

実測値に基づくみかんの色の経時変化の表現法

東海彰吾* 安田孝美** 横井茂樹** 鳥脇純一郎* 亀岡孝治***

* 名古屋大学工学部：名古屋市千種区不老町

** 名古屋大学情報文化学部：名古屋市千種区不老町

*** 三重大学生物資源学部：津市上浜町1515

あらまし 本文ではみかんの経時的な色変化を表現するための手法について報告する。「色」は人間の感覚に訴えるものであり、その表現手法はCGにおける重要な研究テーマと言える。みかんの色は成熟にしたがって緑色から橙色に変化する。この変化はいくつかの色素量の時間変化によって引き起こされるものであり、みかんの熟度や味など人間の感覚と深く関わっており、重要な要素である。本文では、実際に測定したみかんの果実の色変化の測定値と色評価の基準として用いられる果実カラーチャートを用いて果実の色変化をモデル化し、このモデルを用いてCGによる表現を行った。また、個々の果実の差として現われる色の「むら」の表現も可能である。

和文キーワード コンピュータグラフィクス 質感表現 果実 成熟過程 色彩変化 色むら

Rendering Method for Color Change Process of Satsuma Mandarins Based on Measurements of Real Fruits

Shogo TOKAI* Takami YASUDA** Shigeki YOKOI**

Jun-ichiro TORIWAKI* Takaharu KAMEOKA***

* Faculty of Engineering, NAGOYA University, Furo-Cho, Chikusa-Ku, Nagoya 464-01 Japan

** School of Informatics and Sciences, NAGOYA University, Furo-Cho, Chikusa-Ku, Nagoya 464-01 Japan

*** Faculty of Bio-resources, MIE University, 1515 Kamihama-Cho, Tsu, Mie 514 Japan

Abstract In this paper, we propose the way to render color change of satsuma mandarins. In computer graphics, it is very important to express "color" of objects, because it is very effective for human natural senses. The surface color of satsuma mandarins changes from green to orange as their maturation. We define a model of their color change based on measurements of real mandarins and a fruit color chart. We present computer graphics images of satsuma mandarins generated by this model. This model can also realize expression of uneven surface color of fruits.

英文 key words computer graphics, photorealistic, fruits, maturation, color change, uneven color

1. はじめに

「色」は人間にとって、視覚を始めとして様々な感覚に影響を与える。これは、人間の経験的な学習によるものであるが、「色」の重要性を認識することができる。従来、コンピュータグラフィクス（以下、CGと略す）の分野においては、物体の形状表現を中心に研究が進められてきたが、近年のCGハードウェアの発達にともない、形状だけでなく色を含む物体の持つ独特のテクスチャ表現が注目されるようになってきている。より効果的で品質の高いCGを生成するためには、この色の要素に対する配慮が必要である。しかし、CGにおける「色」の研究の報告はまだ少なく、実際の生物の色を扱った研究としては、紅葉の色変化をシミュレートしたものが報告されている程度である⁽¹⁾。

本文で扱う果実については、CGの分野での研究例は少なく、手法の適用例としていくつかの表示例が紹介されている程度であった⁽²⁾⁽³⁾。筆者らのグループではCGにより柑橘果実を表現するために、果実形状に「油胞」と呼ばれる表面の細かな凹凸を付加する方法を報告している⁽⁴⁾。しかしながら、果実の色については試行錯誤的に決定した値を用いたにすぎず、より現実に近いCG画像生成のためには、何らかの実測値に基づく果実の色表現のための方法の開発が必要である。更に、みかんの色変化は収穫時期の判断や酸味・甘味等との関係があり、みかん自身の状態を示すものとして園芸農業の分野でも重要視されている。

本文では、みかんの果実の色変化を時間を追って実際に測定し、得られた結果をもとにみかんの果実の色をより実際に近く表示し、また、時間の経過に伴う果実の色変化の過程を表現する方法を開発したので報告する。

