

基于 TMS320DM642 的农业机器人视觉导航路径检测*

曹倩 王库 杨永辉 史小磊

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

【摘要】 在农田非结构化自然环境下,通过机器视觉提取导航线的处理算法,利用透视投影变换得到摄像机相对于导航路径的偏移距离和偏移角,成功地在 TMS320DM642 系统上得到实现,并对程序进行了基于 C 语言的代码优化。试验结果表明,偏移角的最大误差为 2° ,横向偏移距离最大误差为 5 cm。

关键词: 机器人 自定位 视觉导航 农业环境 数字信号处理

中图分类号: TP242.6⁺2

文献标识码: A

Identifying the Navigation Route Based on TMS320DM642
for Agriculture Visual Robot

Cao Qian Wang Ku Yang Yonghui Shi Xiaolei

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

In the farmland non-structurization natural environment, navigation route's extraction algorithm was studied based on machine vision. The distance and angle between camera and navigation route was gained by the perspective projection. The algorithm was successfully transplanted to TMS320DM642 hardware platform, and optimized on a C programming language level. In the examination, it shows that the biggest error of deviation angle between camera and navigation route is 2° and the biggest deviation distance between camera and navigation route is 5 cm.

Key words Robot, Self-orientation, Visual navigation, Agriculture environment, DSP

引言

农业机器人视觉导航技术作为精准农业的重要分支,越来越受到关注。国内外专家在作物识别和提取导航信息方面做了大量研究,但大多数都是基于 PC 的算法实现,成本较高,而且体积庞大,不易携带。鉴于此,采用 DSP 嵌入式平台取代传统的 PC 来控制机器人的视觉系统^[1]。基于非结构化农田自然环境的特点,本文使用一种提取导航路径简单有效的算法,并在 TMS320DM642 系统上实现。

1 导航路径提取算法

导航路径提取算法的流程图,如图 1 所示。可以看出,整个算法分为 6 个步骤,其中选择合适的彩

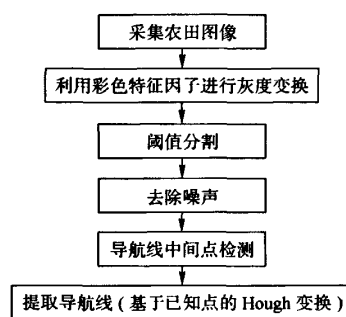


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the algorithm

色特征因子将采集的三维彩色图像变为一维的灰度图像,不仅减少了图像处理的数据量,而且有效地突出了农作物信息。由于农田环境受到外界的影响很

收稿日期: 2008-08-28 修回日期: 2008-11-13

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10A304)

作者简介: 曹倩, 博士生, 主要从事精细农业智能信息系统集成技术研究, E-mail: 41600333@qq.com

通讯作者: 王库, 教授, 博士生导师, 主要从事数字信号与图像处理研究, E-mail: wang_ku@263.net

大,因此在第4个环节中,需要去除掉干扰提取导航信息的噪声。本试验采用基于已知点的 Hough 变换提取导航线,能显著缩短数据处理时间。

1.1 彩色特征因子的选择及灰度化处理

通过在农田环境下大量的试验,得出如下结论: HIS 彩色空间中, H 分量图像比较好地突出了作物区域,同时土壤背景部分几乎变成了黑色。 S 分量图像虽然突出了作物区域,但是背景和作物区域的差异比较小。 I 分量图像只是提取了 RGB 图像的亮度信息,因此并没有突出作物区域。虽然 H 分量图像效果较好,但是由于试验中 DSP 采集图像的模型为 YCbCr,转换为 HIS 模型计算量大,在程序实现过程中耗时过多,而各分量同样没有较好地突出作物区域,不能获得有用的信息。 RGB 模型颜色信息最为丰富,但是也是最繁芜杂乱,不能很好地区分作物和非作物区域。 Ohta 等人^[2]通过对大楼、海滨等不同类型的彩色图像进行方差计算,归纳出 3 个正交的彩色特征

$$\begin{cases} I_1 = (R + G + B)/3 \\ I_2 = (R - G)/2 \text{ 或 } (B - R)/2 \\ I_3 = (2G - R - B)/4 \end{cases} \quad (1)$$

