

基于相对叶绿素含量的黄瓜叶色仿真*

陆声链¹ 汪丽萍^{1,2} 何火娇² 郭新宇¹

(1.北京农业信息技术研究中心,北京 100097; 2.江西农业大学计算机与信息工程学院,南昌 330045)

摘要:提出了一种基于相对叶绿素含量的植物叶片颜色仿真方法,通过连续对正常生长状态下的黄瓜叶片图像采集及相对叶绿素含量 SPAD 值测定,建立了黄瓜叶片颜色分量与 SPAD 值的数学关系模型,并采用均方根误差 (RMSE) 对模型进行验证,结果显示叶片的 3 个颜色分量 R 、 G 、 B 的实测值与模拟值之间的 RMSE 为 13.43%、8.47%、7.42%,模拟效果较好。通过结合叶片色素浓度分布图对叶色空间分布进行仿真,并采用高级着色器语言实现了黄瓜叶片表现颜色变化过程的可视化模拟,获得了较好的真实感效果。

关键词:黄瓜叶片 叶色仿真 相对叶绿素含量 真实感绘制

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)03-0250-05

引言

植物器官的颜色表达是植物内部生理机制与外界环境因素相互作用的结果,因此对植物叶色变化过程进行真实模拟是一个具有挑战性的课题,不仅需要先进的计算机图形软硬件技术的支持,还需要结合植物器官的内在生理知识。

近年来,有关植物叶色模拟的研究发展迅速,尤其是有关树木季节颜色变化的研究^[1-3]。这些方法都取得了很好的渲染效果,但是他们都是基于树木整体尺度或场景整体尺度,忽视了单个叶片上的颜色分布细节。文献[4-7]获得的叶片表现真实感强,但是缺少生物学参数,对植物生理学意义不大。在作物方面,国内外有关叶片颜色的研究主要集中在数学关系模型建立上^[8-12],或利用计算机视觉技术识别叶色的方法来反演和重建^[13-14],但是有关实现基于生理因素的作物叶片颜色仿真的研究尚不多见^[15]。

黄瓜叶片的颜色空间分布并不是均匀的,这是由于平时观察到的颜色是由叶片表面的反射光造成的,而这些反射光受叶片内部生理结构的影响。研究表明,植物叶片内部色素对光线具有吸收作用^[16-17]。色素在叶片内部结构中的不均匀分布导致了叶片表面颜色不均匀。植物叶片内部色素种类不是单一的,一般来说主要有叶绿素、叶红素、花青

素等,而影响黄瓜叶片颜色最重要的色素是叶绿素。因此通过测定叶片不同部位叶绿素相对含量即 SPAD 值来对黄瓜叶片的颜色空间分布进行模拟。文献[18]利用反应-扩散系统计算色素分布,通过色素分布灰度图来实现植物花色模式建模。采用类似于文献[18]的思想,通过利用黄瓜叶片不同部位色素浓度差异来对黄瓜叶片颜色空间分布进行仿真,不同的是,本文以试验实测数据为数据来源进行仿真模型构建,并在三维模型上进行可视化渲染。

1 试验设计

1.1 数据获取方法

为了获得黄瓜叶片叶色变化过程的真实数据,在日光温室开展了黄瓜栽培试验。待黄瓜长到坐果期,随机选取 12 株长势一致、无病虫害的植株,取第 5 片至最顶上的所有叶片作为试验观测对象。为解决外界光环境对叶片颜色的影响,利用便携式平板扫描仪对植株的所有叶片进行扫描,扫描时将黄瓜活体叶片正面平展于扫描仪稿台上,所得图像以 1700 像素×2338 像素分辨率和 BMP 格式存入计算机,每个图像大小为 11.3 MB。扫描完毕后,在叶片正面 8 个位置(如图 1 所示,所选取的位置应尽可能均匀分布在叶片表面。由于叶片较大,测量中间位置时需将叶片从底部向上卷起)测定 SPAD 值进行平均。数据采集每隔 3 d 进行一次,一共取 3 次

收稿日期:2013-03-21 修回日期:2013-07-03

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD35B01)、北京市自然科学基金资助项目(4122033)和北京市农林科学院自主创新专项资助项目(KJ CX201104011)

