

置进行颜色数据的获取,并保证相机和拍摄物体相对位置、光源环境基本保持恒定。由于利用软磁铁对叶片进行固定,因此可以在不损坏叶片的情况下获取叶片的颜色信息。为了增加装置的便利性,可将其与三脚架相连,从而使装置具有升高、降低、旋转的功能,因此该装置可以通过操控三脚架实现不同高度植株、不同生长朝向叶片的颜色测量。本装置也可以通过在叶片背面打光,获得叶片透光下的颜色。图 2 为采集装置实际照片。



图 2 采集装置实际照片
Fig. 2 Leaf color acquisition device

2 试验设计及数据处理

以绿萝叶片为试验对象对 30 片绿萝叶片进行反射颜色及透射颜色的采集,相机曝光系数设为 1/10、光圈系数设为 5.0,焦距设为 8 mm,在获取颜色的叶片位置利用 KONICA MINOLTA SPAD 测量仪进行 SPAD 的测量,由于该设备支持多次测量并取平均值,为了降低误差,对叶片部位测量 10 次并取平均值。对于获取的图像,利用图像处理软件去掉明显的高光部分及背景,之后取像素平均值作为测量结果。

通过对叶片的 SPAD 及反射颜色、透射颜色进行相关性分析,发现对于绿萝叶片,SPAD 与叶色的红色 R 通道及绿色 G 通道具有显著的相关性,对于蓝色 B 通道,不具有明显的相关性,由于其值较小,对最终的颜色贡献不大。将颜色值归一化至 $[0,1]$ 区间内,并分别构建 SPAD 与 R 、 G 、 B 通道的函数关系。对于反射颜色,SPAD 与 R 、 G 、 B 通道的关系为

$$\begin{cases} R = 0.8884e^{-0.03634S} \\ G = 0.7602e^{-0.01462S} \\ B = 0.2677e^{-0.01298S} \end{cases} \quad (1)$$

式中 S ——SPAD 值

决定系数分别为 0.972、0.967 8、0.509 0, RMSE

分别为 0.038 66、0.017 19、0.045 82。图 3 为利用数据拟合的曲线。

与反射颜色相比,SPAD 与透射颜色的相关性较弱,但是趋势与反射颜色大致相同,仍大体呈现指数关系,唯一不同的是,蓝色通道与 SPAD 的相关性比绿色通道更高。SPAD 与透射颜色 R 、 G 、 B 通道的函数关系为

$$\begin{cases} R = 0.6062e^{-0.03187S} \\ G = 0.5516e^{-0.01364S} \\ B = 0.4087e^{-0.03943S} \end{cases} \quad (2)$$

决定系数分别为 0.925 6、0.678 0、0.820 0, RMSE 分别为 0.044 37、0.065 25、0.054 54,图 4 为利用数据拟合的曲线。

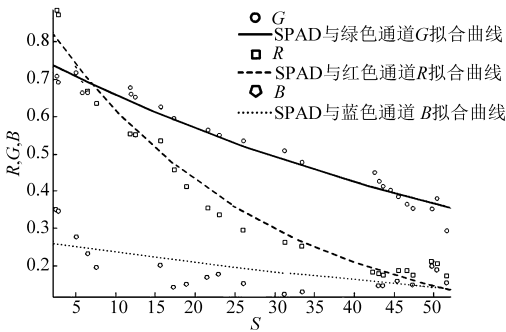


图 3 不同 SPAD 值下反射颜色分量 R 、 G 、 B 通道的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of reflectance color (R , G , B channels) with different SPAD value

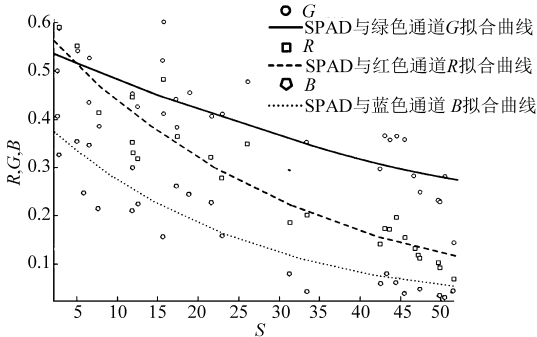


图 4 不同 SPAD 值下透射颜色分量 R 、 G 、 B 通道的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of transmittance color (R , G , B channels) with different SPAD value

