

基于平面镜成像的单摄像机立体视觉传感器研究

冯晓锋 潘迪夫

(中南大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要 在传统双目立体视觉传感器的基础上,对基于平面镜成像的单摄像机立体视觉传感器进行了研究。在电荷耦合器件(CCD)摄像机前放置一平面反射镜,通过对目标物体和其虚像进行拍摄,得到一幅具有视差的图像,该图像相当于摄像机和其在平面镜中的虚拟摄像机从不同角度对目标物体进行拍摄,具有双目立体视觉的功能。建立了单摄像机立体视觉传感器数学模型,分析了参数对单摄像机立体视觉传感器的视场范围和测量精度的影响,设计了传感器参数尺寸,进行了相关实验验证。实验结果表明,该测量方案方便有效,结构简单,调节方便,尤其适合近距离高精度测量。

关键词 机器视觉;单摄像机;平面镜;视觉传感器

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0915002

Study of Single Camera Stereo Vision Sensor Based on Plane Mirror Imaging

Feng Xiaofeng Pan Difu

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract A single camera stereo vision sensor based on plane mirror imaging is researched on the basis of traditional binocular stereo vision sensor. Placing a plane mirror in front of charge coupled device (CCD) camera, a picture with parallax image is obtained by shooting target object and its virtual image. This is equivalent to shot the target object from different angles by the camera and the virtual camera in plane mirror, so it has the function of binocular stereo vision. The mathematical model of single camera stereo vision sensor is established. The impact of the parameters to the field range and the measurement accuracy is analyzed. The parameters of the sensor are designed, and the corresponding experiment has been done. The experimental results show that the measuring method is convenient and effective. It also has the advantages of simple structure, convenient adjustment, and is especially suitable for short distance measurement with high precision.

Key words machine vision; single camera; plane mirror; vision sensor

OCIS codes 150.0155; 150.6044; 330.1400

1 引 言

视觉传感器以非接触性、测量精度高、响应速度快等特点被广泛地应用到在线测量、质量监控、装备制造、自动化控制等诸多领域。传统的双目视觉传感器是基于视差原理,利用两台交叉摆放的摄像机从不同角度观察同一被测物体,获取同一物体特征

点的图像坐标,来完成目标点的三维测量^[1]。但该方法存在一定的缺点:一方面,对于动态测量来说,由于两台摄像机的工作状态不可能完全同步从而降低了测量精度;另一方面,对于某些场合,由于对视觉传感器的体积及重量要求严格,两台摄像机组成的视觉传感器难以满足要求^[2]。

收稿日期: 2014-02-23; **收到修改稿日期**: 2014-05-12

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(CX2013B069)

作者简介: 冯晓锋(1980—),男,博士研究生,主要从事机器视觉和测控技术等方面的研究。E-mail: brucexf@163.com

导师简介: 潘迪夫(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事智能测控技术、轨道交通安全技术等方面的研究。

E-mail: difupan@csu.edu.cn (通信联系人)

国内外许多学者都是借助光学成像系统来开展单摄像机立体视觉传感器的研究。国内具有代表性的立体视觉传感器是由郝继贵等^[3]设计的,它由两套对称平面反射镜和单摄像机构成,通过平面镜镜像出两个完全一致的虚拟摄像机。由于采用两套对称平面反射镜,使得光学系统结构复杂。国外方面, Goshtasby 等^[4]采用两块平面镜和单摄像机组成双目视觉传感器,两块平面镜对称置于摄像机前,并用铰链连接,可绕中间轴旋转,但是对称的设计使得测量范围较小,应用不够灵活。Joshua 等^[5]改进了两块平面镜组成反射系统的配置方式,给出了两平面镜的位置关系矩阵和选用的标定方法。杨琤等^[6]在此基础上建立了镜像式单摄像机双目视觉传感器的结构模型,提出了一种结构优化设计方法。郑元杰等^[7]提出利用单个摄像机和一平面镜的合体实现双目成像系统的立体视觉功能,对实现成像的条件进行了分析,但未对系统的参数进行设计,也没有对系统的精度进行分析。

