

基于光照不变图像的阴影图像道路及导航线提取算法

段志刚^{1,3} 李 勇^{1,2} 王恩德¹ 田建东¹ 唐延东¹

¹中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016

²东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对有阴影情况下的道路及导航线提取问题,提出一种基于光照不变图像分割和投票函数的阴影道路图像道路及视觉导航线提取算法,该算法利用正交分解法获取彩色光照不变图像,并对其进行分割,通过构造的投票函数及道路判别准则提取道路区域,扫描道路定位点后对其进行最小二乘拟合提取导航线。该方法不需要大量样本进行学习。实验结果表明,所提算法与现有两种算法相比,在检测精度和速度上均具有明显优势,并且算法复杂度较低。算法能够有效地解决阴影环境下道路及导航线的提取问题。

关键词 机器视觉;光照不变图像;阴影道路图像;道路提取;导航线提取

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1215004

Road and Navigation Line Detection Algorithm from Shadow Image Based on the Illumination Invariant Image

Duan Zhigang^{1,3} Li Yong^{1,2} Wang Ende¹ Tian Jiandong¹ Tang Yandong¹

¹ State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

² College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For extracting the road and navigation line under the shadow environment, a road and visual navigation line extraction algorithm is proposed based on illumination invariant image segmentation and vote functions. The color illumination invariant image is acquired with orthogonal decomposition method. After the image segmentation, the road region is extracted through the structure of the vote function and road criterion. The navigation line is detected by scanning path location and the least squares fitting. The proposed method does not require a large number of samples to learn. Experimental results show that, compared with two existing algorithms, the proposed algorithm has obvious advantages in detection accuracy, speed and complexity, it can effectively solve the road and navigation line extraction under the shadow environment.

Key words machine vision; illumination invariant image; road image with shadow; road detection; navigation line detection

OCIS codes 150.1135; 150.4620; 110.4153; 100.4145

1 引 言

基于视觉的车辆、机器人以及农机具的自动导航系统已成为国内外智能交通、农业机械等领域的研究热点^[1]。道路检测及视觉导航路径的提取是视觉导航系统的关键步骤^[2]。道路的提取方法主要分为基于道路

收稿日期: 2016-06-28; 收到修改稿日期: 2016-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(61473280)、国家自然科学基金重点项目(61333019)

作者简介: 段志刚(1981—),男,博士研究生,主要从事图像光照建模及处理方法,机器人视觉方面的研究。

E-mail: duanzhigang@sia.cn

导师简介: 唐延东(1962—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事图像处理与模式识别,机器人视觉方面的研究。

E-mail: ytang@sia.cn(通信联系人)

边界信息和基于区域分割的道路提取算法。前者主要利用边缘^[3]、颜色^[4]等特征提取道路的边界线或消失点^[5],从而获取道路区域。而基于区域分割的算法^[6-7]主要通过对道路图像进行区域分割、聚类等方法,再利用道路的颜色、纹理等多特征信息融合,将道路区域进行分割。目前,对于非结构化道路提取算法较少,Kong等^[8]利用 Gabor 小波提取道路图像的纹理信息,从而进行消失点估计,然后基于消失点,并利用纹理、颜色等信息提取道路区域。利用消失点和道路边界线信息提取道路区域的这类算法复杂度高、实时性较差,因此,针对非结构化道路进行高效的道路检测具有重要意义。

近年来,关于乡村及农业道路的导航线提取已有大量研究。大多数农业道路的视觉导航线提取,通常选择颜色空间模型进行图像灰度化,再利用直线扫描的方式检测作物导航线^[9]。Torii^[10]利用色调、饱和度、亮度(HIS)彩色空间,并通过水平扫描线,利用最小二乘法提取导航路径;高国琴等^[11]利用颜色特征信息,引入 K-means 算法对图像进行聚类分割,从而利用 Hough 变换拟合出导航线。但是,当前的导航线提取算法在稳健性和实时性上仍然存在很多问题。

