

1-8-2019

Method of VisualSimulation of Rice Leaf Color

Hongyun Yang

1. School of Software, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;;3. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Agricultural Information Technology, Nanchang 330045, China;

Aizhen Sun

2. College of Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;;3. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Agricultural Information Technology, Nanchang 330045, China;

Wenji Yang

1. School of Software, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;;3. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Agricultural Information Technology, Nanchang 330045, China;

Huojiao He

1. School of Software, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;;3. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Agricultural Information Technology, Nanchang 330045, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Method of VisualSimulation of Rice Leaf Color

Abstract

Abstract: A color rendering method for rice leaves based on SPAD data distribution image was presented. Rice leaf image was collected and SPAD value was measured by field rice sample test. The relationship model between SPAD values and RGB value of leaf image was analyzed and constructed, and the R^2 was 0.932 8, 0.833 1, 0.562 3 respectively. This showed that there was a correlation between SPAD and the red and green color of the leaf image. By the SPAD data distribution image, the spatial distribution of SPAD value on the leaf surface is described. The leaf surface color difference and the change with the growth time were simulated. Through Microsoft's Direct3D9.0 graphics library and vc ++ programming, the visual simulation of rice leaf color change process based on the previous 3D model of rice leaf was achieved. The method has good generalization.

Keywords

rice, leaf color, SPAD data distribution image, visualization

Recommended Citation

Yang Hongyun, Sun Aizhen, Yang Wenji, He Huojiao. Method of VisualSimulation of Rice Leaf Color[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 2892-2899.

水稻叶片颜色可视化模拟方法研究

杨红云^{1,3}, 孙爱珍^{2,3*}, 杨文姬^{1,3}, 何火娇^{1,3}(1. 江西农业大学软件学院, 南昌 330045; 2. 江西农业大学理学院, 南昌 330045;
3. 江西省高等学校农业信息技术重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 提出了一种基于SPAD数据分布图像的水稻叶片颜色渲染方法。通过大田水稻样本试验采集水稻叶片图像并测定叶片SPAD值, 分析并构建了SPAD值与叶片图像的R、G、B分量值之间关系模型, 模型判定系数分别为0.932 8, 0.833 1, 0.562 3, 表明SPAD与叶片图像R、G颜色分量之间存在相关性。通过SPAD数据分布图像表征SPAD值在叶片表面的空间分布状况, 对叶片表面的颜色差异以及随生长时间变化过程进行可视化模拟, 并通过微软的Direct3D9.0图形函数库和vc++编程, 在前期水稻叶片三维模型的基础上, 实现了水稻叶片颜色变化过程的可视化模拟, 实现方法具有很好的推广性。

关键词: 水稻; 叶色; SPAD值分布图像; 可视化

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X(2018)08-2892-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808010

Method of VisualSimulation of Rice Leaf Color

Yang Hongyun^{1,3}, Sun Aizhen^{2,3*}, Yang Wenji^{1,3}, He Huojiao^{1,3}

(1. School of Software, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. College of Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 3. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Agricultural Information Technology, Nanchang 330045, China)

Abstract: A color rendering method for rice leaves based on SPAD data distribution image was presented. Rice leaf image was collected and SPAD value was measured by field rice sample test. The relationship model between SPAD values and RGB value of leaf image was analyzed and constructed, and the R^2 was 0.932 8, 0.833 1, 0.562 3 respectively. This showed that there was a correlation between SPAD and the red and green color of the leaf image. By the SPAD data distribution image, the spatial distribution of SPAD value on the leaf surface is described. The leaf surface color difference and the change with the growth time were simulated. Through Microsoft's Direct3D9.0 graphics library and vc++ programming, the visual simulation of rice leaf color change process based on the previous 3D model of rice leaf was achieved. The method has good generalization.

Keywords: rice; leaf color; SPAD data distribution image; visualization

引言

叶片作为植物光合作用最重要的器官, 其颜色

反映了植物内在生理功能和生长状态的重要特征, 在生长过程中植物叶片颜色受基因品种、营养状况、病虫害影响以及生长环境等多个因素的影响, 其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, 定量描述叶片颜色动态变化过程对于植物生长的数字化和可视化仿真模拟具有重要意义^[1]。近年来, 对植物叶片颜色模拟的研究主要集中在关于树木叶片季节颜色变化的研究^[2-5]。



收稿日期: 2016-10-21 修回日期: 2016-12-18;
基金项目: 国家自然科学基金(61562039, 61363041, 61462038);
作者简介: 杨红云(1975-), 男, 江西新干, 硕士, 副教授, 研究方向为虚拟农业技术、机器学习; 孙爱珍(通讯作者 1975-), 女, 江西新干, 硕士, 副教授, 研究方向为数学建模与应用。

