

卒業論文題目

物体の光学特性の経時変化計測  
の解析と表現

指導教授 栢木 寛 教授

慶応義塾大学理工学部電気工学科

平成10年度

学籍番号 69503881

大石 岳史

## 目次

### 第 1 章 序論

- 1.1 はじめに
- 1.2 色の測定
- 1.3 物体表面の時間変化
- 1.4 本研究の意義及び目的

### 第 2 章 分光反射率の測定と解析手法

- 2.1 反射モデル
  - 2.1.1 2色性反射モデル
  - 2.1.2 Phong のモデル
- 2.2 分光反射率
- 2.3 色空間
  - 2.3.1 XYZ(Yxy)表色系
  - 2.3.2  $L^*a^*b^*$ 表色系
- 2.4 スペクトルの時間変化の統計的分析
  - 2.4.1 主成分分析
  - 2.4.2 重回帰分析

### 第 3 章 分光反射率の測定と解析結果

- 3.1 内部反射の分光反射率の測定
  - 3.1.1 実験装置の構成
  - 3.1.2 測定手順
  - 3.1.3 測定結果
- 3.2 データ解析
  - 3.2.1 主成分分析結果
  - 3.2.2 重回帰分析結果
  - 3.2.3 色度図上での解析

### 第 4 章 RGB 画像からスペクトル画像の生成及び物体の CG による再現

- 4.1 スペクトル画像の生成
  - 4.1.1 RGB 画像の解析
  - 4.1.2 分光反射率の分布と RGB 値の分布の対応づけ
- 4.2 3次元モデルの CG による表現

## 第 5 章 結論

5.1 まとめ

5.2 問題点

謝辞

- 第 1 章 -

序論

# 1 序論

## 1.1 はじめに

人間は色によって非常に多くの情報を得る事が可能である。通常人間が外界から情報を得るために、五感の中で最も大きな役割を占めるのが視覚である。視覚によって得られる情報は、物体の形状、文字から得られる情報なども含めて非常に多種多様であるが、すべては色の違いの認識であると言える。つまり、色の違いを認識することによって人間は外界から多くの情報を得ているのである。

コンピュータグラフィックス(以下CGと呼ぶ)の分野では現実物体のモデリングを自動化しようという動きがあるが、この際、色の測定には様々な問題がある。通常CGで3次元物体を表現する場合、その形状と物体表面の光学特性の情報が必要である。物体形状をモデル化する手法は、レンジファインダを用いて距離画像を生成しこれをマージングするのが一般的である。これは不透明な物体に限られるが、透明物体に関しても偏光を用いた手法によってその形状を測定する方法が報告されている[1]。色の測定は、カラーCCDカメラを用いて画像を撮影し、この画像からその情報を抽出するのが一般的である。しかしカラーCCDカメラで測定された値には、そのカメラの分光感度特性や光源の情報などの環境に依存した情報が多分に含まれている。よってこうして測定された値は非常に局所的なものであり一般性や可搬性に欠ける。そこで物質固有の色情報を測定する事が必要となる。

## 1.2 分光反射率の測定

物質固有の色情報をモデル化するためには物体表面の分光反射率を測定する必要がある。前述のようにカラーCCDカメラで測定された値には環境の情報が多分に含まれている。そのため物質固有の色情報を得るためにはこれらの環境に影響されない値を測定しなければならない。

環境に依存する情報としてまず上げられるのがカメラの特性である。カラーCCDカメラによる色の測定というのは、反射光に対してR(Red)、G(Green)、B(Blue)の3つの分光透過特性を持つフィルタをかけ、それぞれの透過光強度を測定し3刺激値として色を表現するものである。光強度を測定するための受光センサの特性も含めて最終的にカメラの特性は分光感度特性として示される。例として本研究でも用いているカラーCCDカメラの分光感度特性を図1.1に示す。この分光感度特性は用いるフィルタや受光センサによって異なるので、当然測定するそれぞれのカメラによって異なる。つまり異なるカメラで測定され

た値には何ら物理的な相関が存在せず互換性がない。

次に考えられる環境に依存する情報は光源情報であろう。反射光の分光強度は光源の分光強度に物体表面の分光反射率を乗じた値である。つまり光源の分光強度が変化すれば反射光の色の見え方も変化する。実際の例を示そう。図 1.2 に示すのはりんご表面のある一点における分光反射率である。図 1.3 に示すのが蛍光灯と白熱灯の分光強度である。そして図 1.4 に示すのが各光源を用いた場合の分光反射光強度である。この図から明らかに用いる光源によって測定される反射光の色が異なる事が分かる。実際にこれを CIE (国際照明委員会) が定める色度図に投影してみると蛍光灯を用いた場合  $x=0.472$ 、 $y=0.396$  となり白熱灯を用いた場合  $x=0.559$ 、 $y=0.394$  となるのでその色の違いは歴然としてくる(実際には、 $Y_{xy}$  空間は均等な色空間ではないので色度図上での距離から色差云々を語る事は出来ないが違いを感じる事は出来るであろう)。つまり反射光には光源の分光強度という情報が多分に含まれてしまうのである。よって光源情報を含まない値を抽出する必要がある。ただしカラー CCD カメラにはホワイトバランスという機能があり、光源の状況に応じて標準の白色を定めるための係数を求めて出力する値を補正しているので、これによって光源の色に対する変化を除去する事が出来る。しかし 3 次元モデルを表現する際に光源を変化させたい場合、3 刺激値から分光反射率を復元する事は出来ないため正確な色再現は出来ない。また明度も光源と物体の相対位置などによって変化し、ゲインは観測者によって適当に定められるので、絶対的な意味を持たない。或いはこれらの値を変化させた場合を表現するためには、測定した状況での情報を保持していて相対的に値を計算しなければならず、こういった付加的な環境変数を保持している必要がある。

