

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.06.001

基于图像测距的汽车防撞系统关键技术研究*

高宏伟^{1,2} 王辉¹ 刘玉影¹ 于洋¹

(1. 沈阳理工大学 自动化与电气工程学院 沈阳 110159; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所
机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

摘要:针对汽车防撞系统的问题,以图像测距技术为背景,对其中的关键技术进行了研究。首先,根据相对运动学原理,由图像测距实验平台在假定沿光轴方向移动采集图片,在此基础上运用改进的SIFT匹配算法对图像进行匹配获得匹配点,计算所得到的匹配点的世界坐标,从而获得距离值;其次,通过室内实验计算证明了所推导的测距原理的正确性;最后,将图像测距技术应用在汽车防撞系统中,实验结果证明,测距系统平均误差为8.5077 mm,精度较高,验证了整个方案的可行性和有效性。

关键词: 图像测距;SIFT;匹配;汽车防撞

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Key technology research of car collision avoidance system based on image distance measurement

Gao Hongwei^{1,2} Wang Hui¹ Liu Yuying¹ Yu Yang¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The key technologies which based on the technology of image based distance measurement are researched for the avoidance of automobile collision. Firstly, according to the principle of relative motion and assume that the image distance measurement test-bed is moved to collect images along the direction of the optical axis, and then the improved SIFT matching algorithm which is well used for image matching to obtain matching points. The world coordinates of the matching points are calculated to obtained distance value. Secondly, the validity of distance measurement principle is demonstrated by experiments. Finally, the image based distance measurement technology is applied into the automobile collision avoidance system. The error average of measurement system is 8.5077 mm, the practicability and validity of the whole theme are proved by experiment results.

Keywords: image based distance measurement; SIFT; matching; automobile collision avoidance

1 引言

随着现代科技的发展,汽车业发展迅猛,汽车智能化越来越高。在汽车智能化发展中,最为关注的无人驾驶技术的汽车安全一直都是热点问题。研究智能汽车防撞系统成为汽车安全的关键^[1],并且由于汽车防撞系统运用在各类高中低档车型,防撞系统测距方法有很

多。其中主要的防撞系统有毫米波测距、红外线测距、超声波测距等方法,但都原理复杂以及计算复杂。光学测距按照其测量过程所采用照明方式不同可以分为主动测距和被动测距两大类。主动测距中具有代表性的是结构光法^[2-3]、飞行时间法^[4]、三角测距法^[5]。被动测距技术是目前研究最多、应用最广的一种距离感知技术。被动立体视觉按照使用的视觉传感器数量可以分为单目视觉、双目视觉和三(多)目视觉3大类。近年来随

收稿日期:2017-01 Received Date: 2017-01

* 基金项目:辽宁省自然科学基金(201602652)、机器人学国家重点实验室开放课题(2016008)资助项目

着航天和军事方面的需求,单目立体视觉以成本低、体积小、功耗低,并且能与双多目立体视觉完成同样任务的特点成为了研究热点。单目立体视觉方法可分为 3 类:聚焦^[6-7]、离焦^[8-10]与变焦^[11]。而拍摄多幅图片,深度图精度较高的聚焦方法实时性不好,对硬件要求高的缺点;拍摄最少需要两幅,深度图精度较低的离焦方法需要用高斯函数来近似计算所需的点。而变焦方法的基本原理是移动镜头的位置或者改变相机参数,同时保持空间对象和成像平面的固定,然后改变相机的焦距,使得在保持空间对象和成像平面固定的情况下来获得不同大小的同一场景的图片。并且可以根据不同焦距的图像点的位置的变化来计算对象点的对应深度值^[12]。

本文研究了一种基于视觉测距方法,该方法可以获得被测目标特征点的三维坐标,从而为汽车辅助驾驶技术提供技术支撑。本文中的基于图像的测距技术与基于聚焦的测距方法有类似之处,根据相对运动原理,在假定沿光轴方向移动拍照的条件下,两者是等价的。论文具体阐述了图像测距步骤和实验平台的组成,运用 SIFT 特征匹配算法实现了车牌上特征点的匹配^[13-14],实验结果证明了整个方案的可行性和有效性。

