

单摄像机全向立体视觉传感器的结构设计

宋 丫 柴兴华 周富强

北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191

摘要 传统宽视场三维测量常采用多传感器构建的测量系统实现,传感器的同步和多传感器测量坐标系的统一两大难点导致测量精度与测量速度难以兼容。为了实现更宽视场范围内目标物的实时三维测量,设计了 1 种由单摄像机和 2 个四棱锥反射镜构成的全向立体视觉传感器。2 个四棱锥反射镜对称摆放,顶部相对,下四棱锥顶端安装高分辨率工业摄像机。四棱锥反射镜成像形成 4 对虚拟摄像机,等效于传统双目视觉传感器的 1 对摄像机同时采集同名特征点,从而由 4 对虚拟摄像机实现水平 4 个方向的同步测量。解决了传统双目视觉传感器体积大、视场狭小、图像采集不同步等问题,且有效保证了图像的透视投影不变性,避免了曲面镜成像产生的图像畸变,减小了后续工作难度。

关键词 机器视觉; 宽视场; 折反射立体视觉; 单摄像机; 传感器

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0615002

Structure Design of Single Camera Omnidirectional Stereo Vision Sensor

Song Ya Chai Xinghua Zhou Fuqiang

*Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology of Ministry of Education,
Beihang University, Beijing 100191, China*

Abstract Conventional wide-field three-dimensional (3D) measurement is usually implemented by measuring system consisting of multiple sensors. Difficulties, including sensor synchronization and unified measuring coordinate system of multiple sensors, lead to the incompatibility between high accuracy and high speed. An omnidirectional stereo vision sensor consisting of a single camera and two rectangular pyramid mirrors is designed to realize real-time 3D measurement of objects in wider field. The rectangular pyramid mirrors are symmetrically placed, with their top opposite to each other, and a high resolution industrial camera is set at the head of the under rectangular pyramid. The rectangular pyramid mirrors are reflecting and imaging as four pairs of virtual cameras. It is equivalent to the traditional binocular vision sensor in which the counterpart points are obtained by two cameras. Thus synchronization measurement in horizontal four direction is realized by four pairs of virtual cameras. Some disadvantages of traditional binocular vision sensor are overcome, such as big size, narrow field of view, asynchronous image collection etc. Moreover, constant perspective projection of images is ensured and distortion in images reflected by curved mirror is avoided, which makes the later work much easier.

Key words machine vision; wide field of view; catadioptric stereo vision; single camera; sensor

OCIS codes 150.0155; 150.6910; 330.1400

1 引 言

宽视场(FOV)范围内的三维测量具有广泛的应用需求,如大型管道的内表面检测,机器导引及导航等,且更宽范围的三维场景信息能够进一步提高机器的避障能力和对环境的适应能力。实时现场采集目标对象

收稿日期: 2016-01-25; **收到修改稿日期:** 2016-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(61372177)

作者简介: 宋 丫(1993-),女,硕士研究生,主要从事计算机视觉和图像识别方面的研究。

E-mail: songya@aspe.buaa.edu.cn

导师简介: 周富强(1972-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事计算机视觉、图像处理与识别、激光及光电测试技术方面的研究。E-mail: zfq@buaa.edu.cn

更宽范围内的三维数据信息,是现代先进制造业加工质量的保证和在线生产作业安全的保障,已广泛应用于科学研究、工业生产、航空航天探测等诸多领域。

双目立体视觉技术因其非接触测量、自动化程度高、系统柔性好等优点成为目前工程应用中最有发展前途的三维数据采集方法之一。然而传统的双目立体视觉技术并不能够满足宽视场三维信息获取的需求,因此在工程应用中,往往采用多传感器结构^[1]或单传感器结合移动机械结构^[2]的三维测量模式对狭窄的视场范围进行补偿。然而以上测量模式操作繁琐、效率低、节奏慢、双摄像机图像采集同步困难,因此无法适用于对实时性要求较高的场合,尤其是高精度的动态测量。