此外,道路场景中经常存在的阴影情况会给视觉任务带来诸多不利影响,造成图像模糊,破坏灰度值的连续性。视觉导航的研究成果大多集中在普通环境下的路径识别,因此针对阴影环境下的路径识别研究相对较少。然而在实际的环境中,植物和车辆等均会产生阴影,对道路和视觉导航线的提取造成较大的干扰,使导航系统的可靠性下降。

因此,针对有阴影的乡村或城郊道路图像,本文提出一种道路提取及视觉导航线检测的算法,通过利用提出的基于正交分解获取彩色光照不变图像进行分割的方法,实现对阴影道路图像的有效分割;然后基于投票函数的方法对大津法(Otsu)和 K-means 聚类分割结果进行感兴趣区域提取,进而利用子区域分析方法提取道路区域;最后,通过固定步长扫描的方式获取导航线定位点,并利用最小二乘拟合提取视觉导航线。

2 阴影道路图像的道路及导航线提取

图 1 为所提出的阴影道路图像视觉导航线提取算法的流程图,该算法主要包括以下步骤:

- 1) 基于正交分解法对阴影道路图像提取彩色光照不变图像;
- 2) 基于大津法和 K-means 算法对彩色光照不变图像进行分割及形态学处理;
- 3) 利用投票函数对图像分割后的结果求取感兴趣区域;
- 4) 对感兴趣区域的子区域进行分析和道路区域提取;
- 5) 基于扫描的方式获取导航线定位点;
- 6) 利用最小二乘拟合对定位点提取视觉导航线。

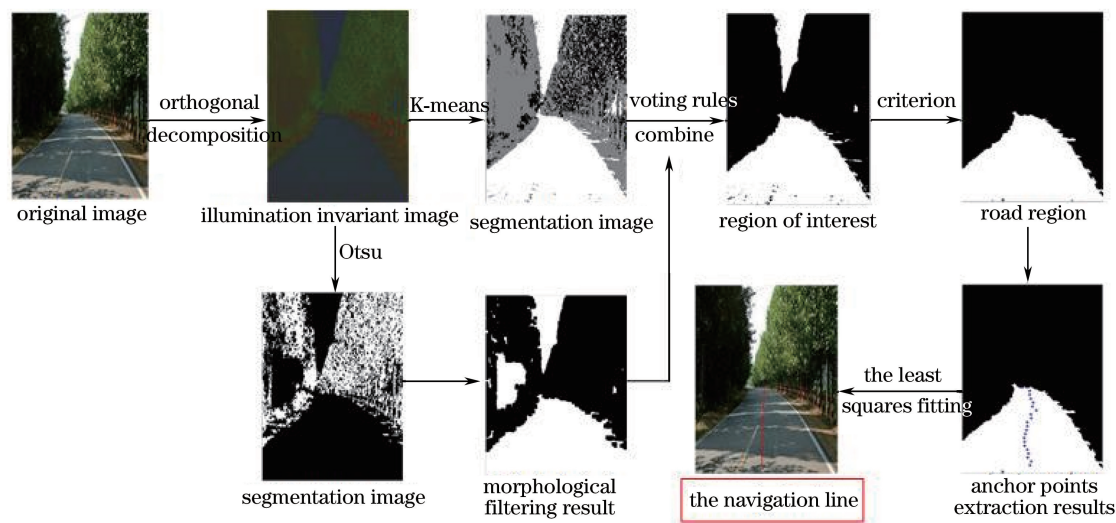


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

2.1 基于彩色光照不变图像的阴影道路图像分割

2.1.1 基于正交分解的彩色光照不变图像提取

对于室外阴影图像,具有一致反照率的阴影区域和非阴影区域存在线性关系^[12]。这种线性关系可简化为

$$\log F_H = \log K_H / 2.4 + \log f_H, \quad (1)$$

式中 F_H 为非阴影区域 RGB 色彩空间中的线性 RGB 三刺激值, f_H 为相应的阴影区域的线性 RGB 三刺激值, $H = \{R, G, B\}$, K_H 为不依赖于波长的参数,其与物体本身的反照率无关,仅由光照条件决定。