通过式(1)、(2)可得出,SPAD 与本文所获取的图像中的 R 通道相关性最好,所以利用式(1),可以通过反射颜色的 R 通道来对 SPAD 进行反演,获取了 10 个叶片的反射颜色和 SPAD,并利用式(1)进行反演,表 1 为不同 R 值下实测与反演得到的数据。

3 叶色变化仿真算法

试验数据表明,SPAD 与叶片颜色值呈现指数

表 1 不同 R 时实测 SPAD 与反演 SPAD
Tab. 1 Real SPAD data and inversion SPAD data

R	反演 SPAD	实测 SPAD
0. 168	45. 855	44. 5
0. 169	45. 599	51. 2
0. 170	45. 472	47. 3
0. 194	41. 798	42. 5
0. 238	36. 195	49. 9
0. 294	30. 346	37. 3
0. 421	20. 538	24. 9
0. 468	17. 623	15. 7
0. 763	4. 187	1. 9
0. 830	0. 000	4. 1

关系,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漫反射分量的变化上。将上面指数形式的变化函数作为漫反射系数,并通过系数 k 来进行调整,光照计算采用点光源进行渲染,叶片各点的漫反射颜色 D 公式为

$$\begin{cases} D = \sum_{i=1}^M (L_i \otimes F)(l_n) \\ F = k(0.8884e^{-0.03634S}, 0.7602e^{-0.01462S}, \\ 0.2677e^{-0.01298S}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 M ——点光源的个数
 i ——点光源的序号
 L_i ——第 i 个点光源的强度
 l_i ——第 i 个点光源的入射方向向量
 n ——当前叶片顶点的三维法向量
 F ——基于 SPAD 的漫反射率函数
 k ——缩放因子,用来调节叶片整体漫反射率的强度

$\otimes$ ——前后两个向量对应的通道分别相乘

图 5 为不同 SPAD 下,真实绿萝叶片与模拟结果的对比,其中第 1 行图片为真实叶片,第 2 行图片为模拟结果,式(3)中 k 取 1, SPAD 值由左至右依次设置为 49.2、21.3、11.0、0。为了便于展现 SPAD 对漫反射的影响,所以效果图中未加入高光分量,叶片的细节变化由法向贴图调整,光源为点光源。

在现实世界中,叶片表面各个点的颜色是不同的,产生这种情况的原因是叶片表面材质在不同区域存在差别,在模拟过程中,多用纹理来表达这种空间变化的材质特征,对于漫反射部分应用漫反射纹理,而对于高光反射部分应用高光强度纹理,由于 SPAD 值的变化主要影响叶片的漫反射分量,所以下面详细阐述如何利用本文方法结合漫反射纹理生成具有空间变化的叶片表现颜色。

