

## 单相机双球面镜视觉传感器成像光学特性分析

陈远泽, 周富强\*, 张莞宁, 刘洋

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 为了扩大镜像双目视觉传感器的视场范围,采用球面反射镜替换平面反射镜成为一种有效方案。但利用凸球面镜进行反射成像,将会导致图像质量和清晰度的下降,为此研究单相机镜像双目视觉传感器的光学特性。以离轴非中心式球面镜反射为研究对象,建立不同光学特性的成像模型,通过仿真和实验来定量分析球面镜参数对视场范围、分辨率和景深的影响,在给定工业相机和光学镜头参数的情况下给出双球面镜参数的设计方法。搭建基于单相机和双球面镜的视觉传感器,该传感器可以实现镜像双目视觉成像。通过分析基于球面镜反射的视觉传感器的光学特性,为新型镜像双目视觉传感器的设计提供了依据。

**关键词** 机器视觉; 镜像双目; 成像系统; 折反射; 光学分析

中图分类号 O435

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1015003

## Analysis of Imaging Optical Characteristics of Vision Sensor with Single Camera and Double Spherical Mirrors

Chen Yuanze, Zhou Fuqiang\*, Zhang Wanning, Liu Yang

School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** In order to expand the field of view of the mirror binocular vision sensor, it is an effective scheme to replace planar mirror with spherical mirror. However, the reflection imaging with convex mirror will lead to the decline of image quality and sharpness, so the optical characteristics of binocular vision sensor for single camera mirror are studied. Taking the off-axis non-central spherical mirror as the research object, the imaging models with different optical characteristics are established. The effects of spherical mirror parameters on field range, resolution, and depth of field are quantitatively analyzed by simulation and experiment. The design method of double spherical mirror parameters is given under the condition of industrial camera and optical lens parameters. A vision sensor based on single camera and double spherical mirror is constructed, which can realize mirror binocular vision imaging. By analyzing the optical characteristics of the vision sensor based on spherical mirror reflection, it provides a basis for the design of a new mirror binocular vision sensor.

**Key words** machine vision; mirrored binocular; imaging system; catadioptric; optical analysis

## 1 引言

视觉传感器通过模拟人眼来感知环境以实现对被测物的非接触快速测量,已广泛应用于智能交通<sup>[1]</sup>、工业检测<sup>[2]</sup>、航空航天<sup>[3]</sup>、无人系统定位与导航<sup>[4-6]</sup>等领域。传统双目视觉传感器由两个相机构成,具有体积大、成本高、图像同步采集困难的缺点,

对此研究人员采用折反射元件来形成镜像视觉测量模式<sup>[7]</sup>以改善视觉传感器的成像和测量性能,基于折反射光学元件的单相机镜像视觉传感器具有小型化、成像方式更加灵活、测量速度更快的特点<sup>[8-9]</sup>。但平面折反射镜的视场受限,难以满足工程应用需求,为此将其替换为凸球面镜,这可有效扩大视场范围,提升传感器的成像能力。在平面镜镜像视觉传

收稿日期: 2021-12-10; 修回日期: 2021-12-20; 录用日期: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(52075027)

通信作者: \*zfq@buaa.edu.cn

传感器的基础上,文献[10]研究了单相机双球面镜视觉传感器,由于其采用球面镜反射成像系统,在大视场下降低了成像质量和清晰度,故需要深入研究球面镜反射成像系统的光学特性,并分析成像系统各参数对光学特性的影响以优化设计传感器。

视觉传感器所具有的光学特性会影响成像效果和清晰度<sup>[11]</sup>,单相机镜像视觉传感器的主要光学特性包括视场范围<sup>[12]</sup>、分辨率<sup>[13]</sup>、景深<sup>[14]</sup>等。Baker等<sup>[15]</sup>为解决传感器视场受限的问题,采用折反射镜与摄像机的组合来扩展视场范围;杨琤等<sup>[16]</sup>提出一种基于单相机镜像式视觉传感器的结构优化设计方法,采用双平面镜来构建反射成像系统;宋丫等<sup>[17]</sup>设计一种由单相机和四棱锥反射镜构成的全向视觉传感器,该传感器可以解决视觉传感器的体积大、视场小等问题;李江勇等<sup>[18]</sup>针对机载光电系统大视场、高分辨率的成像需求,设计了一种基于共轴透镜的广域高分辨率光学成像系统;Ohte等<sup>[19]</sup>基于共轴中心式全向相机分析了球面镜和双曲面镜的景深特性。以上研究仅考虑传感器的单一光学特性,未能考虑系统参数对各种光学性能的综合影响。基于凸曲面镜的成像系统主要采用共轴中心式结构<sup>[20]</sup>,故其不适合配置更加灵活的单相机双球面镜视觉传感器。

本文基于单相机和双球面镜的视觉成像模式,进一步研究球面镜反射成像系统的光学特性。双球面镜相对于单相机以离轴非中心式放置,为此其成像方向和感知范围具有更强的灵活性。本文分析单相机与球面镜的光学和结构参数对成像系统的视场范围(FOV)、分辨率和景深(DOF)的影响并建立数学关系,再通过仿真和实验来分析变化规律,结合单相机的型号参数来确定成像系统的关键结构参数,从而完成基于单相机和双球面镜的视觉传感器的优化设计,进而实现扩大视场的镜像双目成像。

## 2 双球面镜反射成像系统的光学特性

采用球面镜反射成像系统可显著扩大视场范围,然而球面镜自身的结构特征会导致图像卷曲变形,使图像中空间目标各部分的成像分辨率存在差异,而且单位像素所包含的图像信息量大,这不利于图像特征的提取<sup>[21]</sup>。为了利用单相机和双球面镜来实现镜像立体视觉成像,本文研究球面镜反射成像系统的光学特性,分析成像系统的参数对光学成像的影响,建立视场范围、分辨率和景深模型,优化设计球面镜,从而实现镜像双目视觉成像。基于单

相机和双球面镜的反射成像系统如图 1 所示,被测物经两个以不同角度放置的球面镜反射至单相机内,最终获取一幅包含两个虚拟像的图像,即镜像双目图像,其中 MBVS 为单相机双球面镜视觉传感器。

