

基于机器视觉的农机具自动导航系统

杨飞，刘刚，刘寅，孟庆宽，王泷，刘兆祥

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室，北京，100083)

摘要：将机器视觉技术应用到农业机械导航领域，为农业机械提供可靠、准确的位置信息，是近年来精细农业研究的主要方向之一。本文开发一种基于机器视觉的农机具自动导航系统。该系统包括主控计算机、摄像机、横向位移操纵控制器、液压系统、农机具等部分。采用 PID 控制算法，提高农机具自动导航的精度和稳定性。根据农田作物图像的特点，针对 Hough 变换检测速度慢而随机 Hough 变换、随机方法检测精度低的缺点，提出一种基于遗传算法的直线检测算法，该算法处理速度优于 Hough 变换，检测精度优于随机 Hough 变换和随机变换。试验结果表明，该农机具自动导航系统工作稳定，精度较高，能够满足农机具田间作业的实际需求。

关键词：机器视觉；自动导航；PID 控制；Hough 变换；遗传算法

中图分类号： S220.2

0 引言

自动导航技术是计算机技术、电子通信技术、控制技术等多学科的综合，在现代农业生产中的应用越来越多，逐渐成为现代智能农业机械的一个重要组成部分，有广阔的发展前景，在农药喷洒、收割作业、插秧种植、中耕除草、液态施肥等方面有着广泛的应用。农业机械导航经历了沿犁沟、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。目前对农业机械的导航研究已经主要集中在GPS和机器视觉导航这两种最具发展前途的方式上。^{*}

GPS导航采用绝对坐标进行导航，工作可靠，可以进行大范围的工作路径规划。而机器视觉导航采用相对坐标进行导航，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，具有更多优点的机器视觉导航得到更加广泛的发展。机器视觉导航在交通运输、自动化仓库、生产线的运料小车等工业方面已经取得较好的应用。相对于室内的工业机器人而言，农业机械的工作环境和工作对象则更加复杂。

目前，农业机械的机器视觉导航技术的研究主要集中在硬件系统、视觉信息处理、导航控制方法和算法等方面。硬件系统的研究主要是对视觉系统的组成结构的研究，旨在加强视觉系统的信息感知能力。视觉信息处理研究针对如何快速地从图像信息中获取准确可靠的导航信息，其中主要是对数字图像处理方法的研究。导航控制方法和算法的研究即如何利用获取的导航参数控制

农业机械工作，实现农业机械的自动导航。

1 系统总体设计

系统采用上位机决策与下位机控制相结合的方法，上位机负责路径图像信息实时处理以及导航决策，而下位机则负责具体的控制任务。系统的总体设计如图 1 所示。

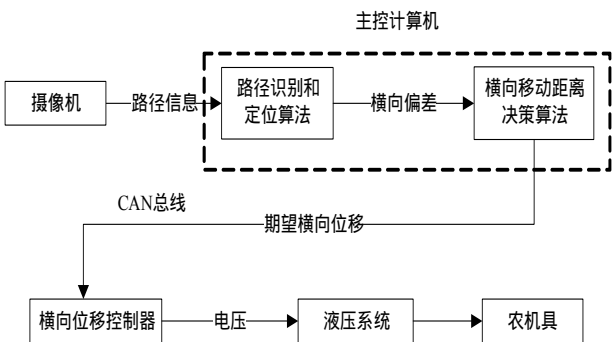


图 1 系统总体设计

Fig.1 System Design

摄像机实时采集图像，通过 USB 总线将图像信息传输至主控计算机，主控计算机对采集的图像进行处理，完成路径的识别和定位，计算出农机具相对目标路径的横向偏差，决策出期望的横向位移，将决策结果经 CAN 总线传输至横向位移控制器，位移控制器经过一定的控制算法计算出合适的控制量（电压信号）并控制液压系统，完成农机具的自动导航。

2 系统硬件组成

视觉导航系统包括主控计算机、摄像机、横向位移

* 收稿日期：

修订日期：

项目基金：田间作业智能控制关键技术与装备研发（2011BAD20B06）
作者简介：杨飞（1987—），男（汉），硕士，农业电气化与自动化。北京市海淀区清华东路 17 号 125 信箱，100083。Email: yangfei1987@163.com
通讯作者：刘刚（1966—），男（汉），教授，农业电气化与自动化。北京市海淀区清华东路 17 号 125 信箱，100083。Email: pac@cau.edu.cn

