

农业机械机器视觉导航研究

杨为民^{1,2}, 李天石¹, 贾鸿社²

(1. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049; 2 中国一拖集团有限公司技术中心, 洛阳 471039)

摘 要: 该文对农业机械机器视觉导航的关键问题图像处理和路径控制进行了深入的研究, 采用基于 Hough 变换和动态窗口技术的图像处理算法提取自然环境下的导航特征, 根据系统辨识试验的结果和农业机械机器视觉导航的特点建立了仿真模型, 并在通用型轮式拖拉机上建立试验系统对图像处理和路径控制算法进行验证, 取得了良好的试验结果。

关键词: 机器视觉; 仿真; 图像处理; 系统辨识; 农业机械; 导航

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0160-06

0 引言

农业机械的自动导航是现代智能农业机械的一个重要组成部分, 有着广阔的发展前景。在自动喷洒农药、肥料、收割作业、中耕除草、插秧耕作等许多方面有着广泛的用途。在经历了沿犁沟、田垄、农作物行的机械触杆导航、预埋引导电缆的有线引导、地磁导航、无线电或激光导航、用惯性导航进行航程推算等多种导航方式的发展过程后, 目前对农业机械的导航研究已经主要集中在机器视觉和 GPS 导航这两种最具发展前途的方式上^[1,2]。

机器视觉与 GPS 导航两种导航方式各有优点, 相互之间相辅相成, 通过二者之间的信息融合可以完成各种复杂环境下的导航任务。GPS 采用绝对坐标导航方式, 工作可靠, 可以进行大范围的工作路径规划。而采用相对坐标的机器视觉导航则更加灵活, 实时性和导航精度更好。随着以信息化技术为核心的精细农业的兴起, 机器视觉导航又具有更多的优点, 机器视觉系统在采集导航信息的同时还能采集有关农作物、病虫害以及农田状况的图像, 从而为精细农业变量投放提供信息^[3]。

机器视觉导航在交通运输、自动化仓库、柔性生产线的运料小车等方面都已经得到了较好的应用。相对于室内的工业机器人而言, 农业机械的机器视觉导航的工作环境和对象更加复杂。

1 系统的组成

农业机械的机器视觉导航重点需要解决三个问题, 其一是视觉信息处理, 机器视觉系统的 CCD 摄像机采集外部环境场景中的图像, 从中提取导航特征。由于是室外作业, 要求图像处理算法具有实时性和很强的鲁棒性, 能够适应复杂多变的自然光线条件。其二是根据视觉信息处理得到的位置和姿态误差进行导航规划, 并由

此产生操向角。由于图像处理数据量很大, 需要较长的计算时间, 因此图像处理的结果有较大的滞后。另外还有车辆行驶的速度, 车辆相对导航基准的初始姿态都对操向角有很大的影响。其三是伺服控制系统, 需要快速准确的完成操向控制指令, 通过执行机构完成转向, 其间要克服车辆导向轮与地面之间相互作用的影响。本文组成了如图 1 所示的农业机械机器视觉导航系统, 对上述的三个关键问题分别进行了研究。首先针对农业机械机器视觉导航的特点开发了基于 Hough 变换和动态窗口技术的农田作业环境视觉信息处理算法, 然后在仿真分析的基础上建立了导航规划器和操向控制器, 最后在东方红 LF80-90 拖拉机上建立了机器视觉导航的试验系统, 通过实车试验验证了研究结果。

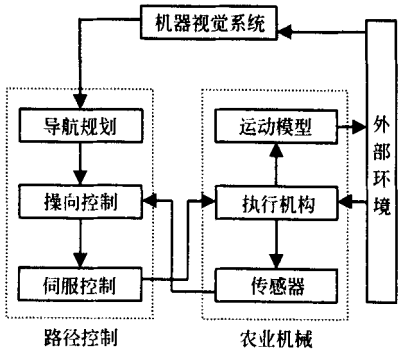


图 1 农业机械机器视觉导航系统结构

Fig 1 Hierarchical structure for machine vision steering system of an agriculture vehicle

