

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.029

# 基于光照色彩稳定性分析的温室机器人导航信息获取\*

袁挺<sup>1</sup> 任永新<sup>2</sup> 李伟<sup>1</sup> 纪超<sup>1</sup> 谭豫之<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 机械科学研究总院, 北京 100044)

**【摘要】** 针对温室环境下视觉导航存在光照波动影响问题,从应用可行性角度,研究了一种基于光照色彩稳定性的导航信息获取方法。分析了温室导航线图像在颜色空间的色彩特征分布,建立了光照分析模型,以提高不同光照条件下的导航线提取适应性。提出  $g$ 、 $C_r$ 、 $C_b$  色彩分量组合的导航线分割方法,实现了导航信息有效快速识别。采用基于导航参考点的改进 Hough 变换拟合导航路径,通过几何关系获得导航侧向位移和角度偏差作为导航参数。温室环境下随机拍摄 150 幅不同光照导航图像进行识别算法验证,导航线平均识别率为 93.9%。导航实验结果表明,导航线获取方法平均耗时约 95 ms,在运行速度低于 1.5 m/s 时最大路径跟踪误差小于 6 cm,满足视觉导航实时性和准确性的要求。

**关键词:** 温室 机器人 视觉导航 信息识别 色彩稳定性

**中图分类号:** TP242.6<sup>+</sup>4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)10-0161-06

## Navigation Information Acquisition Based on Illumination Chromaticity Stability Analysis for Greenhouse Robot

Yuan Ting<sup>1</sup> Ren Yongxin<sup>2</sup> Li Wei<sup>1</sup> Ji Chao<sup>1</sup> Tan Yuzhi<sup>1</sup>

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

(2. China Academy of Machinery Science and Technology, Beijing 100044, China)

### Abstract

For the problem of sunlight fluctuation influence on vision navigation in greenhouse environment, a navigation information acquisition method based on illumination chromaticity stability was proposed. By comparing the distribution of navigation line image in different color spaces, a light-color analysis model was established to the processes of navigation detection in variable illuminations. Combination model of  $g$ ,  $C_r$ ,  $C_b$  color components was used to extract guidance line rapidly and effectively. The navigation parameters including lateral deviation and angle deviation were obtained from reference navigation line fitted by an optimized Hough transformation. 150 images with navigation information taken under different light conditions were tested by the recognition algorithm, which can detect navigation line with a right recognition rate of 93.9%. The navigation experimental results showed the average processing time of navigation parameters acquisition was about 95 ms, and the maximum error of path tracking was less than 6 cm with the speed lower than 1.5 m/s, which satisfied real-time requirements of vision navigation.

**Key words** Greenhouse, Robot, Vision navigation, Information recognition, Illumination stability

### 引言

基于机器视觉的自主导航技术是农业机器人实

现田间连续作业的重要环节和基础,是农业装备智能化的关键技术。机器人利用视觉系统获取作业环境导航参考信息,通过运动规划设置导航参数,进而

收稿日期: 2011-11-04 修回日期: 2011-11-22

\*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B07)、国家自然科学基金资助项目(31071320)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090008110007)

作者简介: 袁挺, 博士生, 主要从事农业机器人和机器视觉技术研究, E-mail: yuanting122@hotmail.com

通讯作者: 李伟, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机器人和机器视觉技术研究, E-mail: liww@cau.edu.cn

实现导航路径实时跟踪与校正。由于机器视觉探测范围宽、获取信息完整,尤其适合农田、温室等非结构环境,国内外许多专家对此进行了大量研究<sup>[1-6]</sup>。这种方法不足之处在于自然环境下,路标特征复杂多变、光照条件不可预测,导致目标图像表达不一致、导航信息因缺失而控制失效,成为视觉导航技术上的瓶颈。国内外对提高导航路径获取的稳定性,特别在消除光照因素干扰方面的研究鲜有报道<sup>[7-12]</sup>。

本文针对温室环境光线变化特点,进行基于颜色分量抽样特征和直方图特性的光照色彩稳定性分析;通过优化色彩组合识别导航信息,采用快速Hough变换提取导航参数,以有效减少客观因素干扰。

