

基于双目变焦超分辨率成像的测距方法

刘诗婷, 金伟其*, 李力, 裘溯

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 针对目前双目成像测距系统由于基线距离、成像焦距等硬件限制,难以进一步提高测距精度的问题,提出一种基于双目变焦的超分辨成像测距方法。通过变焦系统进行变焦超分辨率重建,在系统其余硬件条件不变的情况下提高系统的成像分辨率,进而提高双目系统的测距能力,减小双目系统的测距相对误差。实验结果表明:在相同的距离下,双目变焦测距系统具有更小测距相对误差;在相同的测距相对误差下,双目变焦测距系统具有更大的测距范围。通过同步变焦的双目立体视觉系统可提高三维场景的成像分辨率和测距分辨率,为实现小型远距离双目测距系统提供了一种新的有效思路。

关键词 成像系统; 双目视觉; 变焦成像; 超分辨率; 测距

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1411004

Ranging Method Based on Binocular Zoom Super-Resolution Imaging

Liu Shiting, Jin Weiqi*, Li Li, Qiu Su

MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract To overcome current hardware limitations related to baseline distance and focal length, this paper proposes a method for improving the ranging accuracy of binocular systems using super-resolution imaging based on binocular zoom. The zoom system achieves super-resolution reconstruction, improving the imaging resolution of the binocular system, and consequently, improving the ranging capability and decreasing the relative ranging error, without altering the remaining hardware components. Experimental results reveal that the binocular zoom ranging system has a smaller relative ranging error at the same distance; moreover, the binocular zoom ranging system has a greater range while keeping the relative ranging error constant. The binocular stereo vision system with synchronous zoom can improve the imaging and ranging resolutions of three-dimensional scenes and provides a novel and effective way of building a small long-distance binocular ranging system.

Key words imaging systems; binocular vision; zoom imaging; super-resolution; ranging

OCIS codes 110.2960; 330.1400; 100.6640; 150.5670

1 引 言

双目立体视觉系统在军事和民用领域具有广泛应用^[1-3],根据双目三角测距原理,在获取场景二维图像的同时,通过双目成像的视差获得目标场景的距离信息,完成三维立体视觉成像。不仅传统的双目光学望远镜、炮队镜及机器视觉系统等均采用了这一原理或方法,而且现代工业测量和智能驾驶等快速测距应用也采用了这一方法。如 Gao 等^[4]将双目系统应用于智能汽车中,实时重建三维场景,检测车前障碍物并获得距离;Guo 等^[5]将双目系统应

用于水下测距;Yang 等^[6]讨论了基于双目视觉系统测量海啸的立体匹配方法;Zhao 等^[7]通过会聚型双目结构、定向二进制简单描述符(ORB)的特征提取和基于网格的运动统计(GMS)特征匹配的方法,在低亮度环境下实现远距离、高精度的双目测距。虽随着激光技术的发展,诸如夜视观察仪和数字望远镜等应用较多地采用了单目+小型近红外/短波红外激光测距技术,成功实现了场景目标的观察和距离的快速测量,但随着隐身应用需求的增加,发展新型被动观察测距技术也应运而生。

按照三角测距模型,双目视觉的测距误差随

收稿日期: 2020-02-17; 修回日期: 2020-03-14; 录用日期: 2020-04-13

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金(J20160101)

* E-mail: jinwq@bit.edu.cn

距离增大而增加^[8],降低测距误差的主要途径包括加大光学系统焦距^[9]、增大双目系统的基线距离^[10]和提高系统的成像质量^[11],如提高图像分辨率。然而加大光学系统焦距会缩小成像视场范围,且受系统体积限制;增大双目系统的基线距离不仅受到系统体积限制,而且会减小双目视场交汇区域,增大视觉盲区,加大系统标定难度;提高系统的成像质量可在不明显增加系统体积和质量的条件下,通过大阵列成像探测器特别是数字图像处理等方法实现,而高分辨率的成像有利于提高立体视觉的测量距离或精度。

传统提高图像分辨率的数字方法有维纳滤波和结合点扩展函数等多种方法^[12-13]。如 Li 等^[14]根据点扩展函数与目标距离间的关系,通过双目测距及相应的点扩展函数,获取目标距离信息从而减少图像伪影,提高解码过程中的成像质量。目前超分辨率重建方法发展迅速,主要分为单幅和多幅超分辨率图像处理方法,前者利用单幅图像及成像退化信息实现超分辨率图像复原,后者是对多幅具有微位移或空间缩放的场景图像进行超分辨率图像重建。如 Kanaev 等^[15]提出了一种基于光流的多帧图像的超分辨率算法,通过提高具有微位移的低分辨率图像的运动估计精度,增强超分辨率重建效果;Huang 等^[16]提出了一种空间信息加权专家矢量场(WFoE)模型,将图像的空间结构信息引入专家矢量场(FoE)模型中,利用图像的微位移信息对图像进行超分辨率重建,进而更好地保护重建过程中的边缘信息;张海涛等^[17]利用不同焦距的图像获得不同抽样频率下的混淆信息,进而对图像进行超分辨率重

