

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.056

基于达芬奇平台的联合收获机视觉导航系统路径识别*

张成涛^{1,2} 谭 或¹ 吴 刚¹ 王书茂¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 广西工学院汽车工程系, 柳州 545006)

【摘要】 针对联合收获机视觉导航对实时性及鲁棒性要求, 采用了基于达芬奇平台的路径识别算法实现方案。在分析小麦收获视频图像纹理度量的基础上, 提出了基于改进平滑度纹理特征的视觉导航路径识别算法。该算法利用水平方向上图像平滑度纹理特征, 把原亮度图像转换成水平方向平滑度图像, 然后采用自适应阈值分割图像的边界点, 最后通过 Hough 变换确定视觉导航的路径。为验证该算法在达芬奇平台的运行效果, 对联合收获机田间收获小麦进行导航实验。结果表明: 算法运行实时性高, 识别路径平均速度可达 28.6 帧/s; 算法鲁棒性好, 对多种环境下的路径识别有较好的适应性; 算法运行稳定可靠, 持续运行时间无限制。

关键词: 联合收获机 视觉导航 路径识别 达芬奇平台 图像纹理

中图分类号: TP242.6⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)S0-0271-06

Visual Navigation System Path Recognition Algorithm Based on DaVinci Platform for Combine Harvester

Zhang Chengtao^{1,2} Tan Yu¹ Wu Gang¹ Wang Shumao¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Automobile Engineering Department, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract

According to combine visual navigation of real-time and robustness requirement, based on the DaVinci platform, a path recognition algorithm was designed. After analyzing the texture measure in the image of wheat harvest, the path recognition algorithm of visual navigation, on account of an improved smoothness texture feature, was put forward. The original brightness image was converted into horizontal smoothness image, by the image texture feature of the horizontal smoothness. The harvest boundary was extracted from the smoothness image by using adaptive threshold segmentation, and finally visual navigation path could be determined by Hough transform. In order to validate the algorithm in the operation of the DaVinci platform, the navigation experiments of wheat harvest by combine harvester were conducted. The experimental results showed that the algorithm had the high real-time and good robustness. Its average rate of recognizing navigation line was up to 28.6 frame per second. Path recognition effect was good in a variety of environments. Algorithm operation was stable and reliable, and to continue operating time was unlimited.

Key words Combine harvester, Visual navigation, Path recognition, DaVinci platform, Image texture

引言

联合收获机自动导航系统是智能化精细农业研

究的重要组成部分, 其中基于机器视觉的导航系统研究是最具发展前途的导航方式之一, 有着广阔的应用前景^[1-3]。导航路径识别是联合收获机视觉导

收稿日期: 2012-07-07 修回日期: 2012-07-16

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110008110009)

作者简介: 张成涛, 博士生, 广西工学院讲师, 主要从事车辆智能控制及机电一体化技术研究, E-mail: zhchtzet@yahoo.com.cn

通讯作者: 谭或, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆智能控制及机电一体化技术研究, E-mail: tanyu32@sina.com

航系统关键技术之一,由于复杂的农田非结构环境和多变的自然光线变化^[3],要求其图像处理算法具有较高的实时性和鲁棒性,以满足导航控制系统的需要^[4]。

达芬奇平台是TI公司开发的一种基于C64x+的SoC(片上系统),包括DSP核、ARM核、视频加速器和外设,专门为高效、强大的数字视频量身定制^[5]。该平台是基于共享存储的嵌入式多处理环境,在片内多处理器之间形成了典型的C/S架构^[6]:以计算能力强大的C64x+核作为服务器提供算法的实时计算服务,带有JAVA处理能力的ARM9核实现DSP算法调用、复杂的控制策略、用户界面及数据存储等功能。

为满足导航系统的实时性需要,采用达芬奇平台作为路径识别算法的软硬件平台,通过Matlab软件分析收获小麦视频图像的特点,提出基于改进平滑度纹理特征的视觉导航路径识别算法,并在多种小麦收获环境下对该算法进行实验验证。

