

镜像双目视觉精密测量技术综述

周富强^{1*}, 王晔昕², 柴兴华³, 陈昕¹

¹北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

²中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

³中国电子科技集团公司第五十四研究所航天信息应用技术重点实验室, 河北 石家庄 050081

摘要 综述了镜像双目视觉测量技术的发展现状, 从测量原理及传感器、测量模型及标定、测量精度及评价等方面分析了镜像双目视觉测量结构模型, 主要包括基于平面折反射的镜像双目结构和基于曲面折反射的镜像双目结构, 总结了现有镜像双目测量结构在结构模型、图像获取和对应匹配等方面的优缺点, 阐述了镜像双目视觉精密测量技术的发展趋势。

关键词 机器视觉; 双目视觉; 精密测量; 折反射

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815003

Review on Precise Measurement Technology Based on Mirror Binocular Vision

Zhou Fuqiang^{1*}, Wang Yexin², Chai Xinghua³, Chen Xin¹

¹School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191;

²State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;

³Key Laboratory of Aerospace Information Application Technology, The 54th Research Institute of
China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050081

Abstract The development status of mirror binocular vision measurement technology is reviewed. The measurement models of the binocular vision structure based on mirrors, including structures using plane mirrors and curved mirrors, are analyzed in the aspects of measurement principle and sensor, measurement model and calibration, measurement accuracy and evaluation, etc. The advantages and disadvantages of the existing mirror binocular measurement system are summarized with respect to the structure model, image acquisition and corresponding matching. In addition, the development trend of precision measurement technology based on mirror binocular vision is described.

Key words machine vision; binocular vision; precise measurement; catadioptric

OCIS codes 150.0155; 150.6910; 330.1400

1 引 言

“工业 4.0”的日益普及以及“中国制造 2025”的政策^[1]牵引, 融合图像探测与定量视觉测量的三维视觉测量技术已经成为诸多领域最受青睐的技术。双目立体视觉技术作为实现三维精密测量的首选, 被广泛地应用于先进制造^[2]、现代农业^[3]、智能交通^[4]、航空航天等领域, 如无人机、无人驾驶感知系

统、无人航天航空飞行器、先进制造无人生产线机器人、突发灾害智能探测机器人、特殊环境下作业机器人等。随着相关技术的发展, 必将进一步扩大到与国计民生紧密相关的诸多领域。

目前的双目视觉测量方法, 主要针对室内、光照均匀、无遮挡或较少反射的强约束场景, 仅适用于特定条件下的三维测量需求。近年来, 针对各种不同的场景条件, 国内外学者开始尝试研究特殊场景下

收稿日期: 2018-04-15; 修回日期: 2018-05-20; 录用日期: 2018-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(61372177)

* E-mail: zfq@buaa.edu.cn

的三维感知测量技术。Liao 等^[5]提出了一种针对光照较弱环境下,利用光度立体相机对室内场景进行三维感知的方法。Priya 等^[6]针对场景中的被遮挡物体,利用双目立体视觉系统进行目标识别和三维感知。Dai 等^[7]针对室内场景三维感知,提出实现三维重构实时性的方法。除此之外,还有关于利用无人机高光谱成像进行三维数据获取^[8]、火灾救援机器人智能导航等研究^[9]。微软公司和英特尔公司分别在 2010 年和 2012 年发布了 Kinect 和 RealSense 摄像机,能够获取 RGB 及深度图像^[10]。现有的测量传感器因体积大、双目图像采集同步难、以此构建的测量系统小型化困难等缺陷,难以满足动态测量或对受限空间的精密测量的应用需求。

镜像式双目视觉测量模式融合了传统双目视觉测量的优点,而且具有测量结构简单、系统配置灵活、可控参数多、结构易小型化等特点,避免了传统双目对左右视图同步采集要求,被广泛应用于各种受限空间测量领域。Sheu 等^[11]提出了一种双视角胶囊内窥镜头,具有前向和后向视图采集功能,为医生提供多视角来处理折叠过程中的病变。Feng 等^[12]则采用双透镜模型应用于红外热成像系统,减少光轴外像差,实现宽视场测量。Jin 等^[13]则将一对平面镜组和激光微机电系统(MEMS)扫描仪相组合,构建一种新型的 360° 三维形貌测量装置。Duma 等^[14]通过配置两平面镜位置,设计了一种小型的具有旋转或振动反射镜的激光扫描仪。因此,镜像双目视觉测量技术由于其结构简单、灵活性高等优点成为宽视场、实时动态场景三维测量的有效