作者简介:陆声链,副研究员,博士,主要从事计算机图形学、虚拟现实研究,E-mail: lusl@nrcita.org.cn

通讯作者:郭新宇,研究员,博士,主要从事数字植物理论技术研究,E-mail: guoxy@nrcita.org.cn

样。获得的叶片图像通过编程提取各像素平均 R 、 G 、 B 值, 将这些值连同对应的平均 SPAD 值存储起来待分析。

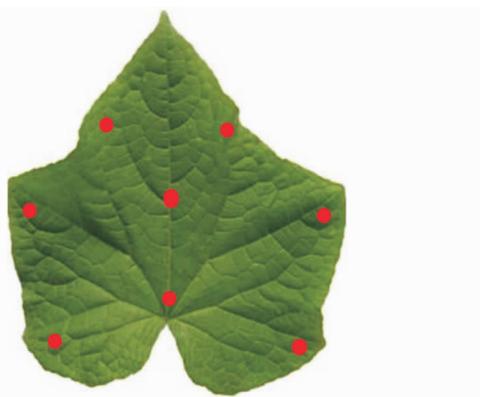


图1 叶片 SPAD 值测定位置示意图

Fig.1 Eight measured points of cucumber leaf

1.2 模型构建和检验方法

本试验所取样品中的前 2 次数据用于建模, 最后一次数据用于模型检验。为衡量模拟值与真实值之间的偏差, 本文采用国际上通用的标准误差即均方根误差 (RMSE)^[19] 对模型进行验证, 其计算公式为

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_{\text{OBS}i} - S_{\text{SIM}i})^2}{n}} \quad (1)$$

式中 $O_{\text{OBS}i}$ ——真实值 $S_{\text{SIM}i}$ ——模拟值
 n ——样本容量

如果 e_{RMSE} 值小于 10%, 则表明模拟值与真实值符合度很好, 10% ~ 20% 之间表示较好, 若大于 30%, 则说明模拟效果差^[20]。

2 叶色与 SPAD 关系模型的构建

2.1 黄瓜叶色与 SPAD 数学关系模型的建立

RGB 颜色系统中, 颜色分量 R (红)、 G (绿)、 B (蓝) 分别表示图像中红、绿、蓝 3 种基色的亮度值, 通过改变三基色数量, 可混合出各种颜色。色度系统中常用 R 、 G 、 B 的比例值表示色度坐标 (r, g, b) , r, g, b 是归一化了的 R, G, B , 通常认为是消除不同环境条件下光强等差异所造成误差的颜色分量, 且 $r + g + b = 1$, 计算公式为

$$r = R / (R + G + B) \quad (2)$$

$$g = G / (R + G + B) \quad (3)$$

$$b = B / (R + G + B) \quad (4)$$

SPAD 值是叶面生理状态的重要指标, 对黄瓜叶色色度分量 r, g, b (即 R, G, B 的比例) 与 SPAD 值进行分析, 如图 2 所示, 能够揭示 SPAD 值与叶色之间的关系。试验结果分析表明, 当 SPAD 值小于 20

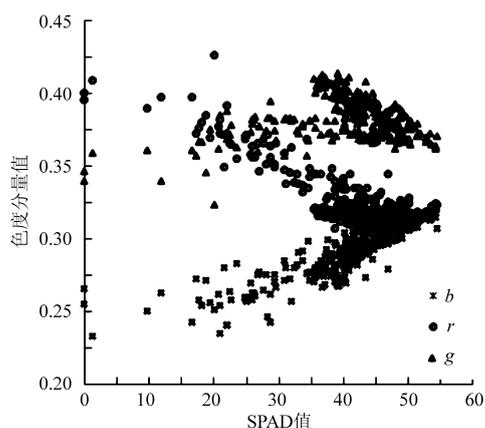


图2 叶片 SPAD 值与色度分量 r, g, b 的关系

Fig.2 Relationships of SPAD and r, g, b colorimetric system

时, r 高于 g, b , g 次之, 此时叶色偏红黄色; SPAD 值处于 20 到 45 之间时, r 随 SPAD 值的升高逐渐降低, g, b 反之且 g 最高, 此时叶色为绿色; 当 SPAD 值大于 45 时, r, b 二者逐渐靠近, g 仍高出 r, b 许多, 此时叶色为深绿色。此结果与实际图像结果一致, 因此本次试验数据符合黄瓜叶色与 SPAD 数学关系模型建立要求, 可以通过建立叶色分量 R, G, B 与 SPAD 关系方程对黄瓜叶色进行反演, 进而实现黄瓜叶色渲染。对试验获得的 SPAD 值与 R, G, B 分量值进行线性分析, 如图 3 所示, 得到的 R, G, B 与 SPAD 之间的二次项回归关系式为