建;Tian 等^[18]将变焦图像的配准方法和超分辨率重建方法融合到同一过程中,通过提高变焦图像的匹配精度,进而改善变焦超分辨率重建效果。

为了在有限的系统体积,特别是在基线距离的约束下提高双目立体系统的成像质量和测距性能,本文基于当前光学变焦和超分辨率成像处理技术,研究一种基于双目变焦超分辨率成像的测距方法,以探寻紧凑型双目系统技术的可行性。

2 基于双目变焦超分辨率成像的测距方法

2.1 双目测距模型及变焦分析

双目视觉测量的基本原理如图 1 所示。点 P 是三维空间中的目标点,在双目相机的两个成像平面中的投影点分别为 p_1 和 p_2 ,投影点位于 x 轴的坐标分别为 x_1 和 x_2 (根据符号规则,从原点向左为负,向右为正),左右成像平面的原点 o_1 和 o_2 为左右成像系统的光轴与左右成像系统的成像平面的交汇点, x' 为点 P 在左右成像平面中成像点的位置差,即视差,两摄像机中光心 O_1 和 O_2 的距离为基线距离 b ^[19]。理想情况下,两摄像机焦距均为 f ,根据三角形相似原理,即可推导目标距离 L 及对应的测距相对误差为^[20]

$$L = \frac{f \times b}{x_1 - x_2} = \frac{f \times b}{x'}, \quad (1)$$

$$\left| \frac{\Delta L}{L} \right| = \frac{L}{f \times b} |\Delta x'|, \quad (2)$$

式中: ΔL 为测距误差; $\Delta x'$ 为成像系统像面可分辨距离误差。

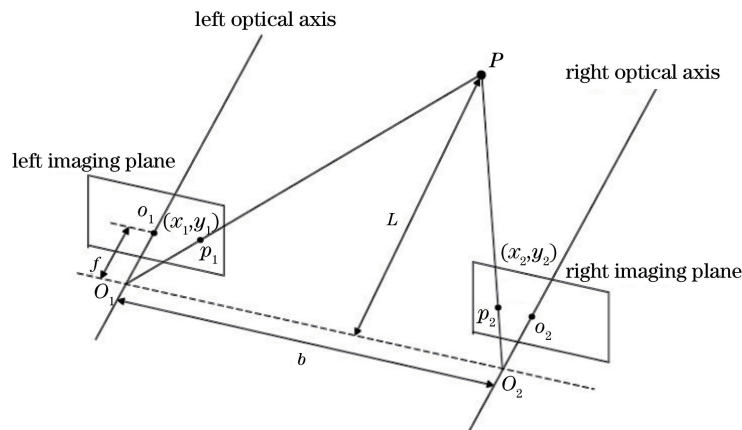


图 1 双目视觉测量的基本原理图

Fig. 1 Basic principle diagram of binocular vision measurement

从(2)式可以看到,测距相对误差与成像光学系统焦距、基线距离成反比,即焦距和基线距离越大,距离相对误差越小;目标距离越大,成像分辨率越低,测距相对误差越大。对于系统中确定的基距和焦距,在一定距离外目标在两个成像平面的成像视差可达到像元尺寸水平。由于图像采集系统受到有限传感器尺寸及像差等影响,传统探测器中成像系统的可分辨视差为像元尺寸,但随着近年来图像处理技术的发展,可分辨视差已小于探测器像元尺寸,且可分辨性能越好,测距精度越高或在相同精度下的可观察目标距离越远。

目前变焦数字望远镜技术得到迅速发展,通常由于基线距离和最大焦距受限,只有物镜焦距可在一定范围内变化。因此,利用不同焦距下的空间缩放可为图像超分辨率重建提供重要基础,即采用双目变焦测距系统获取多帧图像后,通过超分辨率重建方法获得较最大焦距对应图像分辨率更高的超分辨率图像,进一步通过双目配准,提

高测距精度或在相同精度下观察距离更远的目标。

2.2 变焦超分辨率重建

根据实际场景中摄像机的成像过程,尺寸为 $m \times n$ 的低分辨率图像与原始的高分辨率图像间的关系可表示为

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{D}_k \mathbf{B}_k \mathbf{M}_k \mathbf{X} + \mathbf{N}_k, \quad (3)$$

式中: \mathbf{Y}_k 为第 k 幅低分辨率图像经字典排序后组成的 $mn \times 1$ 向量; \mathbf{D}_k 为 $mn \times \xi m \xi n$ 大小的下采样矩阵, ξ 为下采样因子; \mathbf{B}_k 和 \mathbf{M}_k 分别为成像过程的模糊矩阵和变形矩阵,大小均为 $\xi m \xi n \times \xi m \xi n$; \mathbf{X} 为 $\xi m \times \xi n$ 大小的原始高分辨率图像经字典排序后组成的 $\xi m \xi n \times 1$ 向量; \mathbf{N}_k 为第 k 幅低分辨率图像在成像过程中附加的噪声向量,大小为 $mn \times 1$ 。