そこで物体表面に固有な色を表現可能な値を測定する必要がある。物体表面の固有の色というのは測定環境の情報を含まない値である。それは上記の説明からも物体表面の分光反射率に帰依することがわかる。つまり物体表面の分光反射率は固有の色を表現しており、3 次元物体のモデリングのためにはこれを測定する必要がある。

### 1.3 物体表面の経時変化

物体表面色は時間の経過とともに変化していくので、この変化をモデル化する事を考える。従来現実物体のモデリングはある時刻における物体の様子を数値化しただけに過ぎなかった。しかしどんな物体も時間の経過とともに内部組成が変化し、それとともに表面色も変化していく。そこでこの変化のモデル化を考える必要があると思われる。

どのような物体でもその表面色は時間とともに変化していくが、特にその変化

が大きいものは動植物であろう。動物の肌や毛色などは時間とともに大きく変化していく。人間の顔色程よく変わるものはないのかもしれない。また植物は季節とともにその環境の変化によって周期的な変化を繰り返す。例えば広葉樹は春夏は青く茂り、秋には紅葉をし冬になると枯れてその葉を落とす。最もその変化が顕著に現れるのは様々な植物の果実である。緑から赤、黄色などへ徐々に色づいていく。こういった色の変化のモデル化を試みたいと思う。

しかし一般に CG で自然物体、特に動植物を表現する事は人工物体を表現する事よりも難しい。金属や誘電体でできた人工物体は表面の光学特性が一様に分布していると仮定する事により、これを測定し表現する事ができる。むしろ現実感を持たせるためには不均一さを作り出す必要があるといえる。これに対して動植物表面の形状や光学特性などの分布は均一ではないため、一様に記述する事は非常に困難である。更にこれらの形状や光学特性が個体により大きく異なることも記述が困難な理由の一つとなっている。

そこでまずは幾つかの個体を測定し分析する事から始めなければならない。対象物体を果物に限定した場合、柑橘果実の表面色の経時変化をモデル化シミュレーションした研究[2]が報告されている。この研究では果実カラーチャートと実測値を比較して、評価値を媒体変数として果実表面色の時間変化を表現している。この果実カラーチャートというのは色を用いて果実の熟度を判断するためのもので、定量的に果色を評価する基準として作成されている。また Munsell 表色系で定義されているのでその一意性が保証されている。この果実カラーチャートを Munsell 表色系から RGB 表色系に変換し、RGB での測定値と比較して評価値の変化を求め定式化している。実際の 3 次元物体の表現方法としては上部から下部への変化やフラクタル処理による色むらの表現もシミュレーションしている。しかしこの場合色の評価には RGB 値の変化を分析しているだけで反射率については考慮されていない。

果実表面色の時間変化が分光反射率によって計測及び分析された研究がある[3]。この研究では 2 色性反射モデルを基に物体表面の分光反射率や反射係数の時間変化を計測している。分光反射率の時間変化は主成分分析によって情報を圧縮され、主成分得点の時間変化という形で定式化されている。反射係数はその結果を回帰曲線によって定式化しているだけである。こういった分析や定式化の方法は補間などによって拡張し難いものではあるが、本研究の始めのアプローチとしては同様な計測と分析が必要であると考えられる。

