

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.033

全方位视觉定位系统标识方位角研究^{*}

李明^{1,2} 芋生憲司³ 刘仲华¹ 莫亚武² 吴彬²

(1. 国家植物功能成分利用工程技术研究中心, 长沙 410128; 2. 湖南农业大学工学院, 长沙 410128;
3. 东京大学生物环境机械工学研究室, 东京 113-8657)

【摘要】 为保证全方位视觉图像中标识方位角度的计算精度,研究了图像除噪和提取人工标识的算法。采用低频滤波除噪;计算了图像中红色像素的强度,并设置红色阈值提取红色特征像素,以相邻像素的欧几里得几何距离来划分像素块,每像素块的重心作为图像中的位置标识;求出图像中标识与相机投影中心的方位角度;在复杂环境中,采用蓝色块来辅助红色标识判别人工标识。通过图像标识识别实验验证了除噪处理的有效性;并在面积为30 m×30 m的室外平地上,进行了定点、直线行驶和传感器倾斜实验。定点实验结果为标识方位角平均绝对误差和均方根误差平均值分别为1.12°和2.10°;传感器倾斜实验结果表明5°倾斜对方位角的影响较小;直线行驶的定位精度约10 cm。研究表明算法可行,求出的标识方位角误差较小,运行速度较快和鲁棒性强且定位精度较好。

关键词: 全方位视觉 人工标识 图像处理 方位角

中图分类号: S24; TP242.6⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0181-06

Landmark Direction Angle for Omnidirectional Vision Localization System

Li Ming^{1,2} Kenji Imou³ Liu Zhonghua¹ Mo Yawu² Wu Bin²

(1. *National Research Center of Engineering Technology for Functional Ingredients from Botanical, Changsha 410128, China*
2. *College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China*
3. *Biological and Environmental Mechanism Lab., The University of Tokyo, Tokyo 113-8657, Japan*)

Abstract

The position accuracy is mainly decided by the accuracy of landmark directional angle for the localization system of agricultural machinery based on omnidirectional vision sensor. The algorithms about low pass filter eliminating noise and artificial landmark features detection was studied. After eliminating noise, the red pixels' intensity was calculated and the red landmark pixels beyond the threshold were extracted. Based on the Euclid geometrical distance of neighbor pixels, the small area of pixels was divided and the center of gravity was calculated for the extracted small area representing the candidate of one landmark. The algorithm provided the blue patch as compensation to further distinguish the landmark from other objects in a complex environment. The landmark detection test proved that the low pass filter eliminating noise was effective. Pointing, straightaway driving and tilt tests were conducted on the level ground in a 30 m×30 m area outside. Results showed that the average values of MAE and RMSE of landmark direction angles were 1.12° and 2.10°, and the influence of vehicle vibration and tilt angle less than 5° were not obvious. The positioning accuracy was about 10 cm. The proposed algorithm is feasible, the error of landmark direction angle is less and the program is fast running speed and robustness.

Key words Omnidirectional vision sensor, Artificial landmark, Image processing, Direction angle

收稿日期: 2012-06-25 修回日期: 2012-07-20

^{*}教育部留学归国人员科研启动基金资助项目(教外司留[2011]1139号)、湖南省自然科学基金资助项目(11JJ6024)、湖南省优秀青年基金资助项目(10B047)和湖南省科研条件创新专项资助项目(2012TT2045)

作者简介: 李明, 博士后, 湖南农业大学副教授, 主要从事生物机器人及农业机械自动化研究, E-mail: limingcs@hotmail.com

引言

实现田间精确定位是农业机械实施精准农业作业的第一步^[1-3]。定位方法可分为几何定位和拓扑定位。几何定位是计算出机器人所在的精确位置,比如计算具体位置坐标;拓扑定位是通过拓扑地图找出一个相对模糊的位置,比如“在教室”,没有确定的具体位置坐标。拓扑定位应用范围广,不需要人工设置标识,但构建拓扑地图较复杂,图像信息计算量大,运行速度较慢^[4]。设置人工标识几何定位方法简单,在机器人视觉定位中得到广泛应用^[5-7]。农业机械定位主要采用GPS^[8-12]和普通视觉定位^[13-15]。GPS在农业中的应用存在一定的限制。农田作业时,尤其在山区,GPS由于树林、山脉等障碍物阻碍微波传送,精度明显下降^[3]。普通视觉定位主要采用作物、田埂等来实现直线导航^[12],不能普遍使用。