## 1 光照色彩稳定性分析

### 1.1 图像获取

实验在中国农业大学上庄实验基地日光温室进行,以温室黄瓜架间路面图像为研究对象。成像设备为日本Sony公司的EVI-D100P型彩色CCD云台摄像机(视频信号:NTSC,有效像素:768H×494V,镜头:10X光学变焦、40X数字变焦),图像通过Osprey-200型视频采集卡输入至黄瓜采摘机器人控制平台,摄像机与采集卡的设置参数在图像采集过程中保持不变。摄像机安装于机器人平台前端,距地面高度0.8m,俯视角45°,采集图像分辨率为640像素×480像素。导航路径工况特点:硬化水泥路面,中央铺设红色引导线,表面附着有浮土、泥块、植物残留物等。

### 1.2 色彩稳定性分析

视觉导航信息通常选用颜色特征进行提取,选择最佳的色彩参数是导航路径识别的关键。机器人工作在温室非结构环境下,视觉系统采集到的图像受工作场所光照变化、背景反光、阴影噪声等诸多不利因素影响,就需要根据图像采集环境特点和图像分析检测目的,研究一种基于稳定色彩参数的导航信息获取方法。温室导航路面图像如图1所示。不同时段、不同光照条件下,导航线和环境的颜色发生明显改变,致使导航线提取算法的可靠性大幅下降。为提高图像处理算法的适应性和稳定性,有必要针对温室可能出现的不同光照导航图像进行色彩稳定性分析。

#### 1.2.1 色彩分量抽样统计

色彩分量抽样统计,即在每幅图像导航线区域随机选取1500个像素点,分别在6个颜色空间比较色彩分量的均值向量。图2为抽样导航线色彩分

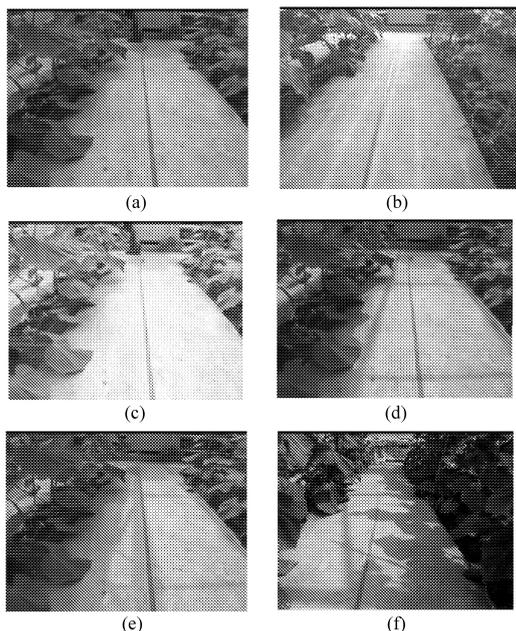


图1 不同时刻拍摄的导航路面图像

Fig. 1 Navigation image taken under different time scales

- (a) 10:00, 照度: 642 000 lx, 色温: 4 822 K  
 (b) 11:00, 照度: 816 000 lx, 色温: 5 713 K  
 (c) 12:00, 照度: 845 000 lx, 色温: 6 205 K  
 (d) 13:00, 照度: 721 000 lx, 色温: 7 008 K  
 (e) 14:00, 照度: 574 000 lx, 色温: 8 425 K  
 (f) 15:00, 照度: 432 000 lx, 色温: 7 373 K

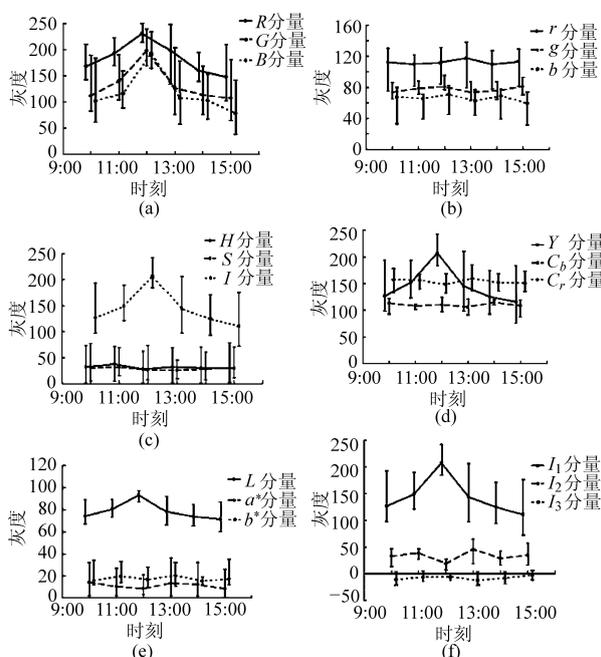


图2 彩色空间导航线色彩分量均值分布

Fig. 2 Mean color distributions of navigation line in different color spaces

量随光照变化曲线,曲线波动反映各分量与光照的相关程度。由图可见, $r$ 、 $g$ 、 $b$ 分量分别为归一化后RGB颜色空间的 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 分量,HSI颜色空间的 $H$ 、 $S$ 分量, $Y C_b C_r$ 颜色空间的 $C_b$ 、 $C_r$ 分量,Lab颜色空间的