2 图像测距原理

本文研究的图像的测距方法是根据相对运动学原理来实现的。首先,通过相机沿着光轴方向移动如图 1 所示,来表示汽车正在向前运行。然后该相机在同一场景中移动,分别在前后两个位置对固定的相同物体采集图片。最后通过图像处理的方法和相应的技术计算特征点的三维坐标,获得相机与物体之间的距离。操作过程具有如下步骤。

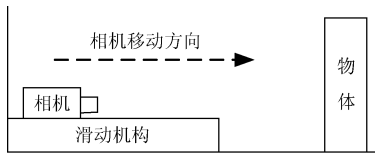


图 1 相机移动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of camera movement

1) 将相及其滑动机构对准测距场景,如图 1 所示。本实验的滑动机构是需要将相机沿光轴方向移动的高精度导轨。

2) 首先,使用滑动机构将相机沿光轴方向移动一段距离,相机对同一场景的成像的前后两个位置采集图片。然后,将这两个位置采集的图片当作立体图像进行保存编号。假设相机向前移动前所采集的图片定义为远景图,近景图则是被移动后,如图 2 所示。

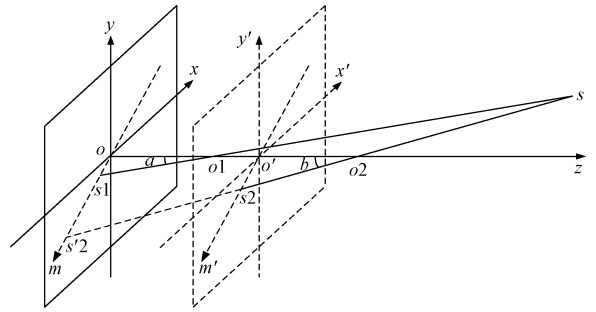


图 2 移动前后图像

Fig. 2 The images before and after camera movement

3) 剔除无匹配点的方法是通过改进的 SIFT 算法来完成,并优化匹配算法。来完成对采集的立体图像特征点的匹配。该方法主要通过远景图内标出与近景图出现的共同场景,是由于远景图具有更大的空间范围。

4) 根据改进的 SIFT 算法得到匹配点,计算出特征点的三维坐标。图 2 所示的单相机定焦测距示意图是针孔成像模型,便于进行几何分析。将相机移动前的相机光学中心定为原点 o ,并将相机沿着光轴前移,从而建立空间直角坐标系 $o-xyz$,如图 3 所示,其中的图像平面为 xoy 。由步骤 2) 所述,对同一场景分别在两个位置采集图片。相机沿着光轴前移后的图像平面设定为 $x'o'y'$,光学中心为 o' 。场景中的任意一点为 s ,移动前的点为 s_1 ,移动后的点为 s_2 。在同一坐标系下对这两个模型进行分析。像点 s_1 在直线 om 上,点 s_2 在直线 om' 上,两直线的斜率在理想模型中是相同的,作直线 ss_2 的延长线交直线 om 于点 s'_2 。 ss_1 直线是通过移前透镜的中心点 o_1 , ss_2 直线是通过移后的透镜中心点 o_2 ,其中 f 是相机的固定焦距,并且 $oo_1 = oo_2 = f$ 。平面 som 是穿过 z 轴并且垂直于像平面 xoy 的平面。

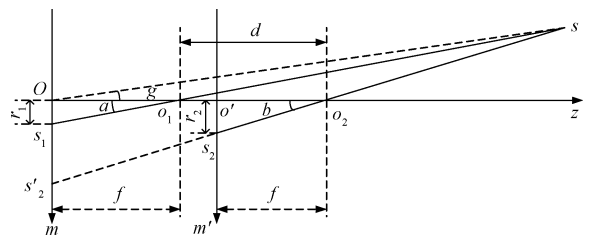


图 3 相机移动成像

Fig. 3 The imaging of camera movement

截取平面 som 单独分析,如图 3 所示。 r_1, r_2 为像点到光心的距离,即平面 xoy 中的极半径,如图 4 所示。图 4(a) 包含的为更大的场景空间,图 4(b) 包含的则为更过的细节。并且图 4(a) 和 (b) 都包含的像平面 $a'b'c'd'$ 为公共场景。图 4 中的 $abcd$ 为像平面大小。为此可以在

图4(a)的 $a'b'c'd'$ 平面内找任意一点 s_1 ,通过几何特征的关系可在图4(b)中找到相应的匹配点 s_2 。就可以确定 r_1 、 r_2 的值了。因此图2中 $\angle\alpha$ 、 $\angle\beta$ 可解。已知 $o_1o_2 = d$, so_1o_2 三角形也可解。