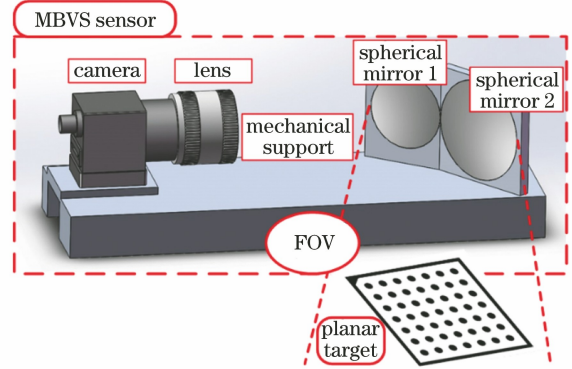


图 1 基于单相机和双球面镜的成像系统

Fig. 1 Imaging system based on single camera and double spherical mirror

### 2.1 双球面镜视场范围

根据文献[22]设计的基于单相机和双平面镜的传感器,本文采用球面镜替换平面镜可以改进视觉传感器的性能,扩大视场范围。对不同摆放位置的球面镜进行参数分析,观察曲率半径和摆放角度的变化对视场范围的影响。图 2(a)和图 2(b)为两个位置下球面镜反射成像系统的视场范围示意图,位置 1 下的球面镜为 SM1,位置 2 下的球面镜为 SM2,图中箭头实线表示视场边界光线,弧线表示球面镜, $O_1$ 和 $O_2$ 分别为 SM1 和 SM2 的球心,在相机光心处建立坐标系, $d$ 为光轴方向上的相机与球面镜之间的距离。SM1 和 SM2 的主要参数:圆弧  $\widehat{NM}$  和  $\widehat{M'P}$  所对应的圆心角  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  及半径  $r_1$  和  $r_2$ ;弧弦  $\overline{NM}$  和  $\overline{M'P}$  与  $y$  轴的夹角  $\beta_1$  和  $\beta_2$ ,将它们作为 SM1 和 SM2 的摆放角度。图 2(a)中直线  $\overline{NC}$  和  $\overline{MD}$  所夹的锐角范围即为位置 1 处的视场范围  $F_{FOV1}$ ,图 2(b)中直线  $\overline{M'A}$  和  $\overline{PB}$  所夹的锐角范围即为位置 2 处的视场范围  $F_{FOV2}$ 。根据文献[10]的公式推导,SM1 和 SM2 的视场范围为

$$\begin{cases} F_{FOV1} \subseteq \left[ \frac{\pi}{2} - \alpha_1 - 2\beta_1 - \gamma_1, \frac{\pi}{2} - 2\beta_1 + \alpha_1 \right] \\ F_{FOV2} \subseteq \left[ \frac{\pi}{2} - 2\beta_2 - \alpha_2, \frac{\pi}{2} - (2\beta_2 - \gamma_2 - \alpha_2) \right] \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\gamma_1$ 为反射光线  $\overline{NO}$  与  $y$  轴负向的夹角; $\gamma_2$ 为反射光线  $\overline{PO}$  与  $y$  轴负向的夹角。

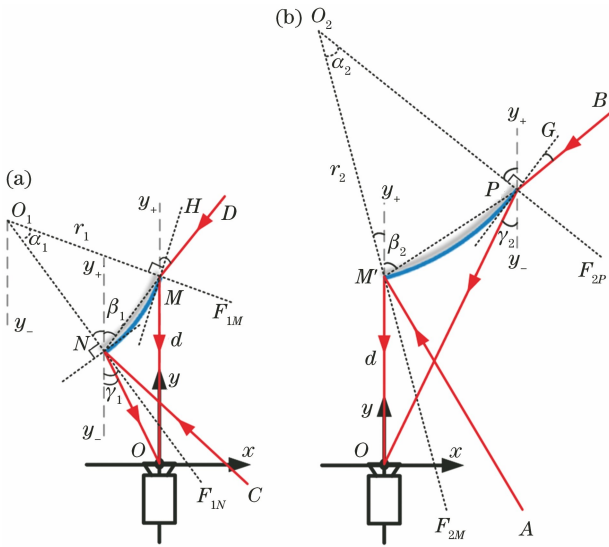


图 2 不同位置的球面镜反射成像视场范围。

(a)  $F_{FOV1}$ ; (b)  $F_{FOV2}$

Fig. 2 Field of view of spherical mirror reflection imaging at different positions. (a)  $F_{FOV1}$ ; (b)  $F_{FOV2}$

## 2.2 球面镜反射成像分辨率

成像分辨率是保证视觉传感器测量精度的基本要求,有效获取局部图像的分辨率是球面镜反射成像系统的研究重点<sup>[23-24]</sup>。本节分析球面镜表面局部小区域反射成像的分辨率,建立球面镜反射成像分辨率模型,从而优化设计球面镜,目的是在扩大视场范围的同时保证足够的分辨率<sup>[25]</sup>。

图 3 为球面镜反射成像的分辨率模型。假设凸球面镜中无限小区域  $\Delta S$  通过光心以角度  $\varphi$  映射到摄影机图像平面的无限小区域  $\Delta A$  中,  $\Delta\omega$  为无限小区域  $\Delta S$  的入射空间角,定义通过球面反射区域映射到摄像机图像平面的分辨率为  $\Delta A/\Delta\omega$ 。设球心坐标为  $S_0(x_0, y_0, z_0)$ , 球面镜表面上点的三维坐标为  $S_0(x(t), y(t), z(t))$  ( $t$  为参变量), 则球面镜曲面三维方程可表示为

$$z(t) = z_0 \pm \sqrt{r^2 - [x(t) - x_0]^2 - [y(t) - y_0]^2}, \quad (2)$$

式中:  $r$  为球面镜的曲率半径。已知球面镜的焦距为  $f$ , 根据几何关系可以得到光心  $O$  与  $\Delta A$  的距离  $|OA| = f/\cos\varphi$ , 则该平面与光心对向平面的夹角  $\Delta\theta = \Delta A \cos^2\varphi/f^2$ 。又有, 光心与  $\Delta S$  之间的距离为

$$|SO| = \frac{\sqrt{x^2(t) + y^2(t) + [\xi + z(t)]^2}}{\cos\varphi}, \quad (3)$$