1 小麦收获图像特征分析

1.1 视频获取方法

为反映算法对实际路径的识别效果,要求进行分析的视频图像与视觉导航系统正常工作时的视频获取方法一致。为此,研制了达芬奇平台视频采集系统,该系统可利用联合收获机视觉导航系统的硬件,实现联合收获机田间实验视频图像的采集、编码与存储,并把采集后视频解码后转存到计算机上,从而获取所需的小麦收获视频图像。达芬奇平台视频采集系统功能框图如图1所示。

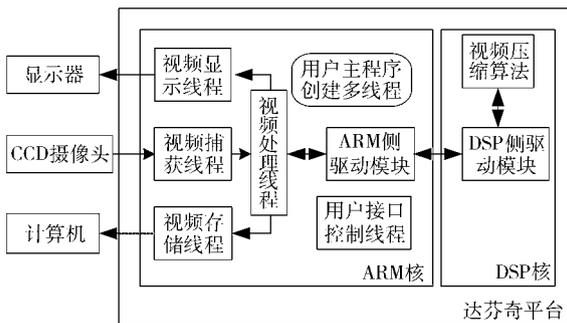


图1 达芬奇平台视频采集系统功能框图

Fig.1 Function diagram of video acquisition system based on DaVinci

1.2 图像区域纹理度量分析

图2是田间收获小麦视频截图,从图中可看出,未收获小麦区域的纹理特征与已收获区域或收获边界的纹理特征差异很大,其中未收获小麦区域无明显的纹理特征,而已收获区域或收获边界在垂直方向的纹理特征呈明显的条带状分布。因此,可通过

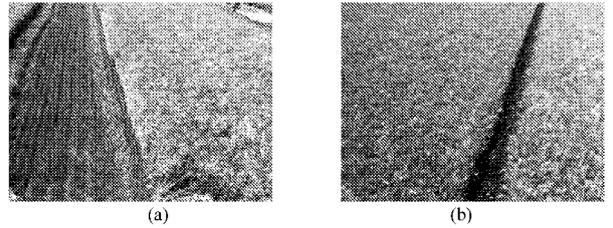


图2 田间收获小麦视频截图

Fig.2 Video screenshots of wheat harvest in fields

提取未收获小麦区域与已收获小麦区域或收获边界的纹理特征,确定收获边界即可完成导航系统路径识别。

描述区域纹理特征的方法可分为统计法、结构法和频谱法。考虑算法的复杂度和实时性,采用基于统计的纹理特征提取方法,其中最简单的统计特征是基于图像区域灰度级直方图的统计量来描述纹理。参照文献^[7],令 z 为表示某区域图像亮度的随机变量, $p(z_i)$ 为该区域对应的直方图, $i=0,1,\dots,L-1$,其中 L 是灰度级数,则关于 z 的平均亮度为

$$m = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i)$$

平均对比度为 $\delta(z) = \sqrt{\sum_{i=0}^{L-1} (z_i - m)^2 p(z_i)}$

相对平滑度为 $R = 1 - \frac{1}{1 + \delta^2(z)}$

熵为 $e = - \sum_{i=0}^{L-1} p(z_i) \ln p(z_i)$

由于以上纹理度量的提取都是基于图像区域的灰度级直方图进行统计的,因此统计区域窗口的选择会影响被提取特征的判别力。图像区域窗口可通过重叠或非重叠的2种方式扫描图像^[8]。所谓重叠方式即为选择一个大小合适的统计窗口,在待处理图像上逐点移动统计窗口,最后可得出与原图像大小相同的纹理特征值图像;非重叠方式需要把整个图像分成若干大小相同的非重叠区域窗口进行统计,每个窗口的纹理特征为该窗口内所有点的纹理度量。由于基于直方图矩作为图像的纹理特征不能反映像素间空间分布信息,非重叠方式的窗口划分会直接影响分割边界的位置信息,然而基于逐点的区域窗口统计方式可有效克服以上困难,因此采用重叠的扫描方式确定统计窗口。

选取统计窗口大小为40像素×40像素,采用重叠方式确定图像区域窗口,通过Matlab软件编程实现如图3所示图像纹理度量的提取结果。其中图3a、3b、3c分别为图2a的亮度图像转换为相应的对比度图像、平滑度图像以及熵图像;图3d、3e、3f分别为图2b的亮度图像转换为相应的对比度图像、