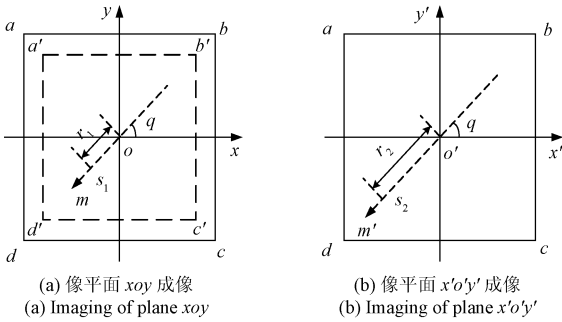


图4 相机移动前象平面成像

Fig.4 The imaging before camera movement

线段 os 是场景中的点 s 到移动之前光学中心 o 的长度,如图3所示,其中极半径 r 表示的为在相机坐标系 $oxyz$ 的线段 os 的长度。通过上述分析发现 soo_1 三角形可解。将相机坐标系 $oxyz$ 中的点 s 取的坐标为 (x,y,z) ,则有 $x = r\sin\gamma\cos\theta$, $y = r\sin\gamma\sin\theta$, $z = r\cos\gamma$ 。那么只要求解出 r 、 $\sin\gamma$ 、 $\cos\gamma$ 、 $\sin\theta$ 、 $\cos\theta$,就可确定点 s 在相机坐标系 $oxyz$ 的坐标,求解过程如下。

首先,假设平面 xoy 内点 s_1 的坐标为 (i,j) ,平面 $x'o'y'$ 内匹配点 s_2 坐标为 (k,n) ,则:

$$\sin\theta = -\frac{i}{\sqrt{i^2 + j^2}} \quad (1)$$

$$\cos\theta = -\frac{j}{\sqrt{i^2 + j^2}} \quad (2)$$

$$r_1 = \sqrt{i^2 + j^2} \quad (3)$$

$$r_2 = \sqrt{k^2 + n^2} \quad (4)$$

再求解三角形 so_1o_2 ,已知 $oo_1 = oo_2 = f$, $o_1o_2 = d$,设 $a = so_1$, $b = so_2$ 。由以上推导可知:

$$\sin\alpha = \frac{r_1}{\sqrt{f^2 + r_1^2}} \quad (5)$$

$$\cos\alpha = \frac{f}{\sqrt{f^2 + r_1^2}} \quad (6)$$

$$\tan\alpha = \frac{r_1}{f} \quad (7)$$

$$\cot\alpha = \frac{f}{r_1} \quad (8)$$

$$\sin\beta = \frac{r_2}{\sqrt{f^2 + r_2^2}} \quad (9)$$

$$\cos\beta = \frac{f}{\sqrt{f^2 + r_2^2}} \quad (10)$$

$$\tan\beta = \frac{r_2}{f} \quad (11)$$

$$\cot\beta = \frac{f}{r_2} \quad (12)$$

$$d^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos(\beta - \alpha) \quad (13)$$

$$r_2 = \sqrt{k^2 + n^2} \quad (14)$$

$$b^2 = d^2 + a^2 - 2ab\cos\alpha \quad (15)$$

将式(15)代入式(13),式(14)代入式(15)得:

$$a = b\cos(\beta - \alpha) + d\cos\alpha \quad (16)$$

$$d = b\cos(180 - \beta) + a\cos\alpha \quad (17)$$

再将式(16)代入式(17)得:

$$b = \frac{d\sin\alpha}{\sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta} = \frac{d}{\tan\alpha\cos\beta + \cot\alpha\sin\beta} \quad (18)$$

将式(4)~(18)代入式(4)~(16)得:

$$a = \frac{\sin\beta + 2\sin\alpha\cos\alpha\cos\beta}{\sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta}d = \frac{\tan\beta}{\sin\alpha + 2\cos\alpha}d \quad (19)$$