理想状态下,当只有镜头的焦距发生细微变化时,成像过程中的模糊和变形过程才可视作保持不变。不同焦距的低分辨率图像中,单个像素在原始高分辨率图像所占区域如图 2 所示。

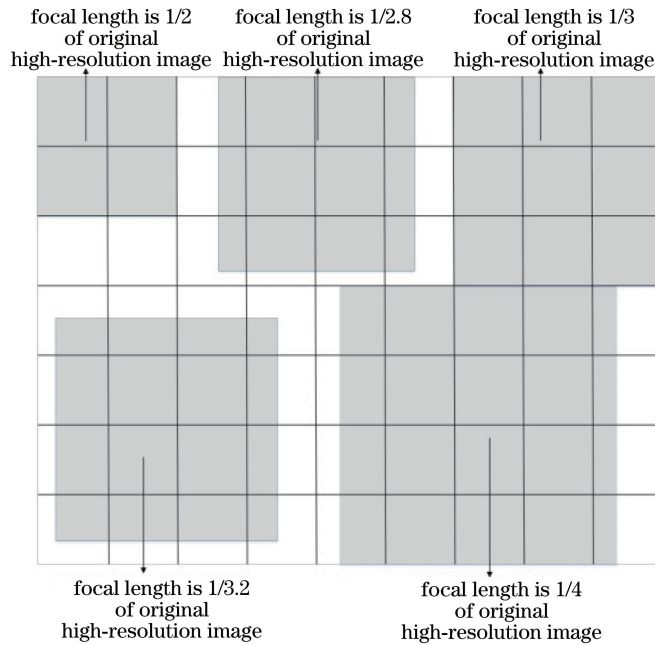


图 2 不同焦距图像的下采样过程

Fig. 2 Downsampling process of images with different focal lengths

从图 2 可以看到,低分辨率图像中单个像素是由高分辨率图像中多个像素线性融合而成。低分辨率成像的焦距越短,其图像中单个像素对应的高分辨率图像像素数越多,包含的有效信息也越少,除了增加计算量并未带来更好的超分辨率重建效果。因此,变焦超分辨率重建更适合采用系列微变焦图像以进行重建,图像的下采样过程如图 3 所示,低分辨率图像下采样过程可表示为^[21]

$$\mathbf{Y}_k^{(i,j)} = \sum_{(c,d) \in \Omega_{i,j}} \mathbf{W}_{(c,d)}^{(i,j)} \mathbf{X}(c,d), \quad (4)$$

式中: $\Omega_{i,j}$ 为低分辨率图像在原始高分辨率图像中的对应区域(图 3 阴影部分); $\mathbf{W}_{(c,d)}^{(i,j)}$ 为原始高分辨率图像中第 (c,d) 个像素与低分辨率图像中第 (i,j) 个像素相交面积的归一化权值(图 3 斜线部分); $\mathbf{X}(c,d)$ 为原始高分辨率图像在 (c,d) 处的像素值; $\mathbf{Y}_k^{(i,j)}$ 为第 k 幅低分辨率图像在 (i,j) 处的像素值。

实际低分辨率图像在原始高分辨率图像中的对应区域通过 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) 特征点匹配而得。

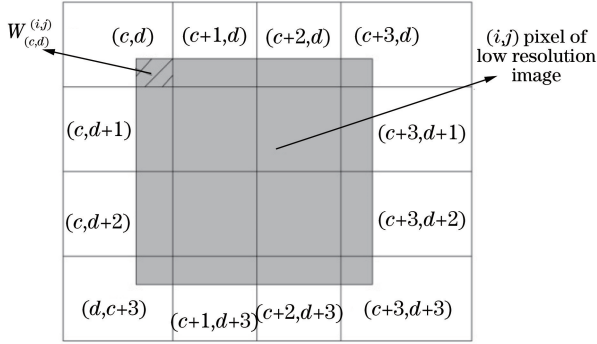


图 3 图像的下采样过程

Fig. 3 Downsampling process of image

从(4)式可以看到,通过足够数量的低分辨率图像可获得一个稀疏线性方程组,求解该方程组即可计算得到原始高分辨率图像。然而,由于实际场景中低分辨率图像的信息不足及受噪声等因素影响,图像的超分辨率重建是一个逆问题,需通过已知图像的先验信息和正则项等条件对图像进行约束。

从(3)式可以看到,可通过最小化评价函数 $E(\mathbf{X})$ 以获得超分辨率重建图像,表达式为

$$E(\mathbf{X}) = \min \left[\sum_{k=1}^N \|\mathbf{Y}_k - \mathbf{D}_k \mathbf{B}_k \mathbf{M}_k \mathbf{X}\|^2 + \lambda \cdot R(\mathbf{X}) \right], \quad (5)$$

式中: $\lambda \cdot R(\mathbf{X})$ 为图像的正则项,其中 λ 为一个平衡保真项和正则项间权重的标量,通常依靠经验设置; $R(\mathbf{X})$ 为图像的先验信息; N 为低分辨率图像数量。