根据文献[13-14],对(1)式建立 RGB 三通道的线性方程组,根据其奇异特性,得到其解空间由自由度为 1 的自由解和任一特解构成。对于方程组的任意解 u ,可定义如下正交分解

$$u = u_p + \alpha u_0, \quad (2)$$

式中 u_0 为归一化的自由解, $\alpha \in R$, u_p 为方程组的特解。对于一幅给定的图像,其自由解 u_0 由光照环境参数唯一确定,且方向由光照变化的比率决定。 u_p 满足 $u_p \perp u_0$,为该方程的唯一特解,它消除了不同光照造成的影响。

图像经过正交分解,得到的特解 u_p 为彩色光照不变图像,记为 I_p 。图 2(a)给出了几种不同的阴影道路图像,经过正交分解,得到图 2(b)所示的彩色光照不变图像。可见,彩色光照不变图像已经滤除了大部分阴影区域,有利于后续的道路分割。



图 2 彩色光照不变图像提取

Fig. 2 Extraction of color illumination invariant images

2.1.2 基于大津法和 K-means 的道路图像分割

由图 2 中的彩色光照不变图像可知,道路区域与其他区域具有一定的区分,因此,首选大津法^[15]对光照不变图像进行阈值分割。具体步骤为:对于彩色光照不变图像 I_p [图 3(a)],先将其变换为灰度图像 I_{pg} ,然后,利用大津法对 I_{pg} 进行分割,得到分割的二值图像 I_{pb} [图 3(b)]。大津法是基于像素的分割,分割后会产生一些孤立点,且分割后的道路区域为黑色区域。为了使道路区域分割的更加完整,通过形态学的方法滤除

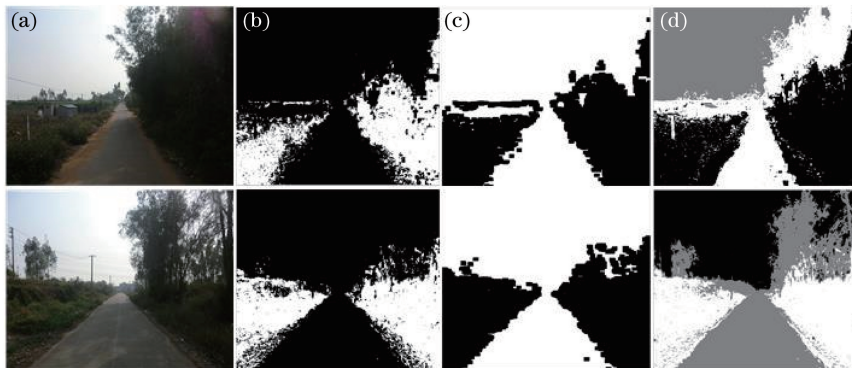


图 3 基于彩色光照不变图像的分割结果。(a) 彩色光照不变图像;(b) 二值图像;(c) 大津法;(d) 大津法和 K-means

Fig. 3 Segmentation results based on color illumination invariant images. (a) Color illumination invariant images;

(b) binary images; (c) Otsu; (d) Otsu and K-means

孤立点,并利用 3×3 的矩形模板进行腐蚀操作,再对图像取反,得到分割结果 I_{ps} [图 3 (c)]。

通过大津法分割后的图像,有时并不能将道路区域单独分割出来,会存在如图 3 (c)所示的情况,道路区域并不是独立的封闭区域。因此,采用基于 K-means 方法对光照不变图像进行聚类分割,并与大津法分割的结果相结合,辅助进行道路区域的提取。具体步骤为:选取 I_p 的两个互不相关的分量 I_{p1} 和 I_{p2} 构成 I'_p 用于聚类分割,通过 K-means 聚类^[16]方法,将图像聚为 3 类,即 $I'_p = \sum_{i=1}^3 R_i$,得到如图 3 (d)所示的聚类分割结果。由于 K-means 聚类分割后的各个区域并不容易区分,并且道路聚类的区域中存在大量非道路区域,因此,通过与大津法分割结果相结合,有利于更加准确地提取道路区域。