式中:  $\xi$  为原点到光心的距离。

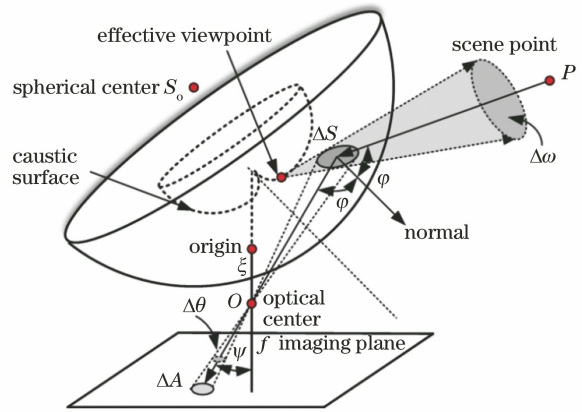


图 3 球面镜反射成像的分辨率模型

Fig. 3 Resolution model of spherical mirror reflection imaging

$\Delta S$  在反射光线  $\overline{SO}$  上的分量小区域面积为

$$\Delta S_A = \Delta\theta \cdot |SO|^2 = \frac{\Delta A [\xi + z(t)]^2}{f^2}. \quad (4)$$

由式(4)可以得到  $\Delta S$ , 表达式为

$$\Delta S = \frac{\Delta S_A}{\cos\varphi} = \frac{\Delta A [\xi + z(t)]^2}{f^2 \cos\varphi}, \quad (5)$$

式中:  $\varphi$  为映射区域  $\Delta S$  中球面的法线与反射光线  $\overline{SO}$  的夹角, 可根据空间向量夹角公式并结合球面镜表面区域法线方向的单位向量  $\mathbf{n}_s$  计算得出。又有,  $r_c(t)$  为球面镜表面反射区域与散焦面切线之间的距离, 则空间点平面的入射空间角  $\Delta\omega = \Delta S \div [r_c(t)]^2$ , 代入式(5)可得到球面镜反射成像系统的分辨率, 表达式为

$$\frac{\Delta A}{\Delta\omega} = \frac{f^2 [r_c(t)]^2 \cos\varphi}{[\xi + z(t)]^2}. \quad (6)$$

综上所述, 球面镜反射成像的分辨率与  $f$ 、 $r_c(t)$ 、 $\Delta S$  位置相关:  $f$  和  $r_c(t)$  越大, 则分辨率越大;  $\Delta S$  距离原点越远, 则分辨率越小。

## 2.3 球面镜反射成像景深

采用球面镜替换平面镜进行镜像式立体视觉成像可有效扩大视场范围, 但会对成像效果产生不良影响, 导致成像的清晰度下降<sup>[26]</sup>。球面镜反射成像的清晰度由成像分辨率和景深来反映, 本节研究图 4 的球面镜反射成像景深模型, 建立景深与球面镜参数的数学关系, 分析球面镜光学参数对景深的影响规律, 从而优化设计球面镜结构。

目标点  $P$  发出的光线在球面镜表面  $\Delta S$  发生反射, 反射光线经过镜头后在焦平面上成像为  $A$  点, 点  $P$  与  $\Delta S$  间的距离为  $L$ , 即成像系统的工作距离。若成像点  $A$  未会聚在焦平面上, 这将会形成弥散斑, 所容许的弥散斑最大直径为  $\delta$ , 弥散斑直径小

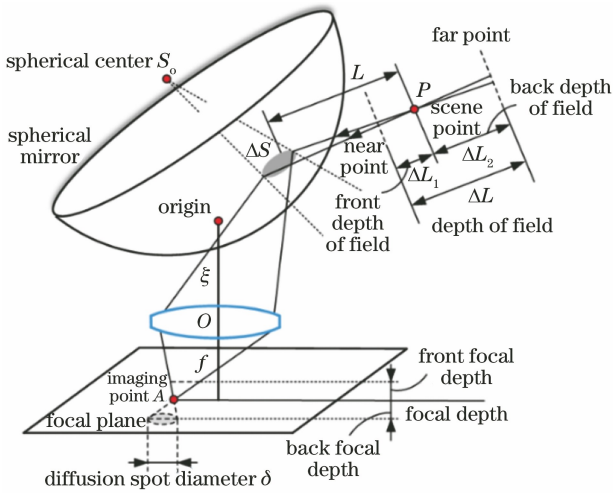


图 4 球面镜反射成像的景深模型

Fig. 4 Depth of field model of spherical mirror reflection imaging

于  $\delta$  可认为是清晰成像。假设所能拍摄到的最近清晰成像点为近点, 最远清晰成像点为远点, 定义点  $P$  到近点的距离为前景深  $\Delta L_1$ , 点  $P$  到远点的距离为后景深  $\Delta L_2$ , 近点到远点的距离为景深  $\Delta L$ 。根据光学成像景深原理<sup>[19]</sup>,  $\Delta L_1$  和  $\Delta L_2$  可表示为

$$\begin{cases} \Delta L_1 = \frac{F\delta(L + |SO|)(L + |SO| - f)}{f^2 + F\delta(L + |SO| - f)} \\ \Delta L_2 = \frac{F\delta(L + |SO|)(L + |SO| - f)}{f^2 - F\delta(L + |SO| - f)} \end{cases}, \quad (7)$$

式中:  $F$  为镜头的光圈值。若前景深小于后景深, 即  $\Delta L_1 < \Delta L_2$ , 则  $f^2 > F\delta(L + |SO|)$ 。由于在测量过程中拍摄距离相比焦距较大, 即  $L$  远大于  $f$ , 因此像距接近于  $f$ , 此时成像平面接近于焦平面, 则球面镜反射成像的景深计算公式可写为

$$L_{\text{DOF}} = \Delta L_1 + \Delta L_2 \approx \frac{2f^2 F\delta(L + |SO|)^2}{f^4 - F^2 \delta^2 (L + |SO|)^2}. \quad (8)$$

由式(8)可知,  $L_{\text{DOF}}$  与  $F$ 、 $f$ 、 $L$  以及像质有关:

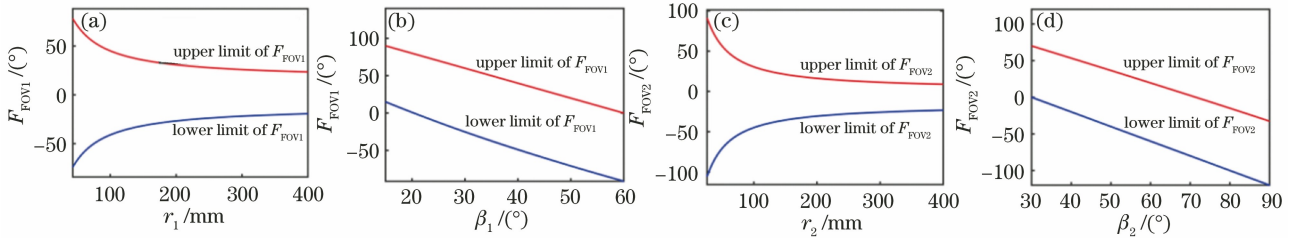


图 5 视场范围与双球面镜参数的关系。(a)  $F_{\text{FOV1}}$  随  $r_1$  的变化曲线; (b)  $F_{\text{FOV1}}$  随  $\beta_1$  的变化曲线; (c)  $F_{\text{FOV2}}$  随  $r_2$  的变化曲线; (d)  $F_{\text{FOV2}}$  随  $\beta_2$  的变化曲线

Fig. 5 Relationship between field of view and parameters of double spherical mirror. (a) Variation curve of  $F_{\text{FOV1}}$  with  $r_1$ ; (b) variation curve of  $F_{\text{FOV1}}$  with  $\beta_1$ ; (c) variation curve of  $F_{\text{FOV2}}$  with  $r_2$ ; (d) variation curve of  $F_{\text{FOV2}}$  with  $\beta_2$

对像质要求越高, 则  $\delta$  越小,  $L_{\text{DOF}}$  越小;  $F$  越大,  $L_{\text{DOF}}$  越大;  $f$  越大,  $L_{\text{DOF}}$  越小;  $L$  越大,  $L_{\text{DOF}}$  越大。

### 3 球面镜反射成像光学规律仿真分析

#### 3.1 球面镜参数对视场范围的影响规律

根据式(1)来定量分析 SM1 和 SM2 的视场范围<sup>[10]</sup>。图 5(a)和图 5(c)为固定  $\beta_1$  和  $\beta_2$ , 改变  $r_1$  和  $r_2$ , 视场范围随  $r$  的变化曲线。图 5(b)和图 5(d)为固定  $r_1$  和  $r_2$ , 改变  $\beta_1$  和  $\beta_2$ , 视场范围随  $\beta$  的变化曲线。从图 5 可以看到,  $F_{\text{FOV1}}$  和  $F_{\text{FOV2}}$  均随着  $r_1$  和  $r_2$  的增大而减小, 其变化区间均随着  $\beta_1$  和  $\beta_2$  的增大而下移。为了有效扩大视场范围,  $r_1$  和  $r_2$  均可在 60~300 mm 之间取值。为了使  $F_{\text{FOV1}}$  和  $F_{\text{FOV2}}$  存在公共区域, 应使  $\beta_1$  在 0~60° 之间取值,  $\beta_2$  在 30°~90° 之间取值。同时, 两球面镜应关于  $y$  轴呈 45° 对称以使传感器能够平视前方, 因此在考察特定参数下的  $F_{\text{FOV1}}$  和  $F_{\text{FOV2}}$  时, 可令  $\beta_1 = 37^\circ$ ,  $\beta_2 = 53^\circ$ 。图 6 为选取不同的特定参数, SM1 和 SM2 及  $F_{\text{FOV1}}$  和  $F_{\text{FOV2}}$  的变化。图 6(a)所示在  $\beta_1 = 37^\circ$ ,  $r_1$  分别为 80, 100, 150, 200 mm 时, SM1 和  $F_{\text{FOV1}}$  的变化; 图 6(b)所示在  $\beta_2 = 53^\circ$ ,  $r_2$  分别为 80, 100, 150, 200 mm 时, SM2 和  $F_{\text{FOV2}}$  的变化; 图 6(c)所示在  $r_1 = 100$  mm,  $\beta_1$  分别为 20°, 30°, 40° 和 50° 时, SM1 和  $F_{\text{FOV1}}$  的变化; 图 6(d)所示在  $r_2 = 100$  mm,  $\beta_1$  分别为 50°, 60°, 70° 和 80° 时, SM2 和  $F_{\text{FOV2}}$  的变化。从图 6 可以看到, 在不同的位置下,  $r$  越大, 视场范围越小, 当球面镜沿上端或下端顶点顺时针旋转时, 视场范围也发生顺时针旋转。据此变化规律, 可结合所用相机和镜头来确定球面镜的尺寸参数和摆放位置, 从而确保被测物处于视场范围内。

#### 3.2 球面镜反射成像系统参数对分辨率的影响规律

利用单相机球面镜反射成像的分辨率公式来分析球面镜反射成像的分辨率随反射点位置及球面参

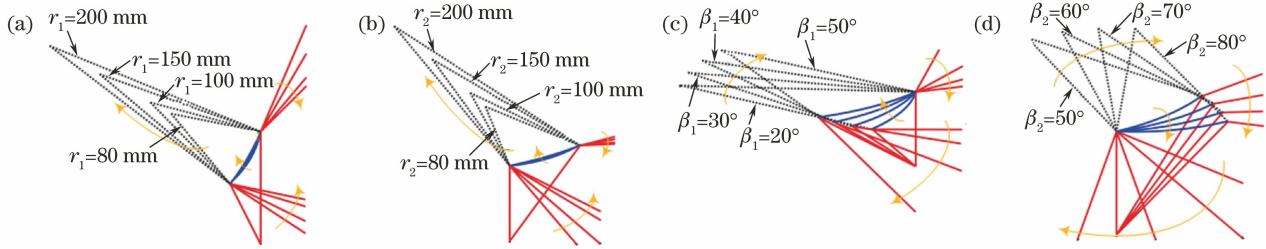


图 6 不同的特定参数下 SM1 和 SM2 及  $F_{FOV1}$  和  $F_{FOV2}$  的变化。(a)改变  $r_1$  后的 SM1 和  $F_{FOV1}$ ; (b)改变  $r_2$  后的 SM2 和  $F_{FOV2}$ ; (c)改变  $\beta_1$  后的 SM1 和  $F_{FOV1}$ ; (d)改变  $\beta_2$  后的 SM2 和  $F_{FOV2}$