现有的宽视场摄像机的实现大致可分为三类:1)采用焦距极短且视角接近 180° 的鱼眼镜头^[3],2)由单个旋转摄像机或多个不同方向的摄像机拍摄多幅图像^[4],3)将单摄像机和反射镜组合等。其中鱼眼镜头等广角镜头成像需要对畸变图像进行算法校正^[5-6],单旋转摄像机或多摄像机拍摄需要设计精密的机械结构,而单摄像机结合多个折反射曲面镜构成宽视场立体视觉系统,以其安装灵活、虚拟摄像机完全相同、实时同步性良好、标定减半、传感器结构小型化^[7]等优势成为宽视场测量领域的重要组成部分。目前国内外研究者已设计出多种由单摄像机与曲面镜组成的立体视觉系统,如Southwell等^[8]设计的由单摄像机与双叶凸面镜组成的立体视觉系统,Mouaddib等^[9]提出由1个垂直投影摄像机和4个抛物面反射镜组成的立体视觉系统,Trubko等^[10]提出的基于多个非球面曲面镜的全景摄像机,还有近年来吴晓军等^[11]提出的圆柱物体 360° 全景成像装置。以上基于2次曲面镜的单摄像机立体视觉系统可以同时采集水平1周 360° 视场范围内的图像,但其缺点有图像存在固有的卷曲变形、目标特征不具备透视投影不变性、图像分辨率差异大、标定与特征匹配较为复杂,而这些缺点大大增加了后续测量工作的难度。Hua等^[12]设计的由六棱锥反射镜和6个摄像头构成的全景摄像机有效避免了图像卷曲变形,且可获得很高分辨率的全景图像,但其传感器结构复杂、数据量庞大、测量速度受限。

单摄像机全向立体视觉传感器是由1架高分辨率摄像机和四棱锥反射镜光学系统组成,其同步性良好、拍摄图像具备透视投影不变性、视场范围满足水平4个方向的同时测量,可用于水平各方向三维信息获取及管道内壁检测等领域。四棱锥反射镜的结构是传感器设计的关键部分,通过建立传感器结构模型,分析各参数与空间被测点之间的关系特性,研究相关参数对测量精度的影响,并基于此选择各参数的最佳取值范围,最终给出传感器设计的一般原则和方法步骤。

2 测量原理

单摄像机全向立体视觉传感器测量系统主要由计算机、图像采集卡、摄像机和四棱锥反射镜光学系统组成,模块示意如图1所示。四棱锥反射镜光学系统为两个上下正对、共轴摆放的四棱锥反射镜,上四棱锥消去顶端,加盖1块矩形平面镜,下四棱锥中空无顶,中心处安置摄像机且光轴与上下平面垂直,其成像原理如图2所示。中心摄像机 O 经上棱镜斜面成像形成虚拟摄像机 A ,经上棱镜平面成像形成虚拟摄像机 B , B 再经下棱镜二次成像形成虚拟摄像机 C ,从而拍摄1次即可得到1对具有视差的图像,相当于虚拟摄像机 A 、 C 从不同方向采集图像。与传统双目视觉原理类似,利用空间点在1对虚拟摄像机像平面上的成像坐标可以求出空间点的三维坐标,实现双目视觉测量的功能。由于四棱锥反射镜光学系统在水平4个方向上完全对称,可构成四对虚拟摄像机,从而实现水平各方向上的双目测量。

四棱锥反射镜光学系统成像较为复杂,上下棱镜尺寸、斜面倾角、相对距离以及摄像机安装位置等直接影响着传感器的视场范围、工作距离、测量精度、体积大小等关键指标。上下棱镜尺寸及斜面倾角与公共视场的范围、形状以及测量距离等密切相关,不恰当的参数设置可能会导致视场不足或无公共视场;上下棱镜的相对距离直接影响着基线距和传感器体积,不合适的距离将导致精度降低、传感器结构庞大冗余;摄像机安装位置影响着各成像区域的比例关系,合理摆放摄像机可使视场范围增大、测量精度提高。

由此可见,四棱锥反射镜光学系统的各个结构尺寸是传感器设计的关键。同时测量精度作为传感器设计的一项重要性能指标,对参数配置起着关键的影响作用。根据模型分析给出相关尺寸的计算方法,并结合参数对精度的影响情况,给出单摄像机全向立体视觉传感器的结构设计步骤。