农田环境中作为导航引导目标的农作物一般呈绿色,而土壤等背景表现为非绿色,因此为了提高绿色通道权重,采用 $2G - R - B$ 作为彩色特征因子。图 2 是农作物在有阴影的情况下采集的图像及处理后的结果,图 3 是在强光下采集的农作物图像及处理结果。可以看出,采用 $2G - R - B$ 作为彩色特征

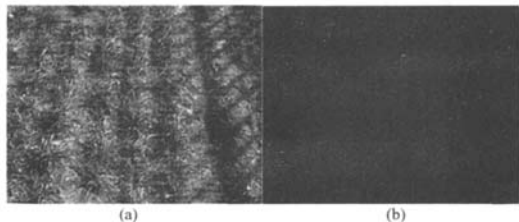


图 2 阴影下的农作物图像及处理结果

Fig. 2 Image of the crop under shadow

(a) 原图像 (b) 处理后图像

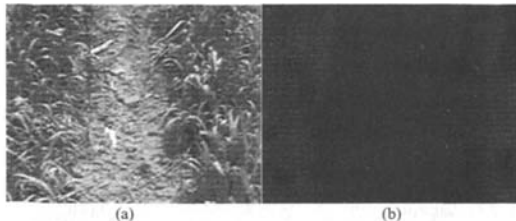


图 3 强光下的农作物图像及处理结果

Fig. 3 Image of the crop under sunshine

(a) 原图像 (b) 处理后图像

因子提取绿色通道的效果较好,在各种环境下,能将农作物和非农作物有效分开。

1.2 阈值分割

经灰度化处理,农田图像直方图多数有双峰但无明显低谷,或者双峰与低谷都不明显,并且两个区域的面积也难以确定。试验对比多种方法后,发现采用最大化类间方差(也称 Ostu 算法)^[3]实现阈值的自动选取能够得到较为满意的效果。Ostu 算法通用性较好,不需要对像素进行训练学习,可以适用于不同特点、不同质量的图像。图 4 是图 3b 按 Ostu 算法变换后的结果。



图 4 Ostu 变换图像
处理结果

Fig. 4 Image processing
result of the
Ostu transformation

1.3 去除噪声

试验需要去除的噪声,主要是指影响提取导航线的一些离散点。本算法应用 3×3 函数窗进行中值滤波去除点状噪声。经过中值滤波后,图像中还有小面积的团块状噪声,采用区域标记^[4]的方法处理。计算白点的区域面积,根据一定的标准,将区域面积小于该标准像素数量的区域设置成与背景一样的像素值(黑色像素)。区域区分的像素数标准一般比较难确定,这与摄像头安装的高度和俯角有很大的关系。如摄像头安装比较低、俯角大,则标准就要定得高些,反之标准就定得低些。试验中摄像头的高度是 81.5 cm、俯角是 25.8° ,区分像素数定为 100 能有效去除噪声,处理后的结果如图 5 所示。



图 5 除噪声后的图像

Fig. 5 Image processing
result of wipe
off disturb

1.4 检测导航路径中间点

除去噪声后图像的白色区域呈带状分布,由于农田环境的未知性和复杂性,除噪后图像的带状区域并不连通。如图 5 所示,图中白色带状区域为提取的有效信息,其内部出现了一些大小、形状不一的黑色区域,如果采用细线化、骨骼化,则不能提取到有效的中间点,而且处理时间过长。根据试验的实际情况,采用形态学方法提取边缘也是不可取的。针对带状目标物,采用了按行扫描图像来获得导航路径的方式。具体方法为从每行的左、右两边分别进行扫描,寻找到每行的左、右端点 x_{li} 、 x_{ri} ,则中间