基于全方位视觉传感器和人工标识开发了一种农业机械的定位系统^[16],该系统可应用于温室,夜间也可以使用。定位算法利用标识在图像中的方位角作为标准来计算传感器的位置^[17],因此标识的图像特征提取以及方位角的计算精度非常重要。尤其应用中地面凹凸不平,视觉传感器倾斜,从而造成方位角误差,因此本文分析方位角误差产生的原因,以达到提高定位系统精度的目的。

1 全方位视觉定位系统

该定位系统硬件由VS-C800U-300-K型全方位视觉传感器、人工标识、作业机械、计算机和支撑架构成,如图1所示。将4个人工标识放置作业区的4个角上组成一个矩形来构建作业场所,如果作业区不是矩形,将标识形成的矩形包围作业区,并测量出长度 b 和宽度 a 。为验证实用效果,将全方位视觉传感器通过支架安装在自动作业车上(图2);然后通过连接视觉传感器与计算机的USB2.0摄像机获取标识图像;利用开发的VC++2005程序计算作业机械相对于标识的绝对位置实现定位。只要全方位视觉传感器满足可视范围内的条件,该定位系统可适用于室内、室外机器人和自动车辆、作业机械。

1.1 全方位视觉图像特征

全方位视觉传感器特点是具有单个视点、每张图像能提供周围环境360°范围的信息,信息丰富并且图像性质不会随传感器的旋转而改变,有利于减小因车轮滑移和震动的负面影响,且价格便宜,被广泛应用在机器人领域^[18-20]。

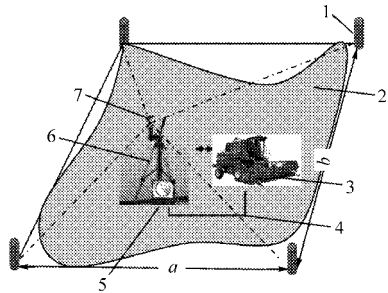


图1 系统构成

Fig. 1 System structure

1. 标识 2. 作业区 3. 作业机械 4. 电源供应 5. 计算机
6. 三脚架 7. 全方位视觉传感器

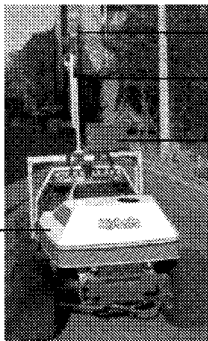


图2 实验设备

Fig. 2 Experimental device

1. 实验车 2. 全方位视觉传感器 3. 支架 4. 计算机

空间点 $P(X, Y, Z)$ 与图像点 $p(x, y)$ 相对于全方位视觉传感器投影中心的方位角 θ 是相同的,如图3所示。只要能够提取出空间物体在全方位图像中的特征点,就可以得出空间物体相对于传感器的方位角。本研究综合利用了全方位视觉传感器能提供360°丰富的图像信息和方位角不变的特点,采用设置人工标识,然后通过提取人工标识在图像中的位置,通过标识的方位角度完成视觉传感器在 XY 平面的定位。

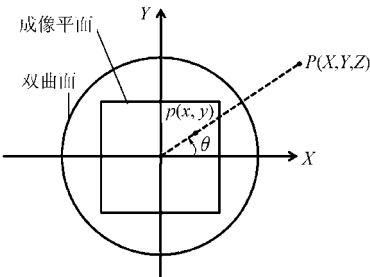


图3 方位角

Fig. 3 Directional angle

1.2 标识

为保证全方位视觉传感器从不同角度摄取到标识表面的图像相同,人工标识外形设计为圆柱形,采用A、B两种类型,A型(纯红色)用于图像噪声少的区域;当环境比较复杂,图像的噪声太多而导致标识