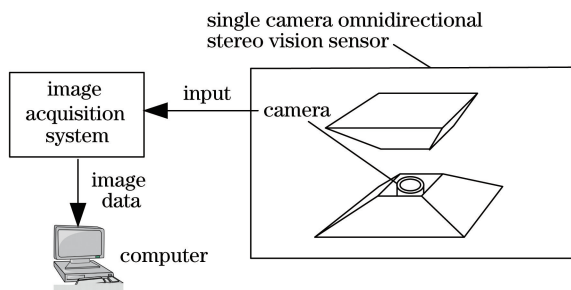


图 1 测量系统组成模块

Fig. 1 Component modules of measurement system

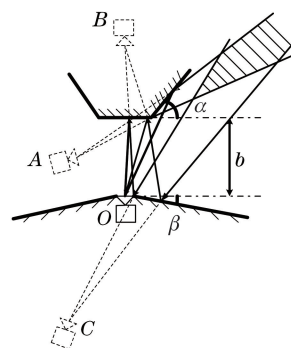


图 2 四棱锥反射镜光学系统成像原理

Fig. 2 Imaging principle of rectangular pyramid reflector optical system

3 结构模型及精度分析

3.1 结构模型

选定一个测量方向,在其截面图中分析结构模型,如图 3 所示。摄像机安装在原点 O 处,以光轴为 y 轴建立如图所示的直角坐标系。 γ 为两个虚拟摄像机 A 、 C 的光轴交角。摄像机焦距为 f ,视场角为 2θ ,设上下四棱锥斜面倾角分别为 α 、 β 。图中反射光线为完整成像的临界情况,由平面镜反射原理可得几何关系:

$$\gamma = 180^\circ - 2\alpha - 2\beta, \quad (1)$$

摄像机视场角为:

$$\theta = \arctan(\omega_{\text{CCD}}/2f), \quad (2)$$

式中 ω_{CCD} 为电荷耦合器件(CCD)的靶面宽度。

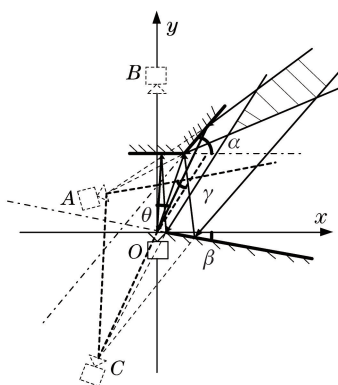


图 3 单摄像机全向立体视觉传感器结构模型

Fig. 3 Structure model of single camera omnidirectional stereo vision sensor

3.1.1 四棱锥尺寸

如图 4 所示,假设上四棱锥底面宽为 $2a$,下四棱锥底面宽为 $2c$ (镜头口径),上下棱锥间距为 b ,参数假设由实际测量需求初步估计,并可依据计算出的传感器尺寸、视场范围、基线距等作适当调整。上四棱锥斜面临界尺寸由摄像机视场角及预设参数决定,通过坐标运算可得上四棱锥斜面的最小尺寸 w_1 为:

$$w_1 = \sqrt{\left(\frac{b - a \tan \alpha}{\cot \theta - \tan \alpha} - a\right)^2 + \left(\frac{b \cot \theta - a \tan \alpha \cdot \cot \theta}{\cot \theta - \tan \alpha} - b\right)^2}. \quad (3)$$

图 5 为下四棱锥斜面计算图示,通过正弦定理等三角形解析及坐标运算可求得下棱锥斜面的最小尺寸 w_2 为:

$$w_2 = \frac{2a \sin \angle \theta_1 - c \sin \angle \theta_1}{\sin \angle \theta_2}, \quad (4)$$