本文通过生成叶片的 SPAD 比率纹理进行控制,该纹理表达了叶片各个点之间 SPAD 值的比例关系。在模拟时,首先给定一个 SPAD 最大值参数,

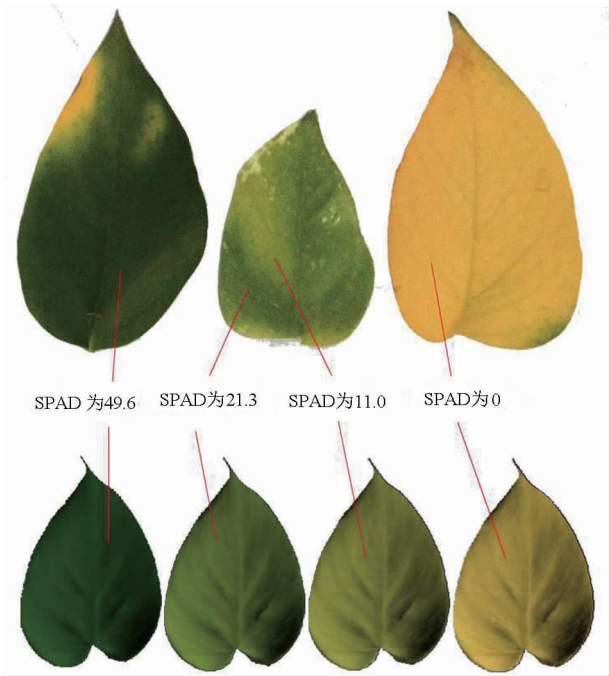


图 5 不同 SPAD 值下叶片的漫反射颜色变化
Fig. 5 Varying diffuse reflectance with different SPAD values

然后将这个值与 SPAD 比率纹理的纹素值相乘,即可获得各个点的 SPAD,然后再根据式(3)获得叶片的颜色。由于该纹理各点 SPAD 比率不同,所以叶片的颜色将会出现空间差异性,这种方法带有人为交互性,适合人为艺术性地编辑叶片的空间颜色分布,图 6 为不同 SPAD 比率纹理、最大 SPAD 为 50 情况下的叶片反射颜色。图 7 为特定 SPAD 比率纹理下,最大 SPAD 分别为 50、40、30、20、10 情况下得到的叶片反射颜色及叶片透射颜色的效果。

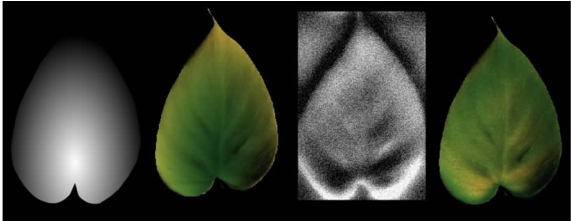


图 6 不同 SPAD 比率纹理的叶片颜色空间变化效果
Fig. 6 Different leaf color with different SPAD ratio texture

本文提出一种根据纹理图像自动生成叶片 SPAD 比率纹理的方法。对于已有的叶片纹理,首先进行预处理,利用一些常用的图像处理工具将叶片中的高光及遮蔽阴影去除,假设经过处理后的纹理其颜色值的贡献主要来自于叶片的漫反射部分。根据辐射度传输模型,当前纹理图像的颜色值为

$$L_o = \int_{\Omega} (L \otimes F)(l_n) d\omega = F \otimes \int_{\Omega} L(l_n) d\omega \quad (4)$$

式中 $L(l_n)$ ——入射光强度(R 、 G 、 B 3 个通道)



图 7 特定 SPAD 比率纹理、不同 SPAD 值的叶片反射颜色变化及透射变化效果

Fig. 7 Using the SPAD ratio texture in the top left corner, the different appearance with different SPAD values

Ω ——像素点的半球天空方向
 ω ——入射光的立体角
 I ——入射光线的方向向量

F 是 SPAD 的函数,由于只是漫反射分量,所以其与入射光的角度以及摄像机的角度无关,故可以从积分中提出。式(4)表明任意一点的颜色值,是在其天空半球内所有的光源与该点 BRDF 以及余弦分量的乘积和。

本文所得到的基于 SPAD 的颜色公式同样可以采用式(4)表达,但是当光环境不同,即 L, I 不同时所得到的漫反射值是不同的,这也是颜色值会与纹理值产生偏差的原因。但如果假设拍摄纹理时,所在环境内的入射光强度颜色值是纯白的,即其 R, G, B 分量是等值的,则有

$$\frac{L_{or}}{L_{og}} = \frac{F_r \int_{\Omega} L_r(I_n) d\omega}{F_g \int_{\Omega} L_g(I_n) d\omega} = \frac{F_r}{F_g} \tag{5}$$

式中 L_{or} ——纹理纹素值的 R 分量值
 L_{og} ——纹理纹素值的 G 分量值
 F_r ——叶片漫反射的 R 分量值
 F_g ——叶片漫反射的 G 分量值
 L_r ——入射光的 R 分量值
 L_g ——入射光的 G 分量值