与其他单摄像机立体视觉传感器相比,本文研究的基于平面镜成像的单摄像机立体视觉传感器只需要一块平面镜的配合即可实现立体视觉测量,结构更加小巧、灵活。

2 单摄像机视觉传感器测量原理

和双目视觉传感器一样,单摄像机立体视觉传感器也是通过空间点在摄像机像平面上的透视成像点坐标来求取其三维坐标进行测量的。该传感器主要由一台电荷耦器件(CCD)摄像机和一块平面反射镜组成,其光路原理如图 1 所示。

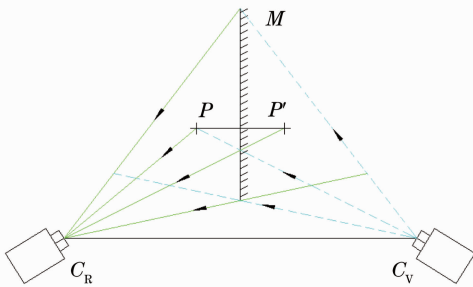


图 1 单摄像机立体视觉传感器示意图
Fig. 1 Schematic diagram of single camera stereo vision sensor

固定 CCD 摄像机,在 CCD 摄像机前放置一面平面镜,对于平面镜前的一待测物体 P ,其在镜中的虚像为 P' ,调整摄像机的摆放角度以及平面镜与 CCD 摄像机的距离,使物体 P 和平面镜中的虚像

P' 同时在摄像机中成像,在一张图像中获得两个不同视觉的目标图像,由于存在一定的虚拟立体视差,故可以实现立体测量^[8]。本实验布置实际上相当于真实摄像机和镜面中的虚拟摄像机从两个不同位置对目标物体 P 进行拍摄获取两幅图像,因此具有双目立体视觉的功能^[9]。

3 单摄像机视觉传感器成像分析

根据上述原理,对单摄像机立体视觉传感器结构进行分析,传感器结构图如图 2 所示。以真实摄像机和虚拟摄像机的光心连线为 X 轴,镜子所在方向为 Z 轴,两轴的交点 O 为坐标原点建立坐标系,光轴与 X 轴的夹角为 θ ,摄像机的视场角为 2α ,光心 A 到原点 O 的距离为 l ,平面镜边缘入射光线 BA 与 X 轴夹角为 β 。

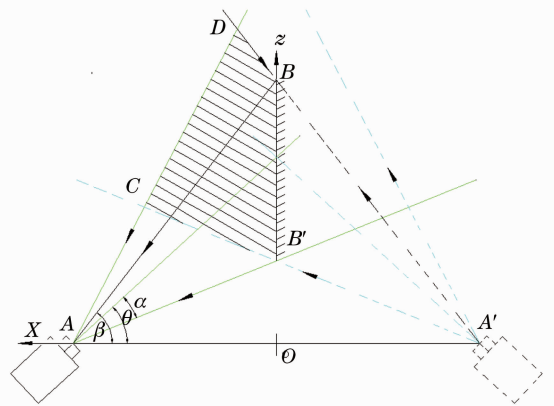


图 2 单摄像机立体视觉传感器结构图
Fig. 2 Structure diagram of single camera stereo vision sensor

3.1 视场分析

对于单摄像机立体视觉传感器,它的有效视场是指能够同时对目标及其虚像成像的区域(图中打剖面线部分),位于此区域之外的部分称为“盲区”。很显然,由于平面镜的镜像作用,该传感器的视场较传统双目立体视觉传感器的视场明显减小,只有其视场的一半;另外,对于一般的不透明三维物体,由于物体本身的遮挡作用,物体的有些表面及其在镜中的虚像不能同时出现在有效视场中,这正是这种传感器的劣势所在。传感器设计时应调整好物体、平面镜和摄像机三者的位置关系,使物体上的所有被测点都位于有效视场内。