2.2 基于投票函数的道路区域提取

根据 K-means 聚类的结果,并结合大津法分割结果,提出道路区域估计的投票函数,针对聚类的每个区域 $R_i (i=1,2,3)$,分别设置投票函数。

1) 面积最大投票规则:大津法分割结果与聚类分割的 3 个区域重合面积较大的区域一般为道路区域,设置投票函数为

$$V_{si} = \text{sum} [\text{sum}(I_{pb} \cap R_i)], \quad i=1,2,3, \quad (3)$$

式中 $\text{sum}(\cdot)$ 为求和函数。

2) 底部采样投票规则:道路区域一般会在图像的底部,因此,通过对聚类后的 3 个区域的底部进行采样,设置投票函数为

$$V_{bi} = \text{sum} [\text{sum}(I_{pb} \cap R_i \cap S)], \quad i=1,2,3, \quad (4)$$

式中 S 为底部采样的区域,其采样区域设置为图像高度 T_1 至 T_2 的区域。

为了使两个投票函数具有相同的权重,对投票函数进行了归一化处理。因此,道路区域估计的投票函数为

$$V_i = V_{si} / \max(V_{si}) + V_{bi} / \max(V_{bi}), \quad i=1,2,3, \quad (5)$$

式中 $\max(\cdot)$ 为取最大值的函数。根据投票函数,选出道路估计的感兴趣区域为

$$I_{roi} = R_n \cap I_{pb}, n = \arg \max(V_i), \quad i=1,2,3. \quad (6)$$

根据上述投票方法,可以得到图 1 中的感兴趣区域,但是,该区域中存在一定的干扰小区域,并不全是道路区域,因此,还需要进一步地选取。

对于感兴趣区域的每个封闭区域 L_i ,计算其面积 S_{Li} 和重心 C_{Li} ,其中, $I_{roi} = \sum_{i=1}^m L_i$, m 为封闭区域的个数。道路选取的规则为

$$S_{Li} \geq \max(S_{Li}) * T_s \cap C_{Li} \geq T_c, \quad (7)$$

式中 T_s 和 T_c 分别为区域面积和重心的经验阈值。当感兴趣区域 I_{roi} 中的每个封闭区域满足(7)式时,则将其定义为道路区域,通过对面积较大的前 5 个区域进行判别,得到最终的道路区域 I_{road} ,如图 1 中的道路区域所示。

2.3 导航线提取

通常情况下,车辆行驶时摄像头拍摄视野的正前方为车辆行驶的方向。在智能导航中,车辆根据道路的导航线实时调整行驶方向来实现自主导航。对获取的道路区域提取中心线,并将其定义为导航线。

首先,选取道路导航定位点。为了提高算法效率,对道路区域按照固定步长 S_T 进行扫描,获取每个扫描的道路左右边界点坐标,并根据左右边界点坐标计算中点,得到整个道路区域的导航线定位点集 $Q(x, y)$,如图 1 所示的定位点图像中的蓝色点集。

然后,对导航线定位点集进行最小二乘拟合,得到如图 1 所示的红色导航线,该直线的方程为

$$y = ax + b, \quad (8)$$

式中 a, b 分别为最小二乘拟合所获得的拟合系数。

2.4 参数分析

由于该算法中的道路提取和导航线提取的参数值取值在一定范围内时,参数值的变化对算法的精度影响较小。用于道路区域判别的参数均是根据先验知识所限定的阈值范围,因此,具有普遍的适用性,对于大多数道路图像具有较好的稳定性。为了使图像大小变化不影响检测结果,动态调整其他受图像大小影响的

参数,提高算法的稳健性,将算法的参数选择规则描述为:图像归一化后的大小为 $M \times N$,则图像采样区域参数 $T_1 = M/2$ 和 $T_2 = M/2 + d$, d 取 5~20 均可,参数重心的位置 $T_c = (0.75 \sim 0.85) \times M$,面积比例阈值(不受图像大小变化的影响) $T_s = 0.25 \sim 0.45$,扫描步长参数 $S_T = (0.02 \sim 0.06) \times M$ 。