$a^*$ 、 $b^*$  分量曲线变化平缓、无波动,受光照变化影响小,适宜在温室复杂采光条件下作为视觉导航的色彩特征依据。

### 1.2.2 色彩分量特征统计

色彩分量特征统计,即人工提取导航线目标区域,计算色彩分量分布直方图(直方图横坐标为像素色彩分量数量级,纵坐标为各数量级出现的概率),根据直方图的特征参数分析色彩分量的稳定性。特征参数表达式为:

用于度量目标区域平均对比度的标准偏差为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} (z_i - \bar{z}_i)^2 p(z_i)} \quad (1)$$

式中  $z_i$ ——数量级的一个随机变量

$p(z_i)$ ——数量级  $z_i$  出现的概率

$\bar{z}_i$ ——所有数量级的均值向量

$N$ ——可能的数量级

用于度量目标区域各数量级的相对平滑度为

$$R = 1 - 1/(1 + \sigma^2) \quad (2)$$

用于度量直方图的偏斜的三阶矩为

$$u_3 = \sum_{i=0}^{N-1} (z_i - m)^3 p(z_i) \quad (3)$$

式中,  $m = \sum_{i=0}^{N-1} z_i p(z_i)$  表示灰度均值。

用于度量目标区域各数量级的随机性的熵为

$$e = - \sum_{i=0}^{N-1} p(z_i) \text{lp}(z_i) \quad (4)$$

基于 1.2.1 节分析的 9 个有效色彩特征分量,分别选取图 1a、1c、1f 的导航路径进行直方图整体特征分析,表 1 为色彩分量特征统计结果。根据直方图特征参数特点,标准偏差越小、平滑度越趋近于零,表明直方图分布集中、数量级偏移少;同样,三阶矩越趋近于零,熵值越小,表明直方图分布越对称、色彩分量有序且一致性好。综上分析,色彩分量  $g$ 、 $C_b$ 、 $C_r$  更好地反映了对不同光照恒常性特点,通过 3 分量优化组合将导航信息从复杂的背景和变化的光照环境中有效提取出来;同时,由于分量  $g$ 、 $C_b$ 、 $C_r$  颜色空间变换算法不涉及大量的开方、三角函数等非线性计算,运行速度完全满足机器人导航实时性要求。

## 2 导航信息获取

### 2.1 导航图像识别

导航图像可通过 4 个感兴趣区域:导航线、路面、作物茎叶和温室薄膜,分析 4 个区域像素点  $g$ 、 $C_b$ 、 $C_r$  色彩分量。经过大量样本统计,导航线  $g$  分量