<http://www.china-simulation.com>

• 2892 •

这些研究主要是获得树木或场景的整体视觉效果, 缺乏对单片叶子颜色细节的描述以及忽略植物的生理生态学因素。

水稻作为主要粮食作物之一, 其叶片 SPAD 值可以反应水稻叶片中叶绿素相对含量, 是反映植物生理活性变化的最重要指标之一^[6]。国内外有关农作物叶片颜色的研究主要集中在如何构建数学关系表达式上^[7-9], 或利用计算机视觉技术识别叶色的方法来反演和重建^[10-11], 但结合生理生态因子描述器官颜色并实现可视化表达的研究报道很少见^[12-13]。作者通过常规水稻栽培试验, 获取水稻不同叶位叶片的 SPAD 值数据及使用数字图像处理技术统计叶片的 R、G、B 分量值数据, 分析不同 SPAD 值与水稻叶片颜色分量之间的关系并构建数学模型, 并结合前期研究的水稻叶片三维模型^[14-16], 实现基于 SPAD 值的水稻叶片表面颜色的可视化模拟。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

本研究主要以水稻叶片器官表面颜色变化过程为研究对象, 水稻样本栽培试验采用江西地区推广种植的双季早稻金优 458 品种, 试验于 2014 年和 2015 年在江西农业大学校内试验站进行。根据施氮肥水平不同试验, 设计 4 组不同的氮素水平 ($N_1=CK(0)$ 、 $N_2=225 \text{ kg/hm}^2$ 、 $N_3=150 \text{ kg/hm}^2$ 、 $N_4=75 \text{ kg/hm}^2$)。各处理中, 基肥为 60%, 追肥为 40%。水稻试验样本栽培为大田栽培, 土壤为水稻土(有机质 14.24 g/kg, 全氮 0.8 g/kg, 速氮 52.23 mg/kg, 速磷 8.9 mg/kg, 速钾 101.84 mg/kg)。在秧苗 4 叶 1 芯时单苗移栽, 每个施肥处理均设计 3 个重复以便对照, 其余管理措施均按常规管理进行, 以获取不同含氮量的叶色差异的水稻样本个体。

1.2 样品测量与数据处理

水稻样品采用离体测试方式, 离体测试的数据主要有叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素(用分光光度计测试)、叶绿素相对含量 SPAD 值(SPAD-502

叶绿素仪测试)、叶片数字图像数据(Epson V300 平板式扫描仪扫描)和叶片长宽、面积等叶片几何形态数据。离体测试在返青和分蘖阶段每 2 周测试 1 次, 拔节至齐穗期每周测试 1 次。在本研究中主要获取叶片的 SPAD 值和叶片的 RGB 值数据, 其它测量数据为后续研究使用。

根据文献^[17-18], 水稻 SPAD 值得最佳测定位置是距离叶基部 2/3 处, 用 SPAD-502 叶绿素仪从叶尖到叶中部位等间隔取四点测量叶片的 SPAD 值, 并取均值作为叶中上部分的 SPAD 值作为测量结果。将水稻叶片扫描图像的中上正面部位的数字图像用 C++编程, 去除背景信息后, 逐点读取每个叶片图像的 R、G、B 颜色信息, 并取其平均值, 作为该叶片的 R、G、B 分量用于与叶片叶绿素相对含量 SPAD 值作相关分析。

2 水稻叶色建模

2.1 叶片 SPAD 值的变化过程

对于特定叶位的水稻叶片, 从针状伸展开始到叶片死亡, 叶片的 SPAD 值随叶片生长时间的变化过程如图 1 所示。根据文献^[19], 可以将叶片整个生长期间的叶色变化分为 3 个阶段。第一阶段, 从叶片抽出到定长, 叶片颜色逐渐变深见图 1 中 A 部分; 第二阶段, 从功能期开始到功能期结束, 叶色呈稳定状态, 基本变化不大见图 1 中 B 部分; 第三阶段, 从叶片功能期结束到完全衰亡, 叶片颜色迅速下降见图 1 中 C 部分。

