

基于 TCensus 的立体匹配算法及 FPGA 设计

郑晓亮 周 晓 欧科君 牟新刚

(武汉理工大学机电工程学院 武汉 430070)

摘 要:随着无人机技术的迅速发展,利用无人机代替人工进行电力线巡线是行业内发展的新趋势。尽管无人机电力巡线相对于人工巡线效率更高,更加安全,但无人机巡线仍然面临一些问题,无人机的避障技术亟待完善,在巡线过程中无人机会出现与周边障碍物相撞的情况,尤其是细小的电线对无人机安全造成巨大的威胁。这些线状物往往目标不明显,雷达,超声波等技术得到的回波较少,造成避障困难。基于双目视觉系统的无人机避障技术在无人机避障领域得到了广泛的研究和关注。针对双目视觉实时无人机电力巡线避障应用,提出了基于 TCensus(形态学 Tophat 变换和 MiniCensus)变换的匹配代价测量方法来对原始图像中的弱目标进行增强,同时采用基于十字结构的支持区域来提高匹配的准确度。实验证明,本文设计的双目视觉系统可以有效检测无人机到电力线之间的距离,检测误差达到 5%,提出的 TCensus 立体匹配算法与其它方法相比除了能够获得同样准确的背景深度图之外,还能对电线区域具有更精细的成像效果。

关键词:立体匹配;无人机电力巡线;图像增强;Tophat 变换

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Stereo matching algorithm and FPGA design based on TCensus

Zheng Xiaoliang Zhou Xiao Ou Kejun Mu Xingang

(Institute of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: With the rapid development of UAV technology, the use of unmanned aerial vehicles instead of artificial power line inspection line is the industry development trend. Although UAV power patrols are more efficient and safer than manual inspection, UAV inspection continues to face problems such as aviation restrictions, airborne weight, flight life, obstacle avoidance technology and other factors. Unmanned aerial vehicle obstacle avoidance technology needs to be improved, in the inspection process, no chance will appear with the surrounding obstacles collision situation, and especially the small wires on the UAV caused a huge threat. These lines are often not obvious targets, radar, ultrasound and other technologies to get less echo, resulting in obstacle avoidance difficulties. The UAV obstacle avoidance technology based on binocular vision system has been widely studied and paid attention to in the field of unmanned aerial vehicles. This paper designs a real-time UAV power line detection system based on binocular vision system. In this paper, a matching cost measurement method based on TCensus (morphological Tophat transform and MiniCensus) is proposed to enhance the weak target in the original image, and the support region based on the cross structure is used to improve the matching accuracy. The experimental results show that the binocular vision system can effectively detect the distance between the UAV and the power line, and the detection error is 5%. The stereo matching algorithm proposed in this paper can obtain a better depth map, and the TCensus algorithm can effectively preserve the original image in the weak target line information.

Keywords: stereo matching; UAV power line inspection; image enhancement; Tophat transformation

1 引 言

电力线巡线对于电力系统的安全性和可靠性至关重要

要。传统的电力线巡线采用人工巡线方式,不仅效率低下,对于部分地势复杂区域有可能无法进行巡线。无人机电力巡线相对效率高、安全性高,但是由于巡线目标电

力线较为细小,采用雷达和超声波等避障技术得到的回波往往较少,造成无人机避障困难。基于双目视觉系统的电力线巡检方法可以克服这个困难,是最近几年研究的热点。

立体匹配技术是双目视觉系统的核心技术。最近几年,基于自适应权重^[1]和自适应支持区域^[2]的局部立体匹配算法可以获得比传统的固定支持窗更好的匹配效果,并且得到了进一步的研究和改进^[3-6]。基于 GPU 和 FPGA 的并行处理越来越多地应用到了立体匹配领域。FPGA 功耗相对于 GPU 较低,可以更好地满足高带宽,高复杂性的图像处理任务的需求^[7]。在立体匹配的实时处理方面,目前已经有较多的基于 FPGA 方案的立体匹配的实现方法^[8-9],但是其中大部分是通用的实时深度图求取。