点的横坐标为

$$x_i = \frac{x_{li} + x_{ri}}{2} \quad (2)$$

中间点的纵坐标为所在行的纵坐标。如果行扫描中没有遇到左端点或右端点,则默认左端点或右端点为零。如果左端点和右端点同时为零,则认为是无效点,中心点横坐标标记为零。

1.5 提取导航线

找到正确的中间点后,就可提取导航线的信息。作为导航路径的农作物自然形成的行线基本上为直线,或相对于轮式移动机器人前进方向局部范围内近似呈直线,因此目前研究中一般使用直线路径模型。直线检测的方法有很多^[5],最为常用的是最小二乘法、传统的 Hough 变换、基于已知点的 Hough 变换^[6]等。最小二乘法拟合误差较大,并且当中间点趋向于分布在多条直线附近时,有时拟合不能实现。所以本文只对传统的 Hough 变换、基于已知点的 Hough 变换两种方法进行比较。传统的 Hough 变换是一种全局性的检测方法,具有极佳的抗干扰能力,但其处理速度很慢、精度不易控制。因此,采用基于已知点的 Hough 变换提取导航线信息。基于已知点的 Hough 变换将传统 Hough 变换的穷举式运算过程简化为基于一个已知点的一元映射,在保留传统 Hough 变换抗干扰能力强的基础上简化了计算过程,极大地提高了处理速度。基于已知点的 Hough 变换检测直线的过程详见文献^[6]。已知点的选取在图像的 1/2 处,如果 1/2 处的中间点是无效的,则从图像 1/2 处开始向下扫描,直到遇到有效中间点为止。

在 CPU 型号为 AMD Sempron(tm),主频为 1.8 GHz,内存为 1GB 的台式计算机上用 Matlab 测量两种算法运行时间。图 6 中的直线为检测出的导航路径,可以看出 2 种方法都能正确的计算出导航路径的有效信息。但是在运行时间上两者却相差很多,对于一幅 720×576 的图像,传统的 Hough 变换需要 1.578 s,而基于已知点的 Hough 变换仅需要 0.016 s,只是传统方法的约 1/100。对于需要连续



图6 图像处理结果对比图

Fig.6 Image processing results of the transformation

(a) 传统 Hough 变换 (b) 基于已知点的 Hough 变换

处理多幅照片来说,累积节约的时间是相当可观的。另外采用传统 Hough 变换需要占用大量的存储单元,而基于已知点的 Hough 变换则仅需要占用 10 个存储单元,后者能够更有效利用 DM642 有限的存储空间。所以基于已知点的 Hough 变换更能满足系统实时性的要求。

2 机器人的自定位

自定位的实现是农业机器人自主导航的先决条件。在平地行走时,农业机器人的位置、姿态(简称位姿)可以用相对导航路径的偏移距离 d 及偏移角 β 表示。前面已经介绍了在图像平面中识别导航路径的方法,但导航路径必须转换为轮式机器人相对于实际路径的位姿值才能进行导航控制,这就需要对摄像机进行标定。在视觉导航时,摄像机安装在机器人的正上方,以一定的倾角拍摄机器人正前方的地面区域。

使用 Tsai 的两步法。首先建立空间模型^[7],完成由空间坐标系向图像坐标系的变换,然后再用设立空间参照物的方法对摄像机内外部参数进行标定,这种方法同时具有线性法求解速度快和非线性法计算精度高的优点。为此分别建立 4 个坐标系:空间坐标系(O_w, X_w, Y_w, Z_w)、摄像机坐标系(O_c, X_c, Y_c, Z_c)、摄像机图像坐标系(O_p, X_p, Y_p, Z_p)、计算机中图像坐标系(O_i, X_i, Y_i)。各个空间坐标之间的关系如图 7 所示。

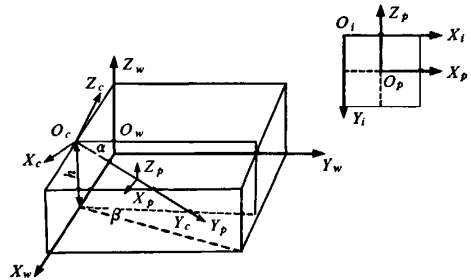


图7 农业机器人的空间成像关系示意图

Fig.7 Space geometry model of the agriculture robot

进而经过计算和推导,得出机器人偏移角 β 和偏移距离 d ,即

$$\beta = \arctan\left(\frac{F_y \sin \alpha + (O_y - kO_x - y_0 + kx_0) \cos \alpha}{F_x k}\right) \quad (3)$$

$$d =$$

$$\frac{h[(O_y - kO_x - y_0 + kx_0) \sin \alpha - F_y \cos \alpha]}{kF_x \cos \beta + [F_y \sin \alpha + (O_y - kO_x - y_0 + kx_0) \cos \alpha] \sin \beta} \quad (4)$$

