

基于主动轮廓模型的自动导引车视觉导航

林桂潮¹ 邹湘军² 张青¹ 熊俊涛²

(1. 滁州学院机械与汽车工程学院, 滁州 239000;

2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 为解决工厂或农业非线性光照环境下视觉导航算法鲁棒性和实时性差的问题, 提出基于主动轮廓模型的导航标识线检测与跟踪算法。首先用多项式曲线模型描述单向标识线, 导航问题等价于计算多项式曲线参数; 然后依据标识线颜色和边缘等特征, 给出关于多项式曲线的主动轮廓模型的内、外部能量函数; 最后将能量函数简化为非线性最小二乘问题, 应用高斯牛顿法和 Armijo - Goldstein 不精确一维搜索方法求解曲线最优参数。采用自制视频和自主小车测试算法, 结果表明: 该算法对非线性光照条件下直线和弯曲标识线的导航正确率为 98.96%, 运算时间为 40.18 ms。试验验证了该算法的鲁棒性和实时性。

关键词: 自动导引车; 主动轮廓模型; 高斯牛顿法; 视觉导航

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0020-07

Visual Navigation for Automatic Guided Vehicles Based on Active Contour Model

LIN Guichao¹ ZOU Xiangjun² ZHANG Qing¹ XIONG Juntao²

(1. College of Mechanical and Automotive Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China

2. Key Laboratory of Key Technology on South Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Lane detection and tracking algorithm based on active contour model was proposed to solve the poor robustness and real-time problem for vision navigation under factory or agricultural nonlinear illumination conditions. First of all, it was illustrated that navigation problem was equivalent to calculation of polynomial curve parameters, which could describe the navigation lanes. Secondly, the external energy function of active contour model was investigated, including three energy terms. The first energy term was about the Euclidean distance between lane colors and colors on one side of polynomial curve, by minimizing the first energy term could attract polynomial curve to navigation lanes. The second energy term was about the edge features, which could attract polynomial curve to lane edges. The third energy term was about the position difference of polynomial curve between adjacent frames, which could limit curve to change abruptly. Finally, the energy function was simplified to a nonlinear least squares problem, and the Gauss - Newton method as well as the Armijo - Goldstein inexact line search method were used to solve this problem. Home video and independent car were tested, the result showed that the algorithm achieved a navigation accuracy of 98.96% for both the straight lane and bending lane under nonlinear illumination, with average processing time of 40.18 ms, and the independent car could walk along the navigation lane successfully. Experiment result showed that the algorithm was robust and real-time.

Key words: automatic guided vehicles; active contour models; Gauss-Newton method; visual navigation

引言

自动导引车 (Automatic guided vehicle, AGV) 是

广泛应用于农业、汽车和家电等行业的物料输送移动机器人^[1-2], 近年来视觉导航技术以其灵活性高、成本低、适用范围广等特点在 AGV 应用中逐渐引起

收稿日期: 2016-05-17 修回日期: 2016-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571568)、广州市科技计划项目(201510010140)和广东省工程中心项目(2014B090904056)

作者简介: 林桂潮(1989—), 男, 助教, 主要从事视觉导航和视觉工业机器人研究, E-mail: guichaolin@126.com

通信作者: 邹湘军(1957—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事智能设计和系统仿真研究, E-mail: xjzou1@163.com

关注^[3-4]。视觉导航是用视觉算法来识别铺设在底面上的特殊标识线,生成导航指令,其主要问题在于视觉算法实时性和鲁棒性差,特别是工厂或农业的非线性光照因素制约了视觉导航效果^[5]。

视觉导航方法大致分为两类:基于颜色分割的方法和基于曲线模型的方法。基于颜色分割的方法是根据标识线与背景颜色特征差异,使用聚类^[6]或阈值分割,结合贝叶斯决策^[7]、伪彩色空间^[8]或小波分析^[9]等方法来提取标识线感兴趣区域。此类方法在不确定性环境下,如非线性光照污染,鲁棒性将降低^[5]。