2 机器视觉信息处理

用于农业车辆的视觉导航方法中, 最简单的是采用人工标记线的方法, 车辆跟踪标记线控制方向, 在标记线的引导下到达指定目标, 完成作业。这种方法相对于其它人工标记方法而言有设置路径标识简单方便, 成本低的优点, 但对作业环境有特别要求, 一般用于地面条件良好的温室内。另外一种方法就是对作业环境中的自然导航特征进行辨识, 如田间作物的空间排列特征, 已收割作物形成的边缘、田垄犁沟等。经过对这些导航目标图像的处理形成导航基线来进行农业车辆导航, 这种导航方法可适应在复杂自然环境下的农田作业的要求,

收稿日期: 2003-07-28 修订日期: 2003-08-18

基金项目: 中国一拖集团公司资金资助项目

作者简介: 杨为民(1969-), 男, 汉族, 浙江余姚人, 高级工程师, 博士研究生, 研究方向为机器视觉导航、液压传动、车辆自动控制。西安 西安交通大学机械工程学院, 710049; 洛阳 中国一拖集团有限公司技术中心, 710049

但是需要图像处理算法具有很好的鲁棒性,能够在复杂的自然景物中可靠地提取导航特征。

2 1 直线特征的检测

在农业机械的作业过程中,由于农田作业自身的特点,由田垄、犁沟、行荃构成的实际引导线主要是直线和可以用多段直线拟合的小曲率曲线,因此在视觉导航中通过对直线特征的检测就可以得到导航的基准。

在直线特征的检测算法中,Hough 变换通过将图像空间中的直线变换为参数空间的点,对所有可能落在直线边界上的点进行累加统计完成检测任务,具体算法说明参见文献[4]。由于这种算法利用了图像全局特性,因此鲁棒性很强,受噪声和直线间断的影响小,而且能够确定特征到亚像素级精度。作者采用 VC 和 Labview 混合编程开发的基于 Hough 变换和动态窗口跟踪的视觉信息处理算法,在室内、室外、晴天、阴天等不同情况下进行了试验测试,试验结果表明采用这种算法在多种自然光线条件的自然条件下都能可靠的工作。

图 2 所示是 Hough 变换算法的处理结果,左图为自然光条件下以路面伸缩缝为导航特征进行检测的结果,右图为经 Hough 变换后得到的参数空间图像,其中最亮的点就是检测到的导航直线。根据检测到的 (x, y) 坐标和角度 θ 可以得到车辆的横向位置偏差以及车辆的方向角误差。

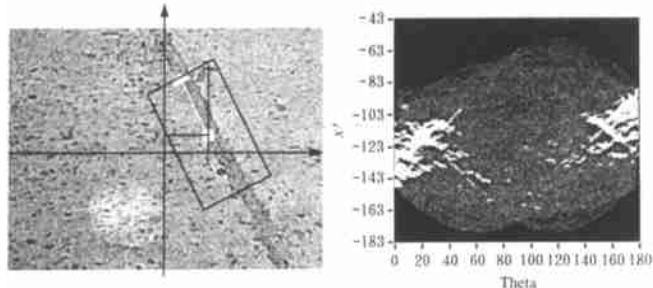


图 2 Hough 变换图像处理结果

Fig 2 Image processing results of the Hough transformation

2 2 动态窗口跟踪与图像抽点简化

由于 Hough 变换在对参数空间检测时要进行统计计算,计算量很大,一幅 256×256 像素的图像需要 3 s 以上的处理时间,根本无法完成导航任务,在仿真研究中也发现若图像处理的时间过长(200 m s),则导航精度和稳定性都很差。

在采集到的场景图像中除导航特征以外的信息是无效信息,不但浪费了大量的处理时间,而且增加了场景的复杂程度,还可能产生对场景中其它直线特征的误检。通过设置兴趣区 ROI(Region Of Interest)实现选择注意机制,只对 ROI 中的图像进行处理,可以大大减少图像处理的工作量,降低场景的复杂性,突出导航特征。

由于车辆行驶的连续性,在图像处理速度足够快的前提下,可以假设相邻两次检测的导航特征的位置和方向没有突变。因此在检出了起始导航特征后,将上次图

像处理得出的导航特征信息反馈回来,把检测得到的直线特征定义为当前 ROI 的中心,通过递归算法使 ROI 窗口跟随导航特征移动,形成一条覆盖导航基准的检测带。由于 Hough 变换是对图像中每个存在的像素遍历所有可能经过该点的直线参数,然后进行累加,这样根据上次的检测信息还可以减少对当前特征的搜索范围。利用已知的位姿信息和转向系统的先验知识预测导航特征参数的可能区间,只在这一区间内进行检测,从而提高了图像处理的速度和可靠性。