式中

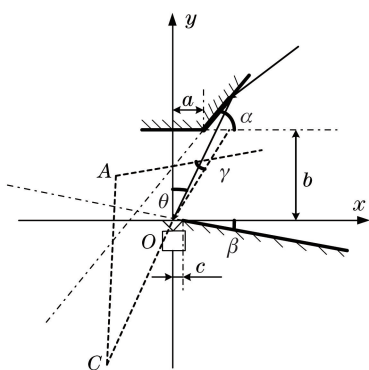


图 4 上四棱锥斜面尺寸计算图示

Fig. 4 Calculation for cant of above rectangular pyramid

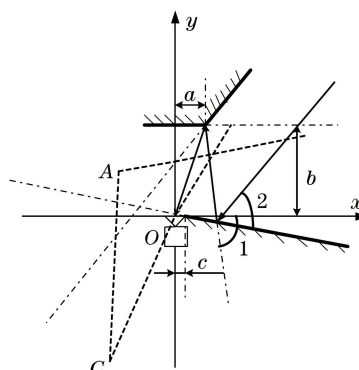


图 5 下四棱锥斜面尺寸计算图示

Fig. 5 Calculation for the cant of under rectangular pyramid

$$\angle\theta_1 = \arctan \frac{b}{a}, \angle\theta_2 = \arctan \frac{b}{a} - \beta, \quad (5)$$

由摄像机透视投影模型可求出上下棱锥斜面在 z 轴方向上的必要尺寸 h :

$$h = l \frac{h_{\text{CCD}}}{f}, \quad (6)$$

式中 h_{CCD} 为 CCD 靶面高度, l 为工作距离, 实际拍摄时需使目标物尽量充满整个画面。

3.1.2 视场范围

单摄像机全向立体视觉传感器的视场范围与 γ 、 θ 及摄像机摆放有关^[13]。在虚拟摄像机光轴夹角 γ 不变的情况下, 摄像机视场角 θ 越大, 视场的宽度范围 w 越大, 如图 6 所示。由图 7 可知, 当摄像机选定, 视场角 θ 不变时, 增大虚拟摄像机的光轴夹角 γ , 视场的宽度范围 w 也随之增大。由结构模型可知, 单摄像机全向立体视觉传感器的两个虚拟摄像机光程并不相等, 导致摄像机摆放不完全对称。如图 8 所示, 摄像机摆放越对称, 视场的宽度越大。

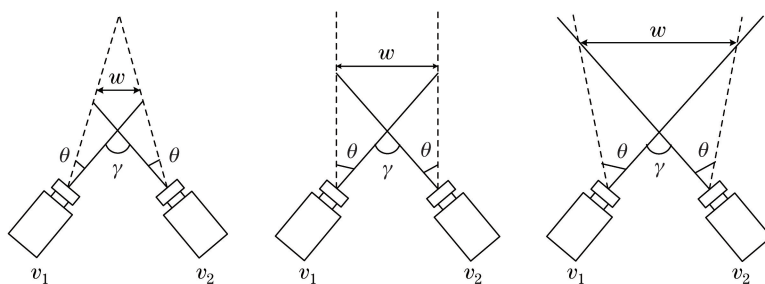


图 6 视场范围与摄像机视场角的关系

Fig. 6 Relationship between field of view and field angle of camera

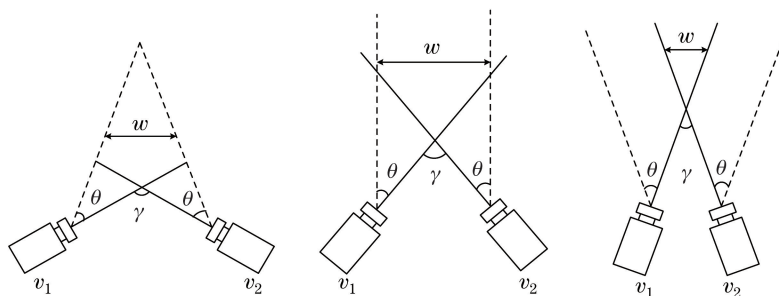


图 7 视场范围与虚拟摄像机光轴夹角的关系

Fig. 7 Relationship between field of view and included angle of virtual camera axis

至此, 竖直方向上的视场范围及工作距离可在图 3 中通过坐标运算求得, 反之, 根据已有的视场要求亦可推算出适合的参数范围。下面就传感器在水平方向上的成像范围作简要说明, 图 9 所示为四棱锥成像俯