基于曲线模型方法是在给定标识线曲线模型的前提下,利用少量标识线边缘点来估计曲线参数^[10-13]。主动轮廓模型是该方法中的一种鲁棒算法^[14-16],它通过图像力迫使参数曲线向图像显著特征移动变形,其关键问题是需依据具体环境确定图像外力,以及需提供合适初值避免陷入局部解^[17],因此相关算法的应用还需改进。

为克服非线性光照污染条件下视觉导航存在的问题,本文提出基于主动轮廓模型的导航标识线检测与跟踪算法:提出使用多项式曲线来表示导航标识线模型;提出适用于导航标识线特点的主动轮廓模型的内、外部能量函数;将主动轮廓模型的能量函数抽象为非线性最小二乘问题,再用高斯牛顿法求解;通过试验验证算法在光照污染下的实时性和鲁棒性。

1 算法原理

1.1 导航标识线模型

工业应用中,AGV 一般采用由直线、圆弧或抛物线等简单线段组成的结构化人工标识线。人工标识线宽度较小,通过检测与跟踪左边缘(或右边缘)即可实现导航,如图 1 所示。在不考虑交叉十字路线的情况下,可用多项式曲线模型来描述左边缘(或右边缘),因此导航标识线检测与跟踪问题等价于求解多项式曲线参数。令第 t 帧图像中的多项式曲线为

$$x_i(y; \theta_i) = a_{i,1} + a_{i,2}y + \dots + a_{i,n}y^{n-1} \quad (y \in [0, h]) \quad (1)$$

其中 $\theta_i = (a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,n})$

式中 n ——曲线阶数 θ_i ——曲线参数

h ——数字图像高度

本文将 $x_i(y; \theta_i)$ 简化为 x_i 。

1.2 主动轮廓模型

主动轮廓模型是一种目标提取方法,它用 1 条能量曲线来表示目标轮廓,在曲线内力和图像外力

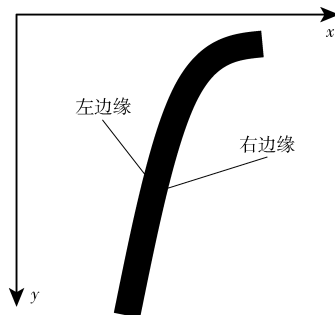


图 1 AGV 导航标识线

Fig. 1 Navigation lane of AGV

作用下,能量曲线不断变形和移动,最终被吸附到邻近的显著特征上。主动轮廓模型能量函数为^[17]

$$E(\theta_i) = E_{\text{int}}(\theta_i) + E_{\text{ext}}(\theta_i) \quad (2)$$

$$\text{其中 } E_{\text{int}}(\theta_i) = \int_0^h (\alpha |x_i'|^2 + \beta |x_i''|^2) dy \quad (3)$$

$$E_{\text{ext}}(\theta_i) = E_{\text{color}} + E_{\text{edge}} + E_{\text{speed}} \quad (4)$$

式中 E_{int} ——控制曲线弯曲程度的内部能量

E_{ext} ——由图像性质产生的外部能量

x_i', x_i'' ——曲线 x_i 对 y 的 1 阶导数和 2 阶导数,对应着曲线斜率和曲率

α, β ——控制曲线斜率和曲率权重因子

$E_{\text{color}}, E_{\text{edge}}$ ——关于图像颜色和边缘特征的能量项,吸引曲线到标识线边缘上

E_{speed} ——关于图像运动速度的能量项,控制曲线移动速度

1.2.1 颜色能量 E_{color}

导航标识线颜色均一,如本文所用标识线是黑色的,当主动轮廓模型捕获到正确的标识线左边缘(或右边缘)时,则多项式曲线右侧(或左侧)的图像颜色便与均一的标识线颜色相同,即正确的多项式曲线单位法向量方向(图 2)的图像颜色与标识线颜色的欧氏距离应最小。基于此,给出能量项

$$E_{\text{color}} = w_c \int_0^h \int_0^w (I_t(x_i + in_x, y + in_y) - u_1)^2 didy \quad (5)$$

$$\text{其中 } (n_x, n_y) = \left(\mp \frac{1}{\sqrt{1 + (x_i')^2}}, \pm \frac{x_i'}{\sqrt{1 + (x_i')^2}} \right) \quad (6)$$