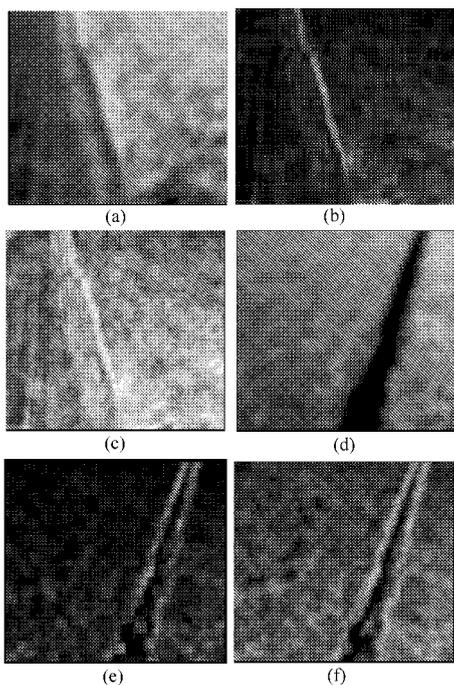


图3 提取后的图像纹理度量

Fig.3 Texture measure images after extraction

平滑度图像以及熵图像。

从图 3a 和图 3d 中可看出未收获区域与已收获或边界区域的方差(对比度)存在较大差异,基于此为采用纹理特征提取收获边界提供了重要保证。从图 3b、图 3c、图 3e 和图 3f 中可看出把图像的平滑度和熵作为其纹理特征值可有效提取收获边界。

由于达芬奇平台处理器芯片 TMS320DM6446 的 DSP 核为 32 位定点处理器,作浮点运算效率较低,而纹理描绘于熵度量公式中存在对数运算,会影响算法在 DSP 上的运行速度,因此本文路径识别算法选用平滑度作为图像的纹理特征度量。

图 4 是基于平滑度纹理特征图像的路径识别结果。其中图 4a 和图 4c 分别显示对图 3b 和图 3e 进行自适应阈值处理后得到的二值图像,图 4b 和图 4d 分别显示对处理后的二值图像进行 Hough 变换后得到的直线检测结果。从图 4a 和图 4c 中可看到二值化后平滑度纹理特征图像可有效获得大部分的边界点,滤除绝大多数的非边界点。这为进行 Hough 变换得到准确的边界直线提供了有利保障,同时使得 Hough 变换有效数据点减少,提高了 Hough 变换的速度。把图 4b 和图 4d 中检测得到的黑色直线与图 2b 收获边界线相比较可得出,通过平滑度纹理特征最终检测得到的直线路径可有效地表征收获边界。

为验证基于平滑度纹理特征算法的实时性,本文通过 Matlab 软件编程实现该算法,并基于计算机测试算法运行消耗的时间。测试该算法运行时间的

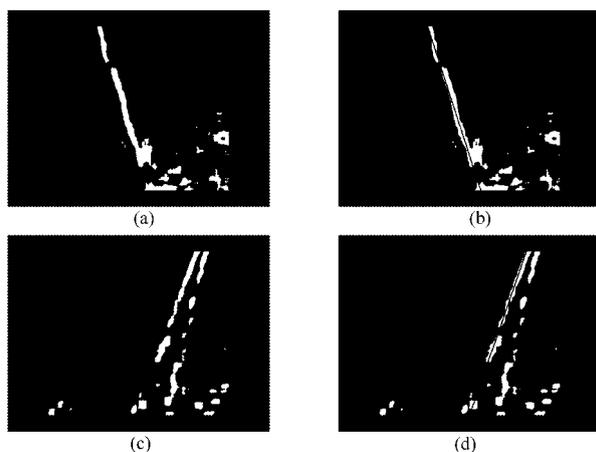


图4 基于平滑度纹理特征图像的路径识别结果

Fig.4 Path recognition results based on smoothness texture feature images

实验结果如表 1 所示,从表中可看出对于不同图像该算法耗费时间变化不大,算法中用于提取平滑度纹理特征所耗费时间是 Hough 变换所消耗时间的 96 倍左右,每识别一帧图像平均需要耗费约 47.14 s,因此该算法实时性较差,对于导航系统而言实用价值不大,因此需要对图像特征值的提取算法进一步改进。