识别难度大时,采用 B 型(红色和蓝色)。B 型中,红色在标识的上部,主要起标识辨识的作用;蓝色在标识的下部,蓝色部分可以有效地去除图像噪声造成的影响。其工作原理:图像处理提取出红色和蓝色像素,当相邻的红色和蓝色像素的距离在一定范围内时,判断为标识;否则,进行下一步的搜寻。

2 定位系统总体算法

算法流程图如图 4 所示,主要包括除噪、标识特征提取、相机位置估算。本文主要就除噪和标识特征提取方位角计算算法进行研究。

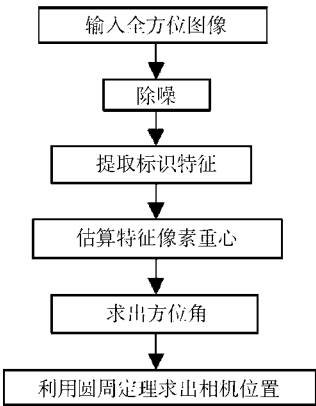


图 4 算法流程图
Fig. 4 Flow chart of algorithm

2.1 除噪

由于相机在作业区内与标识的距离长短不一,摄像时采集的标识图像像素量和颜色强度不一样。在标识提取的算法中,使用了特征颜色(红色和蓝色)的阈值来决定颜色像素点的提取,而特征颜色阈值是由图像中计算的特征颜色的最大值减去一个常数 N 生成, N 由图像处理的实验得出,变化范围一般为 $10 \sim 50$ 。当 N 确定后,为了能清楚地图像中提取到 3 个或 4 个标识,应该尽量取图像的特征颜色平均值,消除过大的数值避免标识丢失,因此采用低通滤波除噪的方法。利用卷积对每个像素的 R 、 G 、 B 3 个分量通道分别处理,为了提高计算速度,卷积核加权采用了先将卷积核乘以最小公倍数,加权计算结果再除以最小公倍数。卷积核变化式为

2.2 标识提取

采用纯红色及红色和蓝色搭配的标识算法。纯红色标识不需要分析蓝色像素,其他与红色和蓝色组成的标识算法相同,算法步骤为:

(1) 通过相机校正求出相机的投影中心。

(2) 定义图像的坐标(左上角为原点);计算图

$$K = \begin{bmatrix} 1/16 & 1/8 & 1/16 \\ 1/8 & 1/4 & 1/8 \\ 1/16 & 1/8 & 1/16 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

像中的像素亮度。

$$\begin{aligned} [r_c \quad b_c] &= [R - (B + G)/2 - |B - G| \\ &\quad B - (R + G)/2 - |R - G|] \end{aligned} \tag{1}$$

式中 R 、 G 、 B ——图像中红色、绿色和蓝色的灰度
 r_c 、 b_c ——红色、蓝色亮度

(3) 求出提取特征颜色像素的阈值为

$$[t_1 \quad t_2] = [r_{\max} - N \quad b_{\max} - N] \tag{2}$$

($10 < N < 50$)

式中 $r_{\max}$ 、 $b_{\max}$ ——红色、蓝色亮度最大值

(4) 从图像中提取出阈值以上的特征红色像素 R_i 和蓝色像素 B_i ; 计算两个相邻像素的欧几里得距离并按一定的距离分为不同的特征像素块。

(5) 计算像素块的重心。

$$[X_r \quad Y_r] = \left[\sum_{i=1}^n R_i x / n_1 \quad \sum_{i=1}^n R_i y / n_1 \right] \tag{3}$$

$$[X_b \quad Y_b] = \left[\sum_{i=1}^n B_i x / n_2 \quad \sum_{i=1}^n B_i y / n_2 \right] \tag{4}$$