无人机电力巡检任务面对的场景往往比较复杂,特别是大面积的低纹理天空背景和细小的线条目标对于立体匹配工作带来了巨大的挑战^[10]。目前大部分的局部立体匹配算法由灰度绝对值和局部非参数 Census 变换作为匹配代价的测量方法,对边缘的保护较差,特别是对于电力线巡检场景中的较细的,与背景灰度差别不大的电力线的保护性不够好,这些待检测目标在深度图中往往会出现断裂、粘连、丢失等不良后果。

针对无人机巡线的立体匹配任务,提出了基于双目视觉和 FPGA 硬件平台的实时电力线检测系统。本文提出了基于 TCensus(形态学 Tophat 变换和 MiniCensus)变换的匹配代价测量方法来对输入像对进行立体匹配,同时采用基于十字结构的支持区域来提高匹配的准确度。实验证明,本文设计的双目视觉系统可以有效检测无人机到电力线之间的距离,检测误差达到 5%,提出的立体匹配算法可以获得较好的深度图,TCensus 算法可以有效保留原图像中的弱目标线条信息。

2 系统方案设计

本文拟采用基于双目视觉的检测系统,以 FPGA 作为平台实现立体匹配算法的实时性处理,FPGA 处理系统和双目相机系统是系统必不可少的一部分,本文所设计的硬件系统结构如图 1 所示。

首先,双目相机需要经过离线标定,标定工作通过 MATLAB 的双目标定工具完成^[11]。相机输出 GigE Vision 接口标准的视频信号,视频信号经由 FPGA 的 MAC 层和 UDP/IP 层的 IP 核,以及 GigE Vision 解码器之后输出原始的视频数据,并将原始视频数据存入外部 DDR3 缓存。在线校正电路负责从 DDR 缓存中读取标定参数和原始视频数据,并输出标定后的视频数据到算法处理模块,算法处理模块处理完成后将处理结果存入 DDR 并通知协处理器进行后续处理,并输出到视频解码器进行显示。协处理器负责读取深度计算结果,上层逻辑控制和执行控制。

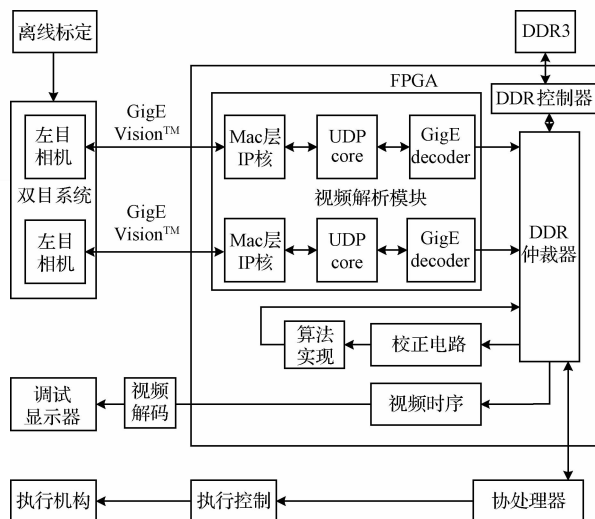


图1 系统硬件结构

3 线纹理增强的立体匹配算法设计

立体匹配算法是双目视觉系统的核心,本文提出的立体匹配算法流程如图 2 所示。

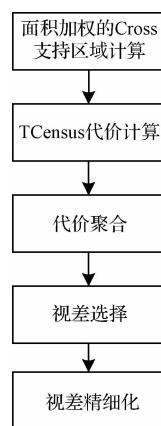


图2 本文的算法流程

所采用的支持区域是基于十字结构的自适应支持区域^[2],首先进行支持区域计算。TCensus 代价计算将原图的 MiniCensus 变换结果和原图的 Tophat 变换结果加权作为匹配的初始化代价。代价聚合步骤根据计算的初始化代价在支持区域内对原始的匹配代价进行聚合,并对所有的视差范围进行遍历。视差选择从视差范围内选择代价聚合值最小的作为代价预估值。视差精细化步骤主要是对初始化代价进行后续处理,进一步减少误匹配点。