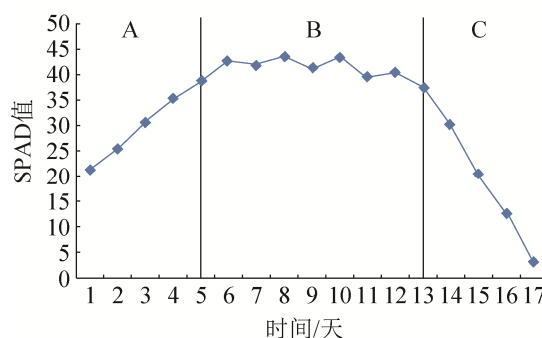


图 1 叶片的 SPAD 值随叶片生长时间变化过程
Fig. 1 Changing process of SPAD values of leaves with the growth period

通过观测试验水稻叶片长度方向的叶尖、叶中、叶枕三个不同位置的 SPAD 值,选择水稻整个生长期的第 3 叶到第 12 叶,隔天对叶片进行测量。发现一般情况下,同一叶片叶尖位置的 SPAD 值小于叶中位置的 SPAD 值,叶中位置的 SPAD 值小于叶枕位置的 SPAD 值。

图 2 列出了随机 20 组不同叶片测量的叶尖、叶中和叶枕 3 个不同部位的 SPAD 值数据。从叶片长度方向来看水稻叶片颜色其功能期稳定期到衰亡期的生长变化过程:叶色有叶尖位置开始到叶枕位置慢慢变黄,直到枯萎。由于水稻叶片宽度方向比较狭窄,同一方向用 SPAD 仪器测量其 SPAD 值不方便测量多点,但从水稻叶片生长过程来看,其宽度方向的颜色变化为从两边叶边缘位置开始到中心叶脉位置慢慢变黄,直到枯萎。

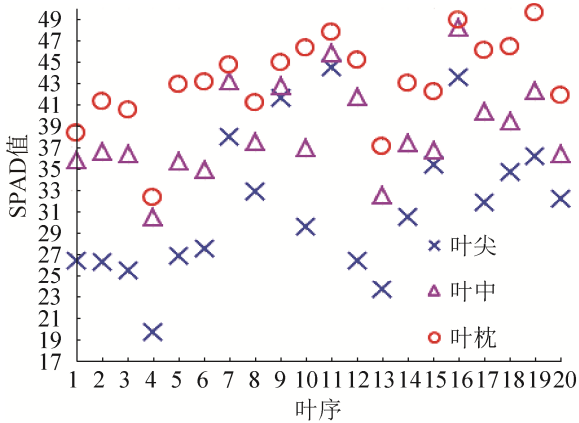


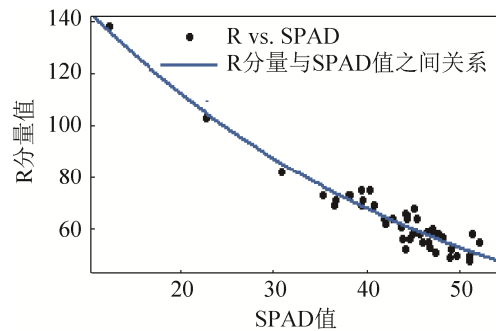
图 2 叶片不同部位 SPAD 值
Fig.2 SPAD values in different positions of leaf blade

2.2 叶片颜色 RGB 值与 SPAD 值的关系模型

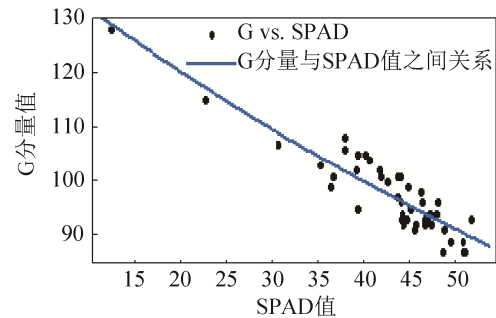
通过对叶片的 SPAD 及正面扫描图像颜色分量 R、G、B 值进行相关性分析,发现对于水稻叶片的 SPAD 值与叶色的红色分量 R 值及绿色分量 G 值具有显著的相关性,对于蓝色分量 B 值,不具有明显的相关性,且由于其值较小,对最终的颜色影响不大。分别构建 SPAD 值与颜色分量 R、G、B 值的函数关系。水稻叶片的 SPAD 值与颜色分量 R、G、B 值的关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} R = 186.6 \times e^{-0.02529s} \\ G = 144.6 \times e^{-0.009184s} \\ B = 55.26 \times e^{-0.0114s} \end{cases} \quad (1)$$