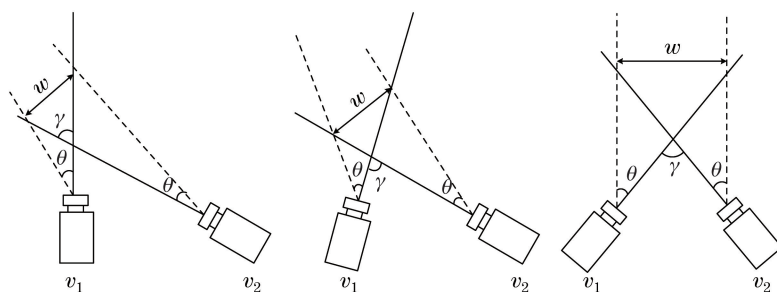


图 8 视场范围与虚拟摄像机相对摆放角度的关系

Fig. 8 Relationship between field of view and relative position of virtual camera

视图,阴影区域即为有效成像范围。可以看出四棱锥反射镜涉及水平各个方向的视场区域,与引言中提到的曲面镜成像相比,四棱锥反射成像并不能无缝覆盖 360° 的视场范围,但由于在实际应用中各方向上的有效信息主要集中在图像中央附近,且可通过轴向旋转实现视场区域的无缝拼接,故传感器可以满足水平 1 周的三维测量。另一方面,传感器与基于曲面镜反射的视觉测量系统相比具有零畸变成像、透视投影不变等明显优势,有效降低了算法复杂度,提高了测量效率,故基于四棱锥反射的单摄像机全向立体视觉传感器具有相当的应用价值。

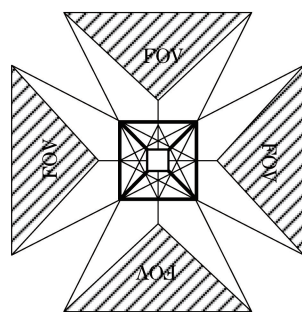


图 9 水平方向视场范围

Fig. 9 Field of view in horizontal direction

3.2 精度分析

为了分析单摄像机全向立体视觉传感器的结构参数对测量精度的影响,建立如图 10 所示的精度分析模型^[14]。 C_1 、 C_2 为 2 架虚拟摄像机,基线距为 K ,建立坐标系,其中 O_1 为摄像机 C_1 的光轴,其与 X 轴的夹角为 ϕ_1 , O_2 为摄像机 C_2 的光轴,与 X 轴的夹角为 ϕ_2 。设空间任一点 $P(x, y, z)$ 在 C_1 像面上的像点 P_1 坐标为 (u_1, v_1) ,在 C_2 像面上的像点 P_2 坐标为 (u_2, v_2) 。两台虚拟摄像机的有效焦距为 f , P 点对 C_1 的透视中心的水平张角为 ω_1 , P 点对 C_2 的透视中心的水平张角为 ω_2 。

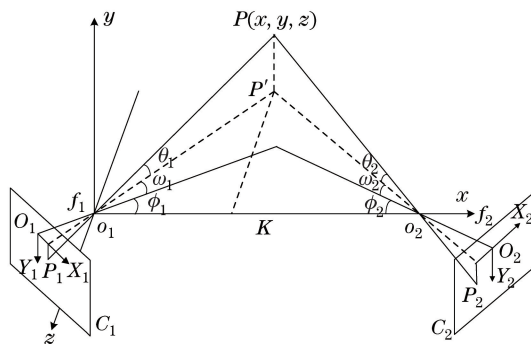


图 10 单摄像机全向立体视觉传感器精度分析模型

Fig. 10 Accuracy analysis model of single camera omnidirectional stereo vision sensor

已知当基线距 K 、焦距 f 和坐标 z 一定时,传感器精度在 $\omega = 0$ 时最低,即位于摄像机光轴上点的测量精度最低^[15],通过研究两摄像机光轴交点处的精度来分析结构参数对测量精度的影响。

首先求出 x, y, z 坐标对 u_1, u_2, v_1, v_2 的偏导, 再设两台摄像机 u 方向提取精度为 du_1, du_2, v 方向提取精度为 dv_1, dv_2 , 由此可得:

P 点 x 向精度为:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial u_1} du_1\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial u_2} du_2\right)^2}, \quad (7)$$

P 点 y 向精度为:

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial u_1} du_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial u_2} du_2\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v_1} dv_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v_2} dv_2\right)^2}, \quad (8)$$

P 点 z 向精度为:

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial u_1} du_1\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial u_2} du_2\right)^2}, \quad (9)$$

P 点的总体测量精度为:

$$\Delta_{\text{total}} = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}, \quad (10)$$