手段,在智能制造、无人驾驶、复杂场景下智能探测及位姿解析等动态应用领域具有广阔的应用前景。

2 测量原理及传感器

2.1 基于平面折反射的镜像双目视觉

基于平面折反射镜像双目视觉技术采用单个摄像机,利用平面折反射光学镜像方式从不同方位同时捕获被测物体图像。由平面镜折反射构建镜像双目结构功能等效于传统摄像机双目传感器,由单摄像机镜像产生的虚拟摄像机完全相同,包括有效焦距、主点坐标和畸变参数等完全相同,有效地简化了标定的流程,避免了传统双目对左右视图同步采集要求,提高了图像采集的效率,而且摄像机与镜面结构距离较近,易于传感器整体结构小型化设计。根据折反射产生的镜像虚拟摄像机的结构对称性,将该类成像方式分为对称式和非对称式。

1) 对称式平面折反射镜像双目结构

对称式结构一般采用对称设计或对称放置的光学元件,如双棱镜、多组对称结构的反射镜等。平面镜折反射镜像系统形成的左右虚拟摄像机关于原摄像机光轴或镜像装置呈对称分布,位于光轴上的被测点到两个虚拟摄像机的光程相等。由于对称结构的成像方向多数同原摄像机方向一致,交角较小,因此拍摄得到的被测物体光照条件基本一致。典型的对称式平面折反射镜像双目结构如图 1 所示,多采用双棱镜结构^[15-16]、多个平面镜组合测量模式^[17]或分光镜^[18-19]等镜像结构组建对称式折反射镜像双目系统^[20-21]。

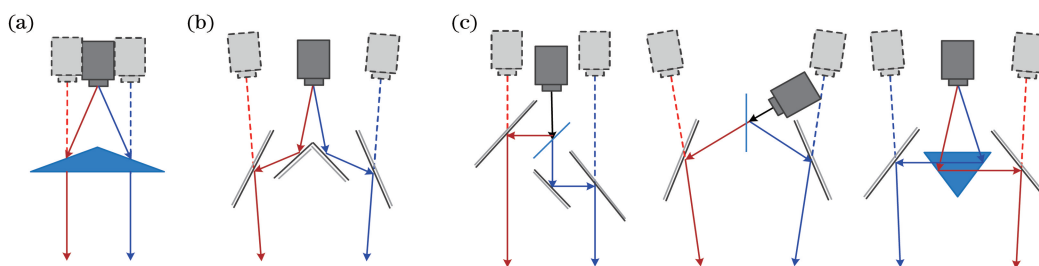


图 1 典型的对称式平面折反射镜像双目结构示意图。(a)单摄像机与双棱镜;(b)单摄像机与平面反射镜组;(c)左至右分别为分光镜、双色向滤光镜、棱镜与平面反射镜组

Fig. 1 Structure of catadioptric symmetry plane mirror binocular vision system.

(a) Single camera and a biprism; (b) single camera and a group of plane mirrors;

(c) from left to right, spectroscope, dichroic filters, prism with plane mirrors, respectively

2) 非对称式平面折反射镜像双目结构

非对称式结构一般由单摄像机和若干平面反射镜组成,形成的虚拟摄像机关于原摄像机光轴或镜像装置不对称。通过调节采用的光学反射镜组的位置和角

度,非对称式镜像双目可以实现大基线距的侧方成像。非对称结构的平面折反射镜像双目多采用单个平面镜^[22-23]、平面镜组^[24-27]或多个平面镜构建^[28],典型的非对称式平面折反射镜像双目结构如图 2 所示。

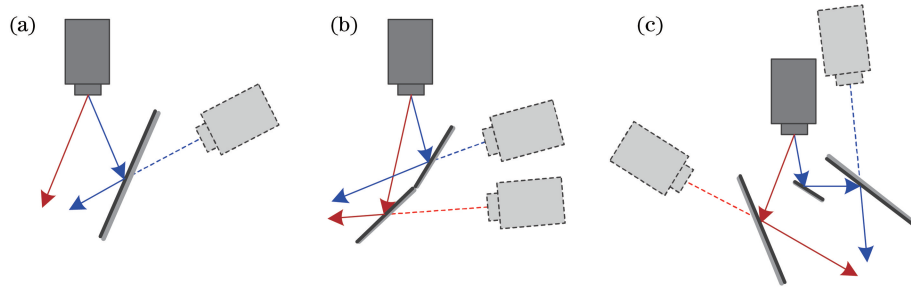


图 2 典型的非对称式平面折反射镜像双目结构示意图。(a)单摄像机与单反反射镜；
(b)单摄像机与平面反射镜组；(c)单摄像机与多个平面反射镜

Fig. 2 Structure of typical catadioptric asymmetry plane mirror binocular vision system. (a) Single camera and a mirror; (b) single camera and a pair of plane mirrors; (c) single camera and a group of plane mirrors