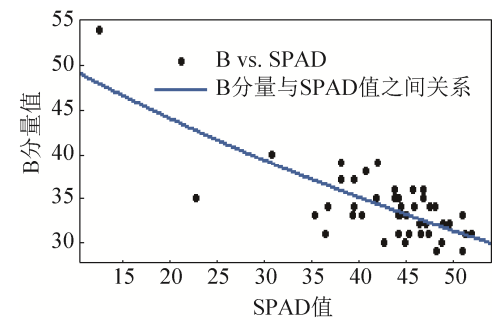
式中: s 为 spad 值,拟合的判定系数 R-square 分别为: 0.932 8, 0.833 1, 0.562 3。RMSE 分别为: 4.034, 3.234, 2.741, 对应的 RMSE 与观测均值的百分比分别为: 6.287 5%, 3.31%, 7.706%。RMSE 与观测均值的百分比能很好的反映模型模拟值的预测性,百分比值小于 10%,表明模拟值与实际观测值一致性非常好,10%~20%比较好,20%~30%表明模拟效果一般,百分比值大于 30%表明模拟值与实际值偏差大,模拟效果差。拟合曲线图如图 3 所示。



(a) R 分量拟合图



(b) G 分量拟合图



(c) B 分量拟合图

图 3 R、G、B 分量值与 SPAD 值拟合曲线
Fig. 3 R, G, B component value fitting curve and SPAD values

2.3 叶色模型检验

采用国际上常用的根均方差 RMSE(Root Mean Square Error)方法, 如式(2)。对模拟值与观测值之间的符合度进行统计分析。RMSE 值越小, 表明模拟值与实际观测值的一致性越好, 模型的模拟结果越准确、可靠。RMSE 的计算如下, 其中 OBS_i 为观测值, SIM_i 为模拟值, n 为样本容量。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \quad (2)$$

利用重复试验中观测的 45 组不同叶位叶片 SPAD 值和 R、G、B 分量值对所建水稻叶片 SPAD 值与叶色分量值的定量关系模型进行了初步的检验, 通过模型关系式(1), 由 SPAD 值模拟计算 R、G、B 分量值和实测 R、G、B 分量值结果如表 1 所示(表 1 中仅列出前 15 组数据)。结果表明: 模型对水稻主茎上不同叶位叶片在不同 SPAD 值时的叶色变化具有较好的预测性, R、G、B 分量值的模拟计算值与观测值之间的 RMSE 平均值分别为 3.784、2.717、1.888。

表 1 R、G、B 分量的模拟计算值与实测值对照表
Tab.1 Table of RGB simulated values and measured values

SPAD 值	R 计算值	R 实测值	G 计算值	G 实测值	B 计算值	B 实测值
41.7	65	62	99	100	34	26
33.1	81	77	107	105	38	30
38.3	71	67	102	105	36	39
37.4	72	78	103	98	36	33
43.7	62	68	97	101	34	37
41.7	65	65	99	100	34	35
40.7	67	64	100	100	35	30
43.4	62	63	97	95	34	30
34.6	78	75	105	102	37	35
38.2	71	72	102	98	36	34
49.4	53	59	92	88	31	27
40.8	66	63	99	96	35	33
46.5	58	55	94	97	33	38
50.4	52	49	81	84	31	26
43.9	61	64	97	98	34	35

3 叶色仿真渲染

试验数据表明, SPAD 与叶片颜色 RG 分量值呈现指数关系, 其叶片 RGB 三分量中, 绿色分量最大, 红色分量次之, 蓝色分量最小。当 SPAD 值大部分在 30~50 范围内时, 绿色分量起主导作用, 叶片呈现绿色。从视觉角度看, 随着 SPAD 的降低, 叶片的颜色大致呈现由绿到黄的变化趋势, 而这种颜色的变化主要体现在叶片的颜色 R、G、B 分量的变化上。水稻叶片在完全伸展开来后叶片颜色和 SPAD 含量的变化, 叶片的 SPAD 值呈现基本稳定值状态, 叶片呈深绿色。当叶片进入衰亡期, SPAD 值将从叶尖位置到叶枕位置不断变小, 直到基本为 0; 叶片也将由叶尖位置开始慢慢变黄, 直至叶枕位置变黄枯萎失去功能。从视觉角度来说, 水稻叶片生长期颜色变化过程主要反映到漫反射分量的变化上, 在实际渲染过程中, 使用点光源, 环境光使用系统默认的环境光, 不考虑镜面反射, 将叶片 RGB 值与 SPAD 值的关系模型方程作为漫反射系数进行渲染, 叶片各点的漫反射颜色 Df 公式如式(3)。