$$R = -2.005P_{\text{SPAD}} + 158.8 \quad (R^2 = 0.791) \quad (5)$$

$$G = -1.449P_{\text{SPAD}} + 147.9 \quad (R^2 = 0.849) \quad (6)$$

$$B = -0.721P_{\text{SPAD}} + 97.01 \quad (R^2 = 0.569) \quad (7)$$

式中 P_{SPAD} ——SPAD 值

2.2 模型的检验

以第 3 次采集所得数据对黄瓜叶片 SPAD 值与叶色组分的定量关系模型进行了初步的检验, 以 RMSE 表示模拟值与观测值之间的统计分析差异, 并制作模拟值与观测值的 1:1 关系图, 结果如图 4 所示。其中直线表示 $y = x$ 的理想值曲线。结果表明, R, G, B 实测值与模拟值之间的 RMSE 为 13.43%、8.47%、7.42%, 其中 R 的 RMSE 在 10% ~ 20% 之间, G 和 B 的 RMSE 在 0 ~ 10% 之间。同时从图 3 可以看出, 本模型在叶片 SPAD 的模拟值和实测值之间表现出较好的一致性和符合度。

3 叶片颜色的空间分布仿真

现实世界中物体的颜色呈现是一个复杂系统, 物体在不同的光照情况下可能呈现出不同的颜色。这是因为物体内部结构 (即材质) 对不同光线的吸收不同, 对不同光线产生的反射光也相应不同, 人眼通过捕捉物体自身发出的光线和反射光线感知物体