为了进一步提高图像处理速度,在采用动态窗口跟踪减少图像处理工作量的同时还采取了图像抽点简化技术。由于并不需要检测图像像素之间的连通性,而且 Hough 变换算法受直线间断的影响小,因此可以根据 ROI 窗口的大小,只对一定间隔的像素进行 Hough 变换。这样可以使每帧图像的处理时间在 80~ 100 m s 以内,满足了导航作业的要求。

2 3 农田作业环境下自然导航特征的检测

通过对大量农田作业环境中作为导航特征的自然景物的图像分析,可以将导航特征分为两类:边界类和团块类。边界类导航特征是指经过图像预处理可以将场景图像分为两个区域,用区域间的边界来作为导航特征。如收割作业时已收割作物与未收割作物形成的收割边缘,田垄与犁沟的边缘等。团块类特征则是指经过图像预处理以后导航特征形成一系列分离的团块,以这些团块的分布特征来作为导航特征,如进行苗间护理和中耕除草时农田中的农作物行等,根据其自身的特点分别开发了针对上述的两类自然导航特征的视觉信息处理算法。

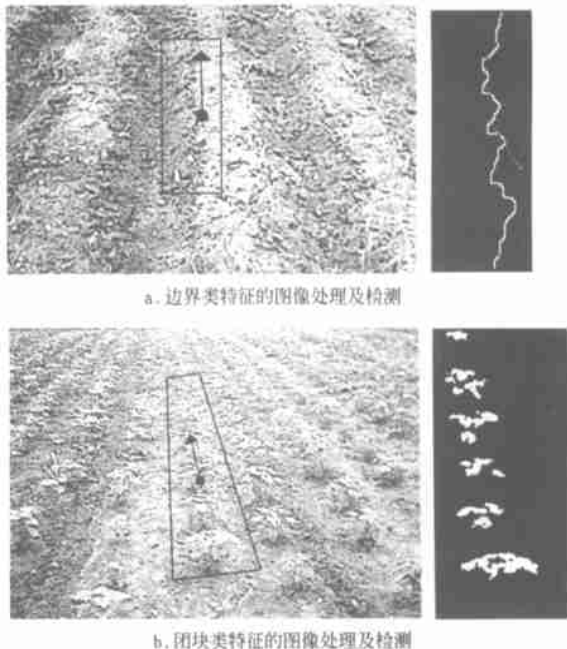


图 3 自然环境导航特征的图像处理及检测

Fig 3 Image processing and measurement of guidance feature in nature environment

在对图像的预处理中先对图像进行增强和滤波,主要是采用直方图处理和低通滤波,扩展导航特征所在的

高灰度区动态范围,增加对比度,并压缩背景低灰度区的动态范围,滤除掉大差别像素间的灰度突变,减少图像细节因素和背景噪声的影响,然后通过聚类算法进行阈值分割,将图像分割为背景和导航特征。

对于边界类的特征,首先对导航特征所在的区域进行生长和溶合,然后用梯度法提取边界,或者如文献[5]中采用的小波变换方法提取边界^[5],对得到的边界图像直接用 Hough 变换检测导航特征。根据透视关系,由此产生的边界代表了一定宽度的带状导航基线,由 Hough 变换产生的直线则是在这段基线内实际存在的不连续线段组成的最长直线。由此得到的车辆位姿误差,可以去除导航特征区域不规则边界局部弯曲的干扰。与直线拟合的方法相比较,拟合直线是一条假想直线,在真实环境中并不存在,在实际基线长度较长情况下进行导航时有可能使车轮进入导航特征所在的区域,引起误导和对导航特征的破坏。