表 1 色彩分量直方图特征统计  
Tab. 1 Histogram characteristic statistics of color components

| 色彩分量  | 光线条件    |       | 标准偏差   | 平滑度   | 三阶矩     | 熵     |
|-------|---------|-------|--------|-------|---------|-------|
|       | 照度/lx   | 色温/K  |        |       |         |       |
| $r$   | 642 000 | 4 822 | 33.056 | 0.016 | 0.371   | 6.832 |
|       | 845 000 | 6 205 | 31.804 | 0.015 | 0.428   | 6.720 |
|       | 432 000 | 7 373 | 31.727 | 0.015 | 0.395   | 6.666 |
| $g$   | 642 000 | 4 822 | 14.406 | 0.003 | 0.047   | 5.298 |
|       | 845 000 | 6 205 | 13.848 | 0.002 | -0.039  | 5.273 |
|       | 432 000 | 7 373 | 14.816 | 0.003 | -0.044  | 5.335 |
| $b$   | 642 000 | 4 822 | 37.289 | 0.011 | -0.037  | 6.678 |
|       | 845 000 | 6 205 | 36.138 | 0.010 | -0.160  | 6.465 |
|       | 432 000 | 73 73 | 28.662 | 0.010 | -0.119  | 6.454 |
| $H$   | 642 000 | 4 822 | 41.610 | 0.071 | 0.827   | 6.612 |
|       | 845 000 | 6 205 | 36.753 | 0.074 | 1.208   | 6.480 |
|       | 432 000 | 7 373 | 46.426 | 0.076 | 1.905   | 6.511 |
| $S$   | 642 000 | 4 822 | 42.111 | 0.038 | 1.167   | 7.406 |
|       | 845 000 | 6 205 | 44.285 | 0.033 | 1.851   | 7.190 |
|       | 432 000 | 7 373 | 46.345 | 0.032 | 1.761   | 7.246 |
| $C_b$ | 642 000 | 4 822 | 16.751 | 0.004 | -0.039  | 5.754 |
|       | 845 000 | 6 205 | 16.602 | 0.004 | -0.084  | 5.872 |
|       | 432 000 | 7 373 | 16.693 | 0.004 | -0.071  | 5.554 |
| $C_r$ | 642 000 | 4 822 | 19.114 | 0.005 | 0.053   | 6.064 |
|       | 845 000 | 6 205 | 21.723 | 0.006 | 0.088   | 6.099 |
|       | 432 000 | 7 373 | 18.010 | 0.006 | 0.082   | 5.975 |
| $a^*$ | 642 000 | 4 822 | 16.512 | 0.172 | -12.027 | 5.057 |
|       | 845 000 | 6 205 | 13.086 | 0.164 | -15.212 | 5.002 |
|       | 432 000 | 7 373 | 18.585 | 0.177 | -8.024  | 5.051 |
| $b^*$ | 642 000 | 4 822 | 17.389 | 0.174 | 0.340   | 5.649 |
|       | 845 000 | 6 205 | 12.241 | 0.138 | 17.650  | 5.657 |
|       | 432 000 | 7 373 | 17.219 | 0.174 | 4.268   | 5.476 |

小于路面、茎叶、薄膜的  $g$  分量,分界阈值设为 89,但导航线与路面两者之间仍存在小部分数据交叉;进一步观察,导航线  $C_b$  集中分布在  $(120 \pm 15)$  像素区域, $C_r$  集中分布在  $(153 \pm 20)$  像素范围。基于 3 分量的色彩分布特征,经优化组合能有效减少目标误判,实现导航信息精确提取,其判别式为

$$G_r = \begin{cases} 255 & (|C_b - 120| < 15 \text{ 且 } |C_r - 153| < 20 \text{ 且 } g < 89) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (5)$$

式中  $G_r$  为图像分割后的像素值,导航线信息置 255,背景信息置 0。以图 3a 为例,运用式(5)对彩色图像进行二值化处理,结果如图 3b 所示,在部分

路面阴影处及叶片间空隙、边缘存在散点噪声,主要是光线在物体表面不规则反射造成,用 $3 \times 3$ 中值滤波模板消除噪声干扰,得到如图3c所示的导航线识别结果。

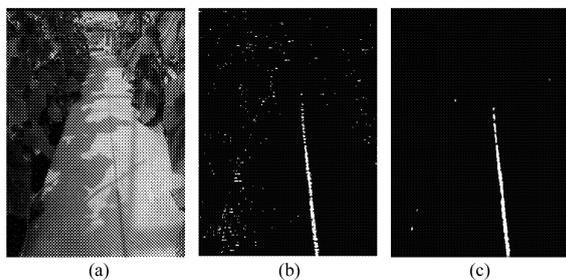


图3 导航线提取结果示例

Fig. 3 Processing of navigation line extraction

(a) 原图 (b) 二值化图 (c) 去噪后结果

## 2.2 导航路径提取

为获取导航离散点,逐行扫描识别出的白色导航线,求取每行所有像素值为255的点横坐标平均值,作为本行离散导航点,离散点计算公式为

$$\bar{d}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

式中  $x_i$ ——每一行白色像素点的横坐标

$n$ ——该行白色像素的数量

$\bar{d}_j$ ——每一行导航离散点的横坐标

导航路径通过提取的导航离散点经 Hough 变换后获得。由于传统 Hough 变换存在运算效率低的问题,采用改进的 Hough 变换路径提取方法,以达到实时处理的要求。步骤如下:

(1) 确定导航参考点,即在导航线起始端选取20行离散导航点,计算20个点的横坐标平均值 $\bar{x}$ ,并将导航参考点记为 $p_0(\bar{x}, 10)$ 。