式中 X_r 、 Y_r ——红色特征像素块的重心坐标
 X_b 、 Y_b ——蓝色特征像素块的重心坐标
 n_1 、 n_2 ——红色、蓝色特征像素数量

(6) 根据红色特征像素重心和蓝色特征像素重心的距离判断是否为标识图像。若为标识,所有特征像素的重心作为该标识在图像中的位置点。

(7) 根据图像中标识位置和相机投影中心,得出相邻标识间的方位角($\theta_1 \sim \theta_4$),如图 5 所示。

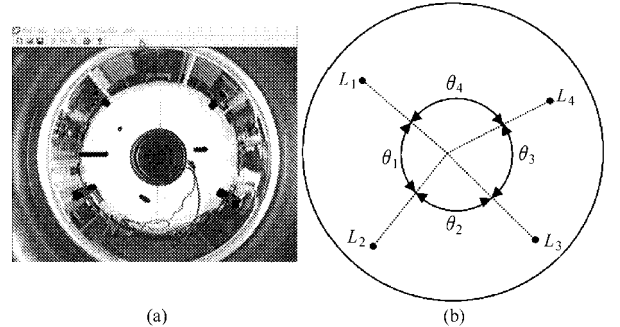


图 5 方位角
Fig. 5 Direction angle
(a) 标识图像提取 (b) 方位角形成

3 实验

3.1 除噪效果对比实验

为清楚地验证除噪效果,在实验设计中只使用一个红色的标识,并且标识与相机距离为 50 m,在光线较弱的环境中进行采集图像,来增加图像的噪声;由于只设置一个标识,所以即使标识被提取出来,程序也会报出错误信息。从图 6b 和 6c 对比可以看出,除噪图像的 R 、 G 和 B 的柱状图峰值低于原始图,尤其是 R 的峰值比较明显;从图 6d 和 6e 结果

得出,除噪图像的标识提取结果是找到了标识,而原始图像标识没有找到。说明采用低通滤波除噪的方法在本研究中是有效的。

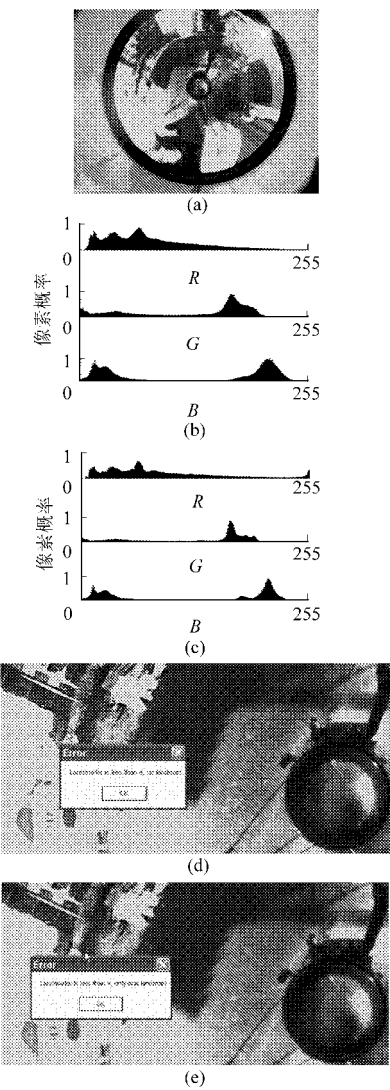


图 6 除噪结果

Fig. 6 Results of eliminating noise

(a) 原始图像 (b) 原始图像 R 、 G 和 B 的柱状图
(c) 除噪图像的 R 、 G 和 B 的柱状图 (d) 原始图像的标识提取结果 (e) 除噪图像的标识提取结果

3.2 标识方位角实验

为验证算法的有效性,在室外面积为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 、光线不是很强的环境下进行了实验。采用纯红色标识,高度和直径分别为 75 cm 和 20 cm ;采用相机获取图像,相机的高度为 1.45 m ;图像格式 24 位 RGB,解析度 $1\,024\text{ 像素} \times 768\text{ 像素}$;在标识固定的区域内 x 和 y 方向各每隔 5 m 选一测量点,共选取 25 个位置获取 25 张图像;然后图像处理提取标识在图像中的位置,并对方位角的图像值(图像处理计算的方位角)和实际值(实际测量点方位角计算值)进行比较,以其平均绝对误差和均方根误差来评价该算法的可行性。