单摄像机立体视觉传感器的视场范围受到诸多条件的限制:1)要在摄像机的视场范围之内,这是由摄像机的视场角来决定的;2)视场还要在虚拟摄像

机的视场范围内;3)由于平面镜的反射作用,将导致视场只能在摄像机和平面镜的一侧;4)由平面镜成像的特点,视场必须不能大于平面镜最上端点 B 点反射到摄像机的入射光线,故成像范围为 $BB'CD$ 。

DC 所在的直线方程为

$$z = (-x + l)\tan(\theta + \alpha), \quad (1)$$

DB 所在的直线方程为

$$z = (x + l)\tan \beta, \quad (2)$$

$B'C$ 所在的直线方程为

$$z = (x + l)\tan(\theta - \alpha), \quad (3)$$

BB' 所在的直线方程为

$$x = 0, \quad (4)$$

对于目标物点 $(x' y' z')$ 和其虚像要同时落入视场范围内,需要满足:

$$\begin{cases} (-x' + l)\tan(\theta + \alpha) < (-x + l)\tan(\theta + \alpha) \\ (x' + l)\tan \beta < (x + l)\tan \beta \\ (x' + l)\tan(\theta - \alpha) > (x + l)\tan(\theta - \alpha) \\ x' < 0 \end{cases} \quad (5)$$

根据几何关系,可得 x 方向最大视场为

$$H_x = l \cdot \frac{\tan(\theta + \alpha) - \tan(\theta - \alpha)}{\tan(\theta + \alpha) + \tan(\theta - \alpha)}, \quad (6)$$

Z 方向视场为

$$H_z = \begin{cases} l \cdot [\tan(\theta + \alpha) - \tan(\theta - \alpha)] - x \cdot [\tan(\theta + \alpha) + \tan(\theta - \alpha)], & \left[l \cdot \frac{\tan(\theta + \alpha) - \tan \beta}{\tan(\theta + \alpha) + \tan \beta} \leq x < l \cdot \frac{\tan(\theta + \alpha) - \tan(\theta - \alpha)}{\tan(\theta + \alpha) + \tan(\theta - \alpha)} \right] \\ (x + l)[\tan \beta - \tan(\theta - \alpha)], & \left[0 \leq x < l \cdot \frac{\tan(\theta + \alpha) - \tan \beta}{\tan(\theta + \alpha) + \tan \beta} \right] \end{cases} \quad (7)$$

要使目标物体能落在成像范围内,必须满足 $\beta - \alpha < \theta < \beta + \alpha$,因为此时真实摄像机和虚拟摄像机视场存在交集,并在平面镜的成像范围之内,目标物体及其虚像能同时出现在真实摄像机的视场内,当 $\beta + \alpha \leq \theta < \pi/2 + \alpha$ 或 $0 < \theta \leq \beta - \alpha$ 时,要么真实摄像机和虚拟摄像机视场无交集,要么平面镜没有有效利用,此时无意义。

3.2 精度分析

为分析单摄像机立体视觉传感器的结构参数对测量精度的影响,建立如图 3 所示的精度分析模型。为简化分析,设摄像机水平放置,视觉测量系统的坐标原点 A 为真实摄像机的投影中心。由平面镜的对称性可知,虚拟摄像机和真实摄像机的焦距都为

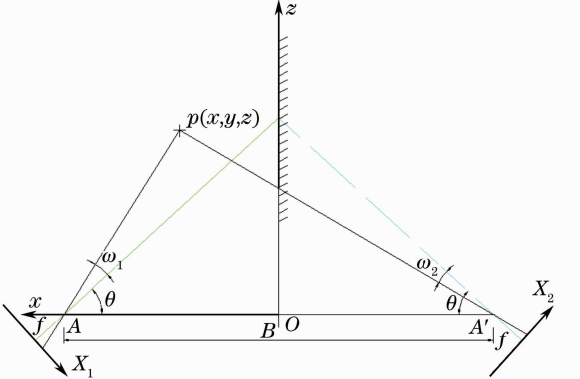


图 3 单摄像机立体视觉传感器精度分析模型

Fig. 3 Precision analysis model of single camera stereo vision sensor

f , 光轴与 x 轴的夹角都为 θ , ω_1 和 ω_2 为小于摄像机视场角的投影角。设空间成像区域内任一点 $p(x, y, z)$ 在像面上的像点坐标分别为 (X_1, Y_1) 和 (X_2, Y_2) 。