式中 w_c ——权重因子

I_t ——第 t 帧灰度图像

w ——标识线像素宽度

u_1 ——标识线灰度

(n_x, n_y) ——曲线单位法向量

(n_x, n_y) 按式(6)计算,检测左边缘时取上方符号,检测右边缘时取下方符号。

导数可用有限差分算子来计算,如 Sobel 算子;亚像素位置的图像灰度值需进行图像插值计算,本文均使用双线性插值法。

(2) 经实验发现,一维搜索方法对算法计算效率和正确率影响很大。使用 Armijo - Goldstein 不精确一维搜索方法^[19],在确保每次迭代都有满意下降量的条件下,能够减少计算量。

(3) 若初值 $\theta_i^{(0)}$ 选择不当,高斯牛顿法易陷入局部解,因此需解决初始化问题。提出以下初始化策略:若 $t=1$,由人机交互获取路线上 $n+1$ 个点, n 为曲线阶数,再用这些点直接解算出曲线参数作为第 t 帧图像的初值;若 $t>1$,考虑相邻两帧图像相对一致,第 t 帧图像初值取为第 $t-1$ 帧图像的结果,即 $\theta_i^{(0)} = \theta_{i-1}$ 。该策略显著提高了标识线检测与跟踪的正确率。

(4) 算法终止准则为:算法达到最大迭代次数 k_{\max} ,或者 $|s_k \mathbf{h}|$ 小于给定阈值。

假设曲线参数数量为 n ,在不考虑一维搜索计算量的前提下,该优化方法每次迭代的总时间复杂度是 $O(n^3 + 2nS^2 + n^2S + nS + n^2)$ 。表 1 给出了每次迭代过程中的时间复杂度。

表 1 每次迭代过程的时间复杂度

Tab. 1 Time complexity of each iteration

步骤	1	2	3	4
时间复杂度	$O(S^2)$	$O(nS)$	$O(n^3 + 2nS^2 + n^2S + nS + n^2)$	$O(n)$

1.4 坐标转换

视觉导航所得曲线需根据摄像机位置、镜头参数进行空间转换,得到世界坐标系下的轨迹图,才能指导 AGV 运行。将世界坐标系放置在平面标定板上,标定板平放在地面上,如图 3 所示。根据文献^[20]可得曲线任意 (x_t, y) 在世界坐标系上的二维坐标点为

$$\begin{cases} x_w = \frac{(h_{14} - h_{34}x_t)(h_{32}y - h_{22}) - (h_{32}x_t - h_{12})(h_{24} - h_{34}y)}{(h_{31}x_t - h_{11})(h_{32}y - h_{22}) - (h_{32}x_t - h_{12})(h_{31}y - h_{21})} \\ y_w = \frac{(h_{14} - h_{34}x_t)(h_{31}y - h_{21}) - (h_{31}x_t - h_{11})(h_{24} - h_{34}y)}{(h_{32}x_t - h_{12})(h_{31}y - h_{21}) - (h_{31}x_t - h_{11})(h_{32}y - h_{22})} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $h_{11}, h_{12}, h_{14}, h_{21}, h_{22}, h_{24}, h_{31}, h_{32}, h_{34}$ 为单应矩

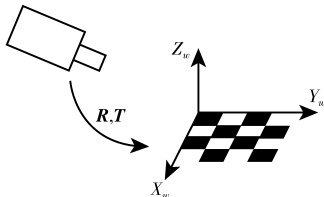


图 3 坐标转换原理

Fig. 3 Principle of coordinate transform

阵 \mathbf{H} 的元素, $\mathbf{H} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$, 其中, $[\mathbf{R} \ \mathbf{T}]$ 是摄像机与标定板间的位置矩阵, \mathbf{K} 是镜头内参数矩阵, 均可通过标定得到^[21]。