2. みかんの色変化

2. 1. 果実の色

みかんを含む様々な果実の色は、成熟にともなって様々に変化する。みかんは緑色から橙色に、リンゴは青緑色から赤色に変化する。これは、果実の成熟の度合い（熟度）などによって、果実表面に存在する色素の量や比率が変化するためである。一般に果実の持つ色素としては、緑色のクロロフィル系色素、黄・橙・赤色のカロチノイド系色素、赤・紫・青色のアントシアン系色素の3種類の色素があり、これらの量の比率によりみかんの橙色、リンゴの赤色などの色が現われる。

本文で扱う温州みかんの場合、特に緑色のクロロフィルと赤色のカロチノイドが主に関わり、これらの色素の比率によって果実の色が決まる。未熟なみかんはクロロフィルを多く含みおおよそ緑色を示す。成熟にともないクロロフィルの量が減少していき、緑色が薄れて黄緑色から黄色へと変化する。クロロフィルの量が十分に減った後、今度はカロチノイドの量が増加する。これにともない果実の色は黄色から完熟したみかんの橙色へと変化していく。色の変化は、果実の下部から進行し、果実の上部へ行くほど緑色が残ることが多い。色素の量の変化は果実の熟度に関係しているが、熟度だけでなく、日照や気温、湿度など周囲の環境からの影響によって変化の度合いが異なり、個々の果実の差や、同一の果実においても色むらなどの形で色変化の差が観察される。

2. 2. 果実カラーチャートによるモデル化

果実の色を忠実に再現することは簡単ではない。そこで、果実の色の基準となるものを用いて色を扱うことを考え、ここでは、出荷の判断などに用いる果実カラーチャートに注目した。

実際の果実は、着色の度合いが個々の果実でばらつき、色むらなどによって様々な果実の色が存在する。そこで、一般的に色を用いて果実の熟度を判断する方法として果実カラーチャートを利用する方法がある。果実カラーチャートは1980年に農林省果樹試験場の特別研究「果実の成熟度判定のためのカラーチャート作成とその利用に関する研究」において、果色を定量的に評価する基準として作成され実用化された（図1）⁽⁵⁾⁽⁶⁾。現在、みかんをはじめニホンナシ、リンゴ、ブドウなどの果実カラーチャート

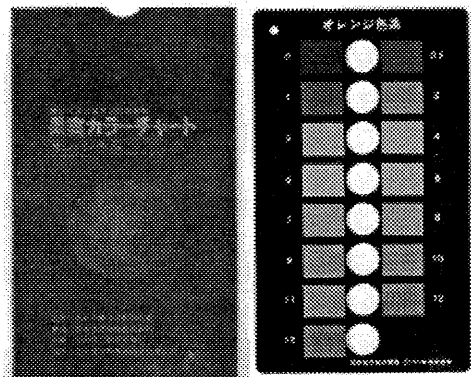


図1 果実カラーチャート(オレンジ色系)

表1 果実カラーチャート（オレンジ色系）の各表色系での色座標

評価値	Munsell表色系	XYZ表色系			RGB表色系		
		Y	x	y	R	G	B
0	6.5GY2.8/ 2.8	8.04	0.3265	0.3805	0.2314	0.2902	0.1882
0.5	4.7GY3.9/ 4.3	13.05	0.3491	0.4194	0.2667	0.3529	0.1412
1	1.4GY4.7/ 5.8	18.14	0.3832	0.4455	0.4510	0.5176	0.1843
2	7.4Y 6.0/ 6.9	29.05	0.4069	0.4440	0.6235	0.6431	0.1961
3	2.3Y 6.8/10.9	37.90	0.4642	0.4504	0.8588	0.7451	0.2040
4	9.9YR6.9/11.5	39.08	0.4728	0.4376	0.8902	0.7176	0.1686
5	9.2YR7.3/13.0	44.08	0.4826	0.4409	0.9647	0.7922	0.2275
6	8.2YR6.8/11.8	38.66	0.4842	0.4283	0.9255	0.7059	0.1765
7	6.5YR6.4/12.1	33.11	0.4936	0.4169	0.9137	0.6667	0.2275
8	5.8YR6.3/12.1	31.96	0.4948	0.4126	0.8941	0.6196	0.1725
9	4.1YR6.0/12.7	29.35	0.5064	0.4028	0.8863	0.5922	0.2275
10	2.6YR5.6/13.0	26.68	0.5166	0.3885	0.8706	0.4902	0.1569
11	1.4YR5.5/12.8	24.65	0.5195	0.3783	0.8667	0.4980	0.2275
12	0.5YR5.2/13.1	22.68	0.5264	0.3712	0.8235	0.3961	0.1608
13	9.8R 5.0/11.6	20.08	0.5042	0.3564	0.7765	0.4078	0.2510