表 1 平滑度纹理特征路径识别算法消耗时间
Tab.1 Running time of path recognition algorithm based on smoothness texture characteristics

图像编号	算法运行时间/s		
	平滑度纹理特征提取	Hough 变换	合计
图 2a	46.33	0.48	46.81
图 2b	46.98	0.49	47.47

2 基于改进的平滑度纹理特征路径识别算法

2.1 改进的平滑度纹理特征路径识别方法

分析如图 2 所示的小麦收获现场图像,可得出该类图像结构化特点:①收获边界纹理特征总体为垂直方向,水平方向平滑度变化大。②收获边界亮度变化最大,而两侧区域内部灰度变化较小。③收获边界右侧亮度始终大于左侧亮度,计算平滑度时只考虑该情况,可有效消除图 4d 中出现的边界识别误差。

经过研究发现基于平滑度纹理特征算法中最耗时部分为逐点扫描方式进行的区域窗口直方图统计,因此改进后算法应避免涉及直方图统计计算。考虑收获图像的结构化特点,本文采用了适合达芬奇平台的基于改进的平滑度纹理特征的路径识别算法^[9]。该算法实际上是一种统计滤波器,其响应是基于图像窗口区域水平方向平滑度的统计值,然后

用该统计值作为区域窗口中心像素的亮度。具体工作原理如图5所示。

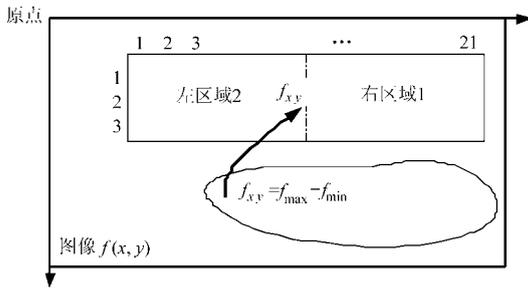


图5 基于水平方向平滑度空间滤波原理图

Fig.5 Spatial filtering principle diagram based on horizontal smoothness

改进的平滑度纹理特征路径识别方法的具体步骤为:

(1)确定窗口区域大小。考虑图像的纹理特性,选取的窗口大小为3像素×21像素。

(2)以过中心点坐标 (x,y) 的垂直线为边界,把区域分为左、右两部分,分别求出右区域1最大值 f_{max} 和左区域2的最小值 f_{min} 。

(3)由公式 $f_{xy} = f_{max} - f_{min}$,得到坐标 (x,y) 处的水平方向平滑度 f_{xy} 。

(4)计算有效区域内(所定义收获边界的最大范围)每个点的水平方向平滑度,最后得到空间滤波后水平方向平滑度纹理特征图像 $f'(x,y)$ 。

(5)求出图像 $f'(x,y)$ 的最大灰度,自适应阈值处理该图像后得到二值图像。

(6)对二值化后的水平方向平滑度纹理特征图像通过Hough变换确定收获边界,即为导航系统要所识别的规划路径^[10]。

通过Matlab软件完成以上算法,对图2中视频图像进行路径识别后的处理结果如图6所示。其中图6a、6c显示的是分别对图2a、2b进行基于方向平滑度纹理特征提取后的图像,从中可以看出该算法提取的纹理特征在边界处亮度最大;同时,对图2b存在较宽边界情况时,该算法可准确保留收获边界点,去除非收获边界点,避免图4c中出现2条明显的收获边界。图6b、6d显示的是分别对图6a、6c通过Hough变换后检测直线后的结果,从图中可看出,虽然相比较图4b、4d非边界点数量有所增多,但并不影响Hough变换直线检测结果;而且对比图6d和4d,该算法检测结果更准确,能够确定导航系统所需的收获路径。

表2所示的是改进算法运行时间测试结果。对比表1可看出逐点计算图像的纹理特征部分的消耗时间减小了29倍,算法累计运行时间由原来的平均47.1s减少到1.9s,该算法改进后的运算速度明显