本文假设对于同一种叶片,具有相同 SPAD 的叶片漫反射颜色是相同的,则通过式(5)可推出

$$\frac{L_{or}}{L_{og}} = \frac{F_r}{F_g} = \frac{0.8884e^{-0.03634S}}{0.7602e^{-0.01462S}}$$

即 $S = -45.46 \ln \frac{L_{or}}{1.16L_{og}} \tag{6}$

通过式(6),对于纹理中每个像素进行 SPAD 的估算,然后记录其中的最大值 S_{max} 与最小值 S_{min} ,利用线性插值,计算像素点的 SPAD 比率 S_r ,插值公式为

$$S_r = \frac{S - S_{min}}{S_{max} - S_{min}} \tag{7}$$

需要注意的是,式(6)是在理想情况下成立的

等式,在实际中是不准确的,譬如有时会在纹理中出现 G 通道或者 R 通道为 0 的情况,从中可以看出,这种情况对于等式是无解的,为此在实际中做如下规定:当 $G=0$ 时, $S_r=0$; 当 $R=0$ 时, $S_r=0.5$ 。这种规定虽然简单,但是却能够很好地处理等式(6)无意义的情况。除此之外,还会出现 SPAD 为负数的情况,这是由于使用的纹理并非在本文假设的理想状态(无高光反射贡献、无遮挡)下进行拍摄的,所以误差会导致整张纹理中 SPAD 的整体偏移,但由于本文只是想获得一个大致的比率关系,通过式(7)仍可以计算出比率,所以即使出现负值,可视化结果也可满足要求。通过上述方法可以获得局部变化的 SPAD 比率关系,但是有时由于 S_{max} 和 S_{min} 与平均 SPAD 之间差距较大,会导致整体 SPAD 比率对比不明显,所以,在获得初始的比率纹理之后,可以通过调整图像的对比度来调整 SPAD 比率纹理各像素之间的差异性。图 8 为根据纹理获取的初始 SPAD 比率纹理以及经过对比度增强的 SPAD 比率纹理。利用对比度增强的叶绿素比率纹理(图 8c)获得的最大 SPAD 分别为 50、40、30、20、10、0 条件下的颜色变化效果如图 9 所示,其中上半部分为反射颜色,下半部分为透射颜色。

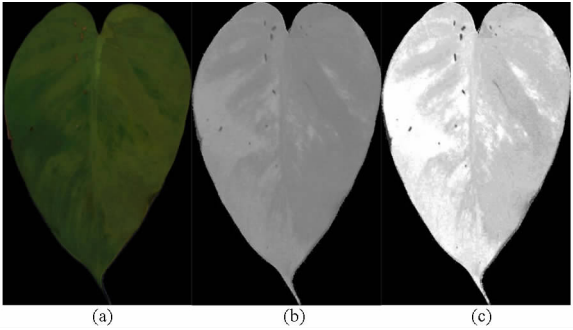


图 8 根据纹理自动生成的 SPAD 比率纹理

Fig. 8 Automatically generated SPAD ratio texture using normal color texture
(a) 输入的纹理 (b) 获得的 SPAD 比率纹理
(c) 对图 8b 进行对比度增强的结果

在同一时刻,叶片的颜色在叶片表面空间上是不同的。而在时间尺度上,叶片每个点的颜色变化速率也是不同的,即叶片不是整个表面以同样的速率发生着颜色的改变,而是局部位置先发生显著变化,之后其他部位再发生变化,仍将 SPAD 值的改变作为颜色变化的主控因子。利用 SPAD 比率纹理的制作方法即可获得时间尺度上的 SPAD 变化速度比率纹理,只是纹素值不再表达 SPAD 含量的比率,而是表达 SPAD 衰减速度的比率。对叶片每个点的 SPAD 进行调控,即