由双目视觉传感器精度分析知,当基线距 B 、焦距 f 和坐标 z 一定时,位于摄像机光轴上点的测量精度最低。在此通过研究两摄像机光轴的交点位置的测量精度来分析结构参数对测量精度的影响。

由几何关系得到 P 的三维坐标为

$$\begin{cases} x = z \frac{X_1 \sin \theta + f \cos \theta}{X_1 \cos \theta - f \sin \theta} + \frac{B}{2} \\ y = z \frac{Y_1}{f \sin \theta - X_1 \cos \theta} \\ z = \frac{B}{\frac{X_1 \sin \theta + f \cos \theta}{f \sin \theta - X_1 \cos \theta} + \frac{f \cos \theta - X_2 \sin \theta}{f \sin \theta + X_2 \cos \theta}} \end{cases}, \quad (8)$$

设摄像机 X 方向的提取精度为 δX_1 和 δX_2 , Y 方向的提取精度分别为 δY_1 和 δY_2 , 则 P 点的 x 方向的测量精度为

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial X_1} \delta X_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial X_2} \delta X_2 \right)^2}, \quad (9)$$

P 点的 y 方向的测量精度为

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial X_1} \delta X_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial X_2} \delta X_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Y_1} \delta Y_1 \right)^2}, \quad (10)$$

P 点的 z 方向的测量精度为

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial X_1} \delta X_1\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial X_2} \delta X_2\right)^2}, \quad (11)$$

P 点的总体测量精度为

$$\Delta_{xyz} = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}. \quad (12)$$

由(8)~(12)式可以看出,传感器的测量精度与物体到基线的距离 z 呈线性关系,距离越大,精度越低,距离越小,精度越高;与摄像机焦距成非线性关系,焦距越大,精度越高,焦距越小,精度越低。图 4 显示了光轴和基线的夹角 θ 对总体测量精度的影响。从图 4 中可以看出,当 $\theta \in (\pi/6 - \pi/3)$ 时,测量精度较高。

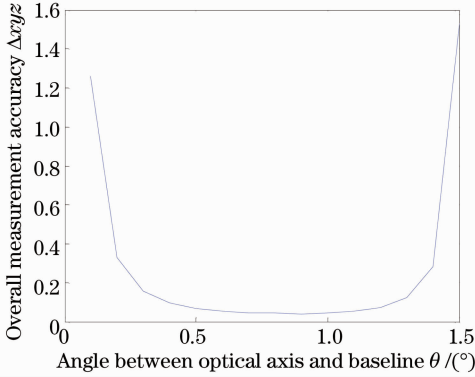


图 4 总体测量精度与光轴和基线的夹角 θ 的关系
Fig. 4 Relationship of the measurement accuracy and the angle between the optical axis and the baseline

4 结构参数尺寸设计

传感器参数尺寸的大小和目标物体的情况紧密相关,对于物体 $EFGH$,其在镜中的虚像为 $E'F'G'H'$,设 $EF = a, FH = b, F$ 到镜面距离为 d , E 点到 X 轴的距离为 s ,为了使能同时看到物体及其虚像,最小的摄像机的视场角必须将物体及虚像包括在内,如图 5 所示。

1) θ 和 β

根据物体的情况,选择镜头,确定焦距和视场角 2α ,由几何关系得到:

$$\theta + \alpha = \arctan\left(\frac{s}{l - a - d}\right), \quad (13)$$

$$\theta - \alpha = \arctan\left(\frac{s - b}{l + a + d}\right), \quad (14)$$

由上两式可得:

$$\theta = \frac{\arctan\left(\frac{s}{l - a - d}\right) + \arctan\left(\frac{s - b}{l + a + d}\right)}{2}, \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{\arctan\left(\frac{s}{l - a - d}\right) - \arctan\left(\frac{s - b}{l + a + d}\right)}{2}, \quad (16)$$