#### 1.4 3次元物体の CG による表現

最終的な目的は物体の時間変化を 3 次元モデルによって表現する事である。前述のように 3 次元モデルは物体形状と表面の光学特性からなる。よってこの物

体形状と表面の光学特性をモデル化する必要がある。

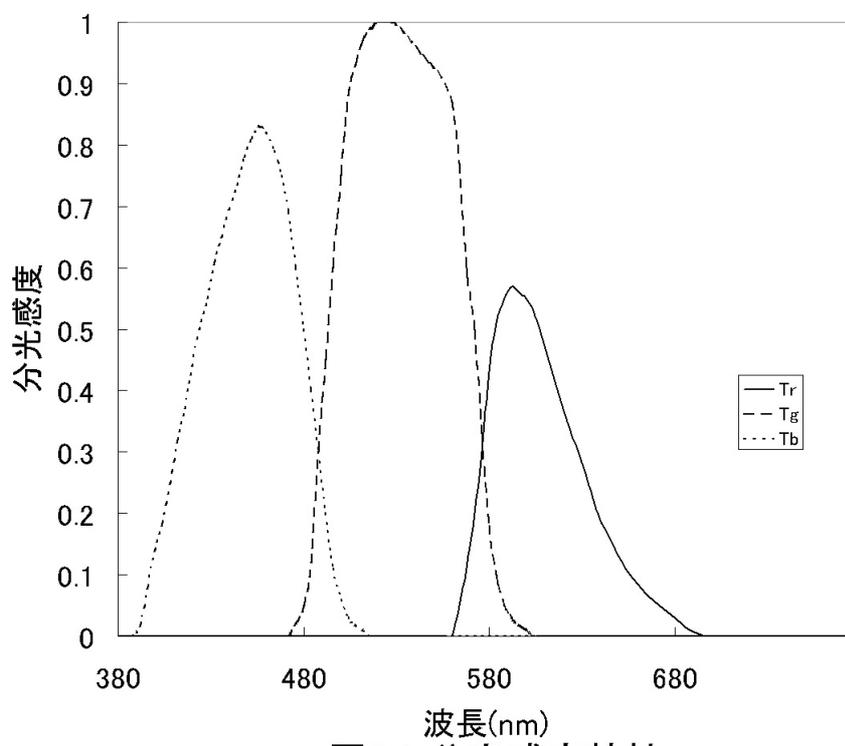
物体形状の時間変化に関しては、柑橘果実の形状をモデル化した研究が発表されている[4]。この場合は現実物体からのモデリングではないがその形状がよく表現されていた。この場合ポリゴンモデルの生成の際にフラクタルの手法によって形状に揺らぎを付加して自然らしさを出している。また表面形状は凹凸を表現するためにバンプマッピングを用い、この窪みの位置の決定のために同様にフラクタルの手法を用いている。最終的にはバンプマッピングのための凹凸法線テクスチャを作りテクスチャマッピングによってこれを貼り付けている。

色の時間変化をシミュレーションした研究については前項で触れたが、やはり分光反射率を用いて3次元物体の表現を行う必要がある。前述の研究ではRGB値による分析及び表現しか行われていなかった。3次元物体の表現を考えた場合物体の移動、配置する場所などによって当然光源の情報は変化する。そのため、このような変化に対しても正確な色表現を行場合は分光反射率によって色表現をしなければならない。

また自然らしさを出すために様々な工夫がなされているが、現実物体からモデリングを考えているため、現実物体から得た色むらなどの情報をそのまま表現する必要がある。そのためには分光反射率によって画像を撮影してこれを3次元ポリゴンモデルにテクスチャマッピングで貼り付けることになる。しかし分光反射率による画像を撮影する事は容易でない。通常は高価な器材と時間が必要である。そこでもっと簡便な方法で分光反射率による画像を作成する必要がある。

### 1.5 本研究の意義と目的

本研究では、まず対象物をトマトとして果実表面色の時間変化を分光反射率によって測定し分析を行う。統計的な分析には主成分分析及び重回帰分析を用いる。また主成分分析の主成分得点を媒体変数としてこの変化を定式化する事にする。分析としては更に反射光を  $Y_{xy}$  表色系に投影してこの変化を調べる。これに加えて簡便な分光反射率による画像の作成法を提示し、これを実証するために実際に3次元物体をCGで再現するものとする。