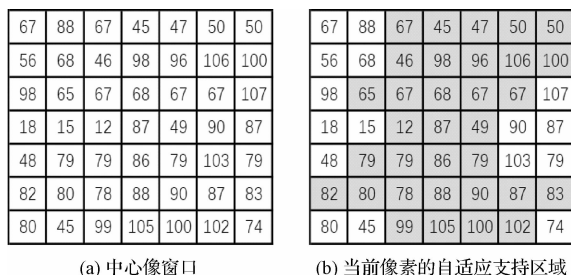
3.1 Cross 支持区域计算

基于十字结构的自适应支持区域的构建方法(下文中统称 Cross 方法)根据图像色彩相似度将图像的矩形支持区域进行分割,对于比较细小的边缘信息,该算法将自适应地提取边缘极其附近区域作为支持区域,因此算法对细节的保持较好。自适应区域的计算公式如式(1)和(2)所示。

$$\varepsilon(p, p_i) = \begin{cases} 0, & I_c(p) < I_c(p_i) \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$R = \max_{r \in [1, r]} (|I_c(p) - I_c(p_r)|) \leq \tau \quad (2)$$

式中: p 为中心像素点, p_i 为搜索范围内的任意点, $I_c(p)$ 为各个颜色通道的值, $L_{\max}$ 为最大臂长, τ 为灰度值分割门限。图3给出了 $L_{\max}$ 为3, 灰度分割阈值为15的 $L_{\max}$ 自适应区域的构建方法。



当前像素的自适应支持区域(灰色背景区域)

图3 自适应支持区域的构建方法

由于每个点的支持区域面积是任意的,需要在代价聚合时对结果进行归一化处理。如式(3)所示。

$$C_d(p) = \frac{1}{U_d(p)} \times \sum_{s \in U_d(p)} e_d(s) \quad (3)$$

式中: $U_d(p)$ 表示 p 和对应图中视差为 d 的点的公共支持区域, $C_d(p)$ 表示 p 在视差 d 出的最终代价, $e_d(s)$ 表示代价初始化函数。

3.2 TCensus 代价计算

常用的初始化代价函数主要有基于灰度值比较的测量,基于局部非参数变换的测量,基于梯度信息的测量。由于实际的双目相机存在视角变化、相机传感器敏感度不同、光照影响、各类噪声等各种复杂情况,得到的左右像素亮度或色彩并不完全一致。局部非参数 Census 变换只与图像的结构有关,对左右两个相机的成像差异不敏感,因此在实际的双目匹配中, Census 表现较好。

MiniCensus 是一种精简型的 Census 变换^[11],并可以提供与标准 Census 变换基本等同的结构描述功能^[13]。MiniCensus 相对于标准 Census 变换的主要优势是它可以降低硬件资源的消耗。

MiniCensus 利用中心像素与邻域内 6 个指定像素的关系字符串作为变换结果,并用汉明距离计算两个 MiniCensus 字符串的初始化代价,如图4所示。

无人机电力线的巡检场景中电力线通常比较细小,电力线的梯度作为一个重要的信息进行匹配代价计算是非常必要的。电力线在天空等其他背景中常常作为边缘出现。图5给出了6种常见的边缘检测算子对普通电力线巡检场景的边缘检测结果。

图5中, Tophat 滤波之后的图像边缘更加细,边缘的连续性也比较好。Sobel 算子和 Laplace 算子在原图像中的边缘两侧都可以产生响应,在梯度图中产生了水平方向