が作成され、果実の成熟状態の判定や収穫時期の判断に利用されている。果実カラーチャートは、果実表面上の平均色と比較して、その果実の成熟度合いを判断するものである。この果実カラーチャートは実際に測定したデータをもとに構成されており、実際の果実の色の基準としてCGで利用することが可能であると考えられる。

みかんに用いられる果実カラーチャートは「オレンジ色系」と呼ばれるもので、評価値0、0.5、1、2、…、12、13の値にそれぞれ色が割り当てられている。おのおのの色はMunsell表色系で定義されており、その一意性が保証されている。これをCGで利用する場合、Munsell表色系では扱いにくいのでXYZ表色系あるいはRGB表色系に変換して使用することになる。各表色系による各評価値の色表現を表1に示す。各評価値での色座標をRGBの空間にプロットするとほぼ1平面上（ $B=0.2$ ）に並ぶ。この平面上でのプロット結果（図2）を見ると、色座標が2本の直線に漸進していることが分かる。一本は評価値0～5の点を最小二乗法で近似した直線であり、もう一本は評価値5～13の点を最小二乗法で近似した直線である。この2直線はそれぞれクロフィルとカロチノイドの各色素の増減による色の变化直線と考えることができ、前述の色素の増減の

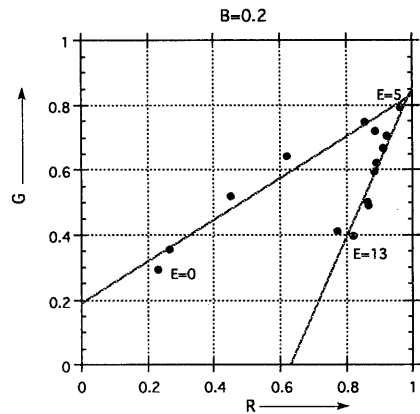


図2 近似平面へのプロット結果

現象と照らし合せてもその変化の過程をうまく表わしている。

みかんの果実の色の変化が色空間の一つの平面上で近似的に表現できるということは、この変化曲線を含む平面上の任意の点Pは、この近似平面上のある点P₀と独立した2つのベクトルx、yの線形結合として以下の式のように表わされることを意味す

る。

$$P = P_0 + \alpha x + \beta y \quad (1)$$

ここで、評価値0の色ベクトルを疑似色素 $x = 100\%$ 、評価値13の色ベクトルを疑似色素 $y = 100\%$ と仮定し、この二つのベクトルの線形結合で表現した場合、 α 、 β の各値は評価値Eをパラメータとして、

$$\begin{aligned} \alpha &= 1.11 + 0.47E - 0.093E^2 + 0.0039E^3 \\ \beta &= -0.086 + 0.24E - 0.018E^2 + 0.00049E^3 \end{aligned} \quad (2)$$