1.5 算法步骤

AGV 运动过程中连续采集图像形成视频, 本文给出针对视频流的导航标识线检测与跟踪算法步骤:

(1) 初始化主动轮廓模型的权重 $\alpha, \beta, w_c, w_e, w_g$ 和 w_p , 标识线像素宽度 w 和标识线灰度 t_1 , 给定变量 $t=1$ 和多项式曲线阶数 n 。

(2) 打开摄像头。

(3) 读取视频流第 1 帧图像, 使用交互界面获取图像上 $n+1$ 点, 利用这些点直接解算多项式曲线的参数作为第 1 帧图像的初值 $\theta_i^{(0)}$ 。

(4) 检测与跟踪: ①使用高斯牛顿法求解第 t 帧图像的主动轮廓模型得到曲线参数 θ_t , 再将曲线进行坐标转换, 得到世界坐标系下的轨迹图。②判断摄像头是否关闭, 若是, 结束程序, 否则跳转到步骤③。③令 $t=t+1$, 读取视频流第 t 帧图像, 令曲线初值 $\theta_i^{(0)} = \theta_{i-1}$, 返回步骤①。

2 试验与分析

2.1 算法精度、鲁棒性和实时性试验

2.1.1 试验条件与参数

为考察本文算法在非线性光照污染环境下的检测精度、鲁棒性和实时性, 并与 IRANSAC 算法^[4] (IRANSAC 是一种基于曲线模型的方法, 由 2 个步骤组成, 首先提取路径边缘, 再用 IRANSAC 算法检测曲线) 比较, 选用易反光的瓷砖地面上铺设单向黑色标识线, 采用大恒公司分辨率为 656 像素 \times 492 像素, 焦距为 8 mm, 帧速为 120 帧/s 的 MER-030-120UM 型工业相机采集 100 幅图像和 1 个视频。应用 Visual Studio 2008 和 opencv 2.3.1 编写算法, 算法运行平台为 CPU 频率 2.80 GHz, 内存 2 GB, 运行 Windows 7 的计算机。算法参数设置为: 多项式曲线阶数 $n-1=3$, 内部能量函数权重 $\alpha=1, \beta=500$, 外部能量函数权重 $w_c=1, w_e=0.1, w_g=0.1$ 和 $w_p=0.1$, 标识线像素宽度 $w=10$, 标识线灰度 $t_1=0$, 最大迭代次数 $k_{\max}=30, |s_k \mathbf{h}| < 10^{-3}$ (这些参数经多次试验、反复调整确定)。

2.1.2 算法检测精度试验

为充分考察算法检测精度, 从 100 幅图像中随机选择 5 幅图像, 对应着直线标识线、弯曲标识线、受光照污染的直线与弯曲标识线和轨迹缺陷等 5 种标识线。用本文算法 (对于非视频流中的图像, 能量项 E_{speed} 不起作用, 需将它的权重 w_c 和 w_p 设置为

0) 和 IRANSAC 算法检测 5 幅图像, 试验结果如图 4 所示, 记录 5 幅图像的计算结果 θ 并与真实结果 θ^* 比较, 其中, 真实参数 θ^* 用人工选择尽可能少且充分正确的标识线边缘点, 通过多项式插值求得^[4], 如表 2 所示。

由图 4 和表 2 数据可知, 相比 IRANSAC 算

法, 本文算法能够正确检测光照污染和轨迹缺陷条件下的标识线, 检测精度较高, 能够满足工业或农业应用的导航精度要求。另外, 由图 4 可见, 标识线在局部光照污染情况下, 表现为轨迹部分缺陷, 也就是说轨迹缺陷可视为局部光照污染下的特例。