实验结果如表 1 所示。方位角的图像值和测量值之间的最大绝对误差为 4.11° ,最小绝对误差为 0.21° ;平均绝对误差和均方根误差平均值分别为 1.12° 和 2.10° 。从实验结果证明,误差比较小,标识提取的算法是有效可行的。同时,采用 CPU 处理器(Intel Core 2, 2.33 GHz)的计算机,处理 25 张 $1\,024\text{ 像素} \times 768\text{ 像素}$ 图像时间不超过 1.5 s ;25 张图像中仅一张由于人为造成图像模糊而找不到标识。该算法的运行速度和鲁棒性均较好。

表 1 方位角误差
Tab. 1 Errors in directional angles ($^\circ$)

角度	均方根误差	平均绝对误差	最大绝对误差	最小绝对误差
θ_1	1.81	1.12	2.28	0.21
θ_2	2.35	1.46	3.21	0.94
θ_3	1.32	1.04	3.12	0.23
θ_4	2.91	0.85	4.11	0.92

形成误差的原因,主要包括:①标识设置本身有误差,造成如图 1 中 a 和 b 的误差,影响计算结果;同时,传感器摄像时设置位置也可能存在一定的误差,导致方位角本身的实际值存在误差。②标识在识别过程中,抽取像素点的平均值与标识的实际中心存在一定的误差,导致方位角的图像值误差。③摄像传感器作业时,存在一定倾斜,方位角的实际值存在误差;摄取图像发生一定变形使方位角图像值存在误差。

3.3 传感器倾斜实验

在直线行驶实验后,选择 $(0,15)$ 、 $(5,15)$ 、 $(10,15)$ 、 $(15,15)$ 、 $(20,15)$ 、 $(25,15)$ 、 $(30,15)$ 7 个点进行实验;考虑农业机械田间作业地面不平造成的倾斜角一般为 $-5^\circ \sim 5^\circ$,采用相机倾角调节仪器,每隔 1° 进行调节,如图 7 所示。左、右、前、后可进行 8 个方向的组合调节,实验中采用最大倾斜程度的右前和左后组合,每个点取 11 张图像,通过图像处理计

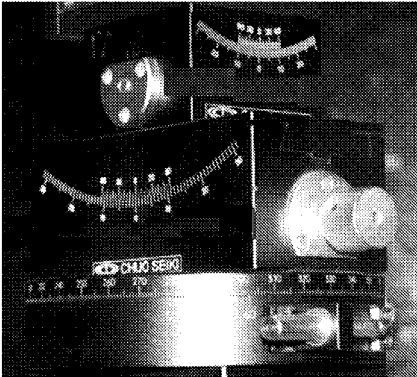


图 7 倾角调节仪

Fig. 7 Equipment for adjusting camera angle

算未倾斜时的方位角与倾斜时得到的方位角的差值作为方位角误差;每一个倾斜角 7 个点的方位角误差平均值作为方位角 $\theta_1 \sim \theta_4$ 的误差标准。

实验结果如表 2 所示,倾斜角由 0° 增加至 5° 或减小至 -5° 时,方位角 $\theta_1 \sim \theta_4$ 的误差呈逐渐增加或减小趋势,但由于标识提取的图像点可能存在一定的偏差,会出现个别非规律现象;但方位角 $\theta_1 \sim \theta_4$ 的误差绝对值和逐渐增加,最大值 1.12° ,由此说明一般情况下,由于作业地面不平造成的倾斜角对方位角的影响不是很明显;但是,方位角误差绝对值随倾斜角增加而变大,所以在实用中,有必要考虑过大倾斜角对方位角度造成定位精度的影响;其次,倾斜时方位角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ 误差的变化不同,计算定位过程中有必要考虑衡量各方位角对定位精度的影响分析。