3 实验结果及分析

为了验证本文算法效果,通过网络和作者拍摄的图像,构建了一个包含 45 幅道路图像的数据集(数据集及实验结果可在 <http://www.newneu.neu.edu.cn/?p=1477> 下载),数据集按照道路的特点划分为 8 幅有阴影的二级公路图像、20 幅有阴影乡村公路图像、10 幅有阴影的田间道路图像和 7 幅无阴影的乡村道路图像;若按照道路有无标志线可划分为 5 幅包含车道线的阴影道路图像和 40 幅非结构化的复杂道路;若按照道路的弯曲程度可划分为 15 幅弯道和 30 幅直道图。为了方便对本文算法进行测试和统计处理,并更加公平有效地与其他算法进行比较,首先将图像大小归一化为 $360 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,并在 8 GHz 的 PC 机 Windows7 环境下,通过 Matlab 2014a 进行仿真实验。实验中的参数选取为 $T_1 = 175$ 、 $T_2 = 185$ 、 $T_c = 300$ 、 $T_s = 0.3$ 和 $S_T = 10$ 。

为了验证所提道路提取算法的性能,与文献[8]算法和文献[7]算法在道路图像数据集中进行比较。图 4 给出了三种算法在不同道路场景的道路提取结果。图 4(a)~(d)中的第一行为本文算法道路提取结果;第二行和第三行分别为文献[8]算法和文献[7]算法的结果。通过对比可知,本文算法可以精确地提取道路区域,尤其对于有阴影的弯道和直道提取效果较好;而文献[8]算法虽然受阴影影响较小,但存在过检或漏检严重的情况;文献[7]受阴影影响最严重,无法进行阴影道路的有效提取,且该算法提取出的道路区域存在大量漏检和少量过检情况,尤其对于阴影较为复杂或者路面区域复杂的情况,该算法几乎无法提取出道路区域。通过综合对比可知,本文算法对于有阴影、有干扰等情况的复杂道路提取效果明显优于其他两种算法。

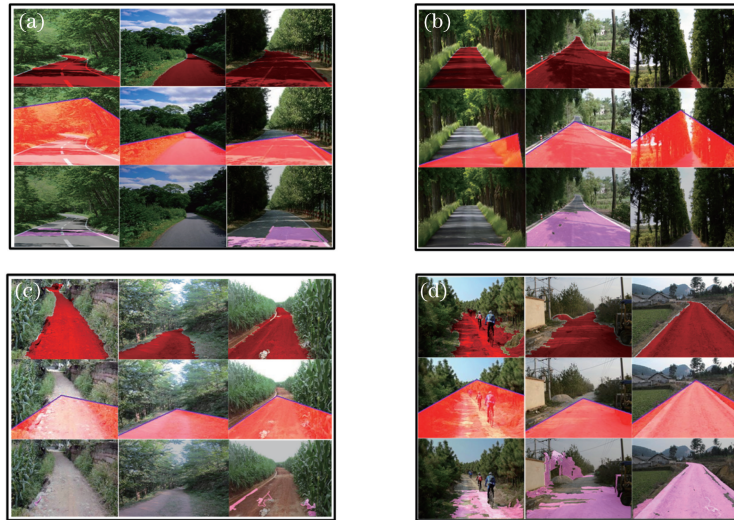


图 4 三种算法对于多种情况道路提取结果对比图。(a) 弯道阴影道路; (b) 复杂阴影直道;
(c) 无阴影复杂道路; (d) 特殊情况阴影道路

Fig. 4 Comparison of road extraction results with different roads under different conditions using three kinds of algorithm.