(2) 设导航离散点的坐标 $p_i(x_i, y_i)$ ,过点 $p_0, p_i$ 的直线方程为: $(y_i - y_0) = (x_i - x_0)/m_i, 1/m_i$ 为斜率。

(3) 将所有导航离散点代入直线方程,计算各个斜率倒数 $m_i$ ,找出斜率倒数最大值 $\max\{m_i\}$ 和最小值 $\min\{m_i\}$ 。

(4) 初始化一个计数数组 $\text{count}[100]$ ,数组每个元素初值为零。在斜率倒数 $[\min\{m_i\}, \max\{m_i\}]$ 区间内均分100等份,每等份对应一个数组元素。当斜率倒数 $m_i$ 落在某个范围内,相应的计数数组元素加1。

(5) 找出数组 $\text{count}[100]$ 中最大值所对应斜率倒数区间的中点值 $m_p, 1/m_p$ 即为拟合导航线的斜率,由导航参考点和斜率确定唯一的导航参考路径。

图4是导航路径拟合结果。

## 2.3 导航参数获取

导航控制参数主要包括导航路径与机器人轴线

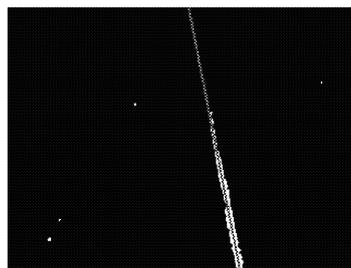


图4 导航路径拟合结果

Fig. 4 Result of navigation reference line

的侧向位移偏差 $\lambda$ 和角度偏差 $\theta$ 。图5为导航路径在图像坐标系中位置示意图,图中虚线为导航路径。

$$\theta = \arctan m_p^{-1} \quad (7)$$

式中  $m_p$ ——导航线斜率的倒数

$\lambda$ 是侧向位移偏差,即图像坐标中心点到导航路径的距离,计算公式为

$$\lambda = |(x_i - W/2) \cos \theta| \quad (8)$$

式中  $x_i$ ——直线与 $x$ 轴交点坐标

$W$ ——图像宽度

规定导航线在原点右侧时 $\lambda$ 为正,在原点左侧时 $\lambda$ 为负。

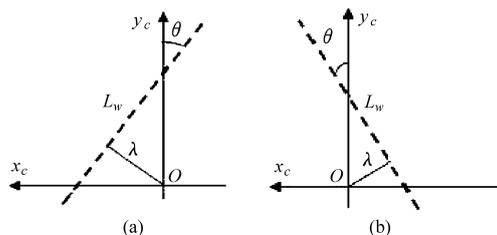


图5 导航控制参数计算

Fig. 5 Navigation parameters calculation

(a) 导航路径右偏 (b) 导航路径左偏

## 3 结果与分析

### 3.1 导航信息获取分析

为验证导航线提取算法的稳定性,根据温室环境不同光照条件,随机拍摄150幅导航路径图像作为识别样本,导航线识别率均值达93.3%,结果如表2所示(识别率指导航信息90%以上被正确识别出来的图像与对应总图像数的比率;误识率指10%以上非导航信息被误识别为导航信息的图像与对应总图像数的比率)。导航信息无法完整提取的原因有以下两方面:光照方向和强弱的变化,在导航路面或形成局部阴影、或形成强烈反射,导航线色彩特征无法有效表达;部分浮土等路面残留物蒙盖于导航线表面,使导航信息出现色彩偏差,在识别过程容易作为背景噪声滤除。非导航信息误判为导航信息的因素有:路面残留物对光照的不规则反射,背景物体边缘间明暗不一、色彩差异大在识别时出现欠分割。

表 2 导航线识别结果

Tab. 2 Recognition results of navigation line

| 天气条件     | 拍摄时间          | 图片数量/幅 | 识别率/% | 误识率/% |
|----------|---------------|--------|-------|-------|
|          | 8:00 ~ 11:00  | 30     | 96.7  | 3.3   |
| 晴天(少量浮云) | 11:00 ~ 14:00 | 30     | 90.0  | 13.3  |
|          | 14:00 ~ 17:00 | 30     | 86.7  | 6.7   |
| 阴天       | 8:00 ~ 11:00  | 20     | 100   | 0     |
|          | 11:00 ~ 14:00 | 20     | 95    | 10    |
|          | 14:00 ~ 17:00 | 20     | 95    | 0     |
| 总计       |               | 150    | 93.9  | 5.6   |