由精度表达式可知影响精度的可变结构参数仅为夹角 ϕ_1 和 ϕ_2 , 且与测量精度呈非线性关系。将 $\phi_1 + \phi_2$ 作为一个整体对(10)式进行参数分离, 可得总精度随 $\phi_1 + \phi_2$ 的变化曲线如图 11 所示, 当 $\phi_1 + \phi_2$ 接近 $\pi/2$ 时精确度最高, 即光轴夹角 γ 越接近 $\pi/2$ 精确度越高。结合(1)式可得, 传感器获得较高测量精度的条件为:

$$\alpha + \beta \approx \pi/4. \quad (11)$$

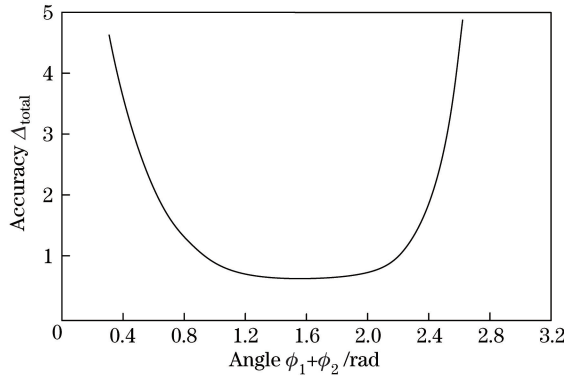


图 11 $\phi_1 + \phi_2$ 对总精度的影响

Fig. 11 Effect of $\phi_1 + \phi_2$ on total accuracy

4 结构设计

上述结构模型与尺寸计算为传感器设计提供了理论依据, 现从实际测量需求出发, 阐述具体设计步骤如下:

1) 根据需求选择镜头, 计算焦距 f 及视场角 θ 。若已知被测物体宽度为 w , 物体两端到光轴交点的距离为 l , 则光轴交角为:

$$\gamma = 2\arcsin \frac{w}{2l}, \quad (12)$$

根据实际需求及测量范围确定 γ 和 l 的值, 根据图 12 的透视投影关系选取镜头焦距:

$$f = \frac{w_{\text{CCD}} \times l}{2w}, \quad (13)$$

此时相应的视场角为:

$$\theta = \arctan(w_{\text{CCD}}/2f). \quad (14)$$

2) 由(1)式、(11)式以及测量需求设定参数 α, β , 并根据预期的传感器尺寸假设参数 a, b, c 。

3) 由(3)、(4)、(6)式计算四棱锥反射镜在各方向上的尺寸, 其中各参数还可根据计算出的相应尺寸作

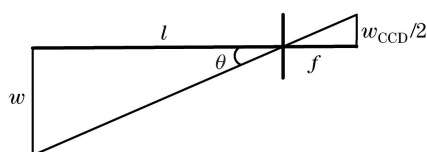


图 12 透视投影

Fig. 12 Perspective projection

适当调整。

根据测量精度、工作距离以及视场范围等要求,最终设计出的单摄像机全向立体视觉传感器如图 13 所示,其中参数取值为: $\alpha=16^\circ$ 、 $\beta=32^\circ$ 、 $a=23\text{ mm}$ 、 $c=20\text{ mm}$ 、 $b=128\text{ mm}$ 。为了满足视场范围内不同距离的测量需求,采用高精度可变焦摄像机。外框架由可调钢管及硬塑料托板构成,结构灵活、高度可调、适用于不同的测量条件。下托板设有摄像机安装槽,槽的侧面采用镂空结构,方便摄像机调焦。框架底端设有数据线孔及电源插口,满足各类摄像机的使用及图像数据传输。

