

基于硬件 SURF 算法的自校准双目测距系统

蒋晓东¹, 于纪言^{1*}, 朱立坤², 黄建森³

¹南京理工大学智能弹药国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094;

²中电海康集团有限公司中电海康集团研究院, 浙江 杭州 310012;

³南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

摘要 为了解决被动式双目测距系统中双目摄像头光轴对准误差较大、图像匹配精确度较低、计算速度慢等问题, 提出了一种基于硬件加速稳健特征(SURF)算法的自校准双目测距系统。该方案采用位置敏感探测器与伺服电机作为双目摄像头光轴自校准平台, 利用 Zynq SoC 处理器对 SURF 算法进行硬件加速, 以实现两幅图像的特征匹配, 从而达到精确、有效、自主的被动测距效果。实验表明本文方案采用位置敏感探测器可以有效地校准双目摄像头至同一平面位置, 同时硬件 SURF 算法匹配图像的精确度高, 速度快, 满足被动测距系统的需求。

关键词 观察设备; 双目测距; 自校准; 加速稳健特征; 特征匹配

中图分类号 TP23

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1036001

Self-Calibrated Binocular Ranging System Based on Hardware SURF Algorithm

Jiang Xiaodong¹, Yu Jiyan^{1*}, Zhu Likun², Huang Jiansen³

¹Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²CETHIK Group Institute, CETHIK Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310012, China;

³School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract In order to solve the problems of binocular camera's optical axis alignment error, low image matching accuracy, and insufficient computing speed in passive binocular ranging systems, a new self-calibrated binocular ranging system based on hardware speeded up robust features (SURF) algorithm is proposed. The scheme uses position sensitive detectors and servo motors as the self-calibrating platform of the binocular cameras, and Zynq SoC is utilized to achieve the hardware acceleration of the SURF algorithm and feature matching of two images. Finally accurate and effective passive ranging is realized. The results show that the position sensitive detector can effectively calibrate the binocular cameras to the same plane position, and the hardware SURF algorithm can match images with high accuracy and speed. The scheme meets the demand of passive ranging systems.

Key words observation equipment; binocular ranging; self-calibration; speeded up robust features; feature matching

OCIS codes 000.2170; 100.2000; 150.6910

双目被动测距技术在工业、军事技术等领域中发挥着非常重要的作用。叶伟彦等^[1]提出一种双目视差测距望远光学系统设计, 利用同一平面的双目摄像机拍摄的两幅图像的视差进行测距, 但并未设置有效的图像匹配系统。张丽娟等^[2]提出基于双目 CCD 测距的目标图像匹配算法, 利用基于模板的灰

度互相关算法进行匹配, 但缺少光轴对准过程, 且匹配算法易受像素点拍摄效果影响。刘昶^[3]提出了一种双平行平面标定方法, 利用物点坐标和畸变图像间的关系进行平面标定, 该方法精度较高, 但需要预先标定摄像头, 不符合测距系统快速操作需求。为此, 本文提出一种基于硬件加速稳健特征(SURF)

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-08-21; 录用日期: 2018-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(11602111)

* E-mail: yujiyan@139.com

算法的自校准双目测距系统,利用位置敏感探测器(PSD)^[4]配合伺服电机进行双目摄像头自校准,利用硬件 SURF 算法^[5-6]对双目图像进行匹配,最终实现精确、有效、快速的被动双目测距。

在实际双目测距过程中,两摄像头光轴会因为相机本身和系统装配而引入配准误差,光轴间是否平行、两成像面是否共面都将对测距精度造成很大影响,因此设计了 PSD 自校准系统。图 1 所示为本双目被动测距系统测距与 PSD 自校准原理。采用双 PSD 探测结构,PSD 与激光调制系统分别与左右摄像头平台固定,左右摄像头分别固连三轴伺服电机。校准过程如下:PSD 测量得到两摄像头坐标位置差(x_1 、 x_2 差为 Δx_{12} , y_1 、 y_2 差为 Δy_{12} , z_1 、 z_2 差为 Δz_{12}),驱动与左右摄像头固连的三轴伺服电机,分别在 x'_1 、 x'_2 、 y'_1 、 y'_2 、 z'_1 、 z'_2 方向调整摄像头,使得 2 个激光点分别落于 2 个 PSD 敏感面中心坐标位置,最终使两摄像头焦平面位于同一水平位置。测量过程如下:校准后,拍摄得到左右图像,降采样后利用 Zynq SoC 硬件 SURF 算法,根据尺度特征匹配得到各个特征点左右位置关系,计算平均位置差后得到相差 Δx ,最终由三角形相似原理求出距目标 T 的距离 L ^[7]。