针对导航路径提取实时性的要求,选取上述样本图像中的 20 幅,进行算法运行效率对比。算法软硬件测试环境:计算机处理器 Intel Core 2 Duo E7300,主频 2.66 GHz,内存 2 GB;操作系统 Windows XP Professional;编译环境 Microsoft Visual C++ 6.0。表 3 为分别基于传统 Hough 变换和改进 Hough 变换的导航路径提取算法总耗时(含导航图像处理耗时)。传统 Hough 变换平均耗时 217 ms,改进的导航线处理过程平均耗时约 95 ms,改进后运算速度比基于传统 Hough 变换算法提高了 1 倍,达到实时要求。

### 3.2 导航路径跟踪分析

导航实验在温室黄瓜垄地进行,导航路径由垄中直线(长度 12 m)和垄间拐弯曲线(圆弧半径 0.7 m) 2 部分组成。机器人初始速度分别设定为 0.3、0.5、0.7、1.0、1.3 和 1.5 m/s,直线、曲线路径跟踪结果如表 4 所示。直线、曲线跟踪偏差随线速度的增加而增加,最大偏差均出现在初速度为 1.5 m/s 时,且在同等运行速度下直线跟踪效果明显好于曲线跟踪。

## 4 结论

(1) 针对温室非结构环境下光照变化特点,引

表 3 耗时计算结果

Tab. 3 Time consuming of each image's calculation

|      |             |             | ms   |             |             |
|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|
| 图像编号 | 传统 Hough 变换 | 改进 Hough 变换 | 图像编号 | 传统 Hough 变换 | 改进 Hough 变换 |
| 1    | 202         | 85          | 11   | 218         | 97          |
| 2    | 206         | 86          | 12   | 211         | 89          |
| 3    | 224         | 101         | 13   | 218         | 98          |
| 4    | 219         | 101         | 14   | 216         | 92          |
| 5    | 208         | 86          | 15   | 214         | 92          |
| 6    | 233         | 111         | 16   | 214         | 91          |
| 7    | 228         | 102         | 17   | 230         | 101         |
| 8    | 220         | 95          | 18   | 220         | 96          |
| 9    | 209         | 89          | 19   | 215         | 95          |
| 10   | 217         | 97          | 20   | 218         | 96          |

表 4 导航路径跟踪结果

Tab. 4 Curve tracking results

| 偏差       | 初始速度/m·s <sup>-1</sup> |     |     |     |     |     |
|----------|------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|          | 0.3                    | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 1.3 | 1.5 |
| 直线跟踪最大偏差 | 1.0                    | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 2.0 | 3.0 |
| 曲线跟踪最大偏差 | 1.0                    | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 5.0 | 6.0 |

入色彩稳定性分析模型,提出基于  $g$ 、 $C_b$ 、 $C_r$  色彩分量组合的导航信息获取方法,增强了不同光照下导航线提取的适应性。

(2) 提出基于导航参考点的改进 Hough 变换拟合导航路径,有效降低了空间复杂度,提高了算法处理效率。

(3) 实验表明,利用光照色彩稳定性能有效提取导航路径信息,导航线平均识别率达 93.9%;改进后导航线获取方法平均耗时约 95 ms,在运行速度低于 1.5 m/s 时最大路径跟踪误差小于 6 cm,满足实时、准确视觉导航的要求。

## 参 考 文 献

- 黄显林,姜肖楠,卢鸿谦,等. 自主视觉导航方法综述[J]. 吉林大学学报:信息科学版, 2010, 28(2): 158 ~ 165.  
Huang Xianlin, Jiang Xiaonan, Lu Hongqian, et al. Survey of vision for autonomous navigation [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2010, 28(2): 158 ~ 165. (in Chinese)
- Hu Zhongxu, Chris Marshall, Robert Bicker, et al. Automatic surface roughing with 3D machine vision and cooperative robot control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55(7): 552 ~ 560.
- Mehta S S, Burks T F, Dixon W E. Vision-based localization of a wheeled mobile robot for greenhouse applications: a daisy-chaining approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 28 ~ 37.
- 任永新,谭豫之,杨会华,等. 基于模糊控制的黄瓜采摘机器人视觉导航[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2009, 30(4): 343 ~ 346.  
Ren Yongxin, Tan Yuzhi, Yang Huihua, et al. Visual navigation of cucumber picking robot based on fuzzy control [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(4): 343 ~ 346. (in Chinese)
- 范莹莉. 基于机器视觉的 AGV 导航标识符识别方法研究 [J]. 伺服控制, 2011(2): 57 ~ 59.