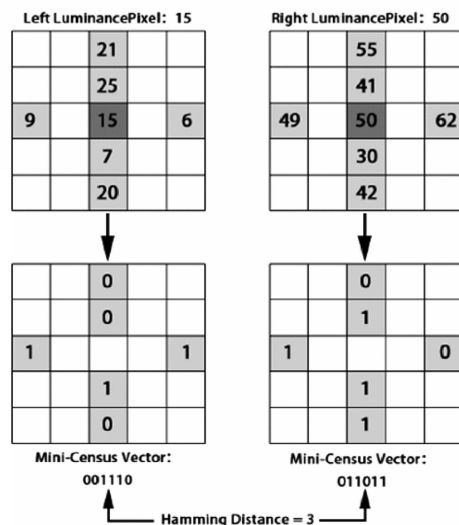


图4 MiniCensus 变换和汉明距离计算

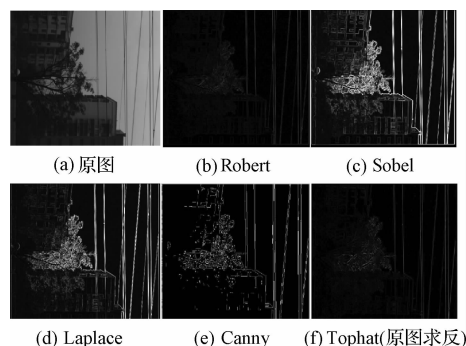


图5 不同边缘算子效果

上的重复性纹理,这对于后面的匹配工作带来了困难。Canny 算子虽然可以得到比较细腻的边缘,但是计算复杂度较高,不利于映射到 FPGA 中。Robert 算子的边缘没有 Tophat 滤波之后的清晰,此外, Robert 算子还会带来边缘线条不连续的问题^[14]。

将 Tophat 变换的结果和 MiniCensus 变换的代价初始化结果加权之后相加作为最终的初始化代价,如式(4)所示。

$$e(x, y, d) = \text{ham}(f_c^L(x, y), f_c^R(x - d, y)) + \text{ham}(g_c^L(x, y), g_c^R(x - d, y)) \quad (4)$$

式中: ham 算子代表汉明距离算子, f 算子代表左图和右图中指定像素的 MiniCensus 变换结果。 g 算子代表左图和右图中指定像素的 Tophat 变换结果。

3.3 匹配代价聚合

匹配代价聚合对每一个可能的深度值进行初始化代价的累加,如式(5)所示。

$$C_d(p) = \sum_{p \in N} C(p, \bar{p}_d) \quad (5)$$

式中: N 为立体匹配的支持窗口。

3.4 视差选择

选择胜者为王(winner takes all)方法进行视差选择。WTA 从计算出的所有代价匹配聚合结果中选取计算代价最小的深度值,作为最终的深度值估计,如式(6)所示。

$$d_p^0 = \min_d (C_d(p)), d \in [0, d_{\max}] \quad (6)$$

3.5 视差精细化

采用的精细化方法是直方图投票精细化方法,直方图投票法在支持区域范围内对深度预估值进行直方图统计,并投票选出统计值最多的预估值作为最终的深度值,如式(7)、(8)所示。

$$V_X(d) = \{r \mid r \in U_d(p) \text{ and } d_{X+r}^0 = d\} \quad (7)$$

$$d_X^* = \arg \max |V_X(d)|, d \in [0, d_{\max}] \quad (8)$$

式中: $U_d(p)$ 表示当前的共有支持区域; $V_X(d)$ 为深度遍历范围内的直方图统计结果。

4 算法实验结果与分析

作为对比,本文给出了以下几种算法的对比。

1)OpenCV 中使用的 SGBM 算法;

2)以自适应十字区域作为支持区域,AD 作为代价测量方法,记为 Cross+AD 算法(文献[2]中算法);

3)以自适应十字区域作为支持区域,MiniCensus 作为代价测量方法,记为 Cross+MiniCensus 算法;

4)以自适应十字区域作为支持区域,MiniCensus 和 Sobel 算子的加权和作为代价测量方法,记为 Cross+MiniCensus+Sobel 算法;

5)以自适应十字区域作为支持区域,MiniCensus 和 Tophat 运算的加权和作为代价测量方法,记为 Cross+MiniCensus+Sobel 算法(本文提出的算法)。

实验结果如图 6 和 7 所示。

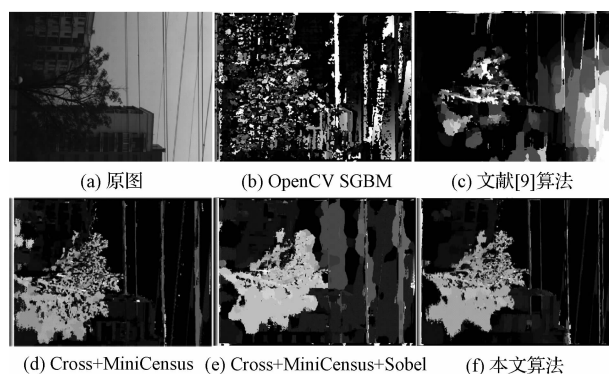


图 6 本文算法与其他算法比较

由图 6 和 7 可以看出,文献[2]提出的方法和 OpenCV 中采用的 SGBM 算法由于代价的测量采用的是 AD 方法,得到的深度图较差,特别是对于大面积灰度值比较接近的天空背景的匹配效果较差;由于 Sobel 算子产生的双边缘效果,将其进行代价加权并不能较好地实现边缘分离。

