结果也证明, 该成像系统能够对不同距离的目标实现高清晰度、高分辨率无视觉可见畸变成像, 系统稳定性良好、适应性强.

参考文献

[1] Claire S K, Jeffrey R H, Timothy K L, Joi W, Raymond G F, Bryan Z, Takahiro I, Allen B, Seung J, John P C, Amit C, Markus W C, Tannishtha R 2016 *Nat. Commun.* **7** 1

[2] Jisoo K, Doo J P, Sun J B, Jaeho L, Soo B C, Seongjun P, Sung W H 2014 *Opt. Express* **22** 31875

[3] Brady D J, Gehm M E, Stack R A, Marks D L, Kittle D S, Golish D R, Vera E M, Feller S D 2012 *Nature* **486** 386

[4] Golish D R, Vera E M, Kelly K J, Gong Q, Jansen P A, Hughes J M, Kittle D S, Brady D J, Gehm M E 2012 *Opt. Express* **20** 22048

[5] Yan A Q, Zhu Q, Cao J Z, Zhou S Z, Yang Z, Liu Y B 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 1975 (in Chinese) [闫阿奇, 祝青, 曹剑

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中, 周泗忠, 杨正, 刘宇波 2008 光子学报 **37** 1975]
[6] Matthew J L, George B, Michael F 2012 *Remote Sensing* **4** 3006
[7] Wang X, Li L, Hou G Q 2016 *Appl. Opt.* **55** 2580
[8] Yu H, Wan Q H, Lu X R, Du Y C, Yang S W 2017 *Appl. Opt.* **56** 755
[9] Tremblay E J, Marks D L, Brady D J, Ford J E 2012 *Appl. Opt.* **51** 4691
[10] Wang S, Heidrich W 2004 *Comput. Graphics Forum* **23** 441
[11] Donggyun K, Jinho P, Joonki P 2014 *Opt. Lett.* **39** 6261
[12] Antonino F, Giovanni M F, Arcangelo R B, Sebastiano B 2017 *IEEE Trans. Image Process.* **26** 696
[13] Mo Z, Robert H C, Juliet T G 2016 *Opt. Express* **21** 23798
[14] Huang Z, Bai J, Lu T X, Hou X Y 2013 *Opt. Express* **21** 10810
[15] Yan J L, Kong L S, Diao Z H, Liu X F, Zhu L L, Jia P 2018 *Appl. Opt.* **3** 396
[16] Lohmann A W 1989 *Appl. Opt.* **28** 4996
[17] Cossairt O S, Nayar S K 2010 *Proceeding on 2010 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)* Pittsburgh, USA, March 29–30, 2010 p1
[18] Brady D J, Hagen H 2009 *Opt. Express* **13** 10659
[19] Marks D L, Llull P R, Philips Z, Anderson J G, Feller S D, Vera E M, Son H S, Youn S, Kim J, Gehm M E, Brady D J, Nichols J M, Judd K P, Duncan M D, Waterman J R, Stack R A, Johnson A, Tennill R, Olson C C 2014 *Appl. Opt.* **53** C54
[20] Patrick L, Lauren B, Zachary P, Kyle D, Marks D L, Brady D J 2015 *Optica* **2** 1086
[21] Cossairt O S, Miau D, Nayar S K 2011 *J. Opt. Soc. Am. A* **28** 2540
[22] Born M, Wolf E 2016 *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light, 7nd Edition* (Cambridge: Cambridge University Press) p210
[23] Luke P L, Robert S 2005 *Science* **310** 1148
[24] Sasian J 2010 *Appl. Opt.* **49** D69
[25] Lijun L, Yiqing C 2017 *Appl. Opt.* **56** 8570

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Design of monocentric wide field-of-view and high-resolution computational imaging system*

Liu Fei [1)2)] Wei Ya-Zhe [1)] Han Ping-Li [1)] Liu Jia-Wei [1)] Shao Xiao-Peng [1)†]

1) (*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an* 710071, *China*)

2) (*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)

(Received 18 December 2018; revised manuscript received 15 January 2019)

Abstract

Imaging systems with a wide field-of-view (FOV) and high-resolution, which can provide abundant target information, are always desired in various applications including target detection, environment monitoring, marine rescue, etc. Various approaches to realizing the wide FOV and high-resolution imaging have been developed, for example, fisheye lens imaging system, and panoramic optical annular staring imaging technology. In these single aperture imaging systems, the maximum resolution and FOV are determined by either the geometric aberration or the diffraction limit of the optics.

Multi-scale monocentric ball-lens imaging system is of particular importance due to its high real-time ability, small image distortion, and wide FOV. The complete geometrical symmetry of multilayer monocentric ball-lens makes it possible to compensate for the geometric aberration with no need of additional assistance. However, the major problem in designing imaging system based on multi-scale monocentric ball-lens is that there are too many variables needed to be set for a ball-lens imaging structure and the problems of high time cost and computation complexity.

For simplifying the design process, in this manuscript, we apply the computational imaging theory to optical system design, thereby developing a geometric aberration optimization function to determine the initial values of the desired system by the sound computation rather than repetitive iterations by using the optical system design software. Function development starts from the aberration theory. Since the monocentric ball lens does not bring in the aberrations relating to FOV, only spherical aberration and chromatic aberration are needed to be considered. The optimization function is then founded according to the principle of minimizing the spherical aberration and chromatic aberration. And then with the determined initial parameters, ZEMAX is employed to globally optimize the residual geometric aberrations, which is time-efficient. After required parameters are finally determined, the system performance is evaluated via the modulation transmission function, the spot diagram distribution, the field-curve and distortion value and the ray fan curve. Favorable results are obtained, which demonstrates the feasibility of the developed system designing approach. Imaging results from the finished prototype system are pretty satisfactory with wide FOV and high resolution which is captured through only one frame. The multi-scale wide FOV and high-resolution computation imaging system not only solves the conflict between the wide FOV and high resolution, but also provides the research foundation for computational imaging.

Keywords: wide field of view and high-resolution imaging system, computational imaging, optical system design, multi-scale imaging

PACS: 42.15.Eq, 42.15.Fr, 42.30.–d, 42.79.–e **DOI:** 10.7498/aps.68.20182229

* Project supported by the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2017M613063), the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. JB170503), the State Key Laboratory of Optical Technology for Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (Grant No. CS16017050001), and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61705175).

† Corresponding author. E-mail: xpshao@xidian.edu.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net