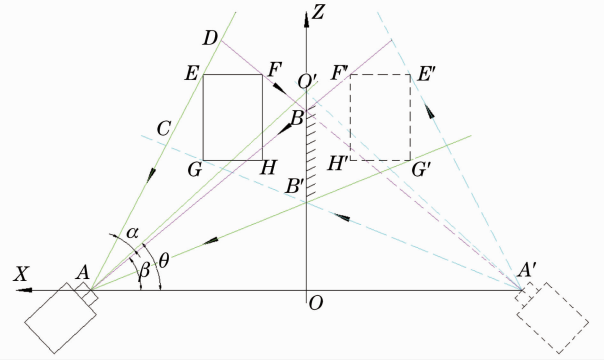


图 5 单摄像机立体视觉传感器参数设计图

Fig. 5 Parameter design of single camera stereo vision sensor

$$\beta = \arctan\left(\frac{s}{l + d}\right). \quad (17)$$

2) 基线距

由于 A 和 A' 关于镜面对称,故基线距 AA' 为:

$$B = 2l. \quad (18)$$

3) 反射镜尺寸

要使目标物体及其虚像能同时在摄像机里成像,不仅对摄像机相对于平面镜的摆放角度和摆放位置有一定的要求,同时对平面镜的长度也应有所要求。平面镜长度过短,将减小摄像机的成像视场;平面镜过长,由于超出了摄像机的视场范围,将增大系统的体积。

由几何关系,反射镜 z 方向最小尺寸如下:

$$BB' = l[\tan \beta - \tan(\theta - \alpha)], \quad (19)$$

反射镜 y 方向尺寸 h 如下:

$$h = \frac{2l}{\cos \theta} \tan \beta, \quad (20)$$

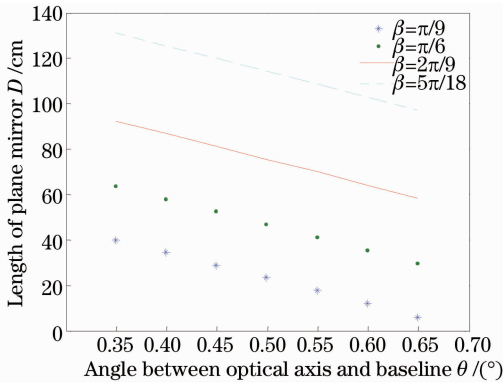
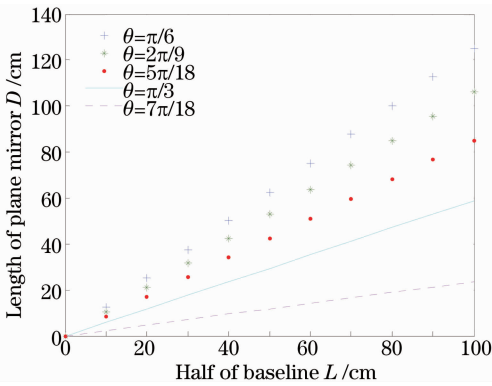
式中

$$\begin{cases} \theta - \alpha < \beta \leq \theta + \alpha \\ \theta - \alpha > 0, \quad \theta + \alpha < \pi/2 \end{cases} \quad (21)$$

反射镜的 z 方向长度与 4 个参数有关:光心到原点的距离 l 、平面镜边缘入射光线与 X 轴夹角 β 、光轴与 X 轴的夹角 θ 、摄像机的视场半角 α 。由于参数较多,同时分析比较复杂,故采取固定 2 个参数来分析反射镜长度随其余变量的变化情况(如图 6、7 所示),此时,图 6 中视场半角 $\alpha = \pi/9$,基线半距 $l = 110$,图 7 中视场半角 $\alpha = \pi/9, \beta = 55\pi/180$ 。

不难发现,在视场半角 α 和基线半距 l 不变时,反射镜的长度随光轴与基线的夹角 θ 的增大呈非线性减少,在视场半角 α 和镜边缘入射光线与 X 轴夹角 β 不变时,随基线半距 l 的增大而线性增加。