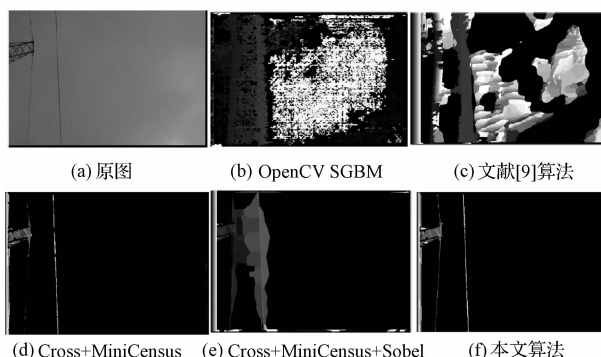


图 7 本文算法与其他算法比较

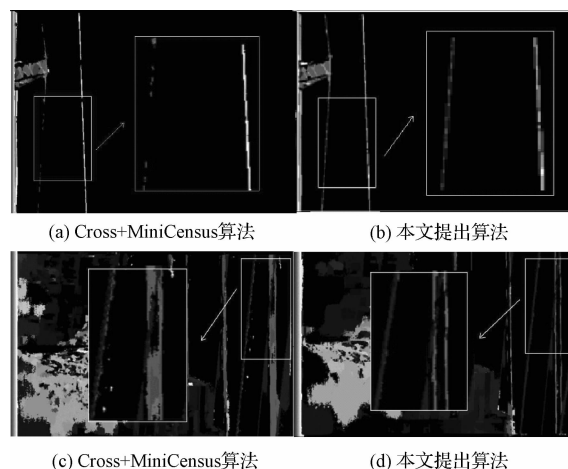


图 8 深度图边缘增强细节

对比图 6(d)和(f),经过 Tophat 滤波代价加权后的深度图少了线条粘连现象,得到的线条更加细致和完整。对比图 7(d)和(f),经过 Tophat 滤波代价加权后的深度图由于新添加了边缘信息,深度图中的线条没有出现断裂的情况,这说明把边缘信息在左右图比对的过程中也占有了一部分的权重,由于提前对原图的较弱边缘进行了增强,在深度图中这些较弱的边缘得到了保留。

5 FPGA 映射

本文所设计的基于 FPGA 的双目立体匹配的整体结构如图 9 所示。

首先将输入的双目图像进行在线图像校正,校正后的图像首先进行中值滤波预处理,之后将滤波之后的左图图像和右图图像分为 3 路,1 路分别进行自适应十字区域构建,第 2 路分别对输入图像做形态学 Tophat 变换^[15]。第 3 路对输入图像进行延时,等待 Tophat 变换完成。左右两路输入的延时图像和 Tophat 变换完成的图像此时分别进行 MiniCensus 变换,由于 Tophat 变换的结果和输入图像结果的 MiniCensus 变换分别为 6 bit,因此,MiniCensus 输出的字符串位数为 12 bit。得到 MiniCensus 变换的初始图像后,将左右两幅图像的 MiniCensus 变换结果进行在深度范围内进行遍历,并将每个深度遍历出来的两个当