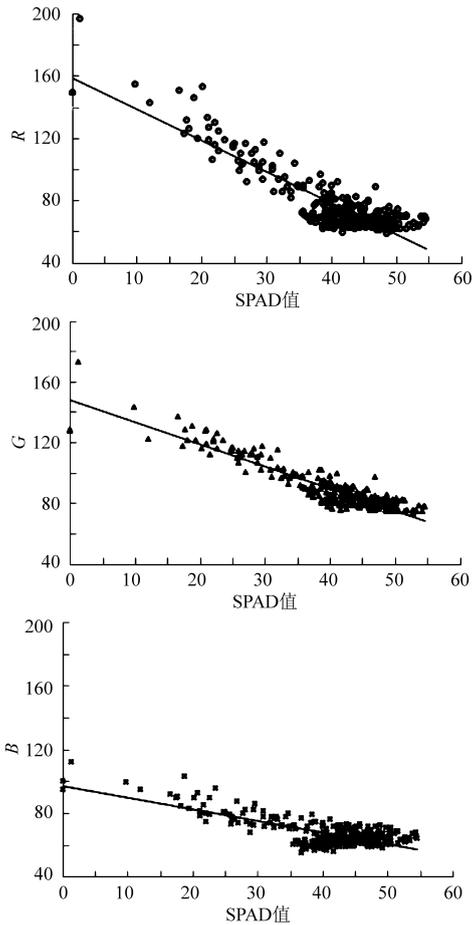


图3 叶片 SPAD 值与 R、G、B 的关系

Fig.3 Relationships of SPAD and R, G, B

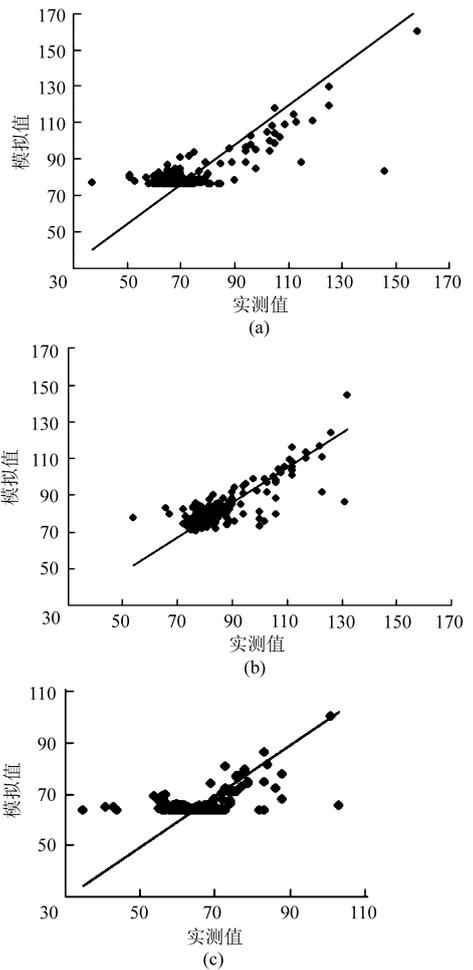


图4 黄瓜叶片 R、G、B 实测值与模拟值的比较
Fig.4 Comparison of simulated and observed values of R, G, B of cucumber leaf

(a) R (b) G (c) B

色泽。本文算法依据 Kajiyu^[21] 提出的渲染方程,即一个物体发出光的数量等于物体自身发出的光量加上物体根据自身材质属性对外界入射光进行反射而发出的反射光,即

$$L_o(x, w) = L_e(x, w) + \int_{\Omega} fr(x, w', w) L_i(x, w') (w'n) dw' \quad (8)$$

式中 $L_o(x, w)$ 表示物体在位置 x 和 w 方向发出的光的总量, $L_e(x, w)$ 表示物体自身发出的光量,在本文中由于黄瓜叶片本身不发光,因此 $L_e(x, w)$ 忽略不计。同时,因为叶片表面并非是绝对光滑的,因此可以将叶片表面看成是由无数个光滑的微表面 w 组成的,于是对于叶片其中一个微表面 w ,它在特定光环境下呈现的颜色可计算为

$$L_o(x, w) = \int_{\Omega} fr(x, w', w) (w'n) L_i(x, w') dw' \quad (9)$$

其中 $fr(x, w', w) (w'n)$ 表示叶片材质属性函数,它计算反射产生的高光大小、亮度和形状,是一个取决于物体表面粗糙程度标量值, x 表示叶片表面粗糙程度, w' 表示入射角方向, n 是表面 w 的法向量,它的具体形式表示为

$$fr(x, w, w') (w'n) = \frac{\exp\left(\frac{-\tan\left(\frac{w'n}{x}\right)^2}{x^2}\right)}{\pi x^2 |w'n|^4} \quad (10)$$

$L_i(x, w')$ 表示特定入射光下叶片漫反射颜色是一个基于 SPAD 获得的颜色关系函数。 $L_i(x, w')$ 的具体形式表示为

$$L_i(x, w') = C_i(P_{SPAD}) = \begin{cases} -2.005P_{SPAD} + 158.8 & (R) \\ -1.449P_{SPAD} + 147.9 & (G) \\ -0.721P_{SPAD} + 97.01 & (B) \end{cases} \quad (11)$$

因此,本文的渲染方程为

$$L_o(x, w) = \int_{\Omega} \frac{\exp\left(\frac{-\tan\left(\frac{w'n}{x}\right)^2}{x^2}\right)}{\pi x^2 |w'n|^4} C_i(P_{SPAD}) dw' \quad (12)$$