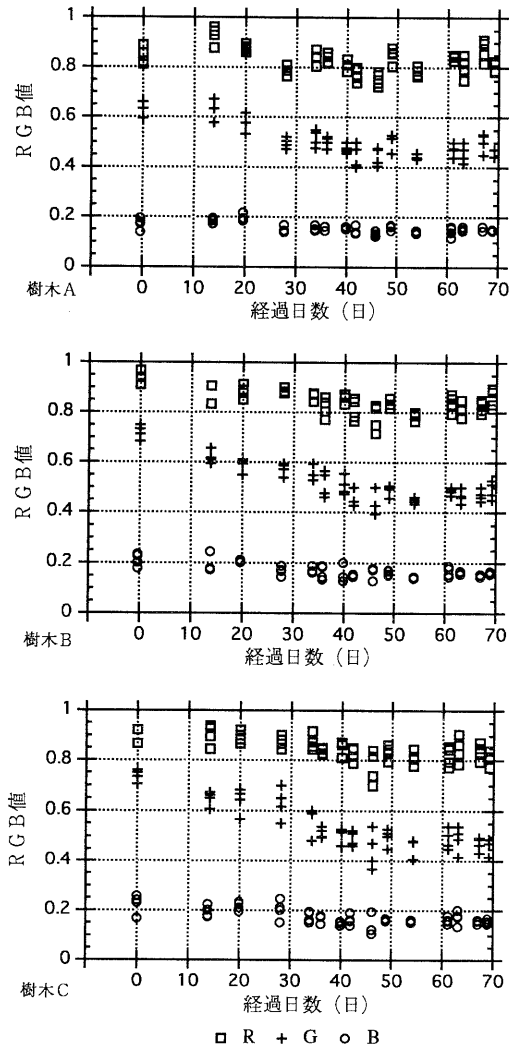


図3 RGB値の経時変化

と表わすことができ、式(1)に代入して用いることにより各評価値における色座標が算出できることが示されている⁽⁶⁾。ここで用いた疑似色素 x 、 y はそれぞれクロロフィルとカロチノイドとに近似的に対応すると考えられるが、実際にどちらかの色素が完全に100%であることはないため、実際の色素量の比を表わしている訳ではない。

2. 3. 果実色の測定と色変化のモデル化

みかんの果実カラーチャートから得られる果実の色の変化は、実際の経過日数に比例してはならず、

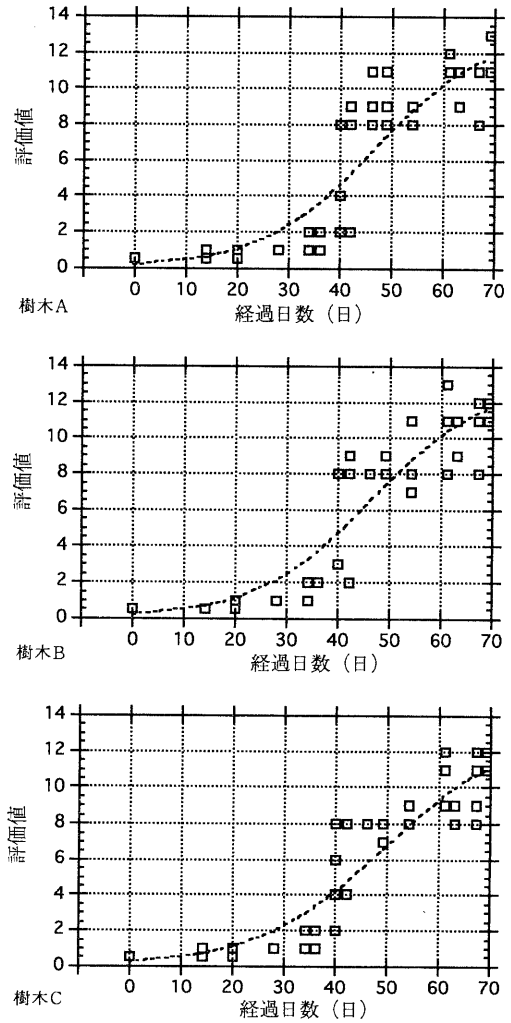


図4 評価値の経時変化

そのまま並べただけでは果実の経時的な色の変化を表現したことはない。そこで、果実カラーチャートの色の妥当性の確認、および評価値と経過日数との関係を知るために、実際の樹上果実の色の変化を測定した⁶⁾。

色変化の測定方法としては、三重大学付属農場から3本の温州みかんの樹木(A・B・C)を選び、日当たりによる変化を少なくするために東西南北の各方向から2ヶ月間定期的に果実をサンプリングし、果実の平均色の測定を行った。果実の平均色は、CCDカメラによる入力画像において、へたの部分を除いて残った果実表面領域の画素の色ベクトルの平均値として算出した。また、測定条件を一定に保つために、照明装置等も工夫している。

このようにして3本の温州みかん樹木の約70日間の果実の色変化と果実カラーチャートにおける評価値を測定した。測定結果を図3、4に示す。樹木による相違はほとんどなく、ほぼ一般的なデータが得られたと考えられる。