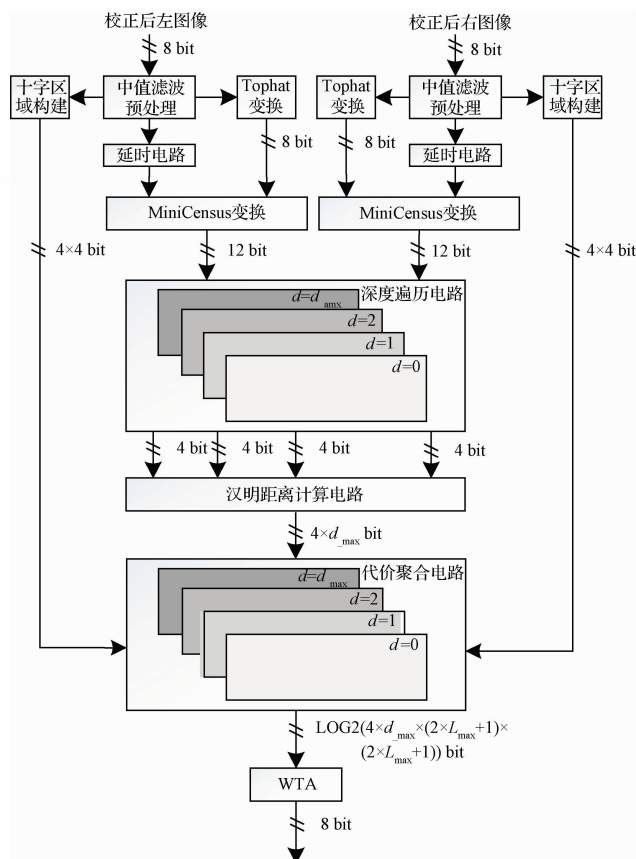


图9 FPGA设计流程

前深度的 MiniCensus 变换结果送入汉明距离计算电路进行初始化代价的计算。初始化代价计算完成之后,根据自适应臂长和指定的深度遍历值计算出当前像素点当前深度所对应的自适应臂长,并在代价聚合的过程根据计算出的自适应臂长计算出聚合代价的起始和结束位置。代价聚合电路负责对输入的汉明距离初始化代价进行加法运算,按照积分图像的思路,将聚合工作分为纵向聚合和横向聚合两部分。将所有视差等级范围内的聚合结果经过 WTA 选择电路,获得最终的视差预估值。

6 实验结果

6.1 测距实验

选取的是双目相机是灰度相机,分辨率为 1288×964 。出于计算时间和资源消耗的考虑,本文中的算法在测试时统一进行了下采样处理,实际有效分辨率为 644×482 。镜头焦距 f 为 16 mm,双目基线 T 为 150 mm,相机的单个点的像元大小为 A 是 3.75,帧频 30 Hz,如图 10 所示。

由双目视觉的三角测量原理,深度 d 和待测距离 Z 的关系如式(9)所示^[16]。

$$Z = \frac{f \times T}{A \times d} = \frac{16 \times 150}{3.75 \times d} = \frac{640}{d} \quad (9)$$

对测距范围内(10~30 m)的部分深度图进行了测距实验,测量结果如表 1 和图 11 所示。



图10 双目相机系统

表1 测距实验

编号	深度	计算距离	实测距离	误差
1	63	10.158 730 2	10.53	3.57
2	51	12.549 019 6	12.97	3.27
3	42	15.238 095 2	14.64	-4.08
4	35	18.285 714 3	19.12	4.34
5	31	20.645 161 3	21.61	4.46
6	28	22.857 142 9	23.83	4.08
7	26	24.615 384 6	23.48	-4.84
8	23	27.826 087	26.49	-5.05
9	21	30.476 190 5	32.25	5.49
10	20	32	33.67	4.96