表 2 传感器倾斜造成的方位角误差

Tab.2 Errors in direction angles caused by sensortilt

($^\circ$)

倾斜角	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	绝对值和
5	0.294	-0.416	-0.143	0.265	1.118
4	0.259	-0.373	-0.133	0.247	1.012
3	0.204	-0.349	-0.056	0.201	0.810
2	0.161	-0.258	-0.029	0.126	0.574
1	0.057	-0.118	-0.018	0.025	0.218
-1	-0.095	0.105	0.057	-0.067	0.324
-2	-0.257	0.295	0.095	-0.133	0.780
-3	-0.243	0.339	0.145	-0.240	0.967
-4	-0.234	0.407	0.117	-0.290	1.048
-5	-0.243	0.422	0.128	-0.311	1.104

3.4 直线行驶实验

在同一条件下,选择中间两点位置(0,15)和(30,15)进行了沿 x 轴方向的直线行驶实验,实验设备(日本久保田实验车,型号:AMX3A)如图 2 所示,行驶速度可按钮调节,本实验中行驶速度为 1 m/s ;全方位视觉传感器图像格式 24 位 RGB,解析度 1024×768 ,帧频为 6 帧/s;原始点位置为(0,15),按照摄取 1 张图片的行驶距离为 $1/6\text{ m}$,第一张图片的原始位置为($1/6,15$),依次类推确定各原始位置点坐标,并根据每点的几何关系计算原始方位角;运用 VC++2005 开发图像运行程序,得出方位角和位置估算值,与原始值进行比较,根据位置点间距离的平均绝对误差和均方根误差来评价该定位系统的可行性。

方位角结果如图 8 所示,4 个方位角分别在

$-3^\circ \sim 3^\circ$ 之间变化,一般分布在 $\pm 1^\circ$ 之间,平均绝对误差在 1.5° 左右,与静止拍摄时误差相近,说明平地作业,在速度不很快的情况下,机械振动对标识方位角的影响不明显。

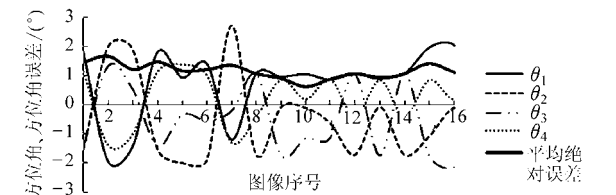


图 8 方位角与方位角误差

Fig. 8 Error distribution of direction angles

直线行驶定位实验结果如表 3 所示。估算值和实际原始值之间的距离 D 最大绝对误差为 7.32 cm ,最小绝对误差为 0.85 cm ;平均绝对误差和均方根误差分别为 6.90 cm 和 5.01 cm 。平均精度大约 5 cm ,一般精度小于 10 cm ,实验结果表明定位精度较好;虽达不到 RTK GPS 的要求,但用于精细农业中施药、施肥、灌溉、作物收获产量图,草地自动作业机械的剪草、洒水和挖掘机挖土开方等作业是可行的;同时,技术上融合其他传感器技术或采用神经网络、卡尔曼滤波等算法,有望达到更好的定位精度。

表 3 x, y 坐标和原始与估算位置点间的距离误差

Tab.3 Errors in x, y coordinate and distance between original position and estimation position

cm

指标	均方根误差	平均绝对误差	最大绝对误差	最小绝对误差
x	8.35	7.54	10.14	0.21
y	5.56	5.26	6.52	0.38
D	6.90	5.01	7.32	0.85

4 结论

(1) 利用低通滤波除噪、颜色像素的阈值提取特征像素,提取出像素的重心作为标识在图像中的位置;通过实验求出的方位角平均绝对误差和均方根误差都比较小,是一种有效可行的算法,运行速度和鲁棒性好。