表 1 不同镜像双目结构对比结果

Table 1 Comparison results based on different mirror binocular structures

Category	Types of structure	Advantages	Disadvantages
Plane mirror-based binocular vision system	Symmetry	1) The parameters of the virtual camera generated by a single mirror is the same, which can simplify the calibration process effectively	
	Non-symmetry	2) Avoid the synchronous acquisition of images in left and right view and improve the efficiency of image acquisition 3) The close distance between the camera and the mirror makes it easy to design the sensor structure 4) Baseline distance is large and easy to configure the field of view	1) The measured field of view is half 2) Different image resolutions make the matching accuracy reduce 3) The changing field-of-view direction makes the configuration of the measured object difficult 4) The unequal optical path measurement reduces the measurement accuracy
Curved mirror-based binocular vision system	Symmetry	1) The field of view is omnidirectional 2) The parameters of the virtual camera generated by a single mirror are the same, which can simplify the calibration process effectively 3) Avoid the synchronous acquisition of images in left and right view and improve the efficiency of image acquisition	1) Inherent curing exists in images 2) The target features do not have the perspective projection invariance 3) The resolution of the same target has a large difference 4) The measurement model is complex

2.2 基于曲面折反射的镜像双目视觉

由于曲面镜本身的结构特征,曲面镜的引入将扩大视场范围,因此,许多国内外学者对基于曲面镜的宽视场图像信息获取技术进行了深入的研究和分析^[29]。如图3所示,典型的基于曲面镜的单摄像机镜像成像系统通常采用光轴共线结构,通常表现为单摄像机与双叶曲面镜双目系统^[30-32]、单摄像机与

两个同向曲面镜双目系统^[33-34]以及单摄像机与两个对向曲面镜双目系统^[35-36]。

依据镜像双目视觉测量系统的结构特征对不同镜像双目结构的优缺点进行了总结和分析,如表1所示。由表1可以看出,镜像双目测量系统整体结构设计灵活性高、易于小型化,但是需要依据实际测量需求对测量系统结构进行优化设计。

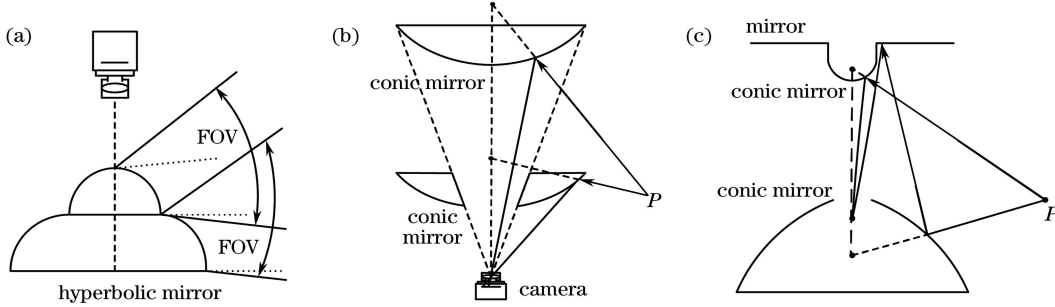


图3 基于曲面镜的单摄像机镜像成像结构示意图。(a)双叶曲面镜;(b)同向曲面镜;(c)对向曲面镜

Fig. 3 Imaging structure using single camera and curved mirrors. (a) Hyperbolic mirror; (b) two synclastic curved mirrors; (c) two inverted curved mirrors

3 测量模型及标定

3.1 镜像双目测量模型

不同的镜像双目测量模型原理大致相同,均为利用虚拟摄像机参数之间的相互关系建立测量模型^[24]。以单摄像机与一对平面镜组构成的非对称镜像双目结构为例^[25]建立的镜像双目测量模型如图4所示,测量模型包含摄像机线性参数和两个虚拟相机之间的结构参数。其中, M_l 和 M_r 为相接的平面镜组,形成两个视场减半的虚拟摄像机;左虚拟摄像机 L 和右虚拟摄像机 R 。

物点 P 位于世界坐标系 $O_w-x_wy_wz_w$,对应的齐次坐标为 $\bar{x}_w=(x_w, y_w, z_w, 1)^T$ 。通过 M_l 和 M_r 从不同角度的反射,物点 P 在左右虚拟图像平面上的投影点分别为 p_l 和 p_r 。在虚拟图像坐标系 O_u-uv 下,点 p_l 在左虚拟图像坐标系中的齐次图像坐标为 $\bar{u}_l=(u_l, v_l, 1)^T$,点 p_r 在右虚拟图像坐标系中的齐次图像坐标为 $\bar{u}_r=(u_r, v_r, 1)^T$ 。在摄像机坐标系下,点 p_l 在左虚拟摄像机坐标系中的齐次坐标为 $\bar{x}_{cl}=(x_{cl}, y_{cl}, z_{cl}, 1)^T$,点 p_r 在右虚拟摄像机坐标系中的齐次坐标为 $\bar{x}_{cr}=(x_{cr}, y_{cr}, z_{cr}, 1)^T$ 。两虚拟相机之间的坐标转换关系可以表示为

$$s\bar{u}_l = \mathbf{A}[\mathbf{R}_l \quad \mathbf{t}_l]\bar{x}_w = \mathbf{A}\bar{x}_{cl} = \mathbf{H}_l\bar{x}_w, \quad (1)$$