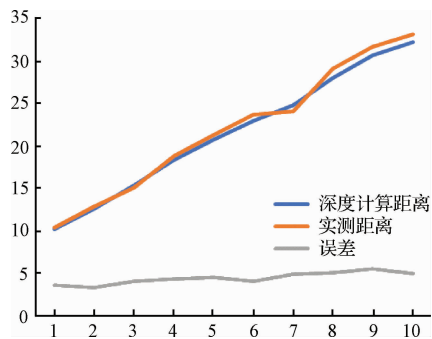


图11 实际测距与误差

由图 11 可知,所设计的系统测量误差在 5% 左右,并且随着测量距离的增加有上升的趋势。

6.2 算法不同应用场景实验

根据几种不同的应用场景,利用本文提出的算法做了大量的测试实验,如图 12~15 所示。

由实验结果看出,所提出的算法能够对无人机工作场景深度成像,不仅能够检测纯天空背景的弱目标线条,对低纹理天空背景成像正确,也能够普通场景如建筑物,

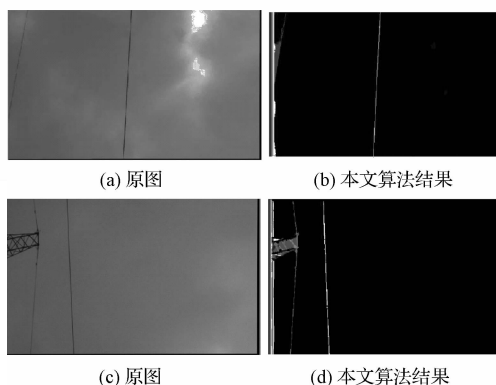


图 12 纯天空背景+弱目标线条应用场景测试结果



图 13 天空背景+普通场景+弱目标线条应用场景测试结果

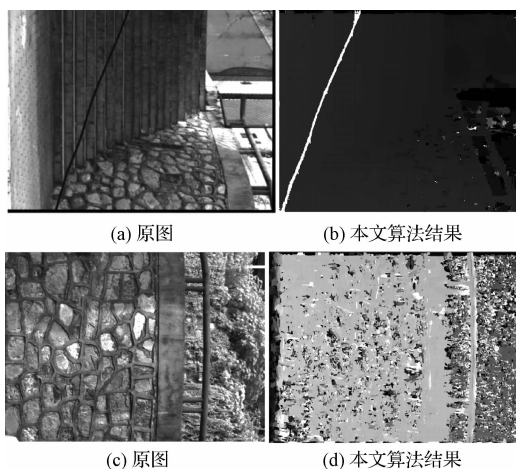


图 14 普通场景+弱目标线条应用场景测试结果

树木等常见的电力线背景下检出线条信息。与当前主要的匹配方法对比结果可以看出,本文所提出的算法对线状区域可以获得更加精确清晰的成像效果,更适用于无人机避障工作。

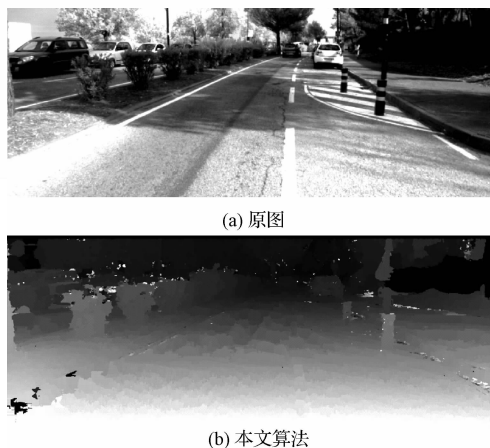


图 15 普通场景应用场景测试结果

7 结 论

提出了一整套完整的立体匹配算法流程,针对弱小线状的电线设计了基于 Tophat 变换与 MiniCensus 相结合的 (TCensus) 方法。实验结果验证了本文提出的算法能够满足无人机避障需求,在不同的实际工作场景下算法均可以有效地检测出弱线目标,相比传统方法具有一定的优势。

参 考 文 献

- [1] 王冲, 潘晨, 高浩然. 视觉显著性的自适应权重立体匹配算法[J]. 中国计量大学学报, 2016, 27(4): 435-440.
- [2] ZHANG K, LU J, LAFRUIT G. Cross-based local stereo matching using orthogonal integral images[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2009, 19(7): 1073-1079.
- [3] MEI X, SUN X, ZHOU M, et al. On building an accurate stereo matching system on graphics hardware[C]. IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, 2012: 467-474.
- [4] 王倩. 基于自适应权重的双目视觉立体匹配算法的研究与改进[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [5] MA N, MEN Y B, MEN C G, et al. Segmentation-based stereo matching using combinatorial similarity measurement and adaptive support region[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2017, 137: 124-134.
- [6] 程思培, 达飞鹏. 基于动态规划的分层立体匹配算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1665-1672.
- [7] MATTOCCIA S, MARCHIO I, CASADIO M. A compact 3D camera suited for mobile and embedded vision applications[C]. Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2014: 195-196.

(下转第 94 页)