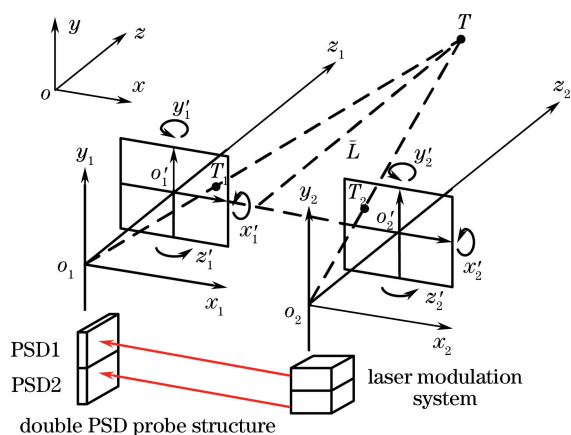


图 1 被动测距系统测距与 PSD 自校准原理

Fig. 1 Schematic of ranging and PSD self-calibration principles in the proposed system

图 2 所示为系统校准后的左右图像匹配效果图,实验中利用 Xilinx 提供的 HLS 软件工具对 SURF 算法进行硬件 IP 核生成^[8],加载进入 Zynq SoC 后,利用现场可编程门阵列(FPGA)的并行处理能力加速执行图像匹配算法,使相差计算过程耗时可以降至 100 ms 数量级。

采用 PSD 配合三轴伺服电机进行双目摄像头自校准的方案,对准过程自动进行,且快速精准,无须预先对摄像头进行标定,具有较高的工程实用价

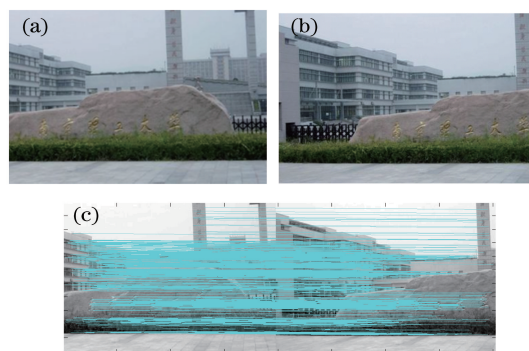


图 2 (a)左摄像头与(b)右摄像头拍摄图像;
(c)最终匹配效果

Fig. 2 Images captured by (a) left and (b) right cameras;
(c) final matching result

值。该方案同时采用 SURF 算法对左右两幅图像进行特征提取,进而实现图像配准。实验表明相较于基于模板的图像配准算法,SURF 算法采用图像中尺度不变特征变换的特点进行图像配准,不依赖于像素值,受摄像头拍摄效果影响较小,因此系统稳健性较强。SURF 算法由经典的尺度不变特征变换(SIFT)算法改进而来,同时利用 Zynq SoC 提供的硬件加速算法执行,相较于传统的软件执行 SIFT 匹配算法和 SURF 匹配算法,极大地提高了图像匹配的计算速度。采用本文方案进行了图像匹配算法横向对比与远距测试。在图像匹配算法横向对比实验中,设置基于模板的图像匹配算法^[9]、基于 opencv 视觉库实现的软件 SIFT 和 SURF 匹配算法作为对比实验^[6,10],实验结果如表 1 所示。其中匹配准确度通过左右两幅相邻图像匹配重叠区域与实际重叠区域的关系计算得到。在远距测试中,采用艾沃斯 S7 手持激光测距仪作为测距基准,实验结果如表 2 所示,表明本文方案可以快速、有效地实现双目摄像头自校准,同时可较为精准地实现双目摄像头被动测距功能,具有较高的工程实践价值。