$$\begin{cases} Df = Ap \times Ac + (Dp \times Dc)(N \cdot L) \\ Dc = (R, G, B) = k(186.6 \times e^{-0.02529st}, \\ 144.6 \times e^{-0.009184st}, 55.26 \times e^{-0.0114st}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: Ap 为环境光强度, Ac 为环境光颜色, Dp 为漫反射光强度, Dc 为漫反射颜色, s 为 SPAD 值, t 为调整系数(也称为 SPAD 值的衰减系数), N 为叶片点法向量, L 为点光源入射光方向向量。图 4 为不同 SPAD 值的叶片颜色模拟效果。调整系数为 1, 从左到右 SPAD 值依次取值为 50.0, 25.0, 0.0, 由于整个叶片的各个点的 SPAD 值都相同, 所以叶片呈现均匀同色。

在实际自然环境中, 叶片表面空间各点的颜色值不一样。由于叶片属于非金属材料, 其表面颜色主要由漫反射颜色决定, 而 SPAD 值的变化主要影响叶片的漫反射分量。也就是说, SPAD 值在叶片表面空间的分布不同而引起其漫反射颜色不用一

样，我们可以像制作高度地形图一样，设计一张基于 SPAD 值的数据分布灰度图像，用于说明 SPAD 值在叶片表面的空间分布情况，依据 SPAD 数据分布图像可以进行叶片表面颜色的渲染。制作设计基于 SPAD 值的数据分布灰度图像需要满足 2 个条件。



图 4 不同 SPAD 值的叶片仿真效果
Fig.4 Simulation of leaves with different SPAD values

(1) 叶色越绿的位置图像亮度越亮，灰度值越大，叶色越黄的位置图像亮度越小，灰度值越小。

(2) 由于水稻叶片的 SPAD 值分布在区间[0,55]之间，若图像灰度值区间限制在[0,255]之间，亮度区分较差，所以图像灰度值为实际 SPAD 值的 5 倍计数，对灰度值超过 255 的部分记为 255 即可。

编辑不同的 SPAD 数据分布灰度图像，根据坐标点在叶片三维模型中的位置计算出对应坐标点在 SPAD 数据分布图像中的位置，并取出该坐标点的 SPAD 值，再根据公式(4)计算出其漫反射颜色分量，渲染的水稻叶片效果如图 5 所示。

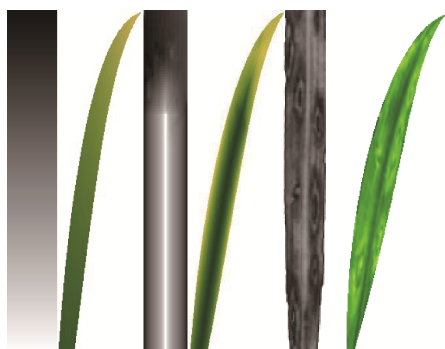


图 5 不同 SPAD 数据分布灰度图像与对应的叶片渲染效果
Fig.5 Rendering distribution gray scale image of leaves with different SPAD values

对于同一张 SPAD 数据分布图像，还可以改变调整系数 t 的大小，而改变漫反射颜色分量值，图 6 为同一 SPAD 数据分布灰度图像，通过不同调整系数 t 所得到的渲染效果，展现出了叶片颜色由深绿缓慢变黄的变化过程，所以调整系统 t 可以看成叶片 SPAD 值随时间而变化的一个衰减系数。



(a) SPAD 数据分布灰度图像 (b) $t=1.0$ (c) $t=0.5$ (d) $t=0.25$ (e) $t=0.125$

图 6 同一 SPAD 数据分布灰度图像，不同调整系数的叶片渲染效果

Fig.6 Rendering distribution gray scale image of leaves with same SPAD value and different adjustable coefficients

在实际应用中，利用上述原理进行人机交互、艺术性的编辑颜色的空间分布，渲染叶片表面颜色，但是这种制作设计 SPAD 数据分布灰度图像的过程相对繁琐，不便自动处理，所以提出一种以实际叶片图像自动生成 SPAD 数据分布灰度图像的方法：

(1) 预处理：采集叶片图像，并将图像进行预处理，利用图像处理工具 Photoshop 软件去除叶片中的高光及阴影，假设经过处理后的图像其颜色值的贡献主要来自于叶片的漫反射部分。

(2) 灰度化：将预处理后的图像进行灰度化处理得到其灰度图像。

(3) 反相化：因灰度图像中叶片越绿的点灰度值越小，颜色越黄的点灰度值越大，这与叶片颜色对应的 SPAD 值结果刚好相反，所以将灰度图像进行反相变换，得到反相图像。