(a) Curve road with shadow; (b) straight road with complicate shadow; (c) road without complicate shadow;
(d) special shadow road

为了定量地评价本文算法的道路提取效果,统计本文算法、文献[8]算法和文献[7]算法对测试数据集中的 45 幅道路图像的道路提取结果。采用道路检测的查全率(TPR)和错误率(FPR)对算法的精确度进行分析,计算方法^[17]为

$$\begin{cases} R_{\text{TPR}} = T_P / (T_P + F_N) \\ R_{\text{FPR}} = F_P / (F_P + T_N) \end{cases}, \quad (9)$$

式中 T_P 为提取正确的道路区域的像素点总个数, F_P 为将非道路区域判别为道路区域的像素点总个数, F_N

为道路区域的像素点被判断为非道路区域的像素点总个数, T_N 为判断为非道路区域的像素点总个数。

三种算法检测精度的统计结果如图 5 所示。由图 5(a)可知,本文算法的 R_{TPR} 值明显高于其他两种算法,文献[8]算法和文献[7]算法都存在 R_{TPR} 为 0 或接近于 0 的情况,即这两种算法在对应的道路图像中未提取到道路区域;本文算法的平均 $R_{TPR} = 90.34\%$,明显高于文献[8]算法和文献[7]算法的 72.77% 和 36.03% ;由图 5 (b)可知,本文算法的 R_{FPR} 明显低于其他两种算法,且均值为 1.85% ,文献[8]算法和文献[7]算法的平均 R_{FPR} 分别为 3.17% 和 15.57% ,道路检测的平均 R_{FPR} 明显优于其他两种算法。可见,本文算法的道路检测效果明显优于文献[8]算法和文献[7]算法。

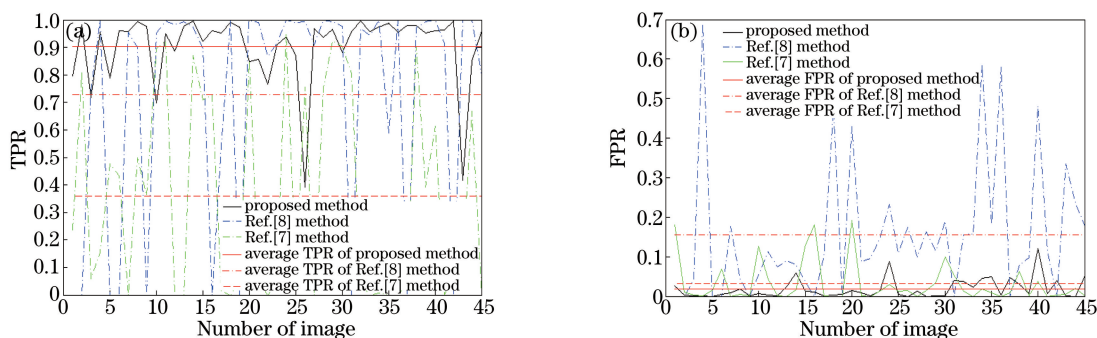


图 5 道路检测结果精度对比。(a) 查全率; (b) 错误率

Fig. 5 Accuracy contrast of road detection results. (a) TPR; (b) FPR

为了定量地评价本文道路提取算法的效率,对测试数据集中的 45 幅道路图像利用不同算法提取道路的时间进行统计,运行时间的统计及对比结果如图 6 所示。从运行时间的数量级上看,本文算法所耗时间明显小于其他两种算法。

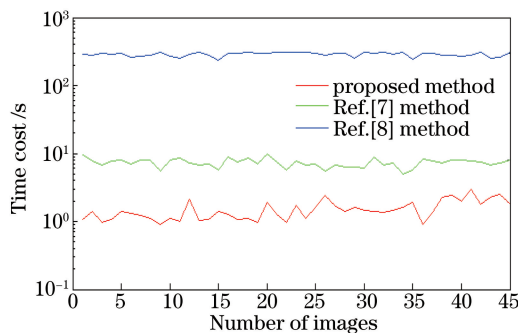


图 6 道路提取运行时间对比

Fig. 6 Run time comparison of road extraction

为了更详细地分析三种道路提取算法的效率,对三种算法的运行时间利用不同的评价指标进行定量分析,结果如表 1 所示。可见,本文算法的运行时间最大值与最小值均比其他两种算法具有明显的优势,从平均运行时间上看,本文算法的速度是文献[7]算法的 5 倍以上,是文献[8]算法的 191 倍以上。由运行时间的标准差可知,本文算法的标准差明显低于其他两种算法,且算法运行更稳定。