正则项有许多类型,即不同种类的先验信息。马尔可夫随机场(MRF)^[22]通过自然图像中每个像素与其邻域相差很小的先验信息有效地抑制了图像中噪声,但易造成图像边缘模糊;总变分(TV)^[23]能有效去除图像中噪声并保持图像边缘,但较难求解;双边总变分(BTV)^[24]引入值域和空域的双约束,与TV相比更易求解。因此,采用BTV正则项,表达式为

$$R(\mathbf{X}) = \sum_{u=-r}^r \sum_{v=0}^r \alpha^{|u|+|v|} \|\mathbf{X} - \mathbf{S}_x^{(u)} \mathbf{S}_y^{(v)} \mathbf{X}\|_1, \quad (u+v \geq 0), \quad (6)$$

式中: r 为选取窗口的半径; $\mathbf{S}_x^{(u)}$ 和 $\mathbf{S}_y^{(v)}$ 为图像沿 x 和 y 方向分别平移 u 和 v 个像素算子; α 为尺度加权系数,取值范围为 $[0,1]$,用于产生空间衰减效应。

为了获得超分辨率图像,对 $E(\mathbf{X})$ 进行迭代求解,得到最小评价函数对应的图像即为所求的超分

分辨率重建图像。迭代的更新方案为

$$\mathbf{X}_{t+1} = \mathbf{X}_t + \beta_t \mathbf{d}_t, \quad (7)$$

式中: \mathbf{X}_{t+1} 为第 $t+1$ 次迭代得到的超分辨率重建图像; \mathbf{X}_t 为第 t 次迭代得到的超分辨率重建图像; β_t 为第 t 次迭代的步长; \mathbf{d}_t 为第 t 次迭代的方向向量。

最小评价函数求解过程中,常用的迭代方法有梯度下降法、共轭梯度法和牛顿迭代法等。梯度下降法的步长难以确定,通常收敛速度较慢;牛顿法必须导出黑塞矩阵,计算量偏大;因此采用自适应步长的共轭梯度法^[25]进行迭代求解。

迭代过程直到第 $t+1$ 幅图像与第 t 幅图像的差异值 $\epsilon_t = \|\mathbf{X}_{t+1} - \mathbf{X}_t\| / \|\mathbf{X}_t\|$ 小于设定阈值 ϵ_0 时,停止迭代。

3 超分辨率图像重建与测距实验

3.1 超分辨率图像重建实验

对数字仿真和实际场景图像的超分辨率图像重建结果进行分析。为了定量评价和比较重建性能,将峰值信噪比(PSNR)和结构相似性(SSIM)作为评价标准^[26]。

数字仿真中,对图4(a)进行分析。彩色图像的分辨率为 $448 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, RGB(Red, Green, Blue)通道像素范围为 $[0, 255]$ 。假设图像无位移,故直接采用方差 $\sigma=1, 3 \times 3$ 大小的高核对图像进行模糊操作;再对图像按照(4)式中面积权重进行降采样以生成5张低分辨率图像[图4(b)~4(f)],其中图像的下采样因子 ξ 分别为 $16/8, 16/7, 16/6, 16/5$ 和 $16/4$,图像相对应的焦距依次减小,5张图像的实际尺寸分别为 $224 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, $196 \text{ pixel} \times 224 \text{ pixel}$, $168 \text{ pixel} \times 192 \text{ pixel}$, $140 \text{ pixel} \times 160 \text{ pixel}$ 和 $112 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$;最后添加标准差为1的高斯噪声。超分辨率重建过程中, α 值太小将降低边缘像素与中心像素间的联系, α 值太大将丢失中心像素的特殊性; r 值过大则将过度平滑图像边缘并增加计算量,所以在BTV中 α, r 根据经验^[27]设置为 $0.7, 2$; λ 经不同大小数值对比后设为 0.1 ; 初始步长设为 0.1 ; 迭代阈值为 10^{-6} 。

图5为超分辨率图像重建结果,其中图5(a)和图5(c)分别为最大焦距图像[图4(b)]及其局部双立方插值放大图像,图5(b)和图5(d)分别为超分辨率重建图像及其局部双立方插值放大图像,将最大焦距插值图像及超分辨率重建图像分别与原图[图4(a)]进行定量评价,结果如表1所示。从图5和表1可以看到,超分辨率图像的细节比最大焦距

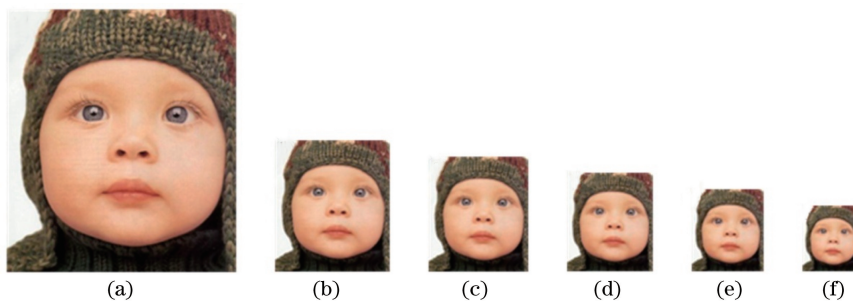


图 4 不同下采样因子的图像。(a)原图;(b) $\xi=16/8$;(c) $\xi=16/7$;(d) $\xi=16/6$;(e) $\xi=16/5$;(f) $\xi=16/4$