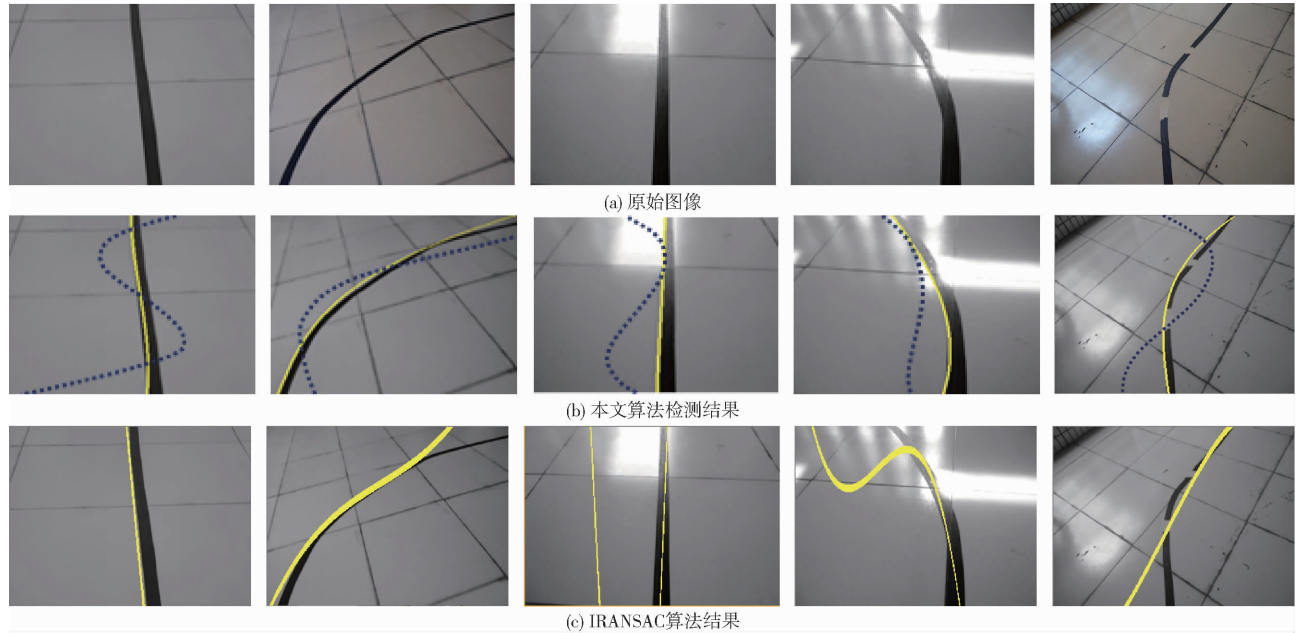


图 4 2 种算法检测结果

Fig. 4 Results of two kinds of algorithms

表 2 2 种算法检测精度比较, 曲线方程为 $x = a_1 + a_2y + a_3y^2 + a_4y^3$

Tab. 2 Comparison of curve parameters calculated by proposed algorithm and IRANSAC, curve equation was

$$x = a_1 + a_2y + a_3y^2 + a_4y^3$$

不同标识线	真实参数 θ^*	本文算法		IRANSAC 算法	
		计算参数 θ	误差 $\ \theta - \theta^*\ $	计算参数 θ	误差 $\ \theta - \theta^*\ $
直线	(158.766, 0.055, 0.000, -0.000)	(159.065, -0.000, 0.001, -0.000)	0.303	(158.659, 0.034, 0.000, -0.000)	0.109
弯曲	(322.580, -3.207, 0.012, -0.000)	(322.571, -3.207, 0.012, -0.000)	0.008	(247.968, -2.222, 0.010, -0.000)	74.618
光照污染直线	(169.033, 0.055, -0.001, 0.000)	(169.655, -0.013, 0.000, -0.000)	0.626	(-2502.905, 35.134, -0.002, -0.000)	2672.2
光照污染弯曲	(121.351, 0.867, -0.024, 0.000)	(121.836, 0.841, -0.002, -0.000)	0.486	(-119.517, 6.944, -0.073, 0.000)	240.947
轨迹缺陷	(-0.000, 0.008, -1.623, 246.157)	(-0.000, 0.008, -1.623, 246.161)	0.005	(0.000, -0.018, 0.767, 298.209)	52.107