表 1 三种算法的运行时间对比

Table 1 Run time comparison for three kinds of algorithm

Method	Proposed method	Ref.[8] method	Ref.[7] method
Time range (second per image)	0.91~3.03	238.26~313.29	5.05~9.89
Average time (second per image)	1.51	287.13	7.30
Standarddeviation(second per image)	0.50	3.06	1.06

为了体现本文算法的效果,提取测试数据集中道路图像的视觉导航线,图 7 给出了不同情况下的导航线提取结果。由图 7 可知,本文算法可以准确地提取导航线。

图 8 给出了本文算法失效的三个例子。图 8(a)为道路图像中树木与道路区分度较低,本文算法并未准

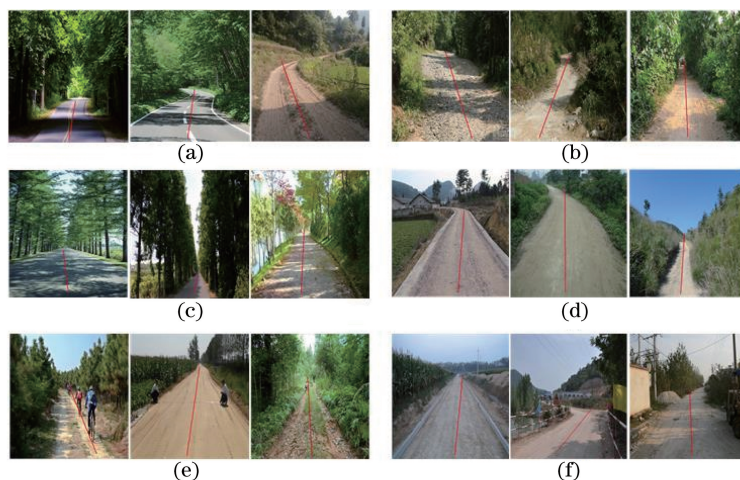


图 7 视觉导航线提取结果。(a) 阴影弯道；(b) 复杂阴影弯道；(c) 复杂阴影直道；
(d) 无阴影乡村道路；(e) 行人干扰的乡村道路；(f) 不同背景乡村公路

Fig. 7 Visual navigation line extraction results. (a) Curve road with shadow; (b) curve road with complicate shadow;
(c) straight road with complicate shadow; (d) country road without shadow; (e) country road with pedestrian;
(f) country road with different backgrounds

确地提取道路区域,且存在大量的过检测,因此,导航线的提取效果不够准确;图 8(b)中道路区域与沿着道路的台阶无法区分,即道路区域与周围非道路的区域差异较小,造成道路的过检测,从而影响了导航线的准确性;图 8(c)中图像阴影差异较大,彩色光照不变图像提取的效果并不理想,造成后续的分割效果较差,从而无法获取道路区域,不能提取导航线。

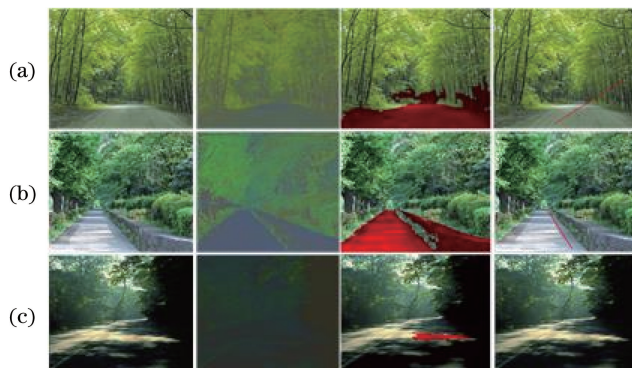


图 8 本文算法失效的三个例子

Fig. 8 Three failure examples of the proposed algorithm

4 结 论

针对复杂的道路场景,尤其是有阴影的道路图像,提出了一种道路提取及视觉导航线检测的算法。首先通过正交分解的方法获取了光照不变图像,并利用大津法和 K-means 聚类分割方法实现了阴影道路图像的有效分割,减少了道路区域受阴影干扰造成的过分割或欠分割等情况;然后,通过构建投票函数对分割结果进行投票并提取感兴趣区域,利用子区域分析方法提取道路区域,在有效获取道路区域的同时减少了算法的计算量;最后,利用最小二乘拟合方法对道路区域扫描的导航线定位点进行拟合,得到最终结果。本文算法能够有效地提高导航线提取的速率,避免了一些干扰点的影响。