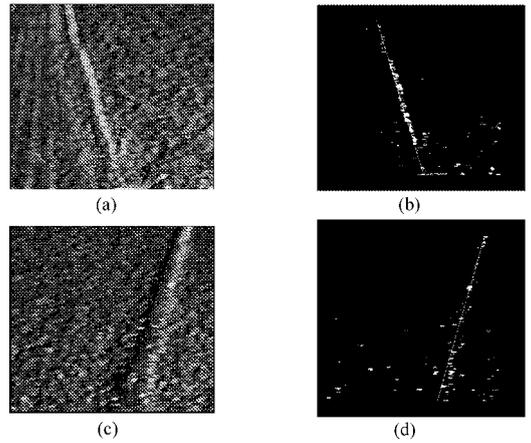


图6 基于改进算法的路径识别结果

Fig.6 Path recognition results based on improved algorithm

表2 基于改进的平滑度纹理特征路径识别算法消耗时间

Tab.2 Running time of improved path recognition algorithm based on smoothness texture characteristics

图像编号	算法运行时间/s		
	水平方向平滑度纹理特征提取	Hough变换	合计
图2a	1.63	0.32	1.95
图2b	1.59	0.27	1.86

增加。

2.2 基于达芬奇平台路径识别软件实现

以上是基于计算机平台通过Matlab软件进行的算法分析,为了测试该算法基于达芬奇平台的运行性能,需要开发在达芬奇平台上实现基于该算法的路径识别软件^[11]。

基于达芬奇平台的路径识别软件包括^[6]:
①ARM端应用程序。②DSP端数字图像处理算法。包括:基于方向平滑度纹理特征提取算法;自适应阈值门限处理及Hough变换检测导航路径算法。DSP端代码引擎服务器生成。

实现该软件的详细流程图如图7所示。

3 实验

为验证基于达芬奇平台的路径识别算法的实际性能,通过已开发的路径识别软件,对不同自然光线条件下的联合收获机田间收获小麦进行路径识别实验。实验收获机为新疆IIA型,谷物为小麦,所采用摄像头为NTSC制式的彩色监控镜头,焦距为8mm,最大光圈为1.2,靶面尺寸为1/3in,平台采集和输出图像分辨率为720像素×480像素。