控制器、液压系统、拖拉机和农机具。系统硬件组成如图 2 所示。

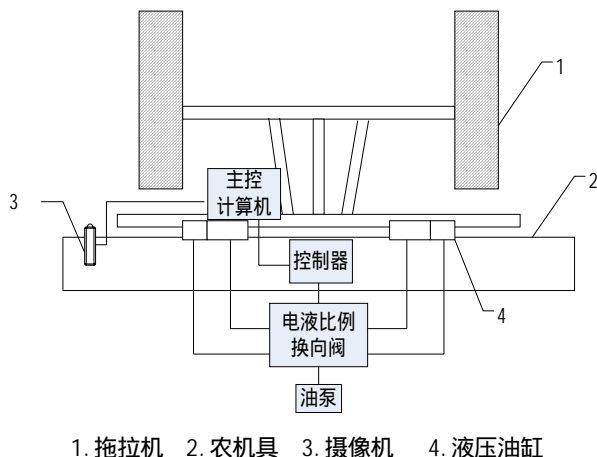


图 2 系统硬件组成

Fig.2 System hardware components

2.1 主控计算机

主控计算机采用威强工业生产的型号为 PPC-3710GS 的工业平板电脑。该电脑野外工作性能稳定，可扩展性强。在抗干扰，抗震方面性能比较优越。

2.2 摄像机

摄像机选用北京嘉恒中自图像技术有限公司生产的 OK AC1310 系列 CCD 摄像机和日本精工镜头，摄像机输出图像为 .bmp 格式的彩色图像。

2.3 横向位移控制器

横向位移控制器采用 KSC-10 PLC 进行开发。KSC-10 控制器是为移动工程机械或液压传动机械专门设计，采用 16 位 40MHz 汽车级专用 C167 CPU 保证稳定工作和高性能计算能力，支持各种复杂的数据计算和过程控制，并配备了大容量的存储芯片，可以实现各种复杂的过程控制或算法，具有扩展和组网功能。

2.4 液压系统

液压系统由比例方向阀和伸缩油缸组成。比例方向阀采用 ARGO-HYTOS 公司的 PRM2-043 型比例方向阀。经过比例方向阀的液压油流入油缸，驱动油缸的推杆拉伸或者收缩，从而实现农机具的左右移动。

2.5 拖拉机

拖拉机选用福田雷沃欧豹 FT704 型轮式拖拉机。该拖拉机适用于旱地和水田作业，具有启动性能好，储备功率大，燃烧清洁，噪音低等特点。

3 算法研究

3.1 机器视觉算法

农业机械导航路径的识别一般归结为农田作物行

的识别和检测，这个过程一般包括图像预处理、图像分割、特征点提取以及作物行路径提取等环节，如图 3 所示。在作物行识别和检测基础上，需要进一步计算车辆相对导航基准线的横向位置偏差，从而为导航决策控制器提供输入信息。

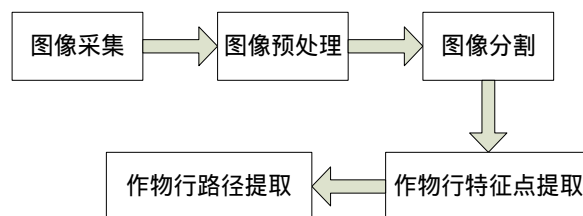


图 3 视觉导航图像处理过程

Fig.3 Image processing of vision navigation

本文所研究的机器视觉导航图像处理的具体过程如下：将摄像机采集的彩色图像采用 RGB 颜色空间中的 2G-R-B 颜色特征因子进行灰度化，加强作物区域；采用最大类间方差阈值分割算法对灰度图像进行分割；采用基于移动窗口的灰度投影算法提取作物行特征点，有效抑制作物行内部孔洞或其它噪声；采用直线检测方法提取作物行导航路径。

本研究主要是探讨了作物行路径直线检测常用的方法，针对 Hough 变换鲁棒性好、精度高，但是检测速度慢和随机 Hough 变换、随机方法检测速度快，但是检测精度低的特点，提出了一种改进算法——基于遗传算法的直线检测算法。

基于遗传算法的直线检测算法，利用遗传算法的全局最优搜索和方向性搜索，以提高直线检测的鲁棒性和速度。其基本思想是：选择合适的参数集合并对其编码，编码后的染色体代表一条可能的待检测直线，染色体的适应度表示该直线的真伪程度，每运行一次遗传算法，通过一定代数的进化和搜索，找到适应度最高的个体，即最佳直线，将该直线一定距离区域内的数据点从图像中清除，再次运行遗传算法，检测下一条直线，这样不断循环，直至直线检测完毕。