Fig. 6 Changes of SM1, SM2,  $F_{FOV1}$ , and  $F_{FOV2}$  under different specific parameters. (a) SM1 and  $F_{FOV1}$  after changing  $r_1$ ; (b) SM2 and  $F_{FOV2}$  after changing  $r_2$ ; (c) SM1 and  $F_{FOV1}$  after changing  $\beta_1$ ; (d) SM2 and  $F_{FOV2}$  after changing  $\beta_2$

数的变化规律。图 7(a)为分辨率随  $f$  的变化曲线。从图 7(a)可知,  $f$  越大, 分辨率越大, 为了保证一定的分辨率,  $f$  可在 10~16 mm 之间取值。图 7(b)为分辨率随  $r_c(t)$  的变化曲线。从图 7(b)可知, 若不考虑球差, 则  $r_c(t) \approx r$  ( $r$  为球面曲率半径), 所以  $r$  越大, 分辨率越大, 因此  $r$  可在 150~300 mm 之间取值。

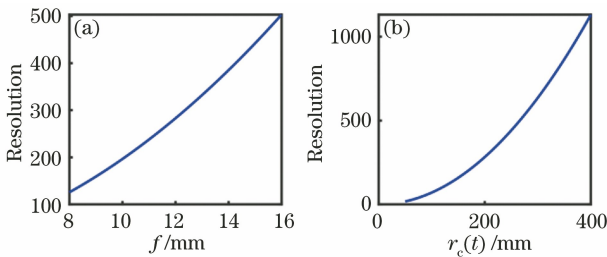


图 7 分辨率与系统参数的关系。(a)分辨率随  $f$  的变化曲线; (b)分辨率随  $r_c(t)$  的变化曲线

Fig. 7 Relationship between resolution and system parameters. (a) Variation curve of resolution with  $f$ ; (b) variation curve of resolution with  $r_c(t)$

改变映射区域中反射点  $S$  的三维坐标, 观察不同位置处反射点对应分辨率的大小分布情况。保持  $f$  不变, 反射点  $S$  的坐标为  $S(x(t), y(t), z(t))$ , 令  $x(t)$  在 -50~150 mm 之间取值,  $y(t)$  在 -50~150 mm 之间取值, 取点间隔均为 10 mm,  $z(t)$  由式 (3) 计算得出, 设定球心坐标为  $S_0(-50, 25, 560)$ , 在不考虑球差的情况下,  $r_c(t) \approx r$ , 在式 (6) 中令  $\xi = 20$  mm, 则可计算得出  $|SO|$  和  $\cos \psi$ , 根据式 (7) 可计算得到  $\cos \varphi$ , 最后由式 (6) 计算映射区域内成像分辨率的大小, 绘制指定表面区域内分辨率的三维矢量图, 以及指定区域内分辨率大小的分布图, 如图 8 所示。图 8(a) 中矩形区域为指定的球面镜表面映射区域, 箭头为表面矢量, 指向该点的法线方向, 长度为该点对应分辨率的大小。从图 8(a) 可以看出, 当点  $S$  在  $x$  轴和  $y$  轴的坐标越小时, 分辨率

越大。图 8(b) 为指定区域内分辨率大小的分布情况, 点  $S$  在  $x$  轴和  $y$  轴的坐标取值均为 -150~150 mm, 取点间隔均为 10 mm。从图 8(b) 可以看到, 反射点对应  $(x, y)$  平面上的点与  $(0, 0)$  点的距离越近, 分辨率越大。根据折反射视觉系统的成像需求, 可结合分辨率大小的分布规律来优化设计光学参数, 从而确保球面镜反射成像满足分辨率要求。

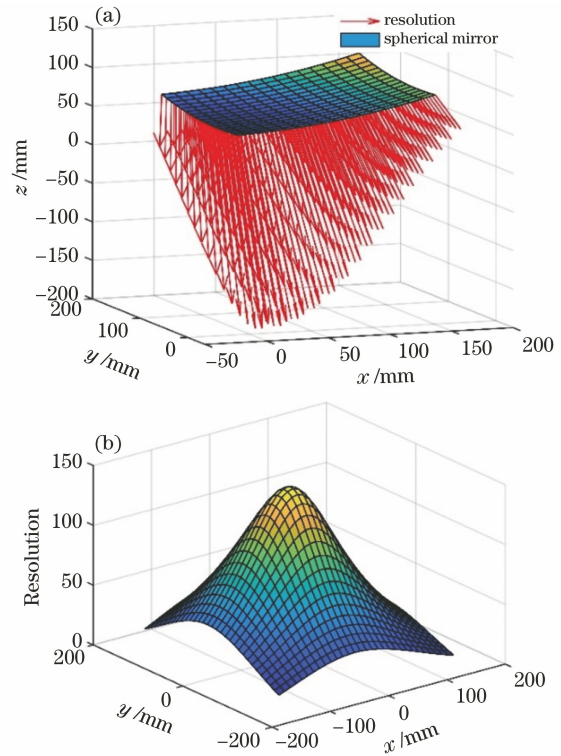


图 8 局部映射区域中反射点  $S$  对应的分辨率。

(a) 三维矢量; (b) 大小分布图

Fig. 8 Resolution corresponding to reflection point  $S$  in local mapping region. (a) Three-dimensional vectors; (b) size distribution map

### 3.3 球面镜反射成像系统参数对景深的影响规律

不同位置的目标点  $P$  所对应的成像景深与球面镜表面映射区域内反射点  $S$  的位置有关。改变

反射点  $S$  的三维坐标, 观察景深的变化。根据式 (6), 可以分析球面镜反射成像景深随点  $P$  位置和系统参数的变化规律。图 9(a) 为景深随  $f$  的变化曲线。从图 9(a) 可以看到,  $f$  越大, 景深越大, 为了保证一定的景深,  $f$  不宜过大, 可在 10~14 mm 之间选择。图 9(b) 为景深随  $L$  的变化曲线。从图 9(b) 可以看到,  $L$  越大, 景深越大, 测量距离可在 200~400 mm 之间选择。