(4) 增强处理(可选)：如反相后的灰度图像区分度不够理想，还可以将反相图像进行增强处理，

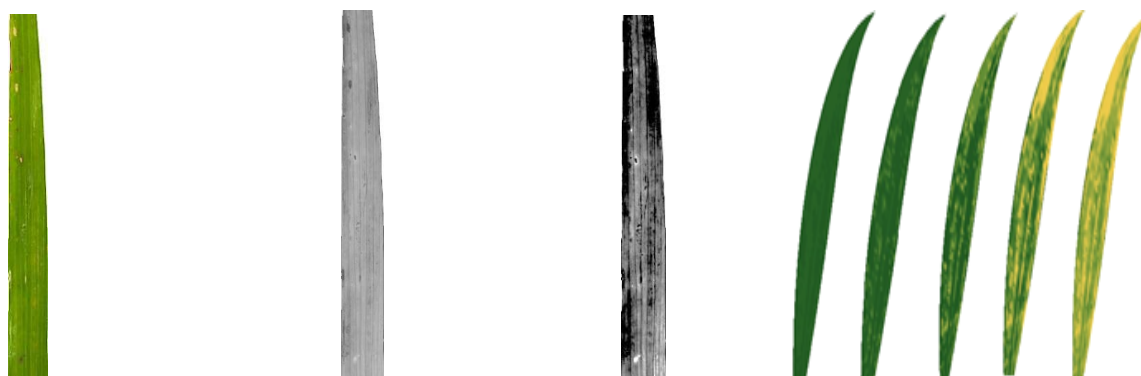
提高对比度。

经过上述步骤处理后的灰度图像作为叶片 SPAD 数据分布灰度图, 用于叶片颜色的渲染, 渲染效果如图 7 所示, 逐步改变调整系数得到叶片缓慢变黄的模拟效果。

4 结果与分析

将水稻叶片表面空间点的 SPAD 值在叶片空间上的变化设计成为一张基于 SPAD 数据分布灰度图像, 有效的解决了叶片表面 SPAD 值的空间分

布问题, 在前期水稻叶片三维模型的基础上, 采用微软的 Direct3D9.0 图形函数库, 在 vc++2010 下编程, 通过叶片的 SPAD 数据分布灰度图像, 取出并计算对应叶片三维模型上点的 SPAD 值, 利用关系式(1), 由 SPAD 值计算叶片表面各点的 RGB 分量值, 利用漫反射颜色公式(3)对水稻叶片三维模型中的三角形进行颜色填充渲染, 同时可以逐步改变调整系数 t 模拟出叶色随生长时间缓慢衰减变黄的变化过程, 模拟效果较为真实, 图 8 为水稻植株三维模型其中一叶片表面颜色枯黄变化过程。



(a) 实际叶片图像 (b) 自动生成的 SPAD 数据分布灰度图像 (c) 图(b)的增强图 (d) 叶色随调整系数衰减变化渲染效果图

图 7 自动生成 SPAD 数据分布灰度图像与不同调整系数叶色渲染效果

Fig.7 Rendering leaves results of automatic generating SPAD value distribution gray scale image with different adjustment coefficients