再求解三角形 soo_1 :

$$r = \sqrt{f^2 + a^2 + 2facos\alpha} \quad (20)$$

$$\cos\gamma = \frac{f^2 + r^2 - a^2}{2fr} = \frac{f + acos\alpha}{r} \quad (21)$$

$$\sin\gamma = \sqrt{1 - \cos^2\gamma} = \frac{asin\alpha}{r} \quad (22)$$

这样就完成了 r 、 $\sin\gamma$ 、 $\cos\gamma$ 、 $\sin\theta$ 、 $\cos\theta$ 的求解,由公式:

$$\begin{cases} x = r\sin\gamma\cos\theta \\ y = r\sin\gamma\sin\theta \\ z = r\cos\gamma \end{cases} \quad (23)$$

可得点 s 在相机坐标系 $oxyz$ 内的坐标为:

$$\begin{cases} x = -jd \frac{\frac{\sqrt{k^2 + n^2}}{f} + \frac{2f\left[1 - \frac{f^2}{(f^2 + i^2 + j^2)}\right]}{\sqrt{i^2 + j^2}}}{\sqrt{i^2 + j^2} + \sqrt{k^2 + n^2}} \\ y = -id \frac{\frac{\sqrt{k^2 + n^2}}{f} + \frac{2f\left[1 - \frac{f^2}{(f^2 + i^2 + j^2)}\right]}{\sqrt{i^2 + j^2}}}{\sqrt{i^2 + j^2} + \sqrt{k^2 + n^2}} \\ z = f + d + d \frac{2f}{\sqrt{i^2 + j^2} + \sqrt{k^2 + n^2}} \frac{(f^2 + i^2 + j^2) - \sqrt{i^2 + j^2}}{\sqrt{i^2 + j^2} + \sqrt{k^2 + n^2}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: s_1 的坐标为 (i,j) , s_2 的坐标为 (k,n) , f 为焦距, d 为移动距离。由于成像是倒立成像,为此在 xoy 平面内的空间点 s 的坐标和成像的位置是处与相反的区间内^[15]。为了测得的三维坐标变为在世界坐标系下的绝对坐标,可将相机坐标系与世界坐标系重合。

3 图像测距技术实验

图像测距实验平台由 ASR 机器人和 CCD 相机组成,并对物体采集图片,如图 5 所示。为了利于本实验,选用镜头畸变系数小和广角小的 CCD 相机。该 CCD 相机选用 640×480 像素,焦距 12 mm,并且通过标定实验^[16]获得相机的内外参数。CCD 相机沿着导轨向前移动采集场景图片,如图 6 所示。



图 5 ASR 机器人
Fig. 5 ASR robot

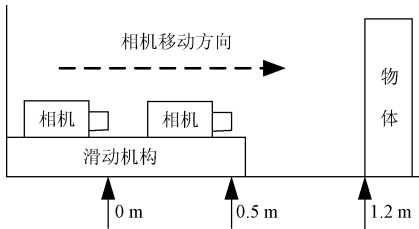
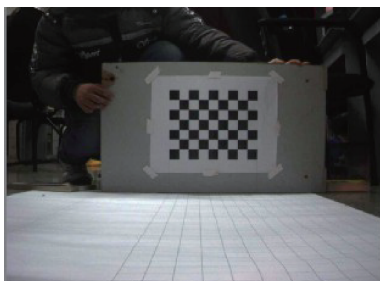


图 6 相机与物体位置示意图

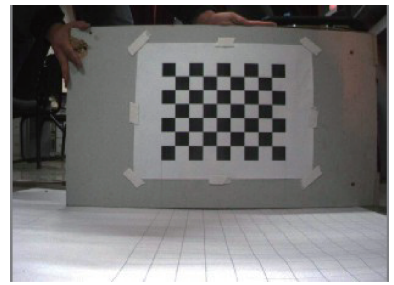
Fig. 6 Schematic diagram of camera and object location

图 6 所示,物体和未向前移动的相机相距 1.2 m,在未移动时采集一次图片。然后相机沿着滑动机构移动 0.5 m,然后在采集一次图片。图 7 所示的为移动前、后相机所采集的图片。

由于相机具有畸变,则需要通过标定实验^[16]来获得相机的内外参数和畸变系数,校正图 7 所示的照片,校正后的图如图 8 所示。



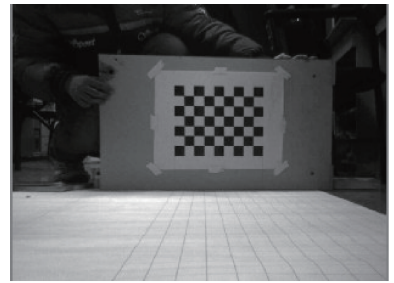
(a) 相机移动前物体成像
(a) Imaging before camera movement