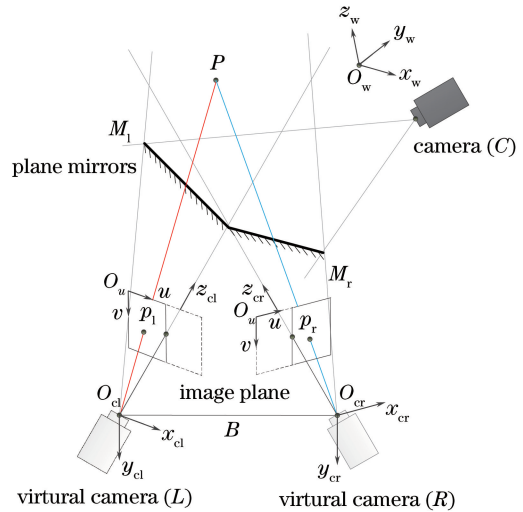


图4 平面折反射镜像双目测量模型

Fig. 4 Measurement model of mirror binocular vision

$$s\bar{u}_r = \mathbf{A}[\mathbf{R}_r \quad \mathbf{t}_r]\bar{x}_w = \mathbf{A}\bar{x}_{cr} = \mathbf{H}_r\bar{x}_w, \quad (2)$$

$$\bar{x}_{cl} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}]\bar{x}_{cr}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{R}_l, \mathbf{R}_r$ 和 $\mathbf{t}_l, \mathbf{t}_r$ 分别为世界坐标系到左(右)摄像机坐标系刚性变换的 3×3 旋转矩阵和 3×1 平移向量。 \mathbf{A} 为 3×3 摄像机内参数矩阵,由于左、右虚拟摄像机由同一摄像机镜像所得,因此具有相同的内部参数。 f_x 和 f_y 为 x 和 y 方向上的有效焦距,单位为像素, (u_0, v_0) 为主点坐标。 \mathbf{H}_l 和 \mathbf{H}_r 为 3×4 左右虚拟摄像机的映射矩阵,分别表示了世界坐标系下点到左、右图像点之间的映射关系。以左摄像机坐标系为参考坐标系,即测量坐标系,右摄像机

坐标系相对于左摄像机坐标系之间的刚性变换可以用 3×3 旋转矩阵 \mathbf{R} 和 3×1 平移向量 \mathbf{t} 来表示。

3.2 镜像双目系统标定

镜像双目系统标定的目的在于完成左、右虚拟摄像机线性参数和结构参数的标定,从而建立物体空间和图像平面映射关系^[26]。基于曲面折反射镜像双目系统通常需要极坐标展开,利用获取的柱面全景图片进行双目标定^[29-30],而基于平面折反射镜像系统的结构特征,无需进行图像处理即可直接进行双目标定过程。通常的镜像双目系统标定一般分为初始值估计和非线性优化两步。通过采集已知空间位置靶标点的二维坐标,建立图像坐标系与世界坐标系之间的映射关系,解算摄像机内部参数和左右虚拟摄像机结构参数,然后将计算得到的值作为初始值,设置目标函数对所有参数进行非线性优化,得到优化后的内部参数、结构参数和畸变参数。

1) 初始值估计

摄像机内部参数和结构参数的初始值通过线性解算求得。在视场范围内自由移动已知空间位置的靶标(如棋盘格靶标),从不同角度获取 k 幅靶标图像($k \geq 3$),检测靶标图像中各个特征点的坐标^[37],并对每幅图像的 n 个($n \geq 4$)特征角点进行亚像素精度提取^[38]。利用特征点之间的对应关系求解每个视角中世界坐标系 $O_w-x_wy_wz_w$ 与图像坐标系 O_u-uv 之间的单应矩阵。设第 q 幅($q=1, \dots, k$)靶标图像的单应矩阵为 \mathbf{H}_q ,利用旋转矩阵的正交性可以解算出摄像机内参数 f_x, f_y, u_0, v_0 和外部参数,单应矩阵以及内外参数的具体求解算法在文献[39]中有详细论述。

实际应用的摄像机通常存在一定的畸变,不适用于理想的小孔成像模型^[40],为了较高地测量精度,将镜头畸变参数设置为零,参与下一步的非线性优化。镜头畸变一般包括径向畸变、切向畸变和薄透镜畸变,通常只考虑径向畸变就可满足大多数场合的精度要求。除了常用的径向和切向畸变模型外,有学者还提出了对数鱼镜头模型^[41]、多项式鱼镜头模型、视场畸变模型^[42]、除法畸变模型^[43]以及配分函数模型^[44]等。文献[45]对当前较为常见的镜头畸变模型进行了总结,并对每种畸变模型进行了评估和实验对比。对镜头畸变的标定方法,文献[46]结合了特征点的交比不变性以及共线性等几何不变量,同时纳入了畸变模型对非畸变点和畸变点位置关系的约束,利用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法对非畸变点坐标、径向和切向畸变