Fig. 4 Images with different downsampling factors. (a) Original image; (b) $\xi=16/8$;
(c) $\xi=16/7$; (d) $\xi=16/6$; (e) $\xi=16/5$; (f) $\xi=16/4$



图 5 最大焦距图像与超分辨率图像的比较。(a)最大焦距插值图像;(b)超分辨率图像;
(c)最大焦距插值图像的局部放大图;(d)超分辨率图像的局部放大图

Fig. 5 Comparison of maximum focal length images and super-resolution images. (a) Interpolated image with maximum focal length; (b) super-resolution image; (c) partially enlarged image of interpolated image with maximum focal length; (d) partially enlarged image of super-resolution image

表 1 仿真实验结果定量评价

Table 1 Quantitative evaluation of simulation results

Figure	PSNR /dB	SSIM
Interpolated image with maximum focal length	33.7684	0.9730
Super-resolution image	35.8526	0.9841

图像更清晰,且能够充分消除模糊现象,与原图结构更为接近;PSNR 和 SSIM 数据也得到明显改善。

实际场景实验使用 DFK 23G274 彩色摄像机(像素数为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$)采集 USAF 1951 分辨率板图像,图 6(a)~6(d)分别为在焦距为 8.142,9.024,9.797,10.201 mm 拍摄的分辨率板图像,图 6(e)为超分辨率重建图像,图中虚线框圈出部分为 0 组靶条,超分辨率图像的重建参数与仿真相同。图 6(f)~6(i)分别为图 6(b)~6(e)中 0 组靶条区域的放大图。

从图 6 可以看到,最大焦距图像[图 6(d)]可分辨 0 组靶条数量约为 2 块,超分辨率重建图像[图 6(e)]可分辨 0 组靶条数量约为 5 块,即分辨率提高了 50%,相当于超分辨率重建图像的等效焦距提高到最大焦距的 1.5 倍左右;超分辨率重建图像

的噪声明显低于最大焦距图像。这表明所提算法在超分辨率重建和滤噪方面的有效性。

3.2 实际场景的三维成像实验

3.2.1 室内场景目标的三维成像实验

使用两个 DFK 23G274 彩色相机,像素为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $4.4 \mu\text{m}$ 。针对室内目标,双目变焦系统的基线距离为 100.0 mm,镜头变焦范围为 4.0~12.0 mm,获得焦距分别为 8.142, 9.024,9.797,10.201 mm 的图像用于超分辨率重建。图像标定及校正后,双目变焦系统最大焦距为 10.705 mm,基线距离为 99.4 mm。通过激光测距仪 GLM30(量程范围为 0.15~30.00 m,精度为 $\pm 2 \text{ mm}$)获得图 7 中目标 1(盒子)距离为 1881 mm,目标 2(分辨率板)距离为 3120 mm,目标 3(书)距离为 6275 mm,目标 4(饮水机)距离为 9333 mm。

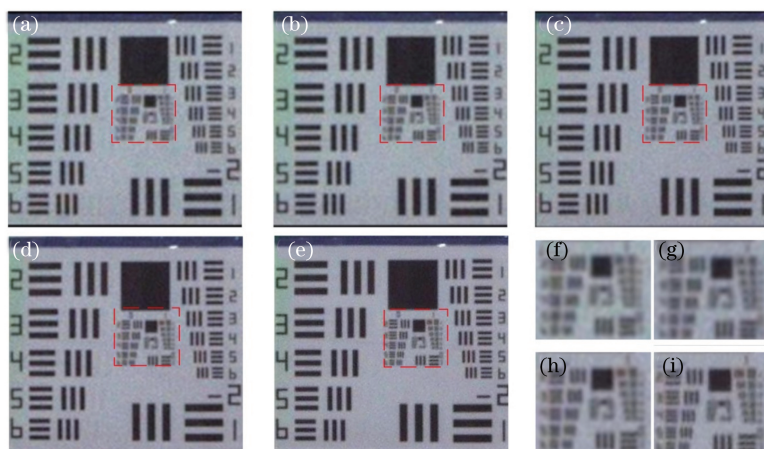


图 6 不同焦距下的分辨率板及虚线框的放大图。(a) 8.142 mm;(b) 9.024 mm;(c) 9.797 mm;(d) 10.201 mm;

(e)超分辨率图像;(f)图(b)的放大图;(g)图(c)的放大图;(h)图(d)的放大图;(i)图(e)的放大图

Fig. 6 Resolution board images at different focal lengths and enlarged view of dotted frame. (a) 8.142 mm; (b) 9.024 mm; (c) 9.797 mm; (d) 10.201 mm; (e) super-resolution image; (f) enlarged image of fig. (b); (g) enlarged image of fig. (c); (h) enlarged image of fig. (d); (i) enlarged image of fig. (e)