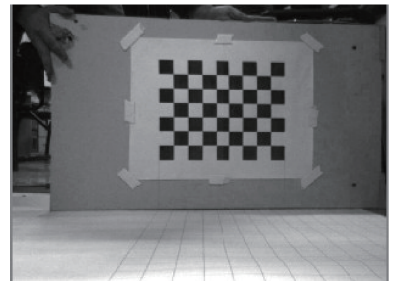
(b) 相机向前移动物体成像
(b) Imaging after camera movement

图 7 原始图像

Fig. 7 Original image



(a) 校正相机移动前物体成像
(a) Imaging before correction camera movement



(b) 校正相机移动后物体成像
(b) Imaging after correction camera movement

图 8 校正后物体照片

Fig. 8 Photo of object after camera correction

校正后的图片通过 SIFT 算法进行特征点提取和匹配,如图 9 所示。并在选定标定板上中心范围,完成特征点的匹配与测距实验。

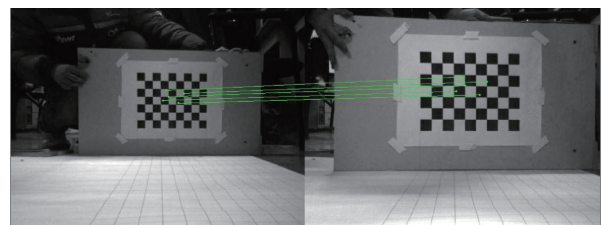


图 9 基于改进的 SIFT 匹配算法

Fig. 9 Based on improved SIFT matching algorithm

利用本文研究的图像测距算法计算匹配点的世界坐标,而且比较移动距离 d , 和比较实际距离 L 与本实验测距方法测量得到的距离 L 之间的误差。图 9 中的匹配点 s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 坐标保存在表 1 中,该实验相机移动距离为 $d = 0.5 \text{ m}$, 标定板与未移动的相机相距 $L = 1.2 \text{ m}$, 定焦测距实验结果如表 2 所示。

表 1 定焦测距图像坐标

Table 1 Image coordinates of fixed focal length distance measurement (Pixel)

匹配点	左右匹配点图像坐标(单位/像素)	
s_1	(543, 290)	(548, 328)
s_2	(603, 300)	(605, 253)
s_3	(549, 308)	(555, 272)
s_4	(527, 323)	(532, 293)
s_5	(594, 328)	(603, 300)

表 2 定焦测距实验结果

Table 2 Experimental results of fixed focal length distance measurement (mm)

匹配点世界坐标		
$x_{w1} = 108.784$	$y_{w1} = 212.473$	$z_{w1} = 1\ 203.045$
$x_{w2} = 180.983$	$y_{w2} = 200.040$	$z_{w2} = 1\ 201.968$
$x_{w3} = 115.086$	$y_{w3} = 191.248$	$z_{w3} = 1\ 206.867$
$x_{w4} = 98.003$	$y_{w4} = 185.014$	$z_{w4} = 1\ 202.845$
$x_{w5} = 161.612$	$y_{w5} = 163.754$	$z_{w5} = 1\ 207.362$

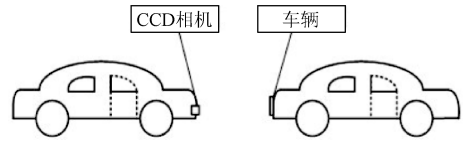
由表 2 中的世界坐标 $z_{wi} (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 可知,通过实验计算出相机移动前与标定板的距离为 L' 和实际距离 L 的误差均值为 4.4174 mm 。其中 L' 的计算为 $L' = (z_{w1} + z_{w2} + z_{w3} + z_{w4} + z_{w5})/5 = 1\ 204.4174 \text{ mm}$ 。通过误差分析,说明本文提出的测距方法是可行的。并且以后可以经过算法的改进,选择更优的传感器和图像处理等方法来提高测距的精度。