系数以及畸变中心进行了迭代求解。

2) 非线性优化

将上节中求解得到的摄像机内部参数、畸变参数和结构参数作为初始值,设置优化目标函数,进行最小化几何距离的极大似然估计,对所有参数进行迭代优化。Levenberg-Marquardt 非线性优化算法具有收敛快的特点,由线性解算得到的结果作为优化的初始值,经过多次迭代能够收敛到全局最优解,避免了不合适的迭代初始值导致优化陷入局部最优的现象。

在优化目标函数建立上,文献[47]中的将三维空间的重投误差最小作为优化目标函数,结果表明,相比于将二维影像的重投误差最小作为目标函数,该方法可以得到更高的三维量测精度。文献[48]将双目系统固有的极线约束和靶标特征点之间的固定距离约束也加入到了最终的优化目标函数,形成了一种多约束条件下的双目视觉参数优化方法,获得的精度高于传统方法。

3.3 极线几何和基本矩阵

如图 5 所示,利用极线几何约束关系,将左右虚拟图像平面中同名特征点的搜索从二维降低至一维空间。 p_l 和 p_r 为物点 P 在左右虚拟图像平面 π_{ul} 和 π_{ur} 的投影, e_l 和 e_r 为两虚拟摄像机光心 O_{cl} 和 O_{cr} 的连线(基线)与两虚拟图像平面的交点,过点 p_l 和 e_l 的直线 l_l 为对应点 p_l 的极线,过点 p_r 和 e_r 的直线 l_r 为对应点 p_r 的极线。

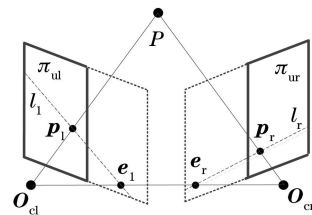


图 5 单摄像机立体视觉的极线几何

Fig. 5 Epipolar constraint model of mirror binocular vision

假设左摄像机坐标系与世界坐标系重合,已知物点 P 在世界坐标系 $O_w-x_wy_wz_w$ 的坐标为 $\mathbf{x}_w = (x_w, y_w, z_w, 1)^T$,其在左、右图像上对应的像点分别为 $\mathbf{u}_l = (u_l, v_l, 1)^T$ 和 $\mathbf{u}_r = (u_r, v_r, 1)^T$,根据摄像机针孔成像模型,有

$$\begin{cases} s_l \mathbf{u}_l = \mathbf{A}_l [\mathbf{I} & 0] \mathbf{x}_w \\ s_r \mathbf{u}_r = \mathbf{A}_r [\mathbf{R} & \mathbf{t}] \mathbf{x}_w \end{cases}, \quad (4)$$

消去 \mathbf{x}_w ,得到极线约束方程为

$$s_r \mathbf{A}_r^{-1} \mathbf{u}_r - s_l \mathbf{R} \mathbf{A}_l^{-1} \mathbf{u}_l = \mathbf{t}, \quad (5)$$

将 $[t]_{\times}$ 左乘上式两端,同除以 s_r 有:

$$[t]_{\times} A_r^{-1} \bar{u}_r - s [t]_{\times} R A_l^{-1} \bar{u}_l = 0, \quad (6)$$

式中 $s = s_l/s_r$,令 $m = A_r^{-1} \bar{u}_r$,左乘 m^T ,有:

$$m^T [t]_{\times} m - s m^T [t]_{\times} R A_l^{-1} \bar{u}_l = 0. \quad (7)$$

已知 $m^T [t]_{\times} m = 0$,得到:

$$A_r^{-T} \bar{u}_r [t]_{\times} R A_l^{-1} \bar{u}_l = 0. \quad (8)$$

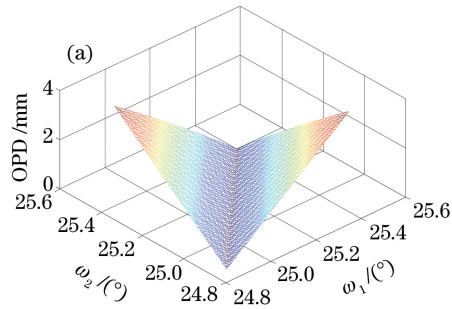
令 $F = A_r^{-T} \bar{u}_r [t]_{\times} R A_l^{-1}$,称 F 为基本矩阵,表征了双目视觉的摄像机内部参数和结构参数(校正畸变后)。对于单镜像双目系统,则有

$$F = A^{-T} \bar{u}_r [t]_{\times} R A^{-1}. \quad (9)$$

4 测量精度及评价

4.1 基于平面折反射的镜像双目测量精度

对称式平面折反射镜像双目结构,除摄像机内



参数矩阵相同,与传统的双目视觉测量方法一致,其整体测量精度受传感器结构参数、摄像机测量视场以及双目对应特征匹配精度的影响^[49]。非对称镜像双目传感器结构设计由于其不对称平面镜设计,改变了测量视场方向,被测物体通过两平面镜反射造成两个成像视图的光程大小不同,在采集少量图像时,影响较小,一旦处理大容量图片数据,图像分辨率不同,容易造成图像处理的滞后。因此,在大容量数据传播时,非对称式平面折反射镜像双目结构极易造成测量精度降低。文献^[50]中分析了光程差与投影角和测量误差之间的变化规律,如图6所示。因此,在非对称式平面折反射镜像双目结构中实现等光程测量,提升传感器测量精度是一个亟待解决的关键问题。