この測定結果と、果実カラーチャートとを比較すると、測定値がカラーチャートの変化曲線の上にプ

ロットされる。これより、経過日数 t と評価値 E の変化の関係を示す次式が導くことができる⁶⁾。

$$E = 13.1 / (1 + \exp(4.35 - 0.094t))$$

$$= 13.1 / (1 + \exp(0.094(46.3 - t))) \quad (3)$$

関数の形はシグモイド関数であり、時間の経過ともなって評価値は0から13へと変化する。また、量の変化する色素がクロロフィルからカロチノイドに変わる評価値5には約40日で到達することになる。

3. 色変化のシミュレーション

前章で果実カラーチャートの色ベクトルと経過日数との関係がモデル化されたので、本章では、これを用いてみかんの色の経時変化をシミュレートする。まず、果実カラーチャートの色ベクトルをそのまま用いて平均色の変化を表現し、これに果実の上部と下部の進行の差の表現を加える。更に、色むらの表現も行う。

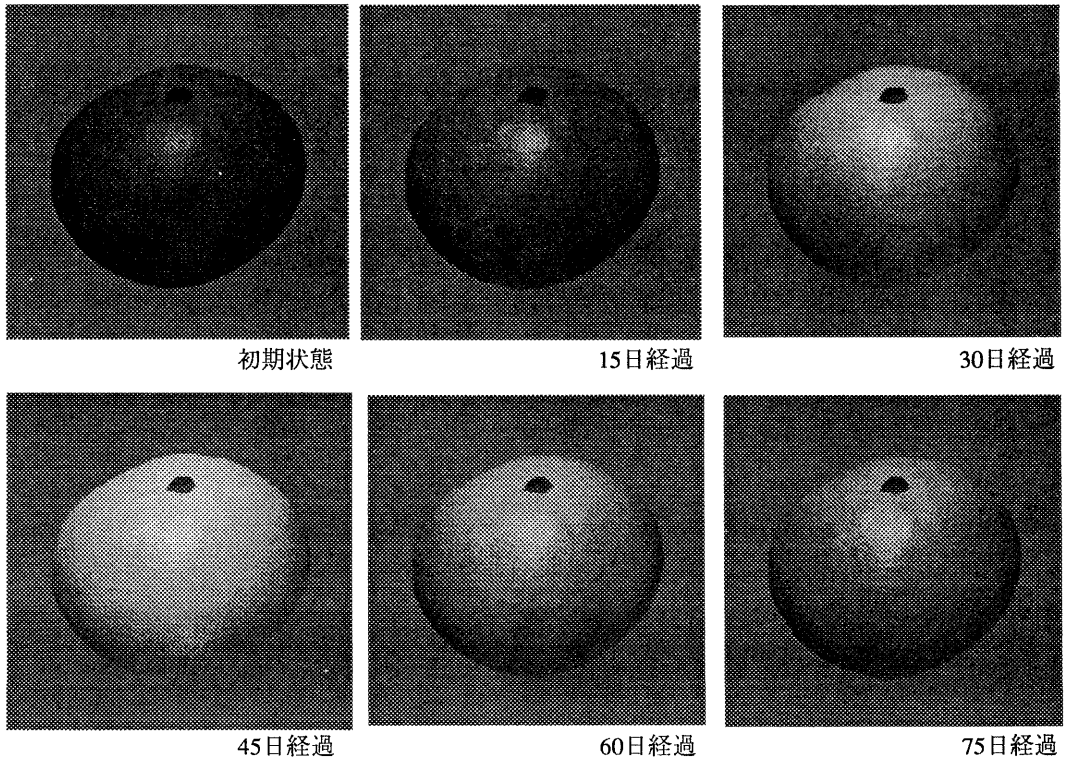


図5 平均色変化の表示例

3. 1. 平均色変化のシミュレーション

果実カラーチャートの評価値と色との関係は2.