对于团块类特征,导航特征表现为与田地中的石块、杂草相比面积大的多的团块,因此首先进行二值形态学操作去除细小团块的噪声干扰,然后通过团块分析(blob analysis)得到各个团块的重心和面积。对每个团块的重心用团块的面积加权后进行 Hough 变换检测,基于 Hough 变换的统计特性就可以得到由较大的团块中心形成的导航基线,在图 3 中给出了两类特征的处理结果。在文献[6]中采用了由三行农作物形成的 Hough 空间进行检测的方法。这种方法要求作物行间距相等的假设,并且要有摄像机的位置、角度以及镜头光学特性等先验知识,通过试验还发现这种方法有可能受作物沿斜向成等距排列的影响而发生误检,因此需要由其它传感器提供信息来预测正确的位置。与之相比采用动态窗口跟踪方法降低了算法的复杂性,在窗口中由导航特征形成的导航基线具有唯一性,避免由于其它作物行的排列特征引起的误导,从而提高了算法的可靠性^[6]。

3 机器视觉导航仿真系统

经图像处理得到导航基准后,需要进行路径规划和操向控制,根据车辆自身的位姿误差和速度产生适当的操向角,然后控制转向来进行路径跟踪。这就需要准确地建立整个机器视觉导航车辆的仿真模型来进行分析研究。

3.1 系统辨识

为了得到与实际相符的车辆液压转向系统的准确动力学模型,以伺服比例阀、转向油缸、溢流阀、液压管路、转向机构、前轮等组成的液压转向系统(如图 6 所示)为被辨识对象,在用东方红 LF80-90 拖拉机建立的机器视觉导航试验系统上进行了系统辨识试验。由车载计算机产生二位伪随机信号,经 D/A 转换输出到伺服比例阀,由转向油缸推动转向机构动作,车载计算机同步采集前轮转角传感器的信号。由于对被辨识系统而言,输入信号到伺服比例阀控制的是转向液压系统的流

量,因此被辨识系统的输出应为前轮转动的角速度,采集到的前轮转角信号对时间微分得到转动角速度,与输出的控制信号一起构成系统辨识数据对^[7,8]。

进行系统辨识的目的主要是为了建立仿真模型,没有必要对被辨识系统中的噪声干扰建立数学模型,因此采用 ARX 模型对系统进行描述。根据理论分析可知,由伺服比例阀和转向油缸组成的阀控缸液压系统的阶次应为二阶,因此被辨识系统的阶次应在二阶以上,最后得出系统辨识的结果是一个三阶 ARX 模型,并得到了它的差分方程。

3.2 液压转向系统建模

尽管得到了系统的差分方程,但是无论系统辨识得到的模型与试验结果多么吻合,它也仅描述了在给定试验条件下的部分系统特性,因此还应该根据系统辨识所揭示的对系统产生影响的主要因素,对组成系统的各个部分进行理论分析,找出实际系统中蕴含的本质规律。

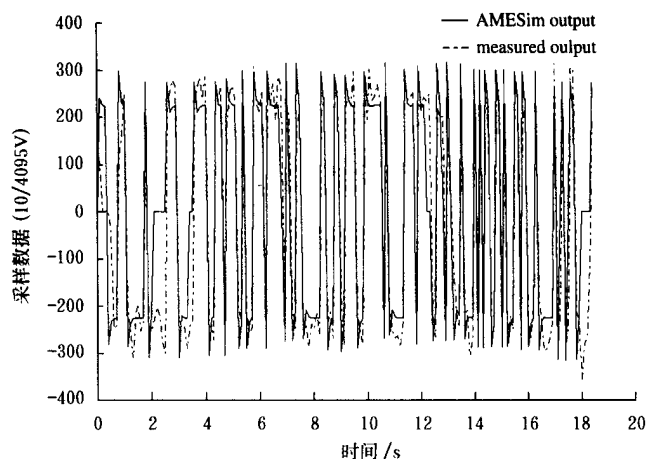


图 4 液压转向系统仿真模型输出比较数据

Fig 4 Comparison between simulation output and measured data of hydraulic steering system

根据系统辨识的结果发现液压转向系统的阻尼比、时间常数较大,而且系统阶次比一般阀控缸系统高,因此可以认为轮胎与地面的库仑摩擦力所引起的阻尼作用有较大的影响。另外由于试验系统的液压系统是由拖拉机尾部的液压输出供油,采用了很长的软管,对系统的动态特性也会产生较大的影响^[9]。