4 图像测距技术在汽车防撞中的应用

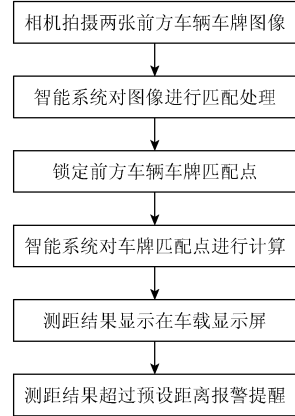
汽车防撞系统是自动驾驶的一项重要技术,为了给驾驶员和乘员及时发出预警信息,防止汽车在行进过程中发生碰撞和擦伤。该技术主要是通过传感器和图像处理技术来对行进过程中的车距进行测量和监控。

4.1 系统的工作原理

本文基于图像的测距的工作原理主要包含两个方面:1)安装在汽车前后端的相机,通过该相机对视野中出现的车牌进行图像处理和分析;2)实时计算前后车相应的位置关系,并设定相应的阈值来提醒驾驶员。汽车测距示意图如图 10(a)所示,测距工作流程如图 10(b)所示。



(a) Schematic diagram of distance measurement system



(b) Working flow chart of distance measurement system

图 10 系统示意图与流程

Fig. 10 Schematic diagram of system and flow chart

汽车防撞系统的测距工作流程简洁概括为,车辆在行驶过程中。首先,车载 CCD 相机快速连续拍摄前方车辆车牌图片,由于车辆在前进过程中 CCD 相机快速采集图片,可近似看作车载 CCD 相机沿相机光心移动。其次,基于改进的 SIFT 匹配算法,在获取车牌的图像之后,匹配两个车牌图像的特征点。然后,运用本文研究的测距算法来计算匹配点的三维坐标。最后,得到的三维坐标将可以计算出与前车的相对位置关系。

采集一组车牌进行实验,将采集到的车牌图片进行图像校正,如图 11(a)和(b)所示。图 11(c)与(d)所示



(a) The license plate image acquainted (b) Image correction



(c) The image matching with traditional SIFT algorithm



(d) The image matching with improved SIFT algorithm

图 11 对采集到的车牌进行的匹配处理

Fig. 11 Matching process for collected license plate

分别为传统的 SIFT 匹配结果和改进的 SIFT 匹配结果。

现有的 CCD 相机在自然场景中像素不够,所以本实验将采用的相机型号为佳能 600D,焦距 $f=18\text{ mm}$,分辨率为 $1\ 280\times 720$ 。相机没向前移动距离车辆距离为 $L=1.84\text{ m}$,向前移动动了 $d=1.1\text{ m}$,通过改进的 SFIT 匹配算法获得的特征匹配点为 8 个。由于车辆防撞系统中的测距只与计算出的这 8 个匹配点的是坐标中的 z_{wi} ($i=1,2,3,4,5,6,7,8$) 有关。所以数据如表 3 所示。

表 3 定焦车辆测距实验结果

Table 3 Experimental results of fixed focus vehicles distance measurement (mm)

匹配点	匹配点	匹配点	匹配点
z_{w1}	1 847.874 8	z_{w5}	1 848.686 3
z_{w2}	1 846.286 1	z_{w6}	1 847.584 5
z_{w3}	1 849.681 5	z_{w7}	1 848.289 7
z_{w4}	1 850.023 5	z_{w8}	1 849.635 1

在世界坐标系下的 z_{wi} 的 L' 平均值计算公式如下:

$$L' = (z_{w1} + z_{w2} + z_{w3} + z_{w4} + z_{w5} + z_{w6} + z_{w7} + z_{w8}) / 8 = 1\ 848.507\ 7\text{ mm}$$

实际距离 L 误差均值为 $8.507\ 7\text{ mm}$ 。虽然误差有点大,但实验结果却验证了整个方案的可行性和有效性。在行驶的车辆中将测得的距离设定一个阈值,接近该阈值时车辆将对驾驶员发出警告。此外,为了提高算法实时性,本文在传统 SIFT 算的基础上进行了特征维数的删减,并对特征点检测数量的加以限制。SIFT 匹配算法和测距算法合计运行时间运行时间不超过 50 ms ,可以为汽车辅助驾驶中的自动防撞功能提供算法支撑。

5 结 论

本文研究了一种基于图像的测距技术,详细阐述了测距步骤,推导求出了匹配点的三维坐标,并通过实验证明了测距方法的有效性。此外,还开展了测距技术在汽车防撞中的应用研究,对行驶中车辆进行测距实验,结果证明实验效果良好。目前基于图像的测距技术在汽车防撞应用还处在一个探索阶段,希望在将来发展的自动驾驶技术的汽车、智能汽车等车辆中被广泛应用,来提高驾驶员和乘员的安全。

参考文献

[1] 陆兴华,彭意达. 基于回波探测的汽车防撞系统智能测距方法[J]. 电子测量技术, 2016,39(6):126-129.
LU X H, PENG Y D. Intelligent ranging method of vehicle anti collision system based on echo detection[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(6):

126-129.