(2) 在倾斜角度 5° 范围内,由于倾斜造成的方位角误差不大,但实用中要考虑由于倾斜造成的影响。

(3) 直线行驶实验中,平地上行驶速度 1 m/s 的情况,方位角的平均绝对误差约 1.5° 且定位精度较好。

参 考 文 献

- 1 梅田幹雄. 世界の精密農業事情と今後の展望 [R]. 担い手を支える精密農業と農業機械, 日本農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センター, 2008.
- 2 Jacopo P, Salvatore F D G, Edoardo F, et al. A flexible unmanned aerial vehicle for precision agriculture [J]. Precision Agriculture International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2012, 13(4): 517 ~ 523.
- 3 Li M, Imou K, Wakabayashi K. et al. Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance [J]. Int. J. Agric. , 2009, 2(3): 1 ~ 16.
- 4 Tamimi H, Andreasson H, Treptow A, et al. Localization of mobile robots with omnidirectional vision using particle filter and iterative SIFT[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2006, 54(29): 758 ~ 765.
- 5 Motomura A, Matsuoka T, Hasegawa T. Self-localization method using two landmarks and dead reckoning for autonomous mobile soccer robots[C] // RoboCup 2003: Robot Soccer World Cup VII, LNCS, 2003: 526 ~ 533.
- 6 Li M, Imou K, Tani S, et al. Localization of agricultural vehicle using landmarks based on omni-directional vision[C] // Proceedings of ICCEA 2009, Manila, 2009: 140 ~ 144.
- 7 Jang G, Kim S, Lee W, et al. Color landmark based self-localization for indoor mobile robots[C] // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington DC, USA, 2002: 1 037 ~ 1 042.
- 8 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139 ~ 145.
Luo Xiwen, Zhang Zhigang, Zhao Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139 ~ 145. (in Chinese)
- 9 刘兆祥, 刘刚, 籍颖, 等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 148 ~ 152.
Liu Zhaoxiang, Liu Gang, Ji Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 148 ~ 152. (in Chinese)
- 10 Nagasaka Y, Saito H, Kitagawa H, et al. Development of autonomous rice transplanter [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2008, 71(1): 79 ~ 84. (in Japanese)
- 11 周俊, 张鹏. 基于灰色预测的农业机器人 GPS 导航系统硬故障隔离[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 165 ~ 168.
Zhou Jun, Zhang Peng. Hard fault isolation of GPS navigation system based on gray prediction for agricultural robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 165 ~ 168. (in Chinese)
- 12 伟利国, 张权, 颜华, 等. XDNZ630 型水稻插秧机 GPS 自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 186 ~ 190.
Wei Liguoguo, Zhang Quan, Yan Hua, et al. GPS automatic navigation system design for XDNZ630 rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 186 ~ 190. (in Chinese)
- 13 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]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 161 ~ 166.
Wang Xinzhong, Han Xu, Mao Hanping, et al. Navigation line detection of tomato ridges in greenhouse based on least square method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 161 ~ 166. (in Chinese)
- 14 周俊, 刘成良, 姬长英. 农业机器人视觉导航的预测跟踪控制方法研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 106 ~ 110.
Zhou Jun, Liu Chengliang, Ji Changying. Predictive tracking and control method for vision-guided navigation of agricultural robot [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 106 ~ 110. (in Chinese)
- 15 Han S, Zhang Q, Ni B, et al. A guidance directrix approach to vision-based vehicle guidance systems [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(3): 179 ~ 197.
- 16 湖南农业大学. 一种局部定位系统: 中国, 201020636810.3[P]. 2011-09-28.
- 17 李明, 李旭, 孙松林, 等. 基于全方位视觉传感器的农业机械定位系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 170 ~ 174.
Li Ming, Li Xu, Sun Songlin, et al. Localization system of agricultural machinery based on omni-directional vision sensor [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 170 ~ 174. (in Chinese)
- 18 Nayar S K. Catadioptric omnidirectional camera[C] // Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997: 482 ~ 488.
- 19 Kim J, Suga Y. An omnidirectional vision-based moving obstacle detection in mobile robot [J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2007, 5(6): 663 ~ 667.
- 20 卢惠民. 自主移动机器人全向视觉系统研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
Liu Huimin. The research on the omnidirectional vision system for autonomous mobile robot [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)