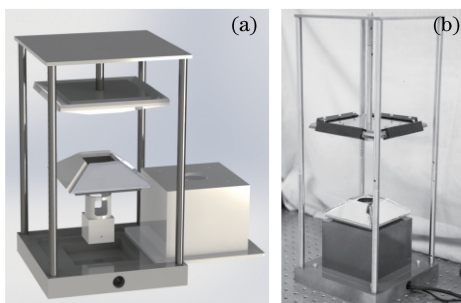


图 13 (a)传感器设计图;(b)传感器实物图

Fig. 13 (a) Design sketch of sensor; (b) picture of sensor

5 实验结果

实验采用 IMPERX 摄像机 (IGV-B1610), CCD 靶面尺寸 $1/1.8''$ ($1\text{ inch}=2.54\text{ cm}$), 最高像素为 $1628\text{ pixel}\times 1236\text{ pixel}$, 镜头焦距 $1.5\sim 16\text{ mm}$ 。针对中型管道内表面检测, 选用 $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 靶标, 并将其置于视场中心, 调节焦距使图像清晰, 并使焦距在后续标定测量过程中不再改变。另外, 视场区域的形状限制了靶标的摆放, 过大的靶标难以完整成像, 因此实验操作需要尽可能精细, 轻微调整靶标姿态, 以保证图像清晰完整。图 14 为 2 个方向上的拍摄结果, 图像分辨率较高, 靶标成像完整清晰, 可以用于双目立体视觉的标定与测量, 其他方向上的双目图像与此类似。

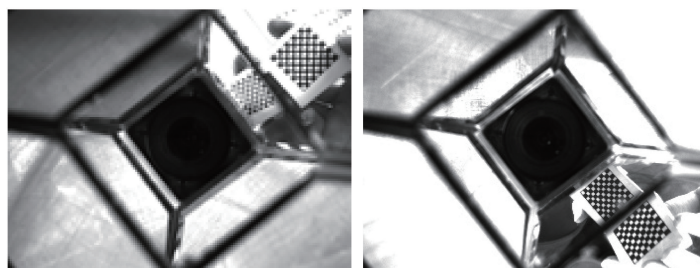


图 14 单摄像机全向立体视觉传感器拍摄的靶标图像

Fig. 14 Target images captured by single camera omnidirectional stereo vision sensor

由传感器采集到的图像不存在任何卷曲畸变, 无需进行校正, 利用 Zhang^[16] 的标定方法对 4 个方向上的 8 幅靶标图像进行标定, 结果如表 1 所示, 为了划分视场, 分别用 E 、 S 、 W 、 N 表示 4 个方向上的视场区域。其中 f_x 、 f_y 表示 x 、 y 方向上的摄像机焦距, (u_0, v_0) 为主点坐标, k_1 、 k_2 为畸变参数, 由于两个虚拟摄像机是由同一真实摄像机镜像产生, 故两者的内参在理论上完全相同, 表 1 展示了单个虚拟摄像机的内参。 R 、 T 是摄像机外参数, 分别代表两个虚拟摄像机间的旋转矩阵和平移向量。代入各参数值, 对提取到的棋

盘格角点进行重投影并计算其误差 E_{RP} , 结果如表 1 所示, 4 个方向上的重投误差平均在 0.12 pixel 左右, 基本可以满足双目立体视觉测量的需求。

表 1 4 对虚拟摄像机的标定结果
Table 1 Calibration results of four pairs of virtual cameras

Parameters	Area E	Area S	Area W	Area N
(f_x, f_y) / pixel	(2115.146, 2117.873)	(2086.119, 2104.301)	(2198.967, 2204.108)	(2106.278, 2118.739)
(u_0, v_0) / pixel	(812.879, 620.451)	(817.492, 622.937)	(808.257, 611.673)	(819.732, 621.365)
k_1, k_2	0.0089, 0.0572	0.0093, 0.0531	0.0096, 0.0504	0.0083, 0.0496
\mathbf{R}	$\begin{bmatrix} 0.996 & 0.0879 & 0.0044 \\ 0.0879 & -0.996 & 0.0015 \\ 0.0045 & -0.0011 & -0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.986 & 0.1658 & -0.0044 \\ 0.1669 & -0.994 & -0.0158 \\ -0.0043 & -0.0107 & -0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.997 & 0.0733 & 0.0015 \\ 0.0728 & -0.997 & 0.0003 \\ 0.0016 & 0.0004 & -0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.994 & -0.321 & -0.0027 \\ -0.3287 & 0.944 & -0.0026 \\ -0.0019 & 0.0034 & 0.999 \end{bmatrix}$
\mathbf{T}	(3.394, 19.484, 0.053)	(-5.57, 15.041, 0.047)	(-6.614, 19.719, -0.083)	(4.713, 16.285, -0.056)
E_{RP} / pixel	0.1157	0.1205	0.1224	0.1196