在机器视觉导航车辆液压转向系统建模时,采用 AMESim 软件为车轮与地面的摩擦,液压软管的膨胀和油液在管路中的摩擦等设定了相应的数学模型,根据实际情况建立了液压转向系统的模型。为了验证模型的真实性和准确性,用系统辨识中得到的试验数据输入所建立的数学模型进行仿真,得到的仿真输出结果与实际的试验数据的对比如图 4 所示,图中实线为仿真结果,虚线为实际试验数据,两者的均方根误差为 102.8867,可以看出模型与实际试验数据符合的很好,从而得到了液压转向系统与实际相符的准确数学模型。

3.3 仿真系统的建立

农业车辆一般在作业时速度较低,而且是长时间等

速作业, 因此为了简化起见, 在试验研究中不考虑车辆运动时的动力学特性和车辆转向时轮胎的侧偏特性, 采用二自由度两轮车平面运动模型^[10]对车辆运动进行仿真。

虽然在车辆的运动模型中不考虑轮胎的侧偏特性, 但是在对导向轮的控制中侧偏力、回正力矩等对控制性能有很大的影响, 而这些因素自身又与轮胎的尺寸、型式、结构以及轮胎的充气气压有关, 再加上农业车辆在农田作业时不同土壤上附着性能也直接影响到导向轮执行机构的控制性能。由于这些不确定因素的影响, 在对导向轮进行控制时, 依赖动力学模型的控制方法很难取得预期效果, 所以在试验中还是采用了 PD 控制, 转向伺服控制系统的输入是操向角, 输出是拖拉机前轮的转向角。

导航规划和操向控制要根据车辆当前的位姿误差和速度确定适当的操向角。主要可以将导航过程分为两个阶段, 一是车辆由初始状态到达导航基准, 二是沿导航基准导航。导航规划的目的是寻找合适的路径以尽可能少的时间和距离到达基准, 然后导航规划的目的变为减少相对于基准的误差并尽量保持车辆姿态与导航基准一致, 保证农业车辆工作装置平稳作业。

换过程中需要平滑的过渡。整个导航规划的过程是一个非线性过程, 由于对导航路径和控制策略的选择上有很大的主观因素, 所以我们采用模糊控制器进行仿人操作, 根据有经验驾驶员对路径的选择经验和仿真分析的结果制订模糊规则, 并采用 Sugeno 推理机制平滑的联接不同的线性控制律^[11, 12]。在机器视觉导航中, 经过图像处理可以得到车辆在当前位置的位姿误差, 也就是在车辆运动模型中的位置偏差和方向角误差。由于机器视觉导航的前馈作用, 在计算误差时是根据摄像机的标定数据计算车辆当前位置与车辆前方导航基准的之间的误差。同时因为图像处理的时间较长, 在处理过程中只有上次的位置信息, 因此在仿真系统的状态变量反馈通道上设置了一个零阶保持器, 并将保持器的采样时间设为 80 ms, 在 Simulink 环境中建立的机器视觉导航的仿真程序如图 5a 所示。

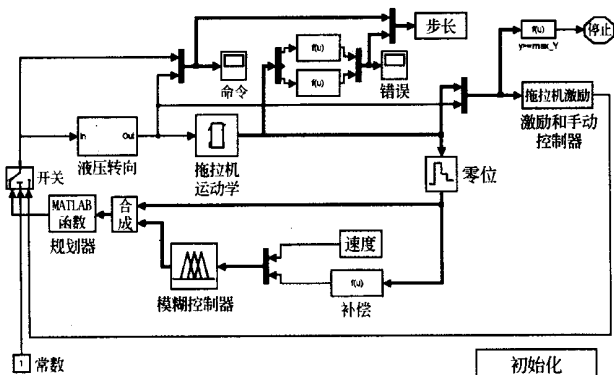
3 4 仿真结果分析

在图 5b 给出的仿真结果中可以看出由于图像处理时间长, 使导航规划器给出的操向角指令成为明显为阶梯状的离散值。在导航的起始段由于液压转向系统响应的影响, 虽然操向角指令是一个阶跃信号, 但拖拉机的转向角仍是连续变化的。在导航的第一阶段, 由于操向角指令变化较快, 转向角的变化始终滞后于操向角指令, 当车辆到达导航基线附近后, 转向角才与操向角的曲线重合, 因此在 PD 参数的整定上是以响应的快速性为优化目标用非线性设计对 PD 参数进行优化^[13]。