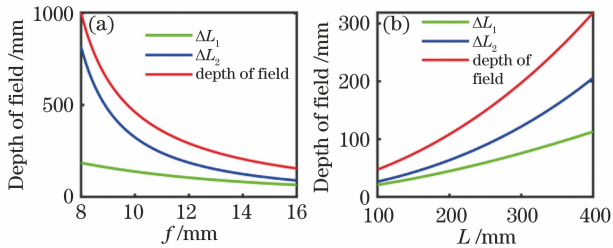


图 9 视场范围与系统参数的关系。(a) 视场范围随  $f$  的变化曲线; (b) 视场范围随  $L$  的变化曲线

Fig. 9 Relationship between depth of field and system parameters. (a) Variation curve of depth of field with  $f$ ; (b) variation curve of depth of field with  $L$

改变映射区域内反射点  $S$  的三维坐标, 观察不

同位置处反射点所对应的景深大小分布情况。令  $f, F, \delta, L$  保持不变, 点  $S$  的坐标为  $S(x(t), y(t), z(t))$ , 令  $x(t)$  在  $-50 \sim 150$  mm 之间取值,  $y(t)$  在  $-50 \sim 150$  mm 之间取值,  $z(t)$  由式 (2) 计算得出, 其中球心坐标  $S_0(-50, 25, 560)$ , 距离  $|SO|$  由式 (3) 计算得出, 在式 (4) 中令  $\xi = 20$  mm, 根据式 (8) 计算点  $S$  所对应的成像视场范围大小, 矢量长度代表视场范围的大小, 绘制球面镜表面视场范围的三维矢量图, 如图 10 所示。图 10(a) 中矩形区域为考察的球面镜表面部分区域, 箭头指向该点的法线方向, 长度为视场范围的大小。从图 10(a) 可以看出, 当点  $S$  在  $x$  轴和  $y$  轴的坐标越小时, 景深越小。图 10(b) 展示了指定区域内视场范围的大小分布情况, 点  $S$  在  $x$  轴和  $y$  轴的坐标取值均为  $-150 \sim 150$  mm,  $x$  轴和  $y$  轴的取点间隔均为 10 mm。从图 10(b) 可以看出, 球面镜表面点对应  $(x, y)$  平面上的点与  $(0, 0)$  点的距离越近, 视场范围越小。根据折反射视觉系统的成像需求, 可结合景深的分布规律来优化设计光学参数, 从而确保球面镜反射成像满足景深要求。

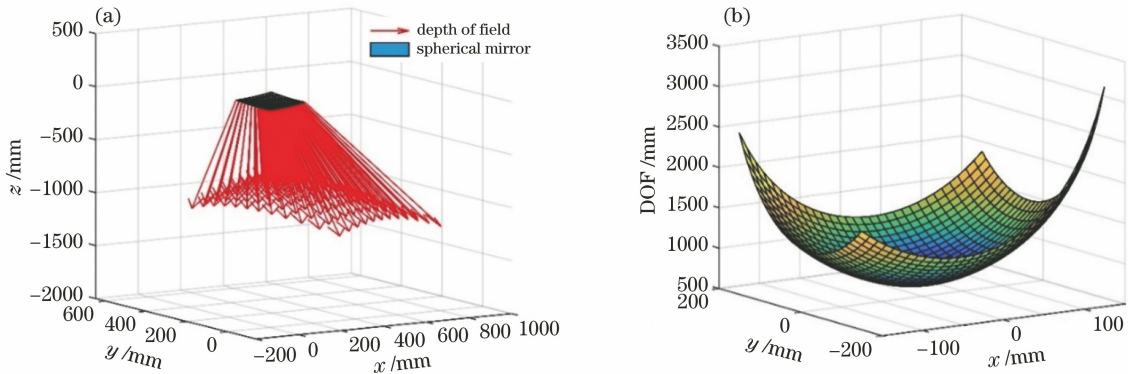


图 10 局部映射区域中反射点  $S$  处的视场范围。(a) 三维矢量; (b) 大小分布图

Fig. 10 Depth of field at reflection point  $S$  in local mapping region. (a) Three-dimensional vectors; (b) size distribution map

## 4 单相机双球面镜视觉成像设计及实验

### 4.1 单相机与双球面镜参数确定

根据第 2 节和第 3 节对球面镜反射成像系统光学特性的分析, 设计基于单相机和双球面镜的视觉传感器的相关参数。在设计双球面镜视觉成像系统时, 需要综合考虑视场范围、成像分辨率和景深。设计流程: 首先优先考虑视场范围, 按照成像系统的视场要求并根据图 5 来确定球面镜尺寸和摆放角度, 并依据镜片外径尺寸及其与单相机的距离来确定工业相机与光学镜头的型号参数, 其中相机参数主要

包含图像分辨率、像素尺寸和 COMS 靶面尺寸; 其次在满足视场范围要求的情况下, 根据图 7 的成像分辨率要求来确定球面镜的曲率半径和镜头的焦距; 最后结合图 9 的景深需求来确定镜头的光圈值和被测物的拍摄距离, 在满足视场范围要求的同时确保图像整体的成像分辨率和景深在合适的范围内, 从而验证参数选择具有合理性。成像实验中, 在优先考虑分辨率的情况下确定被测物的摆放位置, 使其在视场范围内, 且位于各自镜像图像内的中心位置处, 此时成像较为清晰。根据视场范围、工作距离、成像分辨率和景深, 最终设计出的基于单相机和双球面镜的视觉传感器的相关参数如表 1 和表 2 所

示。表 1 为选取的双球面镜参数,并与相同尺寸的平面镜进行对比,其中  $w$  为镜片的外径尺寸, $h$  为镜片的厚度。表 2 为机械结构的设计参数。MER-301-125U3C 型工业相机选用 Sony 生产的 IMX252 型全局快门 CMOS 图像传感器,其光学尺寸为

1/1.8 inch(1 inch=2.54 cm),分辨率为 2048 pixel $\times$ 1236 pixel,像素尺寸为 3.45  $\mu\text{m}\times$ 3.45  $\mu\text{m}$ 。实验中选用 computar 型光学镜头,焦距为 12 mm,最大光圈值为 1.4,光学尺寸为 2/3 inch。