2.1.3 算法鲁棒性和实时性试验

为验证算法鲁棒性和实时性, 对采集视频进行检测与跟踪, 部分结果如图 5 所示。

算法鲁棒性用正确率来衡量, 即标识线被正确检测的数量与图像总帧数的比例。视频的检测跟踪结果见表 3。由表 3 数据可知: 本文算法对直线标识线、弯曲标识线、受非线性光照污染的直线、弯曲标识线等 4 种标识线的检测跟踪正确率分别为 100%、100%、100%、92.58%, 平均正确率为 98.96%, 均优于 IRANSAC 算法, 表明本文算法具有

较高的鲁棒性。

算法实时性用每帧图像的平均运算时间或迭代次数来衡量。对视频的试验结果进行统计可知: 本文算法平均迭代 3 次收敛, 平均运算时间为 40.18 ms; IRANSAC 算法平均运算时间为 188 ms, 表明本文算法更具实时性。

这里需要说明, 本文算法在检测与跟踪的过程中, 如果某 1 帧图像中的标识线受到大面积遮挡, 将使解算出来的曲线偏移真实的标识线边缘, 进而显著降低整个视频流的检测跟踪正确率, 其主要原因

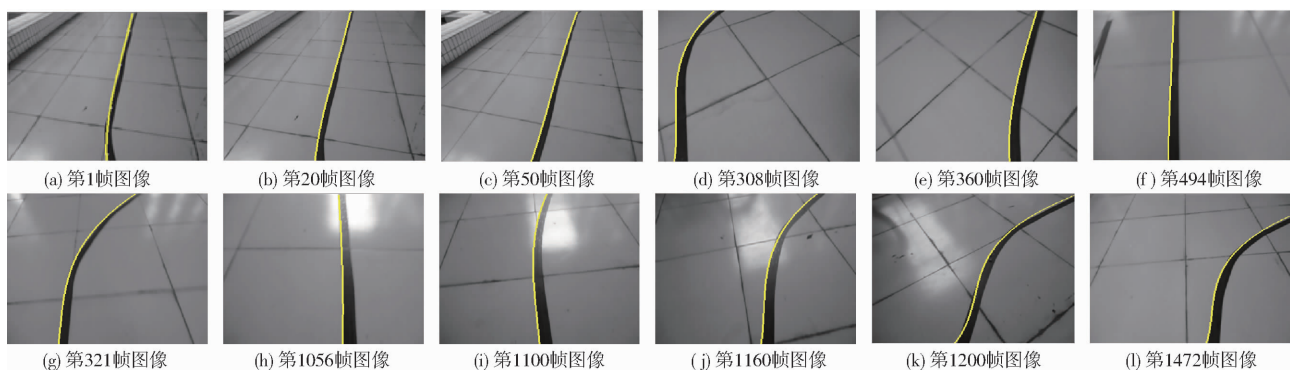


图 5 本文算法检测与跟踪标识线结果

Fig. 5 Results of lane detection and tracking using proposed algorithm

表 3 视频的检测与跟踪结果统计

Tab. 3 Statistics of video detection and tracking results

不同标识线	图像帧数	本文算法		IRANSAC 算法	
		正确检测帧数	正确率/%	正确检测帧数	正确率/%
直线	887	887	100	738	83.20
弯曲	744	744	100	585	78.63
光照污染直线	291	291	100	210	72.16
光照污染曲线	310	287	92.58	207	66.77
综合情况	2 232	2 209	98.96	1 740	77.96