4 结果与分析

在 Visual Studio 2005 编程环境下运用 C++ 语

言结合 OpenGL 图形库编程实现了上文描述的算法,首先导入 obj 格式的叶片(或植株)三维模型,然后采用 OpenGL 的纹理贴图函数将叶片色素浓度分布图与三维模型进行纹理映射。该色素浓度分布图是一张叶片纹理灰度图,图中每一点处的色素浓度由该点处的灰度表示,灰度越大,浓度越高,反之亦然。色素浓度分布图的制作过程如下:首先通过编程求出该灰度图的平均灰度,再将该灰度图每个顶点的灰度除以该平均灰度,从而计算出该灰度图每个顶点基于平均灰度的浓度。本文将整个灰度图处理过程作为一个预处理。将得出每个顶点的灰度浓度称之为色素浓度,这一经过预处理后的灰度图称为色素浓度分布图。纹理映射后将获得三维黑白叶片效果,最后将这个色素浓度分布图乘以 SPAD 值,就可以得到每个顶点的 SPAD 值,利用建立好的黄瓜叶片颜色分量与 SPAD 值的数学关系模型就能计算出黄瓜叶片每个顶点的颜色。黄瓜叶片表观颜色变化过程渲染采用高级着色器语言(The OpenGL 2.0 Shader Language)编写着色器(在 OpenGL 可编程处理器上执行的 OpenGL 着色语言代码被称为“着色器”,包括顶点着色器和片元着色器)实现上文所述算法来获得,在片元着色器中片元的最终颜色值即是式(12)中的 $L_o(x, w)$ 。最后通过函数 `glAttachObject(GLhandle program, GLhandle shader)` 向应用程序附加着色器对象并使用函数 `glLinkProgram(GLhandle program)` 将着色器对象链接到应用程序对象本身,最终的结果如图 5 所示。图 5 为输入单个植物叶片三维模型时的效果,对于给定的某一时刻叶片形状,它每一点的 SPAD 浓度百分比可以通过叶片的色素浓度分布图获得,对指定的一张色素浓度分布图,令指数 n 等于 1,叶片的颜色由 SPAD 值决定。随着叶片逐渐衰老,SPAD 值逐渐下降,叶片的颜色会随之相应变化,并且空间上不同位置的颜色变化速率各不相同。这一点可以通过设置色素浓度变化速率解决,叶片色素浓度越大的地方颜色变化速率越小,色素浓度越小的地方颜色变化速率越大。

图 6 为黄瓜三维植株上一个叶片颜色变化过程仿真的结果,其中左上角所示植株为初始时的渲染效果,植株不同部位的叶片颜色分布不一样。通过试验测量植株不同部位叶片 SPAD 值,并采用本文的方法进行了叶色变化过程的模拟:植株最底部的叶片逐渐衰老,且衰老速率越来越快,SPAD 值迅速减小,颜色呈现从绿到黄的变化;中部叶片颜色稳定,且 SPAD 值偏高,颜色偏深绿;顶部叶片 SPAD 值相对较小,呈翠绿色。