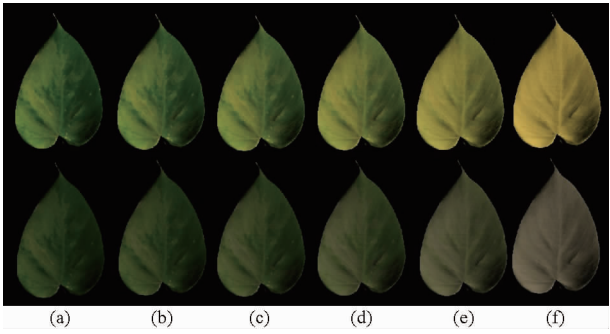


图9 不同 SPAD 值下叶片反射颜色及透射颜色变化效果

Fig.9 Leaf appearance changes with different SPAD values

(a) SPAD 为 50 (b) SPAD 为 40 (c) SPAD 为 30
(d) SPAD 为 20 (e) SPAD 为 10 (f) SPAD 为 0

$$S = S_s - V_{\max} V_r^p t \tag{8}$$

式中 S_s ——初始状态下各点的 SPAD
 $V_{\max}$ ——叶片 SPAD 衰减的最大速度
 V_r ——各点的 SPAD 衰减速度比率
 p ——速率差异调控参数
 t ——变化时间

V_r 是根据纹理给定的(在实际中,由于多采用 SPAD 比率纹理的制作方法,所以对于 SPAD 较小的部位,其纹素值也相应较小,但是希望 SPAD 小的位置是速率变化较大的部位,所以本文用 1 减去纹素值来作为 V_r 值); p 越大,各点的速率差异会呈现指数倍数的增大。图 10 为利用该方法获得的时间尺度上颜色变化效果,各个参数设置为 $V_{\max}=1, S=5, S_s=50$ 。

4 结果与讨论

采用 C++ 语言和 OpenGL 图形库对上述算法进行开发,并在配置为 1.96 GHz 的 CPU、DDR 2 GB 内存以及 NV GEFORCE9500 显卡的 PC 机上进行试

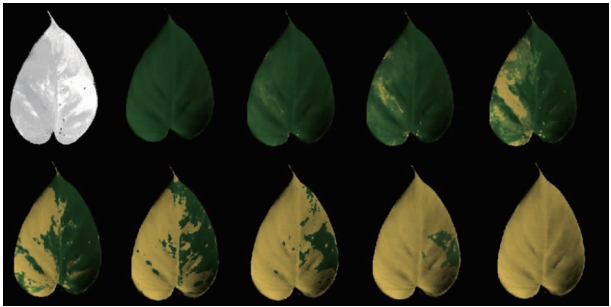


图 10 空间不同 SPAD 衰减速率下的反射颜色变化效果

Fig.10 Reflectance color changes with space-varying SPAD attenuation rate

验。图 11 为利用本文方法模拟的群体绿萝叶片颜色变化过程。由于当叶片发黄时,SPAD 已经基本为零,而之后,叶片还会发生由黄色向褐色的变化,为了模拟这种变化,采用了一种虚构的 SPAD 拟合方法,允许 SPAD 出现负数,并对颜色进行由黄色到褐色的线性插值

$$\begin{cases} R = 0.002325S + 0.8884 \\ G = 0.0035S + 0.7602 \\ B = 0.00071S + 0.2677 \end{cases} \quad (-100 < S < 0) \tag{9}$$

对于叶片干枯的褐色同样利用颜色获取装置进行采集,得到的老化褐色颜色值为(0.6559,0.4102,0.1977)。在图 11 中可以看到,叶色在变化时,最终会出现老化变褐的过程,从而更加真实。

5 结束语

提出了一种基于 SPAD 的叶色模拟方法,通过实测数据建立 SPAD 与叶片漫反射的数学模型,并以该模型为基础,构建叶片表面空间变化及时间变化的模拟框架,最终实现在不同 SPAD 下的真实叶



图 11 绿萝植株老化实时模拟结果

Fig.11 Real-time rendering result of plant leaves aging

片表观建模。利用该方法不仅可以获得较真实的效 研究,构建基于环境因素的叶色模拟方法。果,同时更容易以 SPAD 为中间变量,整合现有农学

参 考 文 献

1 苗腾,赵春江,郭新宇,等. 基于数据约束的黄瓜叶片参数化建模[J]. 农业机械学报,2011,42(1):171-176.