设计时根据目标物体本身的大小、距离镜面的

图6 平面反射镜长度与 θ 关系Fig. 6 Relationship between plane mirror length and θ 图7 平面反射镜长度与 l 关系Fig. 7 Relationship between plane mirror length and l

距离以及距离摄像机的距离合理选择 θ 、 β 和 l 。

5 实验及误差分析

实验装置由 NiKon D700 摄像机和 Nikon AF 35 mm F2D 镜头及一块平面反射镜组成,测量实验采用三维立体靶标(如图 8),根据测量物体的尺寸情况初选镜头焦距和视场角,确定出测量系统的参数如下:真实摄像机投影中心与原点 O 的距离为 33 cm,平面镜有效高度 26 cm,有效长度 25 cm(平

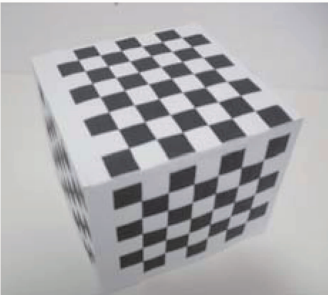


图8 三维立体靶标图片

Fig. 8 Three-dimensional target

面镜其余部分进行了有效遮挡)。由于真实像机的有效视场受到平面镜的分割作用,因而视场减小。视觉传感器所采集到的图像如图 9 所示,图像由左右两部分组成,右半部分为目标在平面镜中的虚像,左半部分为目标图像。



图9 实验拍摄图片

Fig. 9 Image obtained in the experiment

根据双目视觉原理可知,本实验所需标定的参数^[10]主要有摄像机的内部参数及外参数。内部参数包括: u 轴和 v 轴的归一化焦距 f/dx 、 f/dy ,光心坐标 u_0 和 v_0 ,一阶径向畸变系数 k ;外部参数包括:虚拟摄像机相对于真实摄像机的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矢量 \mathbf{T} 。实验中采用的是张正友标定法^[11-12]进行标定,由于获得的图像可看成真实摄像机和镜面中的虚拟摄像机从两个不同位置对目标物体拍摄得到的,两个摄像机内部参数完全一致,所以只需标定出真实摄像机的内参数,就可以得到虚拟摄像机的内参数,取靶标上一角点建立世界坐标系,分别标定出两摄像机相对于世界坐标系的转换矩阵,进而算出虚拟摄像机相对于真实摄像机的转换矩阵,这样就可以根据二维图像对应匹配点计算出空间点的三维坐标。经标定后的摄像机内部参数如表 1 所示。

表1 摄像机内部参数

Table 1 Intrinsic parameters of camera

Pixel focal length		Optical center	Radial distortion coefficient	
f/dx	f/dy	u_0	v_0	k
4097.90	4082.07	1391.68	1666.81	0.027

虚拟摄像机相对于真实摄像机的变换矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9606 & -0.2767 & 0.0259 \\ 0.2354 & 0.9974 & -0.8259 \\ -0.0242 & 0.7899 & 0.9832 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = [93.1243 \quad -53.4958 \quad 454.2221].$$

实验将传统双目成像系统也进行了标定,两摄像机分别和本实验系统中的真实摄像机及虚拟摄像机的相对位置大致一致,以便将测量结果进行对比。

靶标上方格边长为 12.0 mm,对于上表面来

说,以左下角为原点,以向右、向上为正方向;对于前表面来说,以左上角为原点,以向右、向下为正方向,方格的位置以行(row)和列(col)来表示。采用该视觉测量技术及传统双目立体视觉测量技术分别计算

上表面和前表面对应同色方格中心的距离,将计算得到的距离和实际距离以及采用传统双目立体视觉的方法得到的距离进行比较,结果如表 2 所示。

表 2 计算距离和实际距离及传统方法计算的距离对比

Table 2 Comparison between calculated distance and standard distance

Grid position	Top surface		row3	col1	row2	col2	row2	col2	row3	col3	row2	col2
	Front surface		row3	col1	row3	col1	row2	col2	row2	col2	row3	col3
Standard distance /mm			46.09		41.15		29.21		39.66		41.14	
Distance measured by the new method /mm			46.53		41.50		29.45		40.05		41.52	
Distance measured by traditional method /mm			46.52		40.79		29.44		40.03		41.53	
Error of the new method /%			0.95		0.86		0.82		0.98		0.92	
Error of traditional method /%			0.93		0.87		0.79		0.93		0.95	