波長(nm)  
図1.1 分光感度特性

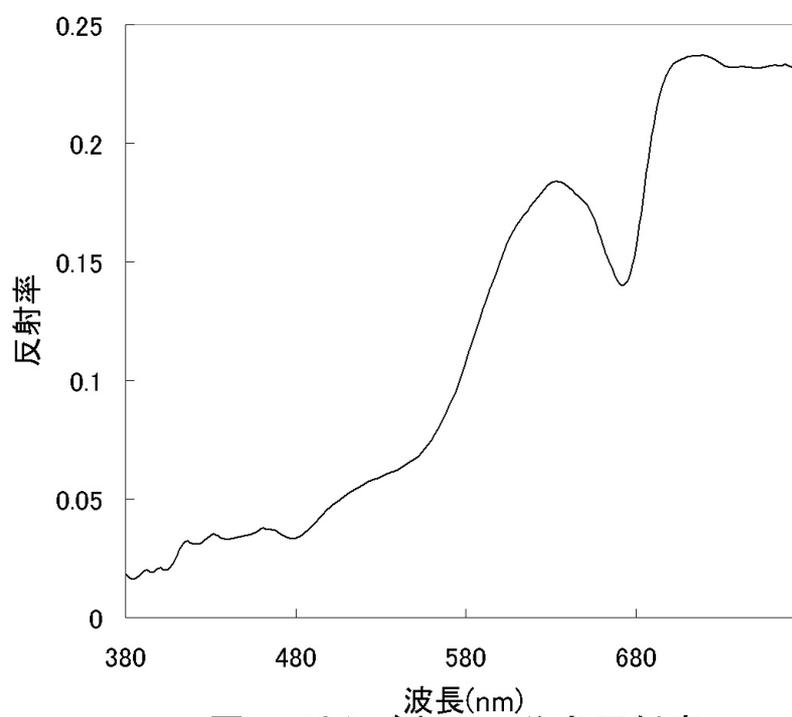


図1.2 りんご表面の分光反射率

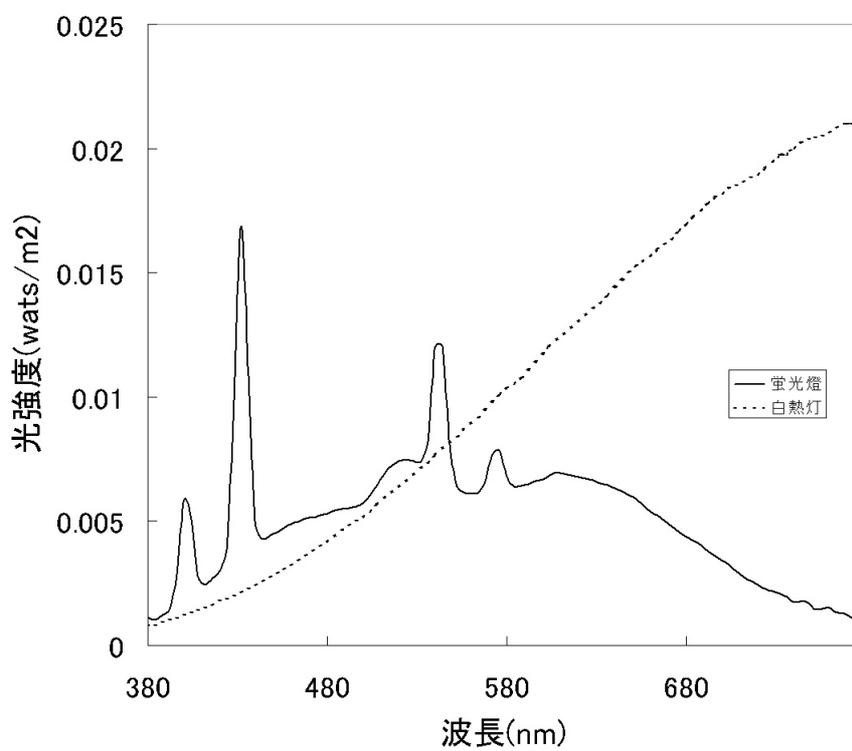


図1.3 光源のスペクトル

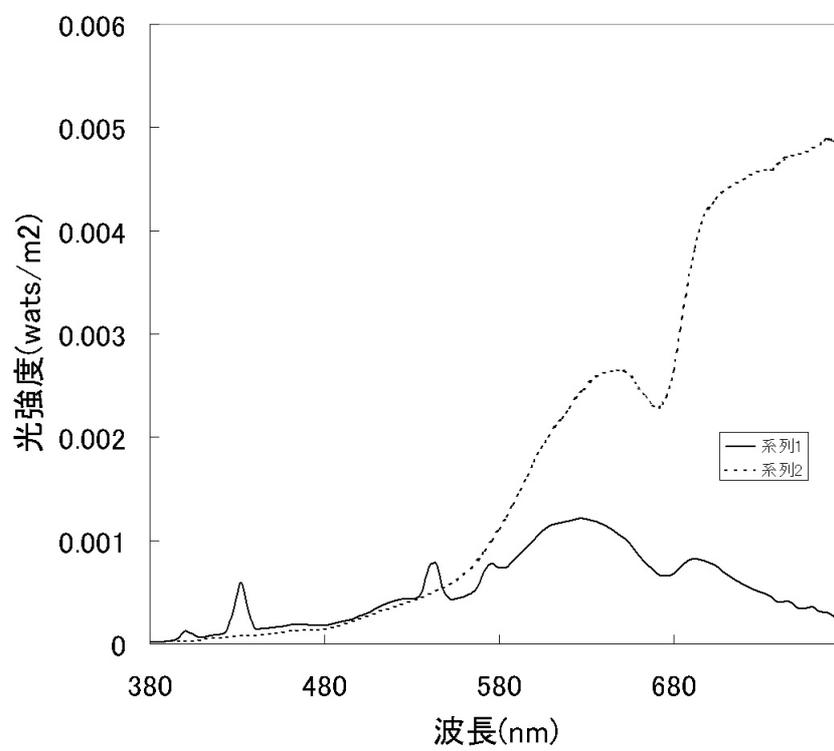


図1.4 反射光スペクトル

## 参考文献

[1]

[2] 東海彰吾, 安田孝美, 横井茂樹, 烏脇純一郎, 亀岡孝治, “実測値に基づくみかんの色の経時変化の表現法”, 信学技報, PRU93-94(1993-12)

[3] 久保田洋孝, 眞鍋佳嗣, 井口征士, “果物の光学特性の時間変化の計測と表現”, 「画像の認識・理解シンポジウム (MIRU'98)」(1998)