针对不同应用场合、不同测量条件, 另外给出若干优化设计思路以供参考:

1) 测量较大目标需要较宽视场范围时, 尽可能选用小口径的镜头, 减小中央镜头成像区域, 增大视场角, 同时适当调整各参数确保成像完整。

2) 工作距离较大时, 采用大范围的变焦镜头, 适当调整四棱锥侧面夹角及上下间距, 使得虚拟摄像机视场重叠区域距离传感器远近恰当。

3) 针对圆形管道内壁 1 周的检测, 可增加轴向旋转机制, 只需旋转视场间隙对应的小角度即可实现无缝拼接。另外, 优化时可以改进加工工艺, 采用整块金属抛光反射面, 从而消除平面镜粘合处的成像误差。

6 结 论

设计了一种全向立体视觉传感器, 由单摄像机和 2 个四棱锥反射镜组成, 其中 2 个四棱锥反射镜上下摆放, 顶点相对, 下四棱锥中间安装高分辨率摄像机, 从而形成水平方向上的 4 对虚拟双目。该结构可以实现水平 1 周 4 个方向的同步实时三维测量, 与基于曲面镜的宽视场成像相比, 传感器所采集到的图像不含任何卷曲畸变, 无需复杂的校正算法, 有效提高了测量效率, 结构简单, 可进一步实现小型化测量。

给出了详细的设计原理与流程, 结合精度分析讨论了参数的优化方法, 并搭建实验平台完成了摄像机标定及结果评估, 在实际应用中具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Fan Y C, Chiou J C, Jiang Y H. Hole-filling based memory controller of disparity modification system for multiview three-dimensional video[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(3): 679-682.
- 2 Newcombe R A, Davison A J. Live dense reconstruction with a single moving camera[C]. IEEE Computer Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010: 1498-1505.
- 3 Drulea M, Szakats I, Vatavu A, et al.. Omnidirectional stereo vision using fisheye lenses[C]. IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, 2014: 251-258.
- 4 Straw A D, Branson K, Neumann T R, et al.. Multi-camera real-time three-dimensional tracking of multiple flying animals[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2011, 8(56): 395-409.
- 5 Zhang Baolong, Li Dan, Zhang Shaojing, et al.. Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1222001.
张宝龙, 李 丹, 张少敬, 等. 非球面鱼镜头设计及畸变校正算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222001.
- 6 Zhang Min, Jin Longxu, Li Guoning, et al.. Camera distortion calibration method based on straight line characteristics [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0615001.
张 敏, 金龙旭, 李国宁, 等. 基于直线特征的摄像机镜头畸变标定方法[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0615001.
- 7 Gluckman J, Nayar S K. Catadioptric stereo using planar mirrors[J]. International Journal of Computer Vision, 2001, 44 (1): 65-79.

- 8 Southwell D, Basu A, Fiala M, *et al.*. Panoramic stereo[C]. Proc of ICPR, 1996: 378-382.
- 9 Mouaddib E M, Dequen G, Devendeville L. A new omnidirectional stereovision sensor[C]. IEEE International Conference on Computer Vision, 2007: 1-6.
- 10 Trubko S, Peri V. Three-mirror panoramic camera: US, US8451318[P]. 2013-05-28.
- 11 Wu Xiaohun, Guo Yaxue. An 360° panoramic imaging design method for cylindrical object[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0923002.
吴晓军, 郭亚雪. 一种圆柱物体 360°全景成像装置设计方法[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0923002.
- 12 Hua H, Ahuja N. A high-resolution panoramic camera[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001: 960.
- 13 Yang Cheng, Zhou Fuqiang. Structure design of binocular vision sensor using mono-camera with mirrors[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 7-12.
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.
- 14 Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong, *et al.*. Calibrating binocular vision sensor with one-dimensional target of unknown motion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(6): 92-96.
周富强, 张广军, 魏振忠, 等. 基于未知运动一维靶标的双目视觉传感器标定[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 92-96.
- 15 Wang X Y, Xiao B P, Pan F. Distance measuring modeling and error analysis of dual-CCD vision system simulating human eyes and neck[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16(4): 396-399.
- 16 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.