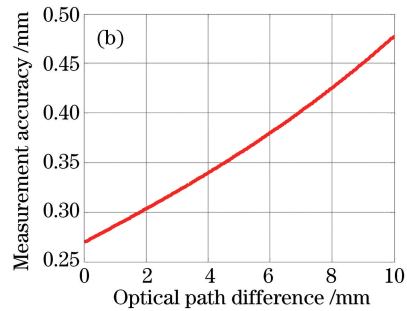


图6 光程差与测量误差规律。(a)光程差分布规律图;(b)测量误差随光程差变化规律

Fig. 6 Laws of optical path difference and measurement errors. (a) Distribution of optical path difference; (b) measurement error varying with optical path difference

4.2 基于曲面折反射的镜像双目测量精度

对于基于曲面折反射的镜像双目结构,引入曲面镜扩大了传感器测量视场范围,但是所采集图片存在较大畸变,不利于双目图像的采集和匹配,传感器测量精度较低。依据现有的基于曲面折反射镜像双目测量的研究成果来看^[22-34],导致整体测量精度较低的原因主要有:1)曲面折反射镜像双目结构极限长度过短,三维重构精度不高;2)基于曲面折反射结构采集图像卷曲畸变严重,畸变校正模型复杂,特征点采集精度不高;3)单摄像机非单视点模式的同名特征匹配算法复杂,匹配精度和效率难以保证。因此,基于曲面折反射的镜像双目结构中高精度特征匹配建模是提升传感器测量精度的关键。

5 镜像双目视觉系统及其应用

基于镜像双目视觉对位置、尺寸、形貌这类几何尺寸具有的高精度测量表现,众多研究者对镜像双目视觉在各领域的实际应用做了大量研究,如电子

科技大学的张俊^[51]研究了基于多目立体视觉的真实人脸重建和测量系统,用于虚拟整形手术中容易操作、高精度的人脸三维成像和测量。西南交通大学的冯伟峰^[52]研究了基于立体视觉的移动机器人局部路径规划技术,移动机器人在行驶过程中,通过视觉感知附近场景的三维信息做出路径规划。哈尔滨工业大学的陈立国等^[53]研究了一种基于旋转式反射镜的飞行视觉系统,视觉系统可以获得待测物的静止的清晰图像,实现待测物位置和角度的测量。Wang等^[54]将镜像双目视觉系统用于机器人的目标识别,使用识别算法首先将镜像图像转换为普通透视图像,再在图像中提取尺度不变特征转换(SIFT)视觉特征,最后使用训练好的贝叶斯分类器来判断该目标是否为数据库中事先已经训练过的目标。Scaramuzza等^[55-56]研究了基于镜像双目视觉的里程计,通过提取机器人连续两帧镜像图像中的SIFT特征点,获得两帧图像的特征点之间的单应性约束条件,进而求解出两帧图像之间的旋转和平

移量。

从镜像双目视觉测量技术的特点来看,镜像双目视觉测量技术主要应用于空间目标定位、机器自主导航和未知环境智能监控等领域进行三维感知测量,相对于传统的固定视觉测量手段,镜像双目视觉测量技术在实时动态视觉测量方面有更高的采样频率,不仅能够实现普通视觉测量所能获得的效果^[57-58],还能够收集获得更多的额外的运动信息,在高精度、高效率三维感知领域具有更广泛的使用范围,更广阔的应用前景。

6 结 论

通过对镜像双目视觉测量原理、测量模型、测量精度以及镜像双目视觉系统展开分析,从各种技术的优缺点及当前各领域的应用需求来看,单摄像机和平面镜组合测量模式具有精度高、小型化容易、结构简单等优点,通过合理设计传感器的结构配置,在考虑传感器小型化的同时保证基线距的长度,研究单摄像机镜像双目测量技术,对受限空间内三维测量、宽视场监控、高动态现场精密测量等有重要意义。总体上,单摄像机镜像双目测量技术的应用需求决定了其研究方向及发展趋势:1)镜像双目视觉测量技术把光学成像系统、摄像机和数据采集系统优化设计,减小视觉传感器的体积,提高传感器的灵活性及适应性;2)单摄像机和全景成像技术相结合,实现360°全方位场景图像的拍摄;3)研究不同镜像双目视觉技术相对应的成像模型、畸变模型和测量模型,及其标定技术和误差评价方法等;4)针对特殊应用场合设计对应的镜像双目结构,尤其是人类无法直接操作的受限空间,对测量系统小型化、灵活性和测量精度均有特殊要求;5)从复杂受限约束的独立测量单元向现场自由组建的嵌入式集成单元发展,从静态环境离线低速测量向未知的动态环境高速测量发展。