使用双目变焦系统获得图像对后,对左右焦距最大图像[图 7(a)和图 7(b)]中不同目标进行 SIFT 特征匹配。获得目标视差后根据(1)式和(2)式计算不同目标距离及其相对误差。对不同焦距图像进行超分辨率重建后获得的左右超分辨率图像如图 7(c)和图 7(d)所示,并对图像中不同目标进行 SIFT 特征匹配。获得目标视差后根据(1)式获得距离信息,根据(2)式计算不同目标距

离的相对误差,并与最大焦距图像中不同目标数据进行对比,结果如表 2 所示。从表 2 可以看到,在相同距离处,通过超分辨率重建可将测距相对误差最佳降至传统方法的 67%,也可将测距相对误差最差降至传统方法的 78%;在相同距离下,双目变焦系统的测距精度相较固定焦距的双目系统更高;在相同测距精度下,双目变焦系统测量距离更远。

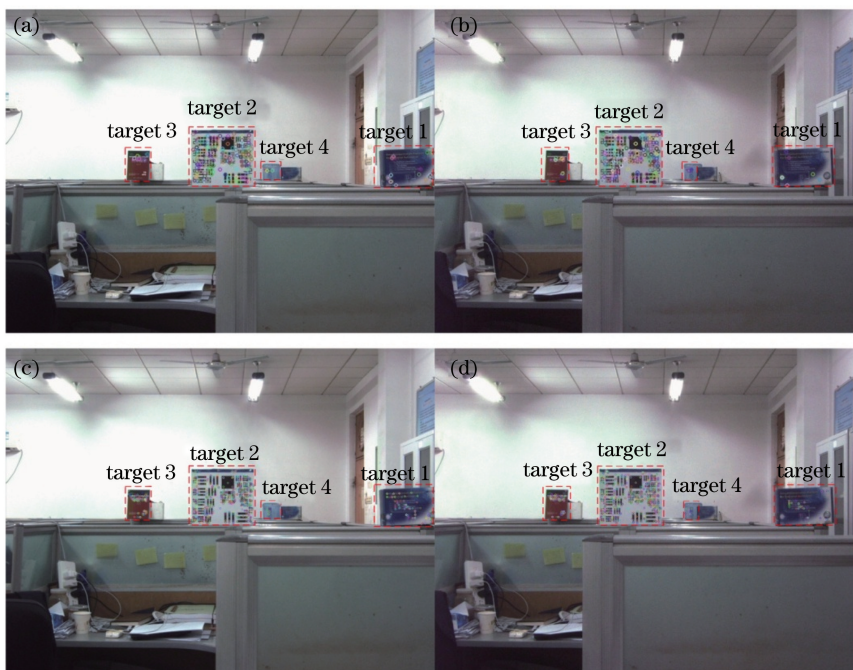


图 7 室内场景目标测距实验。(a)左最大焦距的图像;(b)右最大焦距的图像;(c)左超分辨率图像;(d)右超分辨率图像

Fig. 7 Experiment of indoor scene targets ranging. (a) Left maximum focal length image;

(b) right maximum focal length image; (c) left super-resolution image; (d) right super-resolution image

表 2 双目变焦测距系统的测距结果

Table 2 Ranging results of binocular zoom ranging system

Actual distance /mm	Traditional			Proposed		
	Focal length /mm	Calculate distance /mm	Relative error /%	Equivalent focal length /mm	Calculate distance /mm	Relative error /%
1881(target 1)	10.705	1850	1.65	21.410 (Super-resolution)	1859	1.17
3120(target 2)		3047	2.34		3071	1.57
6275(target 3)		6032	3.87		6085	3.03
9333(target 4)		8787	5.85		8955	4.05

3.2.2 室外场景目标的三维成像实验

使用 DFK 23G274 彩色相机对室外场景目标进行实验,基线距离为 500.0 mm,镜头变焦范围为 12.5~75.0 mm,获得焦距分别为 67.025,69.676,72.901,74.000 mm 的图像用于超分辨率重建。图像标定及校正后,系统最大焦距为 74.091 mm,基线距离为 499.2 mm。图 8 中场景目标 1(右侧大楼第一竖列)距离为 167 m,目标 2(左侧居民楼)距离为 272 m,距离信息通过加拿大 NEWCON 公司手持激光测距仪 LRM 1200 (量程范围为 20~1200 m,精度为 ± 1 m)获得。

使用双目变焦系统获得图像对后,对左右焦距最大图像[图 8(a)和图 8(b)]中不同目标进行特征点匹配。获得目标视差后根据(1)式获得距离信息,根据(2)式计算不同目标距离的相对误差。对不同