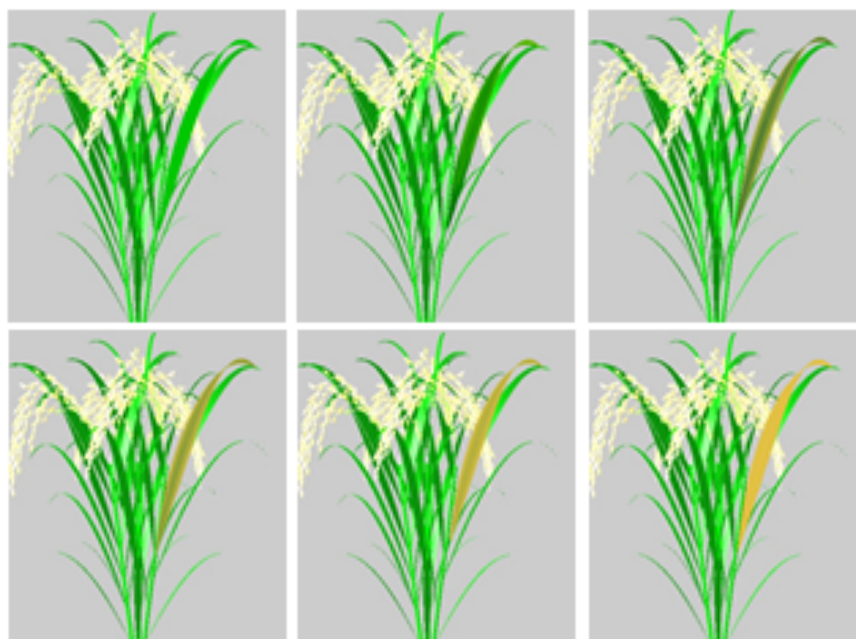


图 8 水稻植株叶片枯黄变化过程

Fig.8 Rice leaf yellow change process

<http://www.china-simulation.com>

• 2897 •

5 结论

(1) 通过试验, 测量水稻叶片的 SPAD 值数据和统计叶片图像的 R、G、B 分量数据, 建立 SPAD 值与叶片颜色分量的数学模型, 提出了基于 SPAD 数据分布灰度图像的水稻叶片颜色变化过程模拟方法。并分析了 SPAD 值在水稻叶片表面随时间和空间的变化过程, 实现了不同 SPAD 值下水稻叶片表面颜色变化过程的模拟, 较为真实的在计算机上再现了水稻叶片颜色生长变化过程。为进一步构建水稻植株形态模型及实现虚拟水稻生长系统奠定了基础。

(2) 不同品种的水稻叶片 SPAD 值与叶色 RGB 分量之间的关系会有不同, 且不同的施肥水平、光照条件下, SPAD 值与叶色 RGB 分量之间的关系系数也会发生变化, 同一叶片的 SPAD 值在其生长期叶表面各个点的衰减变化也是不同的。所以, 整合其他农学因子, 构建普适可靠的多因子叶色数学模型等问题还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 艾施荣, 何火娇, 吴瑞梅. 虚拟作物研究综述[J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(12): 44-45.
Ai Shirong, He Huojiao, Wu Ruimei. Summary of virtual crop research [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2003, 25(12): 44-45.
- [2] 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.
- [3] Peyrat A, Terraz O, Merillou S, et al. Generating vast varieties of realistic leaves with parametric 2Gmap L-systems[J]. The Visual Computer (S0178-2789), 2008, 24(7/9): 807-816.
- [4] 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.
- [5] Zhang Y H, Liang T A N G, Liu X J, et al. Modeling dynamics of leaf color based on RGB value in rice. [J]Journal of Integrative Agriculture (S2095-3119), 2014, 13(4): 749-759.
- [6] 吴文革, 孔令娟, 杨惠成, 等. 2006 双季北缘地区水稻补偿超高产栽培研究[J]. 安徽农学通报, 2006, 12(11): 121-128.
Wu Wenji, Kong Lingjuan, Yang Huicheng, et al. Study on the compensation for super high yield cultivation of 2006 double cropping northern margin area [J]. Anhui agronomy bulletin, 2006, 12 (11): 121-128.
- [7] Miao T, Zhao C, Guo X, et al. Visual simulating appearance of plant leaves infected by disease and insect pests.[J] Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (S1002-6819), 2014, 30(2): 169-175.
- [8] 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]. Chinese Agricultural Sciences, 2008, 41(11): 3851-3857.
- [9] 常丽英, 张文宇, 张玉屏, 等. 水稻叶色变化动态的模拟模型研究 [J]. 作物学报, 2007, 33(7): 1108-1115.
Chang Liying, Zhang Wenyu, Zhang Yuping, et al. Simulation models of leaf color change in rice [J]. Acta Sinica Acta Sinica, 2007, 33 (7): 1108-1115.
- [10] Li C, Qian J, Tong R, et al. GPU based real-time simulation of massive falling leaves. [J]. Computational Visual Media (S2096-0433), 2015, 1(4): 351-358.
- [11] 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 Yane, Li Minzan, Zhang Xijie, et al. Nutrition information monitoring of cucumber leaves in Greenhouse Based on computer vision technology [J]. Acta agro engineering, 2005, 21(8): 102-105.
- [12] 汪丽萍, 陆声链, 何火娇, 等. 基于色素浓度的黄瓜叶片渲染[J]. 中国体视学与图像分析, 2013, 18(2): 123-129.
Wang Liping, Lu Shenglian, He Huojiao, et al. Cucumber leaf rendering based on pigment concentration [J]. Chinese stereology and image analysis, 2013, 18 (2): 123-129.
- [13] 苗腾, 赵春江, 郭新宇, 等. 基于叶绿素相对值的植物叶片颜色模拟方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 282-287.
Miao Teng, Zhao Chunjiang, Guo Xinyu, et al. Simulation method of plant leaf color based on chlorophyll relative value [J]. Acta agronomica Sinica, 2014, 45(8): 282-287.
- [14] Yang Hongyun, HeHuojuiao, Hu Chang. Research Based on the Three-DimensionalVisualization Modeling of