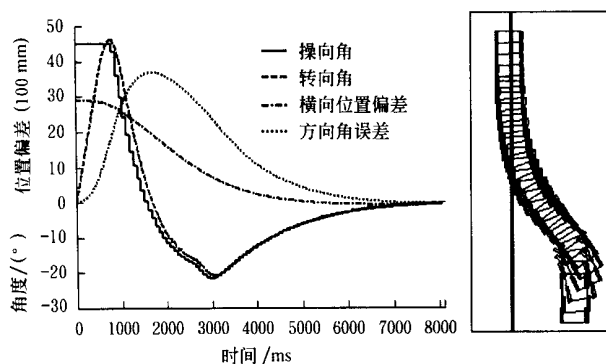
从横向位置偏差和方向角误差曲线上可以看出, 在阶跃响应路径跟踪的第一阶段需要增加方向角偏差来消除横向位置偏差, 而在后一阶段则又要着重控制车辆的姿态, 防止为了纠正微小的位置偏差而进行反复调整, 保证农业机械的正常作业, 因此在不同的阶段需要采用不同的控制律。同样车辆行驶速度的快慢也直接影响到路径规划中操向角的给定。在综合速度、导航的不同阶段和驾驶员经验的基础上确定如下述的模糊规则:

- 1 if (distance is near) then (gain-d is normal) (gain-a is normal);
- 2 if (distance is far) then (gain-d is big) (gain-a is normal);
- 3 if (speed is slow) then (gain-d is big) (gain-a is big);
- 4 if (speed is fast) then (gain-d is normal) (gain-a is big);
- 5 ...

其中, gain-d 和 gain-a 分别是线性控制律中修正横向位置偏差和方向角误差的增益。由于 Sugeno 模糊控制器的作用, 在操向角曲线中可见各个控制策略的切换是平滑过渡的。对车辆在不同的初始位置、不同车速下和不同形状导航基线的导航仿真分析表明, 在各种情况下控制系统都能很好的完成导航任务, 具有很好的鲁棒性。



a. 机器视觉导航系统仿真程序



b. 机器视觉导航仿真结果 (阶跃响应)

图 5 机器视觉导航仿真模型和结果

Fig 5 Simulation model and result of the machine vision guidance system

在同一种初始条件下进行导航, 到达导航基准有多条路径可供选择, 根据车辆自身的速度、相对于导航基准的初始姿态以及当前导航任务所在的阶段需要采用多种的控制律。基于车辆运动的连续性, 在控制律的切

4 试验结果和结论

根据农业车辆机器视觉导航的要求, 在 LF80-90 通用型轮式拖拉机上构建了如图 6a 所示的试验系统。通过安装在拖拉机前端的 CCD 摄像机采集前方场景中导航特征的图像, 经过图像处理提取导航基准, 得出车辆当前的横向位置偏差和方向角误差, 通过导航规划和操向控制使拖拉机沿导航基线作业。

将图像处理算法和系统仿真中得到的机器视觉导航系统的控制策略和参数应用到实车试验中得到了很好的验证。



图 6 农业机械机器视觉导航试验系统

Fig 6 Test system of machine vision guidance on agriculture vehicles

首先在不同季节和不同光线条件下, 用摄像机对农田作业环境中的各种不同的自然导航特征采样, 然后在车载计算机上进行农业机械机器视觉系统的模拟试验测试, 测试结果表明视觉信息处理算法能够可靠的提取各种导航特征, 得到的导航基线与人眼视觉得出的结论相符, 每幅图像的处理时间均在 100 ms 以内, 能够满足实时图像处理的要求, 进一步的工作将进行实车田间试验。

在晴天和阴天两种天气的光线条件下, 在普通路面以路面伸缩缝为导航特征, 在水泥地坪上以电缆设置引导线进行农业车辆的机器视觉跟踪试验。在高速试验、直线跟踪和阶跃响应试验中都取得了良好的控制效果, 直线路径跟踪的均方根误差小于 10 cm, 可以满足农业车辆一般农田作业的要求。