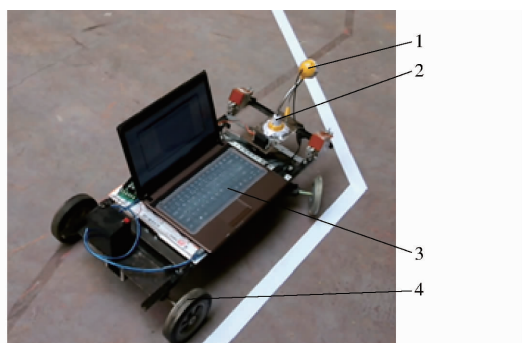


图 6 视觉导航自动导引车

Fig. 6 AGV with vision navigation

1. CCD 相机 2. 单片机 3. 计算机 4. 小车

是主动轮廓模型容易收敛于局部特征。1 种有效的解决方法是,当主动轮廓模型失效时,人为地重新采集 $n+1$ 个点作为当前帧的迭代初值,避免 AGV 迷路。

2.2 视觉导航 AGV 样机试验

搭建视觉导航自动导引车(图 6),由以下部件组成:1 辆后轮驱动前轮转向的小车、1 台 2 G 内存计算机、1 块单片机、1 台 30 帧/s CCD 相机。其工作原理是:以计算机作为上位机运行导航算法,经串口通信将导航信息传输给单片机,再驱动数字舵机控制前轮转向,实现小车沿标识线行走。为增加标识线与室外环境颜色对比度,提高算法鲁棒性,采用白色标识线,标识线灰度 u_1 需设为 255。试验过程如图 7 所示,表明 AGV 能有效跟踪直线和弯曲标识线,本文算法可满足自动导引车的鲁棒性和实时性导航要求。

在某些应用中可能会出现交叉路线,可参照文献[22]在交叉位置贴上包含转向信息的一维条形码,当 AGV 扫描到一维条形码时即可转向,也就是说,本文提出的适用于单向标识线的导航算法可应用于交叉标识线。

3 结论

(1) 针对非线性光照污染环境下视觉检测与跟

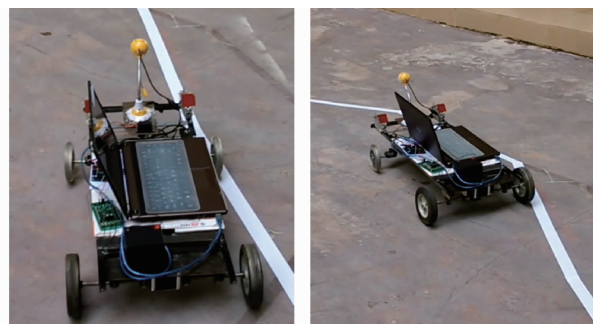


图 7 视觉导航自动导引车行走过程

Fig. 7 Walking process of AGV with vision navigation

踪算法鲁棒性和实时性差的问题,通过分析标识线的颜色、图像梯度和运动速度等特征,确定了适用于标识线识别的主动轮廓模型的内外能量函数,并使用高斯牛顿法给出了能量函数的最优解。

(2) 在不考虑交叉十字路线的情况下,本文算法对直线和弯曲标识线、受非线性光照污染的直线、弯曲标识线等 4 种标识线的检测跟踪正确率分别为 100%、100%、100%、92.58%,平均正确率为 98.96%,平均运算时间为 40.18 ms,能够满足工业或农业非线性光照环境下 AGV 的导航鲁棒性和实时性要求。