参 考 文 献

- [1] Notice of the state council on printing and distributing "made in China 2025" [EB/OL]. (2015-05-19). The State Council of the People's Republic of China. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
国务院关于印发《中国制造2025》的通知 [EB/OL]. 中华人民共和国中央人民政府网. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [2] Chen B H, Deng L, Chen Z X, *et al.* Instant dense 3D reconstruction-based UAV vision localization[J]. *Acta Electronic Sinica*, 2017, 45(6): 1294-1300.
陈宝华, 邓磊, 陈志祥, 等. 基于即时稠密三维重构的无人机视觉定位 [J]. *电子学报*, 2017, 45(6): 1294-1300.
- [3] Luo X, Liao J, Zou H J, *et al.* Enhancing agricultural mechanization level through information technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(20): 1-14.
- [4] Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's automotive engineering research progress: 2017 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(6): 1-197.
《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究成果综述: 2017[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(6): 1-197.
- [5] Liao J, Buchholz B, Thiery J M, *et al.* Indoor scene reconstruction using near-light photometric stereo [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(3): 1089-1101.
罗锡文, 廖娟, 邹湘军, 等. 信息技术提升农业机械化水平 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 1-14.
- [6] Priya L, Anand S. Object recognition and 3D reconstruction of occluded objects using binocular stereo[J]. *Cluster Computing*, 2017, 21(8): 1-10.
- [7] Dai A, Izadi S, Theobalt C. BundleFusion: real-time globally consistent 3D reconstruction using on-the-fly surface re-integration [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 76-85.
- [8] Honkavaara E, Rosnell T, Oliveira R, *et al.* Band registration of tuneable frame format hyperspectral UAV imagers in complex scenes[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017, 134: 96-109.
- [9] Madhevan B, Ramanathan S, Jha D K. Anovel image intelligent system architecture for fire proof robot [M]. *Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems: Proceedings of ICAIECES 2016*, 2017: 805-817.
- [10] Yang Y, Pu F, Li Y, *et al.* Reliability and validity of kinect RGB-D sensor for assessing standing balance [J]. *IEEE Sensors*, 2014, 14(5): 1633-1638.
- [11] Sheu M J, Chiang C W, Sun W S, *et al.* Dual view capsule endoscopic lens design [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8565-8575.
- [12] Feng B, Shi Z L, Zhao Y H, *et al.* A wide-FoV athermalized infrared imaging system with a two-element lens [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2017, 87: 11-21.
- [13] Jin R, Zhou X, Yang T, *et al.* A novel 360-degree shape measurement using a simple setup with two

- mirrors and a laser MEMS scanner[J]. Proceedings of SPIE, 2017: 41.
- [14] Duma M A, Duma V F. Two-mirror device for laser scanning systems: multiparameter analysis [C] // SPIE Optical Metrology, 2017: 1033014.
- [15] Lee D, Kweon I. A novel stereo camera system by a biprism [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(5): 528-541.
- [16] Lim K, Xiao Y. Virtual stereovision system: new understanding on single-lens stereovision using a biprism[J]. Journal of Electronic Imaging, 2005, 14(4): 043020.
- [17] Zhu J, Yang J, Li Y, *et al.* Study on structure precision of single camera stereo vision measurement [J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(17): 4278-4282.
- [18] Somanath G, Rohith M, Kambhamettu C. Single camera stereo system using prism and mirrors[C] // Advances in Visual Computing, 2010, 6454: 170-181.
- [19] Pachidis T, Lygouras J. Pseudostereo-vision system: a monocular stereo-vision system as a sensor for real-time robot applications [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2547-2560.
- [20] Zhong F, Quan C. A single color camera stereo vision system[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(4): 1474-1482.
- [21] Li J, Dan X, Xu W, *et al.* 3D digital image correlation using single color camera pseudo-stereo system[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 95: 1-7.
- [22] Zhang Z, Tsui H. 3D reconstruction from a single view of an object and its image in a plane mirror[C] // IEEE 14th International Conference on Pattern Recognition, 1998: 1174-1176.
- [23] Hu B. It's all done with mirrors: calibration-and-correspondence-free 3D reconstruction[C] // IEEE 6th Canadian Conference on Computer and Robot Vision, 2009: 148-154.
- [24] Wang Y, Zhou F, Cui Y. Single-camera active stereo vision system using fiber bundles[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(10): 68-71.
- [25] Zhou F, Wang Y, 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.
- [26] Zhou F, Wang Y, Peng B, *et al.* A novel way of understanding for calibrating stereo vision sensor constructed by a single camera and mirrors [J]. Measurement, 2012, 46(3): 1147-1160.
- [27] Gluckman J, Nayar S. Catadioptri estereo using planar mirrors[J]. International Journal of Computer Vision, 2001, 44(1): 65-79.
- [28] Gluckman J, Nayar S. Rectified catadioptric stereo sensors[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(2): 224-236.
- [29] Mei C, Rives P. Singleview point omnidirectional camera calibration from planar grids [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007: 3945-3950.
- [30] Gluckman J, Nayar S, Thoresz K J. Real-time omnidirectional and panoramic stereo [C] // IEEE International Conference on Image Understanding Workshop, 1998: 299-303.
- [31] Zeng J Y, Su X Y, Jin G F. Panoramic stereo imaging using hyperboloid catadioptric cameras[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2006, 17(6): 728-732.
曾吉勇, 苏显渝, 金国藩. 基于双曲面折反射相机的柱面全景立体成像[J]. 光电子 • 激光, 2006, 17(6): 728-732.
- [32] Cabral E L L, de Souza J C, Hunold M C. Omnidirectional stereo vision with a hyperbolic double lobed mirror[C] // IEEE 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004: 1-9.
- [33] Su L, Zhu F. Design of a novel stereo vision navigation system for mobile robots [C] // International Conference on Robotics and Biomimetics, 2005: 611-614.
- [34] Nayar S, Peri V. Folded catadioptric cameras[C] // IEEE Conference on Computer vision and Pattern Recognition, 1999: 217-225.
- [35] Jang G, Kim S, Kweon I. Single camera catadioptric stereo system [C] // Proceedings of Workshop on Omnidirectional Vision Camera Networks & Nonclassical Cameras, 2005.
- [36] Kim J, Yoon K J, Kim J S, *et al.* Visual SLAM by single-camera catadioptric stereo [C] // SICE-ICASE International Joint Conference, 2006: 2005-2009.
- [37] Shi J, Tomasi C. Good features to track[C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1994: 593-600.
- [38] Lucchese L, Mitra S K Using saddle points for subpixel feature detection in camera calibration targets[C] // Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, 2002: 191-195.
- [39] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [40] Zhou F, Cui Y, Wang Y, *et al.* Accurate and robust