由于在仿真和实现控制算法时没有考虑摄像机视野的影响, 进行曲线跟踪试验时, 若导航基线的曲率过大, 造成转弯半径过小, 则摄像机捕捉不到导航基线, 会

造成导航失败。由于假设在实际作业时车辆是沿小曲率曲线作业, 因此适当设置导航曲线的曲率后完成了曲线导航试验。

通过仿真与试验研究, 在通用型轮式拖拉机上实现了自然环境条件下的机器视觉导航, 并取得了良好的试验结果, 研究成果具有很好的应用前景。在今后的农业机械机器视觉研究中还需要重点解决下面的问题:

其一是图像处理的计算速度。随着在自然环境中采集的场景图像复杂程度的加大, 图像处理的时间会大大的增加, 在未知、动态变化的非结构化环境下导航, 若图像处理的速度过低, 则无论是感知-建模-规划-动作的传统方法, 还是感知-动作的反应式控制方法, 都会由于感知信息的缺乏, 而无法及时的产生由感知到动作的映射, 也就无法进行有效的控制。

其二是控制算法。在复杂多变的自然环境下, 车辆的运动过程中存在高度的非线性和大量的随机干扰, 采用不依赖于数学模型的智能控制方法具有良好的控制效果和鲁棒性, 实车试验的结果也证明了这一点。在已知或可以预知的环境下, 根据试验、仿真和专家经验可以制订有效的模糊规则, 但是实际环境的复杂性使人们无法预知所有可能的情况, 因此控制系统应该具有自学习和自适应的能力。

其三是多传感器的信息溶合。采用机器视觉导航具有灵活性、实时性好的优点, 但是这种方法依赖于导航特征。通过与 GPS 及其它传感器得到的多种导航信息溶合, 可以有效地提高导航的精度和可靠性, 解决如地头转弯等无有效导航特征情形下的导航问题, 实现完全意义的自动驾驶。

[参 考 文 献]

- [1] Hague T, Marchant J A, Tillett N D. Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25: 11-28
- [2] Wilson J N. Guidance of agricultural vehicles—a historical perspective [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25: 3-9
- [3] Brivot R, Marchant J A. Segmentation of plants and weeds for a precision crop protection robot using infrared images [A]. IEEE Proc-V: Image Signal Process, 1996, 143(2): 118-124
- [4] 章毓晋. 图象工程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000
- [5] 沈明霞, 张瑞合, 姬长英. 农作物边缘提取方法研究 [J]. 农业机械学报, 2000, 31(6): 49-51
- [6] Marchant J A. Tracking of row structure in three crops using image analysis [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1996, 15: 161-179
- [7] Amaliu Bogdan Proca, Ali Keyhani. Identification of power steering system dynamic models [J]. Mechatronics, 1998, 8: 255-270
- [8] 王志中, 王荣本, 张友坤, 等. 自动引导车辆转向系统的辨

识建模[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 27- 31.

[9] Shinji Nishimura, Tsugiharu Matsunaga. Analysis of response lag in hydraulic power steering system [A]. JSAE Review, 2000, 21: 41- 46

[10] Dai Feng, Bruce H Drog. Dynamic steering control of conventionally-steered mobile robots[A]. IEEE, 1990, CH2876-1/90/0000/0390 \$ 1.00: 390-395

[11] 李人厚. 智能控制理论和方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.

[12] Dimirovski GM, L iliev O, Burzevski V N. Fuzzy-logic control algorithms in navigation of a factory vehicle-robot[A]. IEEE Control'94, 21- 24 March 1994. Conference publication No. 389: 282- 287.

[13] Nonlinear Control Design Blockset User's Guide [CP/CD]. MathWorks Inc, 1997.

Simulation and experiment of machine vision
guidance of agriculture vehicles

Yang Weimin¹, Li Tianshi¹, Jia Hongshe²

(1. Institute of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Research and Development center, China Yituo Group, Luoyang 471039, China)

Abstract: This paper aimed at the key problems of machine vision guidance on agriculture vehicles. The two problems of image processing and path control were studied in detail. Guidance features in natural environment were extracted and measured based on the Hough transformation algorithm and dynamic window technology. A simulation model was created according to the system identification result and the characteristics of the machine vision guidance on agriculture vehicles. At last a test system was realized on a general purpose wheeled tractor to test all the image processing and control algorithm and the test results were satisfactory.

Key words: machine vision; simulation; image processing; system identification; agriculture vehicle; guidance