具体算法设计如下：

(1) 编码和解码

数据空间中一条直线一般可以通过以下三种方式确定：两点式、点斜式和斜截式。因此，采用遗传算法对上述三种形式的直线参数进行寻优是可能的。编码方式采用搜索能力比较强的二进制编码。

两点式利用直线上的两点 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 来确定直线方程，即

$$y - y_i = \frac{(y_j - y_i)}{(x_j - x_i)}(x - x_i) \quad (1)$$

因此，可对数据点 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 进行编

码,在参数空间内进行寻优。数据点 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 的寻优有两种方式:一是在整个图像空间内进行搜索,即直接对数据点的坐标进行编码,但这种方式计算量非常巨大,检测过程会非常费时;二是在已有数据点集合内进行搜索,农田图像中表征作物行的特征点只占整幅图像的小部分。因此,采用第二种搜索方式。该方式可以建立包括所有特征点的数组,每个特征点可以通过数组下标进行表示,对数据点 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 的搜索就转化为对数组下标 i 和 j 的搜索,即染色体只代表了 i 和 j 两个参数。由于每检测出一条直线,都要将代表该直线的特征点从数据空间内清除,数组长度是不断变小的,即参数 i 和 j 的搜索空间是不断变小的,因此,采用动态编码的方法,即染色体的长度根据数组长度动态调整,从而进一步提高算法的运行速度。

点斜式利用直线上的一点 (x_i, y_i) 和直线斜率 k 来确定直线方程,即

$$y - y_i = k(x - x_i) \quad (2)$$

因此,可对数据点 (x_i, y_i) 和斜率 k 进行编码,在参数空间内进行寻优。考虑到 k 无穷大的情况,可将 k 的寻优转化为直线方程极坐标形式中 θ 的寻优,因为 $k = -1/\tan\theta$ 。数据点 (x_i, y_i) 的寻优同样有两种方式:一是在整个图像空间内进行搜索,即直接对数据点的坐标进行编码;二是在已有数据点集合内进行搜索。采用第二种搜索方式,对数据点 (x_i, y_i) 的搜索就转化为对数组下标 i 的搜索,即染色体只代表了 i 和 θ 两个参数。

斜截式利用直线的斜率 k 和直线在 y 轴上的截距 b 来确定直线方程,即

$$y = kx + b \quad (3)$$

因此,可对斜率 k 和截距 b 进行编码,在参数空间内进行寻优。考虑到 k 无穷大的情况,同样可将斜率 k 和截距 b 的寻优转化为直线方程极坐标形式中 ρ 和 θ 的寻优。对于一幅的 640×480 图像来说,若 ρ 的量化精度选择 1 , θ 的量化精度选择 1° ,则染色体长度至少为 19 ,而且每运行一次遗传算法(检测一条直线),都要在 2048×256 的固定空间内寻找最佳参数组合,计算量比较大,检测过程也会比较费时。

综上所述,可以发现上述几种参数寻优方式有一些相似性。两点式和点斜式的第一种寻优方式,其染色体长度要比各自的第二种方式长,寻优的参数也多,而且每次检测直线,都要在固定空间内搜索,相比第二种方法在一定程度上会更耗时。斜截式的参数寻优方式每次检测直线同样需要在固定空间内搜索,也会比较耗时。

因此,根据上述分析,本文选择两点式的第二种参

数寻优方式(以下均简称两点式GA)和斜截式的参数寻优方式(以下均简称斜截式GA)进行试验分析。

(2) 适应度函数的构造

如果像素点到直线的距离小于某个给定的阈值,则认为该像素点在这条直线上。假设该直线一定距离范围内的点的个数为 N ,则适应度函数设计为

$$f = N \quad (4)$$

上述适应度函数表示该直线一定距离范围内的点越多越好,它表征了该染色体所表征的直线的真伪程度。由于每次运行遗传算法,均以进化一定代数的适应度最大的个体作为检测的直线,即距离直线一定距离范围内的点数最多得个体作为检测直线,与随机Hough变换和随机检测方法中直接以一定距离范围内的点数是否满足设定的阈值来判断直线真伪相比,在一定程度上更具鲁棒性。