2. 節の式(1)、式(2)によって、経過日数と評価値の変化との関係は2. 3. 節の式(3)により与えられる。この2つの式を用いることにより経過日数から果実の平均色を算出することができる。

算出された果実の色を反射モデルの拡散反射成分として用い、みかんの果実の経時的な色変化をシミュレートした。みかんの形状等は参考文献(4)の方法を用いている。シミュレート結果を図5に示す。

色が全体に一樣であるために多少不自然ではあるが、果実カラーチャートに沿った色変化を表現できていると考えられる。

3. 2. 下部から上部への色変化

前述の方法では、果実の色の変化を表現してはいるものの、あくまで平均色を用いており、全体に一樣な色を与えることしかできない。そこで、実際の果実の色変化が果実下部から進行することを考慮し、果実の下部と上部で色の変化の速度差を表現す

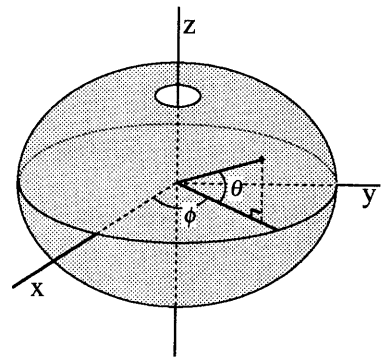


図6 極座標においたみかん果実

る。

まず、図6のように極座標の中に果実を配置し、表面上の各点における遅延日数 t' を図6の θ ($-\pi \leq \theta \leq \pi$) を用いて以下の式で与えることにする。

$$t' = 30.0 \cdot \theta / \pi \quad (4)$$

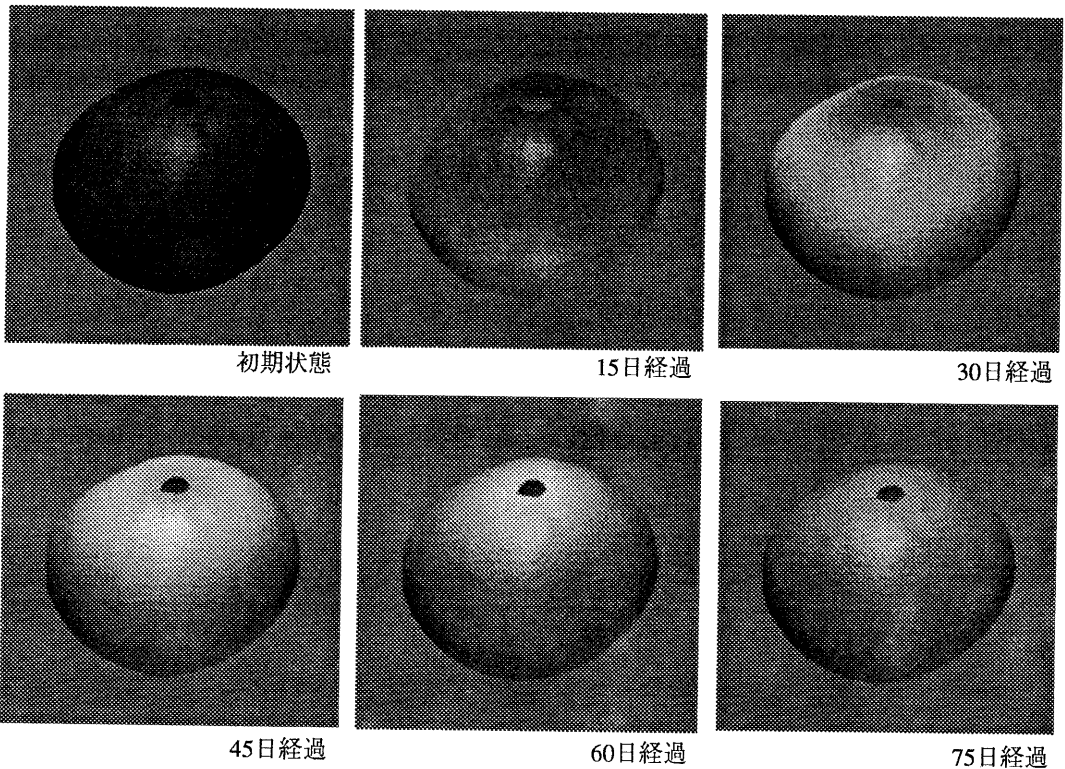


図7 果実下部から上部への色変化の表示例

なお、係数は試行錯誤的に求めた値を用いている。2. 3. 節の式(3)において、 $t \rightarrow t - t'$ の置換により、

$$E = 13.1 / (1 + \exp(0.094 (46.3 - (t - t')))) \quad (5)$$

が得られる。しかし、平均色の变化を示すこのシグモイド関数では、部分的な色の变化を示すことはできない。これは、式(3)が全体的な色素量の変化を示しているだけで、部分的な色素量の変化はかなり急激であると考えられるためである。そこで、式(5)の関数の形を変形した、