式中 F_y, F_x, O_y, O_x ——试验确定的参数

x_0, y_0 ——经图像处理求出的已知点坐标
 k ——Hough 变换提取出导航路径直线斜率
 α ——摄像头俯仰角
 h ——摄像头距离地面高度

3 算法在 TMS320DM642 上的实现与优化

DM642 是美国德州仪器公司(TI)专门为多路视频输入输出设计的数字信号处理芯片。其运算功能强大,建立在第二代高性能超长指令字结构上,可以并行处理 8 条指令,非常适用于数字图像处理^[8]。在本设计中,其工作主频选择为 600 MHz。根据试验的需要,硬件系统除了扩展必须的存储器以及视频采集与播放外,还扩展了多路数字 I/O、多路异步串口以及网络接口等功能。

该算法程序主要用 C 语言编写。在移植过程中,结合 DM642 具有 8 条流水线的特性,将算法代码进行了优化。代码优化的方法比较多,试验用到的主要方法有:①程序中广泛运用以空间换时间的方法来提高代码的运行效率^[8]。②编译器优化。在编译时选择不同的编译优化选项,如 $-pm$ 、 $-oe$ 选项。③使用 DSP 汇编语言改写一些核心的需要满足实时性的 C 代码。直接编写的汇编程序,不再经过 CCS 优化器优化,而是直接进行编译、链接。④优化 C 语言编写的代码,加入指示性信息。常用的指示性信息如 $\#Pragma\ MUST_ITERATE$ 等。

4 试验结果及数据分析

为了验证图像处理算法与自定位算法的正确性,在实验室环境下进行试验。摄像机固定在距离地面约 81.5 cm 处,向下俯角约 25.8°。按照上述方法,先通过图像处理计算出在图像坐标系下导航路径的有效信息,再进行自定位算法,得出世界坐标系下摄像机距离导航路径的偏移距离和偏移角。经试验表明算法图像处理部分能提取导航路径 99.5% 的有效信息。自定位部分先计算摄像机的内外部参数,结果为: $F_x = 603.406\ 9$, $F_y = -770.389$, $O_x = 377.586\ 4$, $O_y = 267.001\ 7$,再由内外部参数及图像坐标系下提取到的导航路径信息计算位姿信息。由于摄像机安装会造成一定的系统误差,所以需要

数据进行校正。从试验数据中随机抽取 11 组数据,校正后如表 1 所示(分别对偏移角和偏移距离进行比较)。

表 1 实际结果与计算结果对比

Tab.1 Comparison of practical results and calculation results

试验 标号	偏移角 $\beta/(^\circ)$		偏移距离 d/cm		角度误差 $\beta'/(^\circ)$	距离误差 d'/cm
	实际值	测量值	实际值	测量值		
1	-10.0	-9.3	20.0	21.5	-0.7	-1.5
2	-8.0	-7.7	20.0	23.5	-0.3	-3.5
3	-6.0	-4.8	0.0	-5.0	-1.2	5.0
4	-4.0	-3.0	0.0	-3.5	-1.0	3.5
5	-2.0	-1.9	0.0	-2.0	-0.1	2.0
6	0.0	-0.2	0.0	-0.5	0.2	0.5
7	2.0	2.0	0.0	1.0	0.0	-1.0
8	4.0	3.8	0.0	2.7	0.2	-2.7
9	6.0	7.6	20.0	19.5	-1.6	0.5
10	8.0	9.2	20.0	20.7	-1.2	-0.7
11	10.0	10.5	20.0	21.7	-0.5	-1.7

试验数据表明,偏移角的最大误差在 2° 之内,横向偏移距离最大误差在 5 cm 之内。偏移角误差平均值为 $-0.479\ 1^\circ$,标准偏差为 0.22°;横向偏移距离误差平均值为 $-0.787\ 9\ \text{cm}$,标准偏差为 0.452 cm。其中偏移角误差在 1.2° 内的数据占总试验数据的 75% 以上,横向偏移距离误差 3 cm 内的数据占总试验数据的 77% 以上。误差的主要来源是摄像机安装造成的系统误差和图像处理过程中的系统误差。