- estimation of camera parameters using RANSAC[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(3): 197-212.
- [41] Basu A, Licardie S. Alternative models for fish-eye lenses [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1995, 16(4): 433-441.
- [42] Devernay F, Faugeras O. Straight lines have to be straight[J]. *Machine Vision and Applications*, 2001, 13(1): 14-24.
- [43] Fitzgibbon A. Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2000: 125-132.
- [44] Claus D. A Rational function lens distortion model for general cameras [C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005: 213-219.
- [45] Ricolfe C, Sanchez A. Lens distortion models evaluation[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(30): 5914-5928.
- [46] Zhou F, Cui Y, Liu L, *et al.* Distortion correction using a single image based on projective invariability and separate model[J]. *Optik*, 2013, 124(17): 3125-3130.
- [47] Zhou F, Cui Y, Peng B, *et al.* A novel optimization method of camera parameters used for vision measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(6): 1840-1849.
- [48] Cui Y, Zhou F, Wang Y, *et al.* Precise calibration of binocular vision system used for vision measurement [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9134-9149.
- [49] Zhang G J. *Vision Measurement [M]*. Beijing: Science Press, 2008.
张广军. *视觉测量[M]*. 北京: 科学出版社, 2008.
- [50] Zhou F, Chen X, Tan H, *et al.* Optical-path-difference analysis and compensation for asymmetric binocular catadioptric vision measurement [J]. *Measurement*, 2017, 109: 233-241.
- [51] Zhang J. A research of real sence 3D face reconstruction and measure system based on Muti-view stereo vision [D]. Chengdu: University of Science and Technology of China, 2016.
张俊. 基于多目立体视觉的真实人脸重建和测量系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [52] Feng W F. Mobile robot local path planning based on stereo vision [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
冯伟峰. 基于立体视觉的移动机器人局部路径规划[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [53] Chen L G, Zhu J F, Liu D D, *et al.* The design of flying vision system based on rotating reflection mirror[J]. *Optical Technique*, 2010, 36(5): 677-681.
陈立国, 朱吉锋, 刘殿冬, 等. 基于旋转式反射镜的飞行视觉系统设计[J]. *光学技术*, 2010, 36(5): 677-681.
- [54] Wang M L, Lin H Y. Object recognition from omnidirectional visual sensing for mobile robot applications[C]. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2009: 1941-1946.
- [55] Scaramuzza D. Omnidirectional vision: from calibration to robot motion estimation [D]. Zurich: ETH Zurich of Switzerland, 2008.
- [56] Scaramuzza D, Fraundorfer F, Pollefeys M. Closing the loop in appearance guided omnidirectional visual odometry by using vocabulary trees[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(6): 820-827.
- [57] Feng M Q, Fukuda Y, Feng D, *et al.* Non target vision sensor for remote measurement of bridge dynamic response[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20(12): 04015023.
- [58] Feng D, Feng M Q. Model updating of railway bridge using in situ dynamic displacement measurement under trainloads[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20(12): 04015019.