从表 2 可以看出,采用提出的测量方案计算得到的距离和采用传统双目方法计算得到的距离相差不大,并且都接近实际距离,本方案的平均误差率为 0.90%,传统双目方案的误差率为 0.89%,实验证明了提出的采用单摄像机立体视觉传感器结构设计方案是合理的,取得了预期结果,但实际得到的测量精度和理论试验值还有一定差距,原因可能是由两方面引起:

1) 图像处理算法还不完善,角点提取存在一定的误差,摄像机固有噪声和环境噪声也是产生测量误差的一个重要因素;2) 在实验中将靶标打印出来贴在方形靶标上,粘贴面无法做到完全水平,从而造成自身的基准精度存在误差。

6 结 论

1) 介绍了基于平面镜镜像的单摄像机双目立体视觉传感器的测量原理,对整个传感器进行了结构及精度分析,建立了单摄像机视觉测量模型。

2) 镜像式单摄像机双目视觉传感器结构可以做的很小,适合于对视觉系统体积和重量要求严格、需要近距离高精度测量的场合。

3) 由于平面镜的镜像作用,因此采集图像的两个“摄像机”完全一致,避免了双目或多目视觉传感器中摄像机之间非严格同步造成的测量误差。

4) 采用“单摄像机”,对于物体特征点的测量,只需一次采集就可以获得物体特征点的两幅图像,提高了测量速度,减小了工作量及计算过程,利于在线测量。

参 考 文 献

1 Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Publisher, 2008.

- 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- 2 J Gluckman, S K Nayar. Catadioptric stereo using planar mirrors [J]. Int J Comput Vision, 2001, 44(1): 65-79.
- 3 Zhu Jigui, Li Yanjun, Ye Shenghua, *et al.*. Study on single camera simulating stereo vision measurement technology [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(7): 943-948.
- 郝继贵, 李艳军, 叶声华, 等. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究 [J]. 光学学报, 2005, 25(7): 943-948.
- 4 A Goshtasby, W A Gruver. Design of a single-lens stereo camera system [J]. Pattern Recogn, 1993, 26(6): 923-937.
- 5 J Gluckman, S K Nayar. Planar catadioptric stereo: geometry and calibration [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999, 1: 22-28.
- 6 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 净, 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.
- 7 Zheng Yuanjie, Yang Jie. Application of binocular vision system based on one camera in computer vision [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(4): 392-396.
- 郑元杰, 杨 杰. 基于单摄像头双目成像系统在计算机视觉中的应用研究 [J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 392-396.
- 8 Zhang Xuping, Wang Jiaqi, Zhang Yixin, *et al.*. Large-scale three-dimensional stereo vision geometric measurement system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315002.
- 张旭苹, 汪家其, 张益昕, 等. 大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现 [J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315002.
- 9 Wang Jianhua, Han Hongyan, Wang Chunping, *et al.*. Theoretic research on double-CCD stereoscopic measurement system [J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(4): 94-96.
- 王建华, 韩红艳, 王春平, 等. CCD 双目立体视觉测量系统的理论研究 [J]. 光电与控制, 2007, 14(4): 94-96.
- 10 Sun Changku, Wei Wei, Zhang Xiaodong, *et al.*. Experimental design for CCD camera parameters calibration [J]. Optoelectronic Technology & Information, 2005, 18(2): 43-46.
- 孙长库, 魏 巍, 张效栋, 等. CCD 摄像机参数标定实验设计 [J]. 光电子技术与信息, 2005, 18(2): 43-46.
- 11 Z Zhang. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]. The Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision, 1999, 1: 666-673.
- 12 Z Zhang. A flexible new technique for camera calibration [C]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.