(3) 选择策略

采用按适应度比例分配的轮盘赌选择法,即利用个体适应度比例的概率决定其后代留存的可能。若个体 i 的适应度为 f_i ,则其被选中的概率为

$$P_i = \frac{f_i}{\sum f_i} \quad (5)$$

(4) 遗传算子

主要包括交叉和变异两个遗传算子。交叉算子采用单点交叉方式;变异算子,以变异概率对染色体的每个二进制位进行逻辑取反。

3.2 导航控制算法

常规PID控制是按照偏差的比例(P-Proportional)积分(I-Integral)和微分(D-Derivative)三个参数的线性组合进行控制的方式。常规PID控制器有比例、积分和微分三种校正环节。比例能够迅速反应误差,从而减小误差,但不能消除稳态误差;积分控制能够积累系统误差,输出控制量消除误差,但积分作用太强会使系统超调增大,甚至出现振荡;微分控制可以减小超调量,克服振荡,提高系统稳定性,同时加快系统的动态响应速度,减小调整时间,从而改善系统的动态性能。其控制规律可以表示为

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + \frac{T_D de(t)}{dt}) \quad (6)$$

其中, K_p 为比例系数, T_i 为积分时间常数, T_D 为微分时间常数, $u(t)$ 为控制量, $e(t)$ 为偏差。

计算机处理的是数字量,所以控制系统中使用的是数字PID控制器。数字PID控制算法通常分为位置型和增量型,本文研究的是后一种算法的应用。将连续PID控

制算式进行离散化处理，就可以得到离散的PID表达式：

$$u(k) = K_p[e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T}] \quad (7)$$

式中：T为采样周期，k为采样序号，k=0，1，2，…，u(k)为第k次采样时刻的计算机输出值，e(k)为第k次采样时刻的输入的偏差值，e(k-1)为第k-1次采样时刻的输入的偏差值。

由上式进一步化简可得，增量式PID控制的表达式为：

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) \\ &\quad + K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned} \quad (8)$$

控制器的控制质量主要取决于各个参数即比例系数K_p、积分系数K_i和微分系数K_D的设置。本文中PID控制器参数的整定是采用“试凑”的方法选取的。

4 仿真与结果分析

4.1 机器视觉

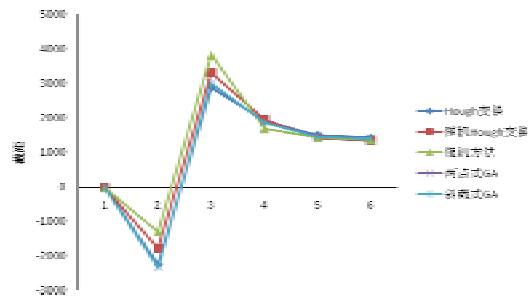
在 VC++6.0 环境下，分别采用 Hough 变换、随机 Hough 变换、随机检测方法以及本文所提出的两种遗传算法对玉米图像进行处理，作物行直线都能够正确提取，各种算法提取所消耗的时间如表 1 所示。

表 1 提取直线消耗的时间
Table 1 Time consuming to extract linear

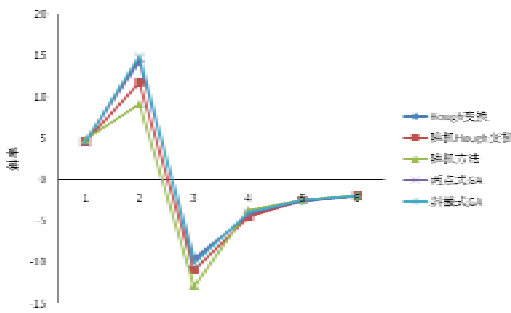
算法	Hough 变换	随机 Hough 变换	随机方法	两点式 GA	斜截式 GA
时间/ms	230	8	5	115	3010

从上面表格中可以看出，斜截式 GA 方法所耗时间最长，Hough 变换次之，两点式 GA 方法相对随机 Hough 变换和随机方法要长些，但是比 Hough 变换少，不足 Hough 变换的一半。