5 结束语

对提取农田环境下导航路径的图像处理算法和自定位技术进行了研究,使用一种简单而有效的农田自然环境下提取导航路径算法,并将提取到的数据转换为世界坐标系下机器人的位姿信息,在 TMS320DM642 上实现,并进行了算法的优化。试验结果表明,每秒处理 15 帧图像,偏移角的最大误差在 2° 之内,横向偏移距离最大误差在 5 cm 之内,能够满足实时导航的需求。

参 考 文 献

- 1 李方慧,王飞,何佩琨. TMS320C6000 系列 DSPs 的原理与应用[M]. 第 2 版. 北京:电子工业出版社,2003.
- 2 Ohta Y, Kanade T, Sakai T. Color information for region segmentation[J]. CGIP, 1980, 13(3): 222~241.
- 3 Ostu N. Discriminant and least square threshold selection[C]// In: Proc 4IJCPR, 1978: 592~596.
- 4 陈兵旗,孙明. Visual C++ 实用图像处理专业教程[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- 5 张红霞. 基于机器视觉的旱田多目标直线检测方法的研究[D]. 北京:中国农业大学,2007.

- Zhang Hongxia. Study on detection algorithm for crop target multi-lines of the field image based on machine vision[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 6 Chen B, Tojo S, Watanabe K, et al. Study on the computer-eye of transplant robot: part 3[J]. Japanese Society of Agricultural Machinery, 1998, 60(5):13~22.
- 7 赵颖. 农业自主行走机器人视觉导航技术的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
Zhao Ying. Research on visual navigation for agricultural mobile robot[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 8 张飞, 王库, 史小磊. 基于机器视觉的公路车流量检测系统研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24:138~140.
Zhang Fei, Wang Ku, Shi Xiaolei. Vehicle flow detection system based on machine vision[J]. Control & Automation, 2008, 24:138~140. (in Chinese)
- 9 Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1 330~1 334.
- 10 Toru T, Akira T, Tsuguo O, et al. Crop row tracking by an autonomous vehicles using machine vision[J]. JSAE, 2000, 62(5):37~42.
- 11 王军宁, 何迪, 马娟. TI DSP/BIOS 用户手册与驱动开发[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- 12 Hague T, Marchant J A. Ground based sensing systems for agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1~2):11~28.
- 13 Choi C H, Erbach D C, Smith R J. Navigational tractor guidance system[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(3):691~706.
- 14 赵颖, 孙群, 陈兵旗, 等. 基于机器视觉的非结构化道路导航路径检测方法[J]. 农业机械学报, 2007, 38(6):202~204.
- 15 侯学贵, 陈勇, 郭伟斌. 除草机器人田间机器视觉导航[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3):106~108.
Hou Xuegui, Chen Yong, Guo Weibin. Machine vision-based navigation for a weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):106~108. (in Chinese)
- 16 杨庆华, 吴佳艺, 鲍官军, 等. 农林环境机器视觉导航路径生成算法及应用[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3):147~151.
Yang Qinghua, Wu Jiayi, Bao Guanjun, et al. Algorithms of path guidance line based on computer vision and their applications in agriculture and forestry environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):147~151. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 196 页)

- 5 李春常, 奚立峰, 周炳海, 等. 基于 Web Services 的 PDM 系统 DNC 系统集成解决方案[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(10):192~195.  
Li Chunchang, Xi Lifeng, Zhou Binghai, et al. A Web Services-based solution for the integration between PDM system and DNC system[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(10):192~195. (in Chinese)
- 6 苏忠, 战晓雷. 对等网 PEER-TO-PEER[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- 7 朱其亮, 郑斌. CORBA 原理及应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
- 8 杨亚罗, 王润孝. 基于 CORBA 的构件实现方法研究[J]. 机床与液压, 2007, 35(9):204~207.  
Yang Yaluo, Wang Runxiao. The research of how to obtain components based on CORBA[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007, 35(9):204~207. (in Chinese)
- 9 韩坚, 范玉顺, 吴澄. 基于代理和 CORBA 的应用集成机制研究[J]. 计算机集成制造系统, 1999, 5(2):11~15.  
Han Jian, Fan Yushun, Wu Cheng. Research on the application integration mechanism based on agent and CORBA[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 1999, 5(2):11~15. (in Chinese)
- 10 Cai Xiaolu. Web service case study[R]. Armonk, NY., USA: IBM DeveloperWorks, 2002.