[4] 東海彰吾, 宮城真, 安田孝美, 横井茂樹, 烏脇純一郎, “CGによる柑橘果実の質感表現の一手法”, 信学論, J76-D- , NO.8, pp.1746-1754(1993)

## - 第 2 章 -

# 分光反射率の測定原理と解析手法

## 2 分光反射率の測定原理と分析手法

現実物体からの反射率の測定及び3次元物体のCGによる表現のためには光の反射の仕組みを表す反射モデルが必要である。そこで本研究で用いた反射モデルについて説明する。また測定した分光反射率の時間変化を様々な方法で分析しなければならない。この統計的な分析手法と色空間について簡単に説明する。

### 2.1 反射モデル

反射率の測定或いはCGによる3次元物体の表現のためには、簡便で適切なカラー反射モデルが必要である。一般に光の反射を厳密に表現するためには多くのパラメータを含む複雑なモデルが必要となる。しかしピクセル単位で得られる画像から反射率を測定し、これを用いて3次元物体をCGで表現しようと考えた場合には、複雑なモデルは実用的ではないといえる。よって記述が比較的容易で現実に近い表現が可能なカラー反射モデルが必要とされる。

#### 2.1.1 2色性反射モデル(dichromatic reflection model)

コンピュータビジョンの分野ではShafer[1]の2色性反射モデルが一般的であり、本研究でもこのモデルを用いる。ただしこの反射モデルが物体の表面層が不均質物質からなる物体を対象としたモデルであることをまず先に述べておく。2色性反射モデルでは物体からの反射光が2つの異なる反射成分の線形結合で記述できると仮定している。第一の成分は鏡面反射光などと呼ばれる物体表面からの反射光である。この成分は物体内部の情報を含まないため照明光と同じスペクトル分布を持つ。第二の成分は内部反射光である。この内部反射光は物体表面を透過し内部の色素粒子によって散乱された光なので、物質固有のスペクトル分布を持ち、物体色そのものをあらわしている。

この反射モデルを以下に式で表現する。反射光輝度 $Y$ は波長 $\lambda$ と幾何学成分 $\mathbf{q}$ の関数として以下のように表現することができる。

$$Y(\mathbf{q}, \lambda) = Y_S(\mathbf{q}, \lambda) + Y_B(\mathbf{q}, \lambda) \quad (2.1)$$

ここで添え字の $S$ 及び $B$ はそれぞれ表面反射と内部反射の成分をあらわす。更に波長成分と幾何学成分とに分離可能であるという仮定の基で次のように変形できる。

$$Y(\mathbf{q}, \lambda) = c_S(\mathbf{q})L_S(\lambda) + c_B(\mathbf{q})L_B(\lambda) \quad (2.2)$$

このとき $c_S(\mathbf{q})$ と $c_B(\mathbf{q})$ はそれぞれ表面反射と内部反射の幾何学成分をあらわす。

また $L_S(\lambda)$ と $L_B(\lambda)$ はそれぞれ表面および内部反射光輝度の電力スペクトル分布

である。

次にこの式から反射率  $S(\mathbf{q}, I)$  の記述を導くと次式のようになる。

$$S(\mathbf{q}, I) = c_S(\mathbf{q})S_S(I) + c_B(\mathbf{q})S_B(I) \quad (2.3)$$

式中の  $S_S(I)$  と  $S_B(I)$  は表面および内部反射の分光反射率である。

反射率の表面反射成分  $S_S(I)$  は波長に対して一定値をとる。反射率の表面反射成分は物理的にはフレネルの法則によって決まる[2]。ここで不均質物体の表面層で媒体として使用される物質の多くは屈折率が波長に関して一定であるとみなせる[3]ので、表面反射成分は波長に依存しなくなる。つまり、

$$S_S(I) = \text{constant} \quad (2.4)$$

となり表面反射成分が波長に対して一定となる。これは表面反射光が照明光と同じ色を持つように見える事を意味している。

内部反射成分  $S_B(I)$  は色素粒子による散乱光なので物体色をあらわしている。

### 2.1.2 Phong のモデル

3次元物体をCGによって表現する際には、Phongの反射モデルを用いる。このモデルはCGの分野では非常に一般的であり物理現象をよくあらわしていると思われる。またShaferの2色性反射モデルと同様に反射成分は表面反射成分と内部反射成分の線形結合で表現される。