表 1 双球面镜与双平面镜的参数

Table 1 Parameters of double spherical mirror and double planar mirror

Mirror	$w$ /mm	$h$ /mm	$r$ /mm	$\beta$ /( $^\circ$ )	$\alpha$ /( $^\circ$ )	$d$ /mm	Field of view /( $^\circ$ )	$\theta$ /( $^\circ$ )
Spherical mirror 1	35.18	1.80	200	37	10.95	100	[−13.07, 13.82]	26.89
Spherical mirror 2	47.37	1.80	200	53	13.60			
Planar mirror 1	35.18	1.80	$\infty$	37	0	100	[−2.17, 0.32]	2.49
Planar mirror 2	47.37	1.80	$\infty$	53	0			

表 2 机械结构的设计参数

Table 2 Design parameters of mechanical structure

Parameter	Value
Camera size / (mm $\times$ mm $\times$ mm)	29 $\times$ 29 $\times$ 36
Connection size / (mm $\times$ mm)	15.5 $\times$ 28.2
Lens size / (mm $\times$ mm)	29 $\times$ 33.5
Bottom plate size / (mm $\times$ mm $\times$ mm)	70 $\times$ 220 $\times$ 10
Mirror 1 fixed plate size / (mm $\times$ mm $\times$ mm)	38 $\times$ 38 $\times$ 5
Mirror 2 fixed plate size / (mm $\times$ mm $\times$ mm)	50 $\times$ 50 $\times$ 5

#### 4.2 双球面镜反射成像及对比实验

利用 4.1 节的参数设计双球面镜,选用工业相机和光学镜头来搭建原理样机,基于单相机和双球面镜的视觉成像系统如图 11 所示。图 12 比较了双球面镜和双平面镜的成像结果,在对比成像实验中,

拍摄距离均为 300 mm。图 12(a)为基于单相机和双平面镜所拍摄的目标图像,图 12(b)为基于单相机和双球面镜所拍摄的目标图像。从图 12 可以看出,双平面镜的反射成像视场较小,为此无法捕获完整的镜像目标图像,而双球面镜的反射成像视场较大,可以捕获完整的镜像目标图像。由此可归纳出球面镜反射成像机理,即被测物经过球面镜后反射至单相机进行成像,这可以使被测物的场景信息集中,所以单相机能够捕捉到更多的场景信息,从而扩大视场范围。同时,在双球面镜的反射成像图中,单相机可以在一张图像中捕获被测物的镜像双目图像对,在左、右两部分图像中:目标越靠近中心,分辨率越大,清晰度越高,且变形和畸变程度越小;目标越靠近边缘,分辨率越小,清晰度越低,且变形和畸变程度越大。

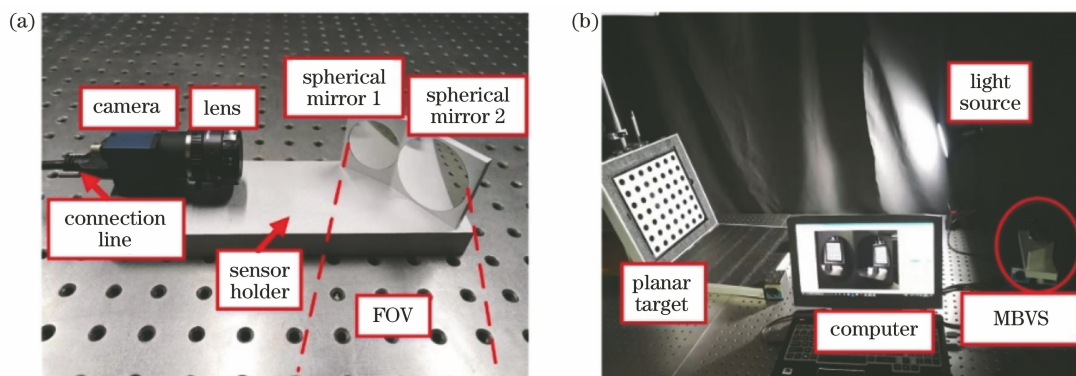


图 11 基于单相机和双球面镜的视觉成像系统。(a)成像系统的组成;(b)成像系统的实验装置

Fig. 11 Visual imaging system based on single camera and double spherical mirror. (a) Composition of imaging system; (b) experimental device for imaging system

## 5 结 论

基于单相机和双球面镜的视觉传感器通过折反

射光学元件来实现镜像双目成像,采用凸球面镜替换平面镜可在有效扩大视场范围的同时降低成像质量和清晰度。本文研究基于单相机和双球面镜的视

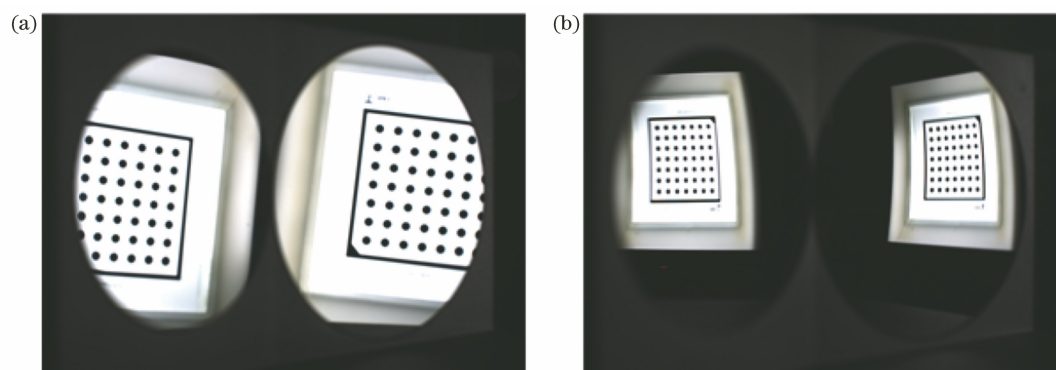


图 12 双平面镜和双球面镜的成像对比。(a)双平面镜的反射目标图像;(b)双球面镜的反射目标图像

Fig. 12 Imaging comparison of double spherical mirror and double planar mirror. (a) Reflected target image of double planar mirror; (b) reflected target image of double spherical mirror