$$E = 13.1 / (1 + \exp(0.3 (46.3 - (t - t')))) \quad (6)$$

を用いて、色を算出する。シミュレート結果を図7に示す。これより、果実の下部から色の变化が進んでいることが分かる。

3. 3. 色むらの表現

実際の果実の持つ色むらの表現は、より自然な表現とする上で重要な要素である。色むら生成の主な

要因としては葉や枝などによる日光の遮断などの受光量の変化であると言われている。これを忠実にシミュレートするためには、個々の果実だけでなくその周りの環境全てを考慮する必要がある。ここでは色むらによる模様はほぼ「地球の陸と海」の様子と同様であると仮定し、フラクタルの手法を利用して果実表面の色変化に時間的なずれを与えることにより、色むらの表現を行う。

まず、平面的な格子を考える。この格子に中点変位法⁹⁾によって乱数の要素を含むフラクタル処理を施し格子点を移動し、得られた格子の標高を $[-1, 1]$ に正規化する。この標高を定数倍 (30倍) したものをその点での色変化の遅延日数 t'' ($-30日 \sim +30日$) と考える。平面的な格子はテクスチャマッピングと同じ要領で図6の θ 、 ϕ と対応付けてみかんの形状に貼り付けられ、格子の標高がその点における遅延日数を示すこととする。なお、実物では「へた」の付近などの極の部分では色むらがなくため、この部分では遅延の無いように処理している。