仿真实验证明,本文算法在道路提取的精度和速率上,明显优于已有的其他两种算法,且无需大量样本学习,视觉导航线提取结果效果较好;该算法对有阴影、无阴影道路场景以及复杂背景的情况同样适用,具有较好的普适性,能有效提高视觉导航系统对阴影环境的适应性。

参 考 文 献

- 1 Liu Haitao, Guan Shengxiao, Qin Liang, *et al.* Study on vision-based navigation system of intelligent-robot[J]. Computer Applications and Software, 2010, 27(12): 218-220.
刘海涛, 关胜晓, 秦 亮, 等. 智能机器人视觉导航系统的研究[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(12): 218-220.
- 2 Hua Xijun, Liao Qian, Chen Meiyun, *et al.* Road recognition for vision navigation system of tractor in shadow environment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(4): 189-193.
华希俊, 廖 茜, 陈美云, 等. 阴影环境下拖拉机视觉导航路径识别方法研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(4): 189-193.
- 3 He Y H, Wang H, Zhang B. Color-based road detection in urban traffic scenes[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2004, 5(4): 309-319.
- 4 Tian Zheng, Xu Cheng, Mi Chao, *et al.* Road segmentation based on vanishing point and principal orientation estimation [J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(4): 762-772.
田 峥, 徐 成, 米 超, 等. 基于消失点和主方向估计的道路分割算法[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(4): 762-772.
- 5 Ding Weili, Li Yong, Wang Wenfeng, *et al.* Vanishing point detection algorithm for urban road image based on the envelope of perpendicular and parallel lines[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1015002.
丁伟利, 李 勇, 王文锋, 等. 基于垂直线包络和平行线对的城市道路图像消失点检测算法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1015002.
- 6 Gao D Z, Li W, Duan J M. A practical method of road detection for intelligent vehicle[C]. 2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics Shenyang, China August, 2009: 980-985.
- 7 Wang Wenfeng, Ding Weili, Li Yong, *et al.* An efficient road detection algorithm based on parallel edges[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0715001.
王文锋, 丁伟利, 李 勇, 等. 一种高效的基于平行边缘的道路识别算法[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0715001.
- 8 Kong H, Audibert J Y, Ponce J. General road detection from a single image[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(8): 2211-2220.
- 9 Li Yong, Ding Weili. Navigationline of vision extraction algorithm based on dark channel[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0215001.
李 勇, 丁伟利. 基于暗原色的农机具视觉导航线提取算法[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0215001.
- 10 Torii T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1-2): 133-153.
- 11 Gao Guoqin, Li Ming. Navigating path recognition for greenhouse mobile robot based on K-means algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 25-33.
高国琴, 李 明. 基于 K-means 算法的温室移动机器人导航路径识别[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 25-33.
- 12 Tian J, Sun J, Tang Y. Tricolor attenuation model for shadow detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 39(2): 195-201.
- 13 Qu L Q, Tian J D, Han Z, *et al.* Pixel-wise orthogonal decomposition for color illumination invariant and shadow-free image[J]. Optics Express, 2014, 23(3): 2220-2239.
- 14 Duan Zhigang, Qu Liangqiong, Tian Jiandong, *et al.* Outdoor illumination shadow detection based on orthogonal decomposition[J]. Acta Optica Sinica, 2016. 36(8): 0815002.
段志刚, 屈靓琼, 田建东, 等. 基于正交分解的室外光照阴影检测[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0815002.
- 15 Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- 16 Mac Queen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations[C]. Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1967, 1(14): 281-297.
- 17 Álvarez J M, López A M, Gevers T, *et al.* Combining priors, appearance, and context for road detection[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(3): 1168-1178.