参 考 文 献

- [1] Ye W Y, Xiang Y, Wu S, *et al.* Optical design of binocular parallax ranging telescope [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 40(1): 72-75.
叶伟彦, 向阳, 吴爽, 等. 双目视差测距望远光学系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(1): 72-75.
- [2] Zhang L J, Yang J H, Jiang Y T, *et al.* Research on target image matching algorithm for binocular CCD ranging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 51(9): 091002.

表 1 各图像匹配算法对比实验结果

Table 1 Comparison of experiment results obtained by different image matching algorithms

Ranging algorithm	Implementation platform	Matching speed /ms	Matching accuracy /%		
			Strong light environment	Normal light environment	Weak light illumination
Image matching algorithm based on template	Zynq SoC	112.02	5.81	58.21	7.92
Software SIFT algorithm	PC+opencv	1813.91	85.36	93.12	86.92
Software SURF algorithm	PC+opencv	1120.32	83.34	92.61	85.43
Hardware SURF algorithm	Zynq SoC	108.33	82.47	92.21	86.32

表 2 测距对比实验结果

Table 2 Comparison of ranging experiment results

Serial No.	Measured distance /m		Relative error ^a /%
	Avos S7 (L_1)	Proposed (L_2)	
Test 1	50.00	49.25	-1.50
Test 2	100.02	99.37	-0.65
Test 3	150.50	152.22	1.14
Test 4	200.30	203.61	1.65
Test 5	500.11	505.59	1.10

^aThe relative error is calculated as $[(L_2-L_1)/L_1] \times 100\%$.

张丽娟, 杨进华, 姜雨彤, 等. 基于双目 CCD 测距的目标图像匹配算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 091002.

[3] Liu C. Two parallel planes calibration for two-dimensional object vision measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1115004.

刘昶. 二维目标视觉测量的双平行平面标定[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1115004.

[4] Song D Y, Liu T G, Ding X K, *et al.* Precise PSD micro-displacement online measurement system [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013, 46(2): 168-173.

宋殿友, 刘铁根, 丁小昆, 等. 精密 PSD 微位移在线测量系统[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(2): 168-173.

[5] Zhang H J, Li G H, Liu C, *et al.* Reliable initial guess based on SURF feature matching in digital image correlation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1112005.

张华俊, 李桂华, 刘程, 等. 基于 SURF 特征匹配的数字图像相关变形初值可靠性估计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1112005.

[6] Jin J J, Lu W L, Guo X T, *et al.* Position registration method of simultaneous phase-shifting interferograms based on SURF and RANSAC algorithms [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1012002.

靳京京, 卢文龙, 郭小庭, 等. 基于 SURF 和 RANSAC 算法的同步相移干涉图位置配准方法[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1012002.

[7] Jiang L T, Yang J H, Liu J, *et al.* High precision calibration of binocular CCD ranging system [J]. Computer Engineering, 2013, 39(7): 228-232.

姜丽彤, 杨进华, 刘剑, 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.

[8] Ding S S, Chai Z L. Design and implementation of hardware accelerator for SURF detection based on HLS [J]. Microelectronics & Computer, 2015, 32(9): 133-137.

丁帅帅, 柴志雷. 基于 HLS 的 SURF 特征提取硬件加速单元设计与实现[J]. 微电子学与计算机, 2015, 32(9): 133-137.

[9] Wang G, Shi Z C, Shang Y, *et al.* Automatic extraction of diagonal markers based on template matching and peaks of gradient histogram [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815014.

王刚, 施忠臣, 尚洋, 等. 结合模板匹配和梯度峰值的对角标志自动提取方法[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815014.

[10] Zhang X, Jin Y X, Xue D. Image matching algorithm based on SICA-SIFT and particle swarm optimization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 091002.

张鑫, 靳雁霞, 薛丹. SICA-SIFT 和粒子群优化的图像匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 091002.