- [2] 王宇,张旭,李晨,等. 基于光场成像的三维测量方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2015,36(6):1311-1318.
WANG Y, ZHANG X, LI CH, et al. Study on the three-dimensional measurement technology based on lighon page 13on page 13t field imaging[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015(1):19-22.
- [3] GANAPATHI V, PLAGEMANN C, KOLLER D, et al. Real time motion capture using a single time-of-flight camera[C]. Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE,2010:755-762.
- [4] 潘华东,王其聪,谢斌,等. 飞行时间法三维成像摄像机数据处理方法研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2010,44(6):1049-1056.
PAN H D, WANG Q C, XIE B, et al. Date processing method of time-of-flight 3D imageing [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010, 44(6): 1049-1056.
- [5] 王顺录,李党娟,范源,等. 短距离激光测距传感器系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2016,35(11):98-102.
WANG SH L, LI D J, FAN Y, et al. Design of laser ranging sensor for short distance measurement [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(11):98-102.
- [6] CHAI Y, LI H, ZHANG X. Multifocus image fusion based on features contrast of multiscale products in nonsubsampling contourlet transform domain [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2012, 123(7):569-581.
- [7] ZHAO T, LEI G, ZHANG L. A new algorithm of spatial positioning based on mono-vision [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2009, 27(1):47-51.
- [8] XIONG Y, SHAFER S A. Depth from focusing and defocusing[J]. Computer Vision and Pattern Recognition Proceedings, IEEE Computer Societ, 2010:68-73.
- [9] DANG T, HOFFMANN C, STILLER C. Continuous stereo self-calibration by camera parameter tracking[J]. IEEE Transactions on Image Processing, A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2009, 18(7):1536-1550.
- [10] ZHOU C, LIN S, NAYAR S K. Coded aperture pairs for depth from defocus and defocus deblurring [J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 93(1):325-332.
- [11] SAHAY R R, RAJAGOPALAN A N. Dealing with parallax in shape-from-focus[J]. IEEE Transactions on

Image Processing, A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2011, 20(2):558-569.

- [12] 丁伟利, 陈瑜, 马鹏程, 等. 基于阵列图像的自适应光场三维重建算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2156-2165.
DING W L, CHEN Y, MA P CH, et al. Study on adaptive light field 3D reconstruction algorithm based on array image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 2156-2165.
- [13] RUBLEE E, RABAUDE V, KONOLIGE K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF [J]. International Conference on Computer Vision 2011, 58(11): 2564-2571.
- [14] 许佳佳, 张叶, 张赫. 基于改进 Harris-SIFT 算子的快速图像配准算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 48-54.
XU J J, ZHANG Y, ZHANG H. Fast image registration base on improved Harris-SIFT descriptor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(1): 48-54.
- [15] 栾长一. 基于定焦平移序列图像的测距技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2013.
LUAN CH Y. Study on distance measurement technology of translation sequence images based on fixed focus[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2013.
- [16] LIANG D T, WANG X Y. Partition-based camera intrinsic and extrinsic parameters calibration for planar

visual metrology [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(3): 422-426, 431.

作者简介



E-mail: ghw1978@sohu.com

Gao Hongwei received B. Sc., M. S. from Liaoning Technical University in 2001 and 2004, from Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences (CASSIA) in 2007, respectively. Now he is professor in Shenyang Ligong University. His main research interest includes digital image processing and analysis, stereo vision and intelligent computation.



于洋 (通讯作者), 分别在 1985 年、1990 年于沈阳工业学院获得学士学位和硕士学位, 现为沈阳理工大学教授, 主要研究方向为智能与网络化测控。为本文的通讯作者。
E-mail: yusongh@126.com

Yu Yang (Corresponding author) received B. Sc. and M. Sc. both from Shenyang Institute of Technology in 1985 and 1990, respectively. Now he is professor in Shenyang Ligong University. His main research interest includes intelligent and networked measurement and control.