焦距图像进行超分辨率重建后获得的左右超分辨率图像如图 8(c)和图 8(d)所示,对超分辨率图像中不同目标进行 SIFT 特征匹配,获得目标视差后根据(1)式获得距离信息,根据(2)式计算不同目标距离的相对误差,并与最大焦距图像中不同目标的数据进行对比,结果如表 3 所示。从表 3 可以看到,在相同距离 272 m 处,通过超分辨率重建可将测距相对误差由原来 5.21%降至 3.52%,在相同距离 167 m 处,通过超分辨率重建可将测距相对误差由原来 3.28%降至 2.00%,通过超分辨率重建可将测距相对误差最佳降至传统方法的 61%。实验结果表明:在相同远距离下,双目变焦系统的测距精度相较固定焦距的双目系统更高,在相同测距精度下,测量距离可提升为传统方法的 1.64 倍左右,且该系统适用于近距离和远距离目标。

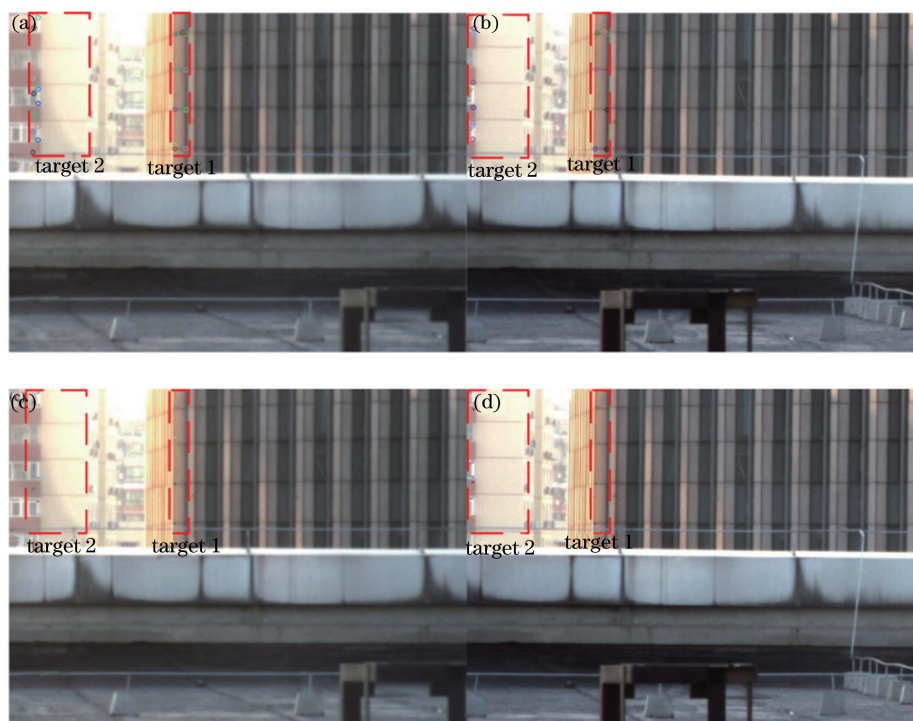


图 8 室外场景目标测距实验。(a)左最大焦距的图像;(b)右最大焦距的图像;(c)左超分辨率图像;(d)右超分辨率图像

Fig. 8 Experiment of outdoor scene targets ranging. (a) Left maximum focal length image; (b) right maximum focal length image; (c) left super-resolution image; (d) right super-resolution image

表 3 室外场景目标测距结果
Table 3 Ranging results of targets in outdoor scene

Actual distance /m	Traditional			Proposed		
	Focal length / mm	Calculate distance / m	Relative error /%	Equivalent focal length / mm	Calculate distance /m	Relative error /%
167 (target 1)	74.091	172.479	3.28	148.182	170.335	2.00
272 (target 2)		286.173	5.21	(Super-resolution)	281.572	3.52

4 结 论

为了在系统尺寸的限制下提高双目立体视觉系统的测距精度,研究了基于双目变焦的超分辨率成像测距方法,在确定的基线限制下,通过基于多帧变焦图像的超分辨率重建算法提高图像分辨率,降低双目系统的测距相对误差。实际实验室和外场测试实验结果表明:双目变焦测距系统对于相同距离的目标,测距系统可使测量相对误差降低至传统方法的61%~78%;在相同的测距相对误差下,测量距离可提升为传统方法的1.64倍左右。通过同步变焦的双目立体视觉系统可全面提高三维场景成像质量和测距分辨率,可为紧凑型双目测距系统的实现提供一种可行的解决思路。后续将在以下三个方面进一步改进实验:1)双目变焦系统的一致性(焦距一致性及其同步、光轴稳定性);2)双目图像匹配精度;3)超分辨率处理效率。