Phongのモデルでは表面反射光は入射角には依存しないと仮定して、入射光の正反射方向と角度  $f$  だけ異なる方向へ反射する表面反射光の強さは  $\cos^n(f)$  の割合で減少する。つまり、

$$c_S(\mathbf{q}) = \cos^n(f) \quad (2.5)$$

となる。ここで  $n$  は表面反射光の広がりを意味しており、 $n$  が大きいほど広がり狭くなり強いハイライトになる事がわかる。

内部反射光は一般に完全拡散反射であるとみなせるので Lambert の法則を用いる。完全拡散反射では、反射光強度は入射光強度と入射角  $a$  のみに依存する。また入射角に対する減少の割合は  $\cos(a)$  となる。つまり、内部反射光の幾何学成分は次式のようになる。

$$c_B(\mathbf{q}) = \cos(a) \quad (2.6)$$

## 2.2 分光反射率

物体色を厳密にモデリングするためには内部反射の分光反射率を測定する必要がある。反射光の色は光源のスペクトルと内部反射の分光反射率を掛け合わ

せたスペクトル分布によって示される。つまり内部反射の分光反射率は物体固有の色を表していると言える。ある光源下で異なる色に見える2つの物体が、他の光源の下では同じ色に見えるという条件等色と呼ばれる現象が起こる場合がある。これは光源のスペクトル分布や視覚の分光感度特性によるもので、単純な反射光によってモデリングしたデータやRGBによる反射率ではこのような現象を正確に表現する事はできない。つまり物体固有の色をモデル化するためには内部反射の分光反射率が必要であると言える。

対象物体の分光反射率は反射光スペクトル分布と入射光スペクトル分布の比として求められる。つまり、

$$S(q, I) = Y(q, I) / E(I) \quad (2.7)$$

のように求める事ができる。しかしこうして測定された反射率は表面反射及び内部反射の両方を含んでいる。そのため内部反射成分だけを測定するためには定数となる表面反射成分を取り除く必要がある。或いは、この反射率が表面反射成分を含まないとすれば、観測される反射率を内部反射の分光反射率とする事ができる。

## 2.3 色空間

スペクトルデータを色として分析するためには、スペクトルを3次元(3刺激値)空間に投影する必要がある。そこでCIE(国際照明委員会)が定める標準的な表色系を用いて評価する事にする。本研究ではXYZ座標系しか用いていないが均等空間で表現されるL\*a\*b\*表色系も必要であると考えられるため簡単に紹介する。

### 2.3.1 CIE-XYZ 表色系

CIE-XYZ表色系は等色性が厳密に保証されており、色解析に当たって適当な表色系である。XYZ表色系は等色関数に基づく3次元(3刺激値)表色系であり、この3刺激値によって全ての色を表現する事が出来る。この等色関数とはCIEによって1931年に定められた2°視野における視覚系の色感度特性を表している。図2.1にこの等色関数を示す。またこの3刺激値から2次元の色度図に投影する事によって色度情報のみで解析可能である。

三刺激値X、Y、Zを求める式を以下に示す[4]。

$$\left. \begin{aligned} X &= K \int E(I) S(I) \bar{x}(I) dI \\ Y &= K \int E(I) S(I) \bar{y}(I) dI \\ Z &= K \int E(I) S(I) \bar{z}(I) dI \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

ここでKは

$$K = 100 / \int E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2.9)$$

で与えられる正規化パラメータである。Yは明度情報を表現しており、正規化パラメータは完全白色物体に対して Y=100 となるように調整する働きをする。

E( )は光源の分光エネルギー分布、S( )は物体の分光反射率である。また  $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$  及び  $\bar{z}(\lambda)$  は標準観測者の等色関数である。色度情報は 3 刺激値 XYZ から、

$$\left. \begin{aligned} x &= X / (X + Y + Z) \\ y &= Y / (X + Y + Z) \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

で定義され明度 Y とともに Yxy として表現される。このとき z 軸は常に 1-(x+y) に等しい。ただし XYZ 或いは Yxy による 3 次元空間は均等な色空間ではないため色差を評価することは難しい。

### 2.3.2 CIE-LAB 表色系

CIE-LAB(L\*a\*b\*)表色系は CIE が推奨する 3 次元の均等色空間である。前述のように CIE-XYZ 表色系或いは Yxy 表色系は均等な色空間ではない。そこで CIE が均等な色空間として推奨したのが CIE-LAB 表色系である。この表色系は三刺激値 XYZ によって均等空間を近似するもので以下の 3 量 L\*、a\*、b\*の直交座標で表現される。

$$\left. \begin{aligned} L^* &= 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500\{(X/X_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}\} \\ b^* &= 200\{(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}\} \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

ここで X<sub>0</sub>、Y<sub>0</sub> 及び Z<sub>0</sub> は標準白色物体に対する三刺激値である。CIE-LAB 表色

系では 2 色 (L<sub>1</sub><sup>\*</sup>, a<sub>1</sub><sup>\*</sup>, b<sub>1</sub><sup>\*</sup>) と (L<sub>2</sub><sup>\*</sup>, a<sub>2</sub><sup>\*</sup>, b<sub>2</sub><sup>\*</sup>) 間の色差 ΔE<sub>ab</sub><sup>\*</sup> はユークリッド距離として次式のように計算する事ができる。

$$\Delta E_{ab}^* = \{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2\}^{1/2} \quad (2.12)$$

### 2.4 スペクトルの時間変化の統計的分析

分光反射率の時間変化を分析するために数学的な多変量分析手法を用いる。果物表面の分光反射率は時間とともに何らかの特徴的な変化をみせるとされる。そこで、こうした特徴を抽出し検証するために統計的な分析を試みる。実際に