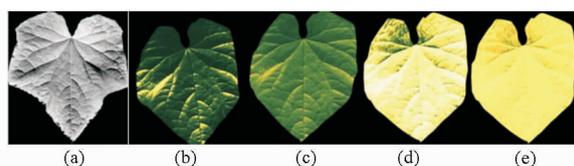


图 5 指定色素浓度分布图下,不同 SPAD 值下的黄瓜叶片颜色变化

Fig. 5 Color change of cucumber leaves in different SPAD values

(a) 原始图 (b) SPAD 为 50 (c) SPAD 为 30
(d) SPAD 为 10 (e) SPAD 为 0

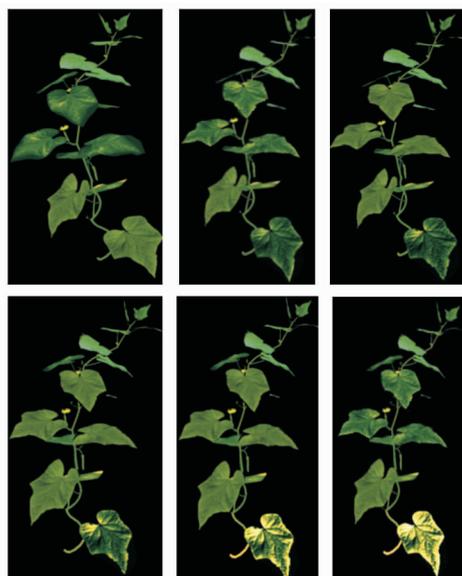


图 6 黄瓜叶片衰老变色过程渲染效果

Fig. 6 Rendering results of color change with cucumber leaves growth

5 结束语

通过分析 SPAD 与叶色 RGB 之间的关系,构建了基于 SPAD 的黄瓜叶色模拟模型,并分别建立了 SPAD 值与叶色 3 个分量(R 、 G 、 B)之间的定量关系。本文得到的叶片外观由色素浓度分布图和叶片 SPAD 值确定,叶片整体颜色由 SPAD 值表达,颜色空间分布由色素浓度分布图以及色素浓度变化速率表达。叶片颜色与 SPAD 关系模型基于试验实测数据,符合叶色变化的生物学规律。同时,该方法输入简单,只需输入一个三维叶片模型和一张黑白的色素浓度分布图,参数 SPAD 易于控制,生成效果与现实相似。本文只关注叶片颜色变化效果,对叶片衰老过程中伴随叶片颜色变化产生的形状变化(如褶皱、卷曲等)不在本文考虑范围内。

影响叶片颜色的因素并不是单一的,植物叶片的颜色表达是一个非常复杂的过程,光照、温度、湿度等外界气候条件以及植物营养状况、病虫害状况对其都有直接影响。因此,应考虑更多影响因子的植物叶色仿真以及由于叶片衰老伴随叶片颜色变化产生的形状变化仿真。

参 考 文 献

- 1 Mochizuki S, Cai D, Komori T, et al. Virtual autumn coloring system based on biological and fractal model[C] // Proceedings of the 9th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2001: 348 - 354.
- 2 Braitmaier M, Diepstraten J, Ertl T. Real-time rendering of seasonal influenced trees[C] // Proceedings of Theory and Practice of Computer Graphics, 2004:152 - 159.
- 3 Zhou Ning, Dong Weiming, Xing Mei. Realistic simulation of seasonal variant maples[C] // 2nd International Symposium on Plant Growth Modeling and Applications, 2006:295 - 301.
- 4 Rodkaew Y, Siripant S, Lursinsap C, et al. An algorithm for generating vein images for realistic modeling of a leaf[C] // Proceedings of the International Conference on Computational Mathematics and Modeling, 2002:9.
- 5 Wang L, Wang W, Dorsey J, et al. Real-time rendering of plant leaves[C] // ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3):712 - 719.
- 6 Peyrat A, Terraz O, Merillou S, et al. Generating vast varieties of realistic leaves with parametric 2Gmap L-systems[J]. The Visual Computer, 2008, 24(7 - 9):807 - 816.
- 7 Fan Jing, Yang Kefeng, Ye Yang, et al. The simulation of the growing process of virtual plant leaves[C] // Proceedings of the 2010 International Conference on Audio Language and Image Processing (ICALIP), 2010: 1377 - 1381.
- 8 张若宇,坎杂,马蓉,等. 基于 RGB 模型的脱绒棉种颜色特征与发芽状况的关系[J]. 农业工程学报,2006,26(10):172 - 177.
Zhang Ruoyu, Kan Za, Ma Rong, et al. Relationship between color features and germination of delinted cottonseed based on RGB color model[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 172 - 177. (in Chinese)
- 9 赵全志,陈静蕊,刘辉,等. 水稻氮素同化关键酶活性与叶色变化的关系[J]. 中国农业科学,2008,41(9):2607 - 2616.
Zhao Quanzhi, Chen Jingrui, Liu Hui, et al. Relationship between activities of nitrogen assimilation enzymes and leaf color of rice [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(9):2607 - 2616. (in Chinese)
- 10 朱艳,刘小军,谭子辉,等. 冬小麦叶色动态的量化研究[J]. 中国农业科学,2008,41(11):3851 - 3857.
Zhu Yan, Liu Xiaojun, Tan Zihui, et al. Quantitative study on leaf color dynamics of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(11):3851 - 3857. (in Chinese)
- 11 Zhu Yan, Chang Liying, Tang Liang, et al. Modeling leaf color dynamic in rice plant on spad value[C] // Computer and Computing Technologies in Agriculture- I -Proceedings of the Third IFIP International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture, 2009:173 - 183.
- 12 王举才,席磊,赵晓莉,等. 基于模糊综合评判的可视化叶色模型数据标准化[J]. 农业工程学报,2011,27(11):155 - 159.
Wang Jucai, Xi Lei, Zhao Xiaoli, et al. Data normalization of leaf color based on fuzzy comprehensive evaluation for visualization model [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 151 - 159. (in Chinese)
- 13 陈国庆,姜东,朱艳,等. 利用计算机视觉识别小麦叶色的光照模型研究[J]. 农业工程学报,2004,20(4):143 - 145.
Chen Guoqing, Jiang Dong, Zhu Yan, et al. Light modeling of wheat leaf color identifying using computer vision [J]. Transactions of the CSAE, 2004,20(4):143 - 145. (in Chinese)
- 14 张彦娥,李民赞,张喜杰,等. 基于计算机视觉技术的温室黄瓜叶片营养信息监测[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8):102 - 105.
Zhang Yan'e, Li Minzan, Zhang Xijie, et al. Nutrition information extraction of the cucumber leaves in the greenhouse based on computer vision technology [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 102 - 105. (in Chinese)
- 15 Miao Teng, Zhao Chunjiang, Guo Xinyu, et al. A framework for plant leaf modeling and shading[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013,58(3 - 4):710 - 718.
- 16 MacAdam D L. Color measurement: theme and variations [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- 17 Shi J S, Ma B, Luo Y Y. Causes of leaf color and its application in garden landscaping[J]. Journal of Landscape Research, 2010, 2(2):47 - 50.
- 18 周宁,董未名,王家厥. 植物花色模式仿真[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007,19(6): 708 - 712.
Zhou Ning, Dong Weiming, Wang Jiaxin. Simulation of flower color pattern[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19(6):708 - 712. (in Chinese)
- 19 Rinaldi M, Losavio N, Flagella Z. Evaluation and application of the OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy[J]. Agricultural Systems, 2003, 78(1): 17 - 30.
- 20 Jamieson P D, Porter J R, Wilson D R. A test of the computer simulation model ARCWHEATI on wheat crops grown in New Zealand[J]. Field Crops Research, 1991, 27(4): 337 - 350.
- 21 Kajiya J T. The rendering equation[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1986, 20(4): 143 - 150.