参 考 文 献

- [1] Puglia L, Vigliar M, Raiconi G. Real-time low-power FPGA architecture for stereo vision[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 64(11): 1307-1311.
- [2] Song W J, Yang Y, Fu M Y, et al. Lane detection and classification for forward collision warning system based on stereo vision [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(12): 5151-5163.
- [3] Wang W B, Wang T F, Guo J. Research on orbit determination technology for space target based on method of tracking with double satellites and double cameras[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112006.
王卫兵, 王挺峰, 郭劲. 基于双星双目跟踪方式的空间目标定轨技术研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112006.
- [4] Gao M Y, Meng X, Yang Y X, et al. A traffic avoidance system based on binocular ranging [C] // 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), June 18-20, 2017, Siem Reap, Cambodia. New York: IEEE, 2017: 1039-1043.
- [5] Guo S X, Chen S Z, Liu F G, et al. Binocular vision-based underwater ranging methods [C] // 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), August 6-9, 2017, Takamatsu, Japan. New York: IEEE, 2017: 1058-1063.
- [6] Yang Y, Lu C W, Chen C H. Research on stereo matching methods for long distance sea surface image [C] // 2019 5th International Conference on Engineering, July 2-5, 2019, Luang Prabang, Laos. New York: IEEE, 2019: 18921735.
- [7] Zhao C, Zhao Z R, Chen W Z. Low luminance measurement based on binocular ranging [C] // 2018 5th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), November 10-12, 2018, Nanjing, China. New York: IEEE, 2018: 983-987.
- [8] Tang W, Ye D, Yuan F, et al. Application of grey incidence method to error analysis of binocular vision measurement system [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(2): 503-513.
唐巍, 叶东, 袁峰, 等. 灰色关联分析法在双目视觉测量系统误差分析中的应用[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 503-513.
- [9] Li D M, Su W, Yang J H, et al. Target image matching algorithm based on binocular CCD ranging [J]. Abstract and Applied Analysis, 2014, 2014: 785072.
- [10] Mou X Z, Wang H. Wide-baseline stereo-based obstacle mapping for unmanned surface vehicles [J]. Sensors, 2018, 18(4): 1085.
- [11] Lee D H, Chang J Y, Heo Y S. Stereo matching using cost volume fusion for high dynamic range scenes [J]. Electronics Letters, 2017, 53(23): 1522-1524.
- [12] Kim T. Optical sectioning by optical scanning holography and a Wiener filter [J]. Applied Optics, 2006, 45(5): 872-879.
- [13] Sun F S, Han X. Super-resolution algorithm based on precise color vector constraint of light field camera [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0304001.
孙福盛, 韩燮. 光场相机精确色彩矢量约束下的超分辨率算法 [J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0304001.
- [14] Li J S, Liu M, Du H Y, et al. Hybrid imaging with

- extended depth of field based on binocular ranging [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(8): 083109.
- [15] Kanaev A V, Miller C W. Multi-frame super-resolution algorithm for complex motion patterns[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 19850-19866.
- [16] Huang S Y, Wu J J, Yang Y, et al. Multi-frame image super-resolution reconstruction based on spatial information weighted fields of experts [J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2020, 31(1): 1-20.
- [17] Zhang H T, Gong M L, Zhao D Z, et al. Superresolution by micro-zooming technique[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(8): 1486-1491.
张海涛, 巩马理, 赵达尊, 等. 实现超分辨率的微变焦法[J]. *物理学报*, 2001, 50(8): 1486-1491.
- [18] Tian Y S, Yap K H. Joint image registration and super-resolution from low-resolution images with zooming motion [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2013, 23(7): 1224-1234.
- [19] Vallerand S, Kanbara M, Yokoya N. Binocular vision-based augmented reality system with an increased registration depth using dynamic correction of feature positions[C]//*IEEE Virtual Reality*, March 22-26, 2003, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE, 2003: 271-272.
- [20] Jiang Y T, Yang J H, Liu Z, et al. High precision calibration of binocular CCD ranging system [J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(7): 228-232.
姜雨彤, 杨进华, 刘钊, 等. 双目 CCD 测距系统的高精度标定[J]. *计算机工程*, 2013, 39(7): 228-232.
- [21] Cao J L, Lü H B, Li G Z, et al. A research on spatial model of the superresolution imaging by micro-zooming and its experiments [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2004, 26(5): 115-118.
曹聚亮, 吕海宝, 李冠章, 等. 基于微变焦法的超分辨率成像技术及实验研究[J]. *国防科技大学学报*, 2004, 26(5): 115-118.
- [22] Joshi M V, Chaudhuri S, Panuganti R. Super-resolution imaging: use of zoom as a cue[J]. *Image and Vision Computing*, 2004, 22(14): 1185-1196.
- [23] Ng M P, Shen H F, Chaudhuri S, et al. Zoom-based super-resolution reconstruction approach using prior total variation [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(12): 127003.
- [24] Abedi A, Kabir E. Stroke width-based directional total variation regularisation for document image super resolution[J]. *Iet Image Processing*, 2016, 10(2): 158-166.
- [25] Wang Y Q, Yang J G, Xiao C, et al. Fast convergence strategy for multi-image superresolution via adaptive line search[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 9129-9139.
- [26] Zhao J W, Hu H P, Cao F L. Imagesuper-resolution via adaptive sparse representation [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2017, 124: 23-33.
- [27] Farsiu S, Robinson M D, Elad M, et al. Fast and robust multiframe super resolution [J]. *IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2004, 13(10): 1327-1344.