图8为实验过程中显示器输出视频图像截图。图8a中前景为软件运行数据的统计信息,其中主要包括ARM CPU占用率、DSP CPU占用率、视频帧

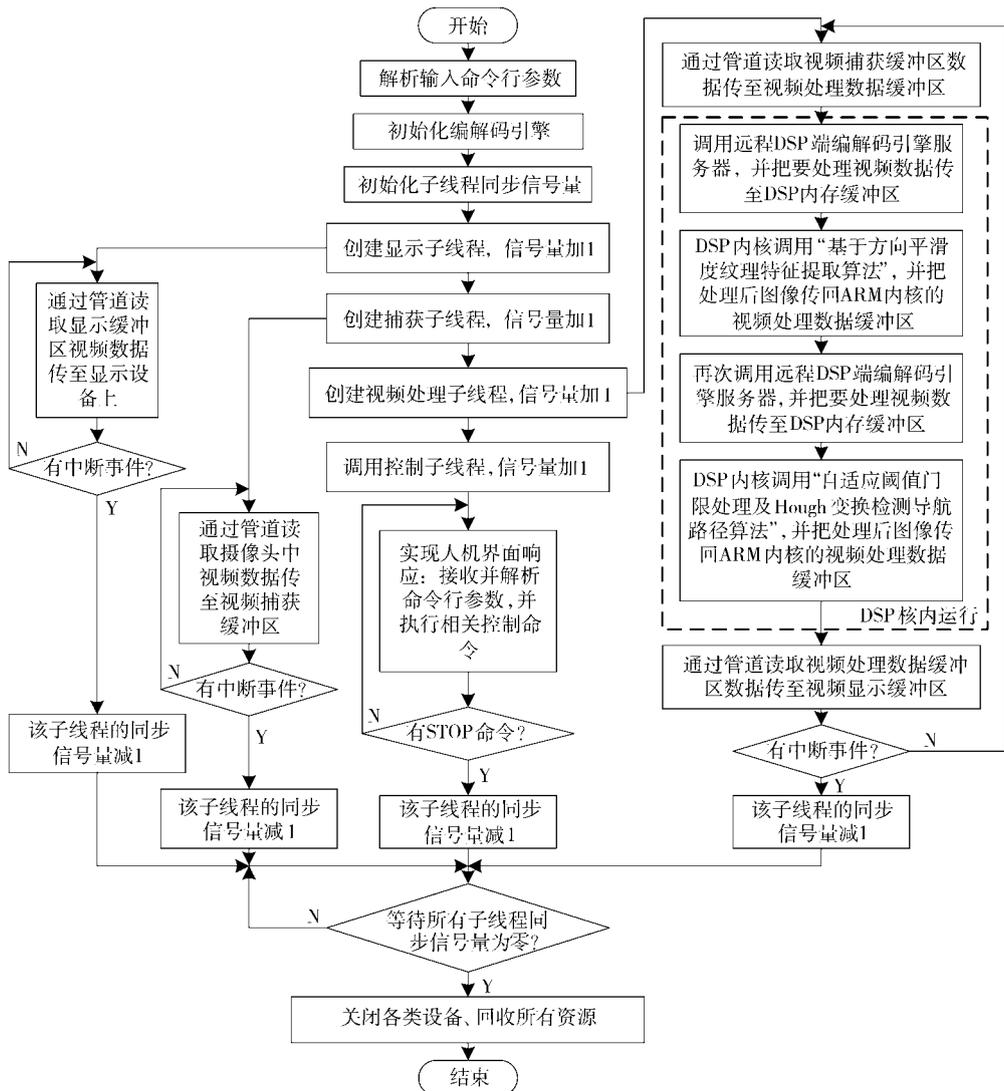


图7 基于达芬奇平台的路径识别软件流程图

Fig. 7 Software flow chart of path recognition based on DaVinci platform

率、软件持续运行时间、输出视频制式以及图像分辨率等信息;背景为输出路径识别后的视频图像,其中黑色方框区域为进行路径识别的有效区域,位于区域内的直线为路径识别软件所最终确定的导航路径。从图8a可见当前软件持续运行了3小时11分6秒,经实验验证该软件可长时间持续可靠运行,无具体时长限制。

图8b、8c和8d为不同自然光线条件下路径识别软件输出的视频截图。其中图8b为光线偏强条件下的路径识别结果,图8c为光线正常条件下的路径识别结果,图8c为光线偏弱条件下的路径识别结果。对比每帧路径识别的无效区域,可看出不同光线条件下该算法的路径识别效果良好。

表3为路径识别实验输出视频序列参数统计结果。

从表中可看出:

(1)ARM CPU 占用率均值为4.6%,为导航系

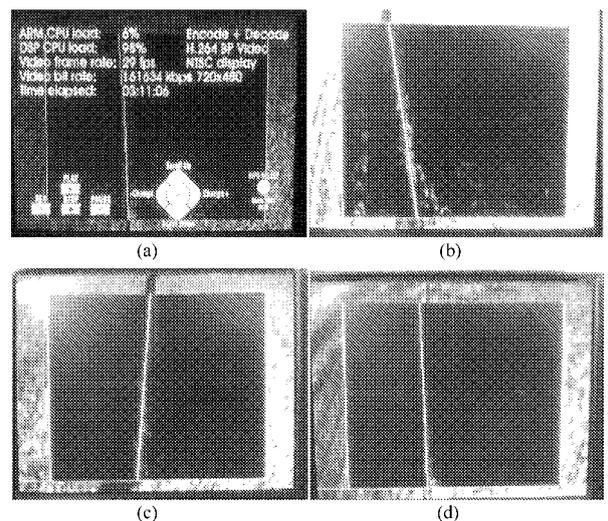


图8 不同光线条件下路径识别软件输出的视频截图

Fig. 8 Output video screenshots of path recognition software under different lighting conditions

统开发复杂的转向控制策略提供了条件。

(2)DSP CPU 占用率均值为97.1% (小于100%),

表3 路径识别试验输出视频序列参数统计结果

Tab.3 Parameters statistical results of output video sequence in path recognition test