觉传感器的成像光学特性,以离轴非中心式球面镜反射为研究对象,建立成像视场范围、分辨率和景深模型,通过仿真和实验得出其光学特性随成像系统各参数的变化规律,综合考虑各光学特性来完成基于单相机和双球面镜的传感器的设计。搭建原理样机进行成像实验,并与双平面镜进行对比。实验结果表明,在相同距离处对同一目标进行成像,采用双平面镜无法拍摄完整的图像,而采用双球面镜可使目标在左、右两个虚拟像中均成像完整,且左、右图像中心处与边缘处相比较为清晰。因此,采用双球面镜替换双平面镜可有效扩大视场范围,在成像过程中优先考虑分辨率时应使被测物靠近中心,优先考虑景深时应使被测物靠近边缘。

### 参 考 文 献

- [1] 孔焜, 张杰, 邓露, 等. 基于机器视觉的车辆检测与参数识别研究进展 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(4): 13-30.  
Kong X, Zhang J, Deng L, et al. Research advances on vehicle parameter identification based on machine vision [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(4): 13-30.
- [2] Yu Q H, Liu H, Sun S L. Optical design of an off-axis telescope: large aperture, small  $f$ /number, wide FOV [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7100: 71001X.
- [3] 支政, 曲宏松, 李静, 等. 锥摆扫一体化空间相机成像模式设计 [J]. 光学精密工程, 2021, 29(3): 536-546.  
Zhi Z, Qu H S, Li J, et al. Design of imaging model for cone-pendulum scanning integrated space camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(3): 536-546.
- [4] Ma Y P, Li Q W, Chu L L, et al. Real-time detection and spatial localization of insulators for UAV inspection based on binocular stereo vision [J]. Remote Sensing, 2021, 13(2): 230.
- [5] Lam E W, Little T D C. Visible light positioning: moving from 2D planes to 3D spaces [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(3): 030604.
- [6] 厉文涛, 聂晓明, 周健. 基于二维激光多普勒测速仪建立新组合导航系统的方法 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0310001.  
Li W T, Nie X M, Zhou J. Method for establishing new integrated navigation system based on two-dimensional laser Doppler velocimeter [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0310001.
- [7] Feng X F, Fang B. Algorithm for epipolar geometry and correcting monocular stereo vision based on a plane mirror [J]. Optik, 2021, 226: 165890.
- [8] Nagano A. Three-dimensional videography using omnidirectional cameras: an approach inspired by the direct linear transformation method [J]. Journal of Biomechanics, 2021, 128: 110722.
- [9] Liu T H, Liu Q, Sui Z, et al. Spatiotemporal characterization of laser pulse amplification in double-pass active mirror geometry [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2020, 8: e30.
- [10] Chen Y Z, Zhou F Q, Sun J H, et al. A novel mirrored binocular vision sensor based on spherical catadioptric mirrors [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 18670-18681.
- [11] Lim J, Ayoub A B, Psaltis D. Three-dimensional tomography of red blood cells using deep learning [J]. Advanced Photonics, 2020, 2: 026001.
- [12] Meng Q Y, Wang H Y, Liang W J, et al. Design of off-axis three-mirror systems with ultrawide field of view based on an expansion process of surface freeform and field of view [J]. Applied Optics, 2019, 58(3): 609-615.
- [13] Lin A Y, Li R, Jiang Z Y, et al. Path independent



- stereo digital image correlation with high speed and analysis resolution [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 149: 106812.
- [14] Yokoya R, Nayar S K. Extended depth of field catadioptric imaging using focal sweep [C]//2015 IEEE International Conference on Computer Vision, December 7-13, 2015, Santiago, Chile. New York: IEEE Press, 2015: 3505-3513.
- [15] Baker S, Nayar S K. A theory of catadioptric image formation [C]//Sixth International Conference on Computer Vision, January 7, 1998, Bombay, India. New York: IEEE Press, 1998: 35-42.
- [16] 杨琤, 周富强. 镜像式单摄像机双目视觉传感器的结构设计[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(22): 7-12.  
Yang C, Zhou F Q. Structure design of binocular vision sensor using mono-camera with mirrors [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(22): 7-12.
- [17] 宋丫, 柴兴华, 周富强. 单摄像机全向立体视觉传感器的结构设计 [J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0615002.  
Song Y, Chai X H, Zhou F Q. Structure design of single camera omnidirectional stereo vision sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0615002.
- [18] 李江勇, 冯位欣, 刘飞, 等. 机载多尺度广域高分辨率成像系统设计 [J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0208002.  
Li J Y, Feng W X, Liu F, et al. Design of airborne multi-scale wide-field-of-view and high-resolution imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0208002.
- [19] Ohte A, Tsuzuki O, Mori K. A practical spherical mirror omnidirectional camera [C]//International Workshop on Robotic Sensors: Robotic and Sensor Environments, 2005, September 30-October 1, 2005, Ottawa, ON, Canada. New York: IEEE Press, 2005: 8-13.
- [20] Labutov I, Jaramillo C, Xiao J Z. Generating near-spherical range panoramas by fusing optical flow and stereo from a single-camera folded catadioptric rig [J]. *Machine Vision and Applications*, 2013, 24(1): 133-144.
- [21] Howard J M, Stone B D. Imaging with multireflection systems of two spherical mirrors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4442: 51-59.
- [22] Zhou F Q, Wang Y X, Liu L, et al. Three-dimensional measurement approach in small FOV and confined space using an electronic endoscope [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(9): 3274-3282.
- [23] 卢泉, 张泽昊, 张卫平, 等. 基于 Boltzmann 函数刃边拟合的光栅成像系统点扩展函数模型 [J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1405003.  
Lu Q, Zhang Z H, Zhang W P, et al. Point spread function model of grating imaging system based on Boltzmann function edge fitting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1405003.
- [24] Jiang S, Guan M L, Wu J M, et al. Frequency-domain diagonal extension imaging [J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2: 036005.
- [25] Xing Y F, Dong J X, Dwivedi S, et al. Accurate extraction of fabricated geometry using optical measurement [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(11): 11001008.
- [26] Huang A W, Chen D N, Li H, et al. Three-dimensional tracking of multiple particles in large depth of field using dual-objective bifocal plane imaging [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(7): 071701.