- Fan Yingli. AGV navigation identifier identification method based on machine vision[J]. Servo Control, 2011(2): 57~59. (in Chinese)
- 6 李进, 陈无畏, 李碧春, 等. 自动导引车视觉导航的路径识别和跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 20~24. Li Jin, Chen Wuwei, Li Bichun, et al. Road recognition and tracking control of an vision guided AGV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 20~24. (in Chinese)
- 7 安秋, 李志臣, 姬长英, 等. 基于光照无关图的农业机器人视觉导航算法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 208~212. An Qiu, Li Zhichen, Ji Changying, et al. Agricultural robot vision navigation algorithm based on illumination invariant image [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 208~212. (in Chinese)
- 8 Marchant J A, Onyango C M. Shadow-invariant classification for scenes illuminated by daylight[J]. Journal of the Optical Society of America, 2000, 17(11): 1952~1961.
- 9 丁幼春, 王书茂, 陈度. 基于图像旋转投影的导航路径检测算法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 63~66. Ding Youchun, Wang Shumao, Chen Du. Navigation line detection arithmetic based on image rotation and projection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 63~66. (in Chinese)
- 10 赵博, 毛恩荣, 毛文华, 等. 农业车辆杂草环境下视觉导航路径识别方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 183~186. Zhao Bo, Mao Enrong, Mao Wenhua, et al. Path recognition for vision navigation system of agricultural vehicle in weed environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 183~186. (in Chinese)
- 11 丁幼春, 廖庆喜, 黄海东, 等. 联合收获机大曲率路径视觉导航方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 122~127. Ding Youchun, Liao Qingxi, Huang Haidong, et al. Large curvature path detection for combine harvester based on vision navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 122~127. (in Chinese)
- 12 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): 137~143. Ding Youchun, Wang Shumao. Vision navigation control system for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 137~143. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 117 页)

- 5 Candolfi A, De Maesschalck R, Massart D L, et al. Identification of pharmaceutical excipients using NIR spectroscopy and SIMCA [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 1999, 19(6): 923~935.
- 6 McLeod G, Clelland K, Tapp H, et al. A comparison of variate pre-selection methods for use in partial least squares regression: a case study on NIR spectroscopy applied to monitoring beer fermentation [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(2): 300~307.
- 7 Crowley J, Alison Arnold S, Wood N, et al. Monitoring a high cell density recombinant *Pichia pastoris* fed-batch bioprocess using transmission and reflectance near infrared spectroscopy [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2005, 36(5~6): 621~628.
- 8 Tamburini E, Vaccari G, Tosi S, et al. Near-infrared spectroscopy: a tool for monitoring submerged fermentation processes using an immersion optical-fiber probe [J]. Applied Spectroscopy, 2003, 57(2): 132~138.
- 9 Sáiz-Abajo M J, González-Sáiz J M, Pizarro C. Prediction of organic acids and other quality parameters of wine vinegar by near-infrared spectroscopy. A feasibility study [J]. Food Chemistry, 2006, 99(3): 615~621.
- 10 Cozzolino D, Kwiatkowski M J, Parker M, et al. Prediction of phenolic compounds in red wine fermentations by visible and near infrared spectroscopy [J]. Analytica Chimica Acta, 2004, 513(1): 73~80.
- 11 Schölkopf B, Smola A J, Williamson R C, et al. New support vector algorithms [J]. Neural Computation, 2000, 12(5): 1207~1245.
- 12 张庆, 徐光华, 华成, 等. 一类支持向量机的设备状态自适应报警方法[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(11): 61~65. Zhang Qing, Xu Guanghua, Hua Cheng, et al. Self-adaptive alarm method for equipment condition based on one-class support vector machine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(11): 61~65. (in Chinese)
- 13 Mourão-Miranda J, Hardoon D R, Hahn T, et al. Patient classification as an outlier detection problem: an application of the one-class support vector machine [J]. NeuroImage, 2011, 58(3): 793~804.
- 14 Wold S, Esbensen K, Geladi P. Principal component analysis [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1987, 2(1~3): 37~52.
- 15 Thissen U, Pepers M, Üstün B, et al. Comparing support vector machines to PLS for spectral regression applications [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2004, 73(2): 169~179.