前節と同様に遅延日数 t'' を式(6)に導入して色の計算を行う。

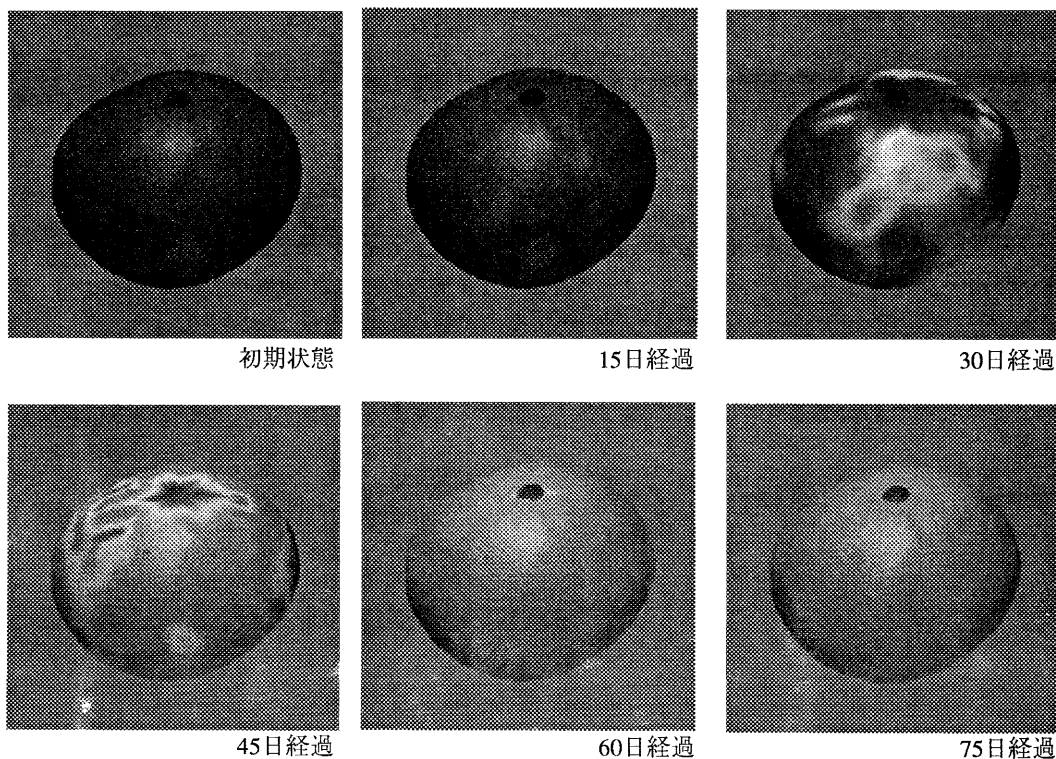


図8 色むらの表示例

$$E = 13.1 / (1 + \exp(0.3(46.3 - (t - t' - t'')))) \quad (7)$$

これを用いたシミュレーション結果を図8に示す。色むらの表現を加えることにより、図5、図7と比べて、より自然な表現となっている。本手法は中点変位法の変位パラメータや乱数のシードを変えることにより様々な色むらが表現可能である。

4. まとめ

本文ではCGによるみかんの果実の成熟に伴う色変化を表現するため、果実カラーチャートと実際の果実の色変化の測定値を用いて、より現実に近い果実の色と、経時的な色変化の表現の方法について述べた。本手法によって、みかん以外の様々な果実についてもその色やその変化のシミュレーションが可能であると考えられる。

今後の課題としては、以下のような点が考えられる。

- (1) 本文では、果実の成熟に伴う色変化のみを表現したが、実際の変化は色だけではなく、形状や大きさの変化など他の要素も考えられ、これらを表現する手法の導入が必要であり、これにより未熟な果実の堅い感じや、熟した果実の柔らかな感じも表現できるのではないかと考えられる。また、より厳密なモデルとするためには全体の要素の定量的な測定も必要である。
- (2) 葉や枝の重なりなどの状態や気温などの周囲の環境からの影響をうまく導入したモデルにすることにより、さらに現実に近い表現手法となると考えられる。
- (3) 本文では、果実の色の拡散反射成分と環境光成分に果実色のモデルを導入したが、果実のみならずしみの表現などといった独特の反射モデルなどの開発も必要である。

また、CGでは、様々な状況をシミュレートできることから、どのような色で人間が「甘い」、「酸っぱい」などの感覚が引き起こされるかといった、感性情報処理の分野についても応用が期待され、より現実的なCG生成を目指す場合に重要なテーマとなると考えられる。

謝辞

長期間にわたる測定実験による多くの貴重なデータを提供していただいた三重大学生物資源学部の阿部正勝氏、西川博士氏に感謝いたします。また、日頃から熱心に御討論いただく名古屋大学工学部情報工学科鳥脇研究室ならびに三重大学生物資源学部生物生産機械学講座プロセス機械学研究室の皆様にも感謝いたします。

参考文献

- (1) 早乙女良江、藤代一成、池邊八洲彦：“生物学的モデルに基づく紅葉の可視化—葉のレベルにおける色変化—”、グラフィクスとCADシンポジウム論文集、pp.59-68、1992
- (2) J.F.Blinn: "Simulation of Wrinkled Surfaces", Computer Graphics, Vol.12, No.3, pp.186-192, 1978
- (3) S.Haruyama, B.A.Barsky: "Using Stochastic Modeling for Texture Generation", IEEE CG&A, pp.7-19, 1984
- (4) 東海彰吾、宮城真、安田孝美、横井茂樹、鳥脇純一郎：“CGによる柑橘果実の質感表現の一手法”、信学論、Vol.J76-D-II、No.8、pp.1746-1754、1993
- (5) 山崎利彦、鈴木勝征：“果実の成熟判定のためのカラーチャート作製とその利用に関する研究（第一報）カラーチャートの色特性”、果樹報告A、第7号、pp.19-44、1980
- (6) 山崎利彦、鈴木勝征、村瀬昭治、宮川久義野方俊秀、水戸部満、森田彰：“果実の成熟判定のためのカラーチャート作製とその利用に関する研究（第三報）成熟と果皮色との関係”、果樹報告B、第8号、pp.85-100、1981
- (7) 日本色彩学会（編）：“色彩科学ハンドブック”、東京大学出版会、1982
- (8) 阿部正勝：“果実の色認識に関する基礎的研究”、平成3年三重大学大学院生物資源学研究科修士論文、1991
- (9) A.Fournier, D.Fussel, L.Carpenter: "Computer Rendering of Stochastic Models", Comm. ACM, Vol.25, No.6, pp.371-384, 1982