は多変量解析手法である主成分分析と重回帰分析を用いる事にする。主成分分析は分析のみではなくデータの圧縮にも用いる事ができるため、データ表現のためにも利用可能である。ただしこれらの分析手法によって常に正しい特徴を抽出し得るわけではない事に注意しておきたい。

#### 2.4.1 主成分分析

主成分分析とはある問題に対していくつかの要因が考えられるとき、それらの要因を一つ一つ独立に扱うのではなく総合的に取り扱おうとするものである[5]。

いま、いくつかの説明変量  $x_1, x_2, \dots, x_p$  を考えた場合、これらの総合的な特性を、

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1p}x_p \\ z_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2p}x_p \\ &\vdots \\ z_m &= a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mp}x_p \end{aligned} \right\}_{1p} \quad (2.12)$$

という幾つかの 1 次式で表現する。各主成分が持つ特性はそれらの 1 次式の係数  $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ip}$  によって表現される。これらの 1 次式によって表される各  $z_m$  が主成分と呼ばれ寄与率が高い順に第 1 主成分、第 2 主成分、...、第 m 主成分と呼ばれる。

主成分の求め方を簡単に説明する。幾何学的には、各点から平面へ垂線を下ろし、この長さの和が最小となるような平面を求める。この垂線の長さを情報の損失量と定義し実際はこの平方和が極小となるように係数を算出する。実際には条件付き極小という微分問題であり、ラグランジュの乗数法を使って解を求める。

各主成分がどの程度その現象を表しているかを示すのが寄与率である。寄与率の総和は 1 になり、主成分数  $i$  は一般的に第  $i$  主成分までの累積寄与率が 0.8 以上となる事が一つの基準となっている。

#### 2.4.2 重回帰分析

重回帰分析とは目的変量と幾つかの説明変量を関係付けるものである。目的変量  $y$  は実測値に対応する。これに対し説明変量  $x_1, x_2, \dots, x_p$  から、

$$Y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_px_p + a_0 \quad (2.13)$$

のような 1 次式を導きこの  $Y$  を目的変量の予測などに用いる。

簡単に計算方法を述べる。Y を単純に予測値と呼ぶならば、実測値と予測値の差の平方和が最小(極小)となるような係数  $a_1, a_2, \dots, a_p$  を求める。実際の計算は分散共分散行列を作成し、これから導出される連立方程式を解く事によって簡単に求める事ができる。

重回帰分析の結果がどの程度目的変数 y に関係づけられているかを示すのが寄与率或いは重相関係数である。寄与率は予測値の分散と実測値の分散の比で表される。また重相関係数はこの寄与率の平方根である。一般にこの重相関係数は 0 から 1 の値を取り、1 に近い程よく関係付けられているといえる。しかし重相関係数は説明変数の数が増えると大きくなるという性質を持っているので、一概にこの値だけで評価する事はできない。

以上、本研究で用いた反射モデルや分析手法などについて簡単に説明した。次の章では実験結果とこの測定値をもとにした分析結果を示す。

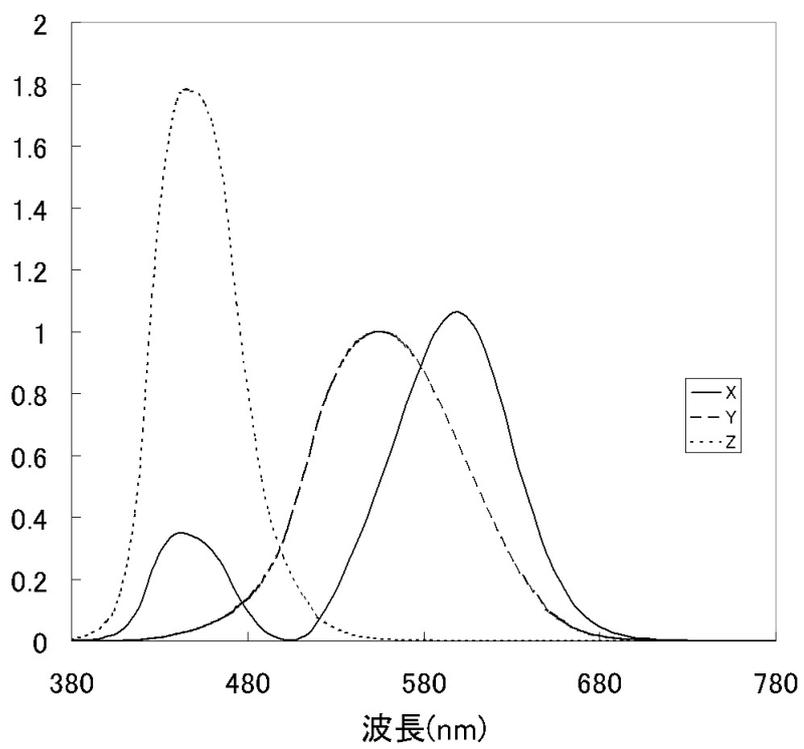


図2.1 標準観測者の等色関数(2° 視野)