视频序列序号	ARM CPU 占用率/%	DSP CPU 占用率/%	视频帧率 /帧·s ⁻¹	航角偏 差/(°)	图像中心点水平 位移偏差/像素
1	4	97	29	0.89	10
2	5	97	29	1.64	18
3	5	97	28	0.38	3
4	9	97	29	0.59	1
5	3	97	28	0.86	4
6	6	97	28	1.87	10
7	4	97	29	1.01	3
8	2	97	30	3.31	13
9	4	97	29	0.49	5
10	5	97	29	0.33	14
11	3	97	28	1.89	0
12	5	98	30	2.20	10
13	6	97	27	2.23	8
14	4	97	28	0.41	9

注:航角及图像中心点水平位移偏差皆为像平面坐标系参数,没有考虑摄像机标定对其影响。

均方差为0.3%,这为路径识别算法的实时可靠运行提供了保证。

(3)视频帧率均值为28.6帧/s,均方差为0.8帧/s,平均处理每帧视频的时间为35ms,且处理每帧视频时间波动不大,完全符合路径识别算法

的实时性需要。

(4)在像平面坐标系内路径识别的航角偏差均值为1.29°,水平位移偏差均值为7.7像素。若考虑摄像机模型,通过摄像机标定获得摄像机的内、外参数,把像平面水平位移偏差均值的二维信息映射为水平平面上的笛卡尔空间信息,可得到导航线的水平位移偏差均值约为5.3cm。

4 结论

(1)研究了基于达芬奇平台的路径识别算法,实现了将嵌入式技术应用于联合收获机视觉导航系统,提高了联合收获机视觉导航系统的实用价值。

(2)提出了改进的平滑度纹理特征路径识别算法,降低了软件的复杂度,避免了大量的浮点运算,为该算法可靠地应用在定点DSP上提供了可能。

(3)该算法运行在达芬奇平台上,具有运行速度快、实时性高,对多种环境下的路径识别具有较好的适应性,鲁棒性好,工作稳定可靠,可长时间连续工作等优点。

(4)通过实验验证,该算法的路径识别结果为:像平面坐标系内路径识别的航角偏差均值为1.29°,水平位移偏差均值为7.7像素,实际导航线的水平位移偏差均值约为5.3cm,基本满足联合收获机视觉导航精度需要。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 丁幼春,王书茂. 联合收获机视觉导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(5):137~142.
Ding Youchun, Wang Shumao. Vision navigation control system for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 137~142. (in Chinese)
- 3 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.
Zhao Bo, Wang Meng, Mao Enrong, et al. Recognition and classification for vision navigation application environment of agricultural vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 166~170. (in Chinese)
- 4 Tang Jinglei, Jing Xu, He Dongjian, et al. Visual navigation control for agricultural robot using serial BP neural network [J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(2):194~198.
- 5 彭启琮. 达芬奇技术——数字图像/视频信号处理新平台[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- 6 张起贵,张胜,张刚. 最新DSP技术——“达芬奇”系统、框架和组件[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- 7 Gonzalez R C, Woods R E. 数字图像处理[M]. 2版. 阮秋琦,阮宇智,译. 北京:电子工业出版社,2009.
- 8 Latif-Amet A, Ertuzun A, Ercil A. An efficient method for texture defect detection: sub-band domain co-occurrence matrices [J]. Image and Vision Computing, 2000, 18(6~7): 543~553.
- 9 王晓燕,陈媛,陈兵旗,等. 免耕覆盖地秸秆行茬导航路径的图像检测[J]. 农业机械学报,2009,40(6):158~163.
Wang Xiaoyan, Chen Yuan, Chen Bingqi, et al. Detection of stubble row and inter-row line for computer vision guidance in no-till field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(6): 158~163. (in Chinese)
- 10 吴刚,谭彧,郑永军,等. 基于改进Hough变换的收获机器人行走目标直线检测[J]. 农业机械学报,2010,41(2):176~179.
Wu Gang, Tan Yu, Zheng Yongjun, et al. Walking goal line detection based on improved Hough transform on harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 176~179. (in Chinese)
- 11 宋立新,于伏亮. 基于DSP的驾驶员疲劳检测系统[J]. 计算机工程与设计,2012,33(2):519~522.