各种算法提取直线参数的精度对比如图 4 所示。



(a) 截距对比



(b) 斜率对比

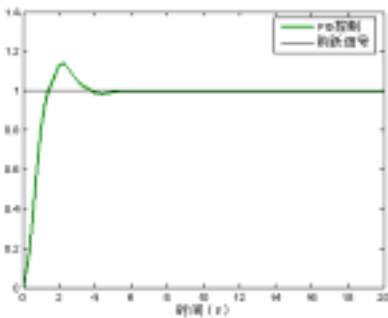
图 4 直线检测精度对比

Fig.4 Line detection accuracy comparison

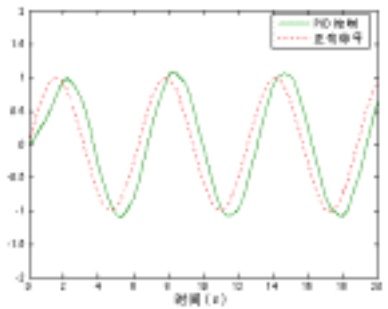
由上图可以看出，若以 Hough 变换的检测结果作为标准，两点式 GA 和斜截式 GA 检测结果的折线与 Hough 变换检测结果的折线几乎重合，而随机 Hough 变换和随机方法检测结果的折线则与 Hough 变换有一定的差别。在某种程度上可以认为，两点式 GA 和斜截式 GA 的检测精度要比随机 Hough 变换和随机方法更高。

4.2 PID 控制

在 MATLAB 下，采用 M 语言编写程序进行仿真。仿真时，分别采用幅值为 1 的阶跃信号和幅值为 1、采样频率为 1rad/s 的正弦波信号，仿真时间均为 20s，仿真实验的跟踪效果如图 5 所示。



(a) 阶跃信号的跟踪仿真



(b) 正弦信号的跟踪仿真

图 5 仿真跟踪效果

Fig.5 Tracking simulation results

由上图可以看出, PID 控制器的上升时间约为 2s, 且具有不超过 10% 的超调量; 响应时间约为 0.7s, 其最大跟踪误差不超过 0.2°。由此可得该 PID 控制器得到的系统动态响应曲线较好, 响应时间短、响应速度快, 稳态误差小, 能够满足自动导航系统的要求。

5 结论

本文研究开发了一种基于机器视觉的农机具导航系统。该系统采用基于遗传算法的直线检测算法和 PID 控制算法。经试验表明, 两点式 GA 方法检测时间为 115ms, 相比其他方法较短、检测精度较高; 增量式 PID 控制算法无论是动态性能还是静态性能都较好。该农机具导航系统能够满足田间作业的要求。

[参 考 文 献]

- [1] 赵博, 王猛, 毛恩荣, 等. 农业车辆视觉实际导航环境识别与分类[J]. 农业机械学报, 2009, 40 (7): 166-170.
- [2] 李娇, 李洪文, 何卿, 等. 拖拉机自动导航与机具偏转导航的仿真对比研究[J]. 农机化研究, 2009, 31 (7): 22-25.
- [3] 杨为民, 李天石, 贾鸿社. 农业机械机器视觉导航研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20 (1): 160-165.
- [4] 王福娟, 张宾. 农业车辆视觉导航技术研究进展[J]. 农机化研究, 2008, (11): 223-226.
- [5] F. Rovira-Mas, Q. Zhang, J. F. Reid and J. D. Will. Machine Vision Row Crop Detection Using Blob Analysis and the Hough Transform. ASAE Paper, 2002, pp. 2-4.
- [6] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] 章毓晋. 图像工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [8] Tijmen Bakker, Hendrik Wouters, Keesvan Asselt, et al. A vision based row detection system for sugar beet[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60 (1): 87-95.
- [9] 赵颖, 陈兵旗, 王书茂, 等. 基于机器视觉的耕作机器人行走目标直线检测[J]. 农业机械学报, 2006, 37 (4): 83-86.
- [10] 周建军, 张漫, 汪懋华, 等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J]. 农业机械学报, 2009, 40 (4): 151-156.

Automatic Navigation System for Farm Machinery Based on Machine Vision

Yang Fei, Li u Gang, Li u Zhaoxi ang

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: It is that one of the main directions of precision agriculture research in recent years that applying machine vision technology to the field of agricultural machinery navigation for providing reliable and accurate location information to agricultural machinery. The system included computer, video camera, displacement controller, hydraulic system, farm machinery and Etc. The system used PID control algorithm to improve the accuracy and stability of farm machinery automatic navigation. Considering the fact in crop row detection that Hough transform was robust and had high accuracy but very slow, and randomized Hough transform, randomized detection method were fast but had low accuracy, a novel crop row detection algorithm based on genetic algorithm was proposed, which is faster than Hough transform, and more accurate than randomized Hough transform and randomized detection method. The experiment results showed that the automatic navigation system for farm machinery is stable, high accuracy, able to meet the actual needs of farm machinery.

key words: machine vision; automatic navigation; PID control; Hough transform; genetic algorithm