参 考 文 献

- 1 周俊, 陈钦, 梁泉. 基于强化学习的农业移动机器人视觉导航[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2):53-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140210&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.010.
ZHOU Jun, CHEN Qin, LIANG Quan. Vision navigation of agricultural mobile robot based on reinforcement learning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):53-58. (in Chinese)
- 2 武启平, 金亚萍, 任平, 等. 自动导引车(AGV)关键技术现状及其发展趋势[J]. 制造业自动化, 2013(10):106-109.
- 3 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10):1-10.
HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10):1-10. (in Chinese)
- 4 林桂潮, 邹湘军, 罗陆锋, 等. 改进随机样本一致性算法的弯曲果园道路检测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4):168-174.
LIN Guichao, ZOU Xiangjun, LUO Lufeng, et al. Detection of winding orchard path through improving random sample consensus algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2015(4):168-174. (in Chinese)
- 5 蔡晋辉, 才辉, 张光新, 等. 复杂环境下自动导引车路径识别算法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10):20-24.
CAI Jinhui, CAI Hui, ZHANG Guangxin, et al. Guidance line identification algorithm for AGV in complex environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):20-24. (in Chinese)
- 6 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.
GAO Guoqing, LI Ming. Navigating path recognition for greenhouse mobile robot based on K-means algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7):25-33. (in Chinese)
- 7 宋怀波, 何东健, 辛湘俊. 基于机器视觉的非结构化道路检测与障碍物识别方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6):225-230.
SONG Huaibo, HE Dongjian, XIN Xiangjun. Unstructured road detection and obstacle recognition algorithm based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6):225-230. (in Chinese)
- 8 胡晓辉, 孙苗强, 苏晓许. 伪彩色空间完全非结构化道路检测方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(2):203-208.
HU Xiaohui, SUN Miaoqiang, SU Xiaoxu. Completely unstructured road detection for pseudo-color space[J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(2):203-208. (in Chinese)
- 9 杜明芳, 王军政, 李静, 等. 自主移动机器人自适应室外道路检测[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(7):1046-1053.
DU Mingfang, WANG Junzheng, LI Jing, et al. Adaptive outdoor road detection for autonomous mobile robot[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(7):1046-1053. (in Chinese)
- 10 许华荣, 王晓栋, 方迺. 基于 B 样条曲线模型的结构化道路检测算法[J]. 自动化学报, 2011, 37(3):270-275.
XU Huarong, WANG Xiaodong, FANG Qiu. Structure road detection algorithm based on B-spline curve model[J]. Acta Automatic Sinica, 2011, 37(3):270-275. (in Chinese)
- 11 王新忠, 韩旭, 毛罕平, 等. 基于最小二乘法的温室番茄垄间视觉导航路径检测[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(6):161-166. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120629&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.029.
WANG Xinzong, HAN Xu, MAO Hanping, et al. Navigation line detection of tomato ridges in greenhouse based on least square method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):161-166. (in Chinese)
- 12 李林, 魏新华, 朱文静, 等. 宽幅施药机械机器视觉辅助导航系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9):28-33. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150904&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.004.
LI Lin, WEI Xinhua, ZHU Wenjing, et al. Research on auxiliary navigation system for wide spraying mechanism based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9):28-33. (in Chinese)
- 13 冯娟, 刘刚, 司永胜, 等. 果园视觉导航基准线生成算法[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(7):185-189, 184. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120734&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.034.
FENG Juan, LIU Gang, SI Yongsheng, et al. Algorithm based on image processing technology to generate navigation directrix in orchard[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7):185-189, 184. (in Chinese)
- 14 WANG Y, TEOH E K, SHEN D G. Lane detection and tracking using B-Snake[J]. Image and Vision Computing, 2004, 22(4):269-280.
- 15 LU B, MIAO C, WANG H, et al. Lane mark detection with active contour for gradient domain[C]//International Conference on Control and Automation and Systems Engineering, 2009:591-594.
- 16 LI X, FANG X, WANG C, et al. Lane detection and tracking using a parallel-snake approach[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 77(3-4):597-609.
- 17 IVINS J, PORRILL J. Everything you always wanted to know about snakes (but were afraid to ask)[J]. AIVRU Technical Memo #86, 1993.
- 18 CHAN T F, VESE L A. Active contours without edges[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2):266-277.
- 19 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- 20 STEGER C, ULRICH M, WIEDEMANN C. Machine vision algorithm and applications [M]. Hoboken, NJ: Wiley-VCH, 2007:193-196.
- 21 ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.
- 22 TAHA Z, MAT-JIZAT J A, ISHAK I. Bar code detection using omnidirectional vision for automated guided vehicle navigation[C]//International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence, 2012:589-592.