- Physiological and Ecological Rice Leaves[C]//Mec2013 IEEE, 2013: 33-39.
- [15] 孙爱珍, 何火娇, 杨红云, 等. 基于积温变化的水稻叶形态伸展过程可视化模拟 [J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(5): 1058-1063.
- Sun Aizhen, He Huoiao, Yang Hongyun, et al. Visual simulation of leaf morphology stretching process based on accumulated temperature changes [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2012, 34 (5): 1058-1063.
- [16] 杨红云, 何火娇, 孙爱珍. 水稻主茎三维形态建模与计算机模拟[J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(6): 1152-1156, 1160.
- Yang Hongyun, he Huojiao, Sun Aizhen. Three dimensional morphological modeling and computer simulation of main stem of rice [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2008, 30(6): 1152-1156, 1160.
- [17] Esfahani M, Abbasi H, Rabiei B, et al. Improvement of nitrogen management in rice paddy fields using chlorophyll meter (SPAD) [J]. Paddy and Water Environment (S1611-2490), 2008, 6(2): 181-188.
- [18] 李刚华, 薛利红, 尤娟, 等. 水稻氮素和叶绿素 SPAD 叶位分布特点及氮素诊断的叶位选择[J]. 中国农业科学, 2007, 40(6): 1127-1134.
- Li Ganghua, Xue Lihong, You Juan, et al. Distribution characteristics of nitrogen and chlorophyll SPAD leaf position in rice and leaf location selection of nitrogen diagnosis [J]. Chinese agricultural science, 2007, 40(6): 1127-1134.
- [19] 龚利猛, 杨珺, 何火娇, 等. 水稻叶色 RGB 组分与 SPAD 的关系研究[J]. 中国农学通报 2015, 31(24): 19-24.
- Gong Gangmeng, Yang Jun, He Huojiao, et al. Relationship between RGB components of leaf color and SPAD in rice leaves [J]. Chinese agronomy bulletin, 2015, 31(24): 19-24.

(上接第 2891 页)

- [8] I Petras, Y Q Chen, C Coopmans. Fractional-order memristive systems[C]// Emerging Technologies & Factory Automation, 2009. ETFA 2009. IEEE Conference on. IEEE, 2009: 1-8.
- [9] Tenreiro Machado J. Fractional generalization of memristor and higher order elements[J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation (S1007-5704), 2013, 18(2): 264-275.
- [10] Mohammed-Salah Abdelouahab, Rene Lozi, Leon Chua. Memfractance: A Mathematical Paradigm FOMR Circuit Elements with Memory[J]. International Journal of Bifurcation & Chaos (S0218-1274), 2014, 24(9): 1430023.
- [11] Fouda M E, Radwan A G. On the Fractional-order Memristor Model[J]. Journal of Fractional Calculus and Applications (S2090-5858), 2013, 4(1): 1-7.
- [12] Fouda M E, Radwan A G. Fractional-order Memristor Response Under DC and Periodic Signals[J]. Circuits Systems & Signal Processing(S0278-081X), 2015, 34(3): 961-970.
- [13] 余亚娟, 王在华. 一个分数阶忆阻器模型及其简单串联电路的特性[J]. 物理学报, 2015, 64(23): 238401.
- Yu Y J, Wang Z H. A fractional-order memristor model and the fingerprint of the simple series circuits including a fractional-order memristor [J]. Acta Phys., 2015, 64(23): 238401.
- [14] YI-FEI PU, XIAO YUAN. Fracmemristor: Fractional-Order Memristor[J]. IEEE Access (S2169-3536), 2016, 4(1): 1872-1888.
- [15] 余战波. 分数阶 T 型 $L_\alpha C_\beta$ 电路仿真研究[J]. 西南大学学报, 2015, 37(2): 141-147.
- Yu Z B. Numerical simulation of a T-shaped fractional $L_\alpha C_\beta$ circuit[J]. Journal of Southwest University, 2015, 37(2): 141-147.
- [16] K B Oldham, J Spanier. The fractional calculus[J]. Mathematical Gazette, 1974, 56(247): 396-400.
- [17] 赵元英, 袁晓, 腾旭东, 等. 常用周期信号的分数阶微分运算[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2004, 36(2): 94-97.
- Zhao Y Y, Yuan X, Teng X D, et al. Fractional order differentiation of periodical signals[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2004, 36(2): 94-97.