2 Mündermann L, MacMurchy P, Pivovarov J, et al. Modeling lobed leaves[C]//Proceedings of Computer Graphics International, 2003:60-65.

3 Lu S L, Guo X Y, Zhao C J, et al. Modeling of organs and structures generating for crops [C] // Proceedings of International Symposium on Crop Modeling and Decision Support, 2008.

4 Desbenoit B, Vanderhaeghe D,Galin E, et al. Interactive modeling of mushrooms[C]//Proceedings of Eurographics'04, 2004:37-40.

5 Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. The algorithmic beauty of plants[M]. New York: Springer-Verlag, 1990.

6 Rodkaew Y, Lursinsap C, Fujimoto, et al. Modeling leaf shapes using L-systems and genetic algorithms [C] // Proceedings of NICOGRAPH2002, 2002:73-78.

7 Oppenheimer P. Real-time design and animation of fractal plants and trees[C] // Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1986:397-410.

8 DeReffye P, Edelin C, Francon J, et al. Plant models faithful to botanical structure and development[C] //Proceedings of the 13th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1988:151-158.

9 Hanrahan P, Krueger W. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering [C] // Proceedings of the 20th annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1993:165-174.

10 Wang L, Wang W, Dorsey J, et al. Real-time rendering of plant leaves[C] //2006 Proceedings of SIGGRAPH, 2006.

11 Desbenoit B, Galin E, Akkouche S. Modeling autumn sceneries[C] //Proceedings of Eurographics'06 Conference, 2006.

12 Wang J, Tong X, Lin S, et al. Appearance manifolds for modeling time-variant appearance of materials[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006,25(3):754-761.

13 Jensen H W, Marschner S R, Levoy M, et al. A practical model for subsurface light transport [C] // 2001 Proceedings of SIGGRAPH, 2001: 511-518.

14 Franzke O, Deussen O. Rendering plant leaves faithfully [C] // Proceedings of SIGGRAPH 2003 Sketches and Applications, 2003:1-1.

15 Donner C, Jensen H W. Light diffusion in multi-layered translucent materials [C] //2005 Proceedings of ACM SIGGRAPH, 2005:1032-1039.

16 Donner C, Weyrich T, D'Eon E, et al. A layered, heterogeneous reflectance model for acquiring and rendering human skin[J]. ACM Transactions on Graphics,2008,27(5):140-149.

17 Habel R, Kusternig A, Wimmer M. Physically based real-time translucency for leaves [C] // Proceedings of Eurographics Association, 2007:253-263.

Simulation of Plant Leaf Color Based on Relative Content of Chlorophyll

Miao Teng Zhao Chunjiang Guo Xinyu Lu Shenglian Wen Weiliang
(Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: A method to simulate the leaf color based on SPAD data was presented. Firstly, the color data in different physiological ages of green dill leaves were tracked and detected using a self-made device for capturing leaf images, which could maintain the stability of the external environment (such as light, camera position). Then, the leaf color attributes were analysed based on the data collected and a function representing the relationship between SPAD and leaf color was constructed to deduce the diffuse reflection formula of the leaf. Finally, a SPAD texture was used to simulate the time-and-space-varying reflectance of leaves aging. The experimental results showed that in the constant environment, the relationship between the SPAD and diffuse color of leaves could be represented by some exponential functions and the R^2 was 0.972,0.968,0.509 respectively. This showed that there was a correlation between SPAD and leaf diffuse color, and it was reasonable using SPAD value as a driving factor to simulate the leaf aging. Meanwhile, compared with real photo, visual effects of proposed method could show the trend of leaf color aging realistically.

Key words: Plant leaves Color simulation SPAD Digital plant