quantitative detection was prepared. It was made by modification of cysteamine onto screen-printed gold electrode surface and immobilization of antigens. By the method of cyclic voltammetry, it was shown that there is a linear relationship between the changes of peak current and the different brucella antibody concentrations within the range of $10^{-5} \sim 10^{-3}$ IU/mL, the relevant correlation coefficient is 0.999 9 and the lower detection limit is 2.8×10^{-5} IU/mL. Furthermore, semi-differential transformation was applied to all of the cyclic voltammograms, the correlation between the changes of semi-differential values and the corresponding concentration of brucella antibody has been established, the correlation coefficient is 0.992 9 and the lower detection limit is 2.7×10^{-6} IU/mL in the range of $10^{-5} \sim 10^{-3}$ IU/mL, and the correlation coefficient is 0.999 2 in the range of $10^{-2} \sim 1$ IU/mL. It was shown that the detection range and the lower detection limit were improved greatly by the semi-differential transformation.

Key words: Brucella antibody Immunosensor Screen-printed gold electrode Cyclic voltammetry
Semi-differential

(上接第 254 页)

Visual Simulation of Cucumber Leaf Color Based on the Relative Content of Chlorophyll

Lu Shenglian¹ Wang Liping^{1,2} He Huojiao² Guo Xinyu¹

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

2. School of Information and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: A method for visual simulating leaf color based on the relative content of chlorophyll was proposed. The mathematical model between cucumber leaf color components and chlorophyll relative content was established according to images acquired from real field and measuring chlorophyll relative content (SPAD) of the cucumber leaf in normal growth state continuously, and the model was also verified by using root-mean-square error (RMSE). The results showed that the RMSE between the observed values (R, G, B) and simulated values (R, G, B) in leaf are 13.43%, 8.47%, 7.42% respectively. The rendering for the spatial distribution of apparent color of cucumber leaf was realized by combining with a black and white pigment distribution texture which was a grayscale image before being preprocessed. Then the high level shader language (OpenGL 2.0 Shader Language) was used to realize the rendering of apparent color changing process of cucumber leaf. The above process showed that the method proposed can achieve better realistic rendering results.

Key words: Cucumber leaf Leaf color simulation SPAD Realistic rendering