## 参考文献

- [1] Shafer, S.A.: Using Color to Separate Reflection Components, *Color Res. Appl.*, Vol.6, pp. 576-584(1989)
- [2] Born, M. and Wolf, E.: *Principles of Optics*, pergamon Press, Oxford(1983)
- [3] Lee, H.C., Breneman, E.J. and Schulte, C.: Modeling Light Reflection for Computer Color Vision, *IEEE Trans. On PAMI*, Vol.12, pp.402-409(1990)
- [4] 富永昌治 コンピュータビジョンにおけるカラー情報の表現と解析
- [5] 有馬 哲, 石村貞夫: 『多変量解析のはなし』, 東京図書, 東京, (1987)

- 第3章 -

測定と解析

### 3 測定と解析

この章では内部反射の分光反射率の測定方法及び時間変化の測定結果、またこの分析結果を示す。まず実験装置の構成、測定方法などを説明し測定結果を提示する。次にこの測定データをもとにした主成分分析及び重回帰分析の結果を示す。更に反射光の色を色度図上に投影し、この変化を分析する。

#### 3.1 分光反射率の時間変化の測定

測定対象にはトマトを選び、内部反射の分光反射率の時間変化を測定した。まず測定手順などを簡単に説明し後に測定データを示す。

##### 3.1.1 実験装置の構成

実験装置の構成を示す。分光反射率の測定には PhotoReserch 社製の分光測色計 PR-650 を使用し、光源には 150w の白熱灯(点光源)を用いた。ただしこの分光測色計はあるスポット内(点)での測定しかできず、定めた点でのデータを取りつづけた。光源の測定には同社製の酸化マグネシウムの標準拡散板を用いた。図 3.1 がこの実験装置の構成である。

##### 3.1.2 測定手順

始めに使用した白熱灯のスペクトル分布の測定を行った。まず測定対象物の位置に標準拡散板を分光測色計と正対するように配置し、つぎに拡散板の法線方向との成す角が  $45^\circ$  になるように光源の位置調整を行った。そして分光測色計によって反射光のスペクトルを測定し光源のスペクトルを計算した。標準拡散板の分光反射率は分光測色計添付のソフトウェアに組み込まれているので、これを用いて光源のスペクトルを計算することができる。測定した光源のスペクトル分布を図 3.2 に示す。以後この構成を維持し、対象物体の反射率の計算にはこのスペクトル分布を使用した。

つぎに標準拡散板と対象物体(トマト)を入れ替えて分光反射率の時間変化の計測を開始した。測定点は1点とし毎回同一点を測定し続けた。緑色の部分が熟して赤くなっていく変化を測定するため、この測定点には予め緑がかった部分を選んだ。時間の周期は12時間毎とし14日間測定を続けた。

##### 3.1.3 測定結果

測定結果を示す。図 3.3 は測定した分光反射率の時間変化である。波長 500nm ~ 600nm の緑色の部分が時間とともに減少し、赤色を示す 700nm 付近が次第に増加していく事がわかる。

## 3.2 データ分析

測定データを統計的な分析手法及び色空間に投影する事によって分析する。まず主成分分析を行い、この結果によって分光反射率の変化を少数のパラメータによって表現する事を考える。つぎに実際の物理現象を基にした値によって重回帰分析を行い、その物理現象を検証する。最後に色空間に投影し色の概念から考察を加える。

### 3.2.1 主成分分析結果

まず分光反射率の時間変化を主成分分析し主成分得点の時間変化という形でパラメータ化した。処理は全スペクトルの平均をそれぞれ減算し特異値分解を行った。第一主成分、第二主成分の寄与率はそれぞれ 61.1%、23.2%であり、累積寄与率が 84.3%となった。よって一般的な主成分分析の概念からこの 2 成分を主成分とみる事ができる。このときの固有ベクトル(主成分の係数)を図 3.4 に示す。またこれらの主成分得点を図 3.5 及び図 3.6 に示す。

主成分分析によって得られた第一主成分は色の変化そのものを示していると言える。第一主成分は波長 560nm と 680nm 付近に正負逆のピークを持っている。またその主成分得点が時間とともに単調増加している事からも、第一主成分は緑色から赤色への表面色の変化を表していると言える。

第二主成分の主成分得点は単調な増減を見せないなので簡単に物理現象に結び付けるわけにはいかない。しかし後述する重回帰分析の結果や色度図上の変化にも同様な変化が見られるので何らかの原因が考えられるはずである。この時点で考えられる要因は時間的な変化の差である。これは環境などによって対象物体の各部位で変化の度合いに時間的な差があるので、一定の時間間隔で測定しても単調な変化にはならないという事である。この様な差は累積されるので連続した変化として第二主成分に現れたと考えられるのである。しかし、これはあくまで推測に過ぎず、これを確かめるためには環境を変化させず多くのサンプルを用いて測定と解析をする必要がある。

次に、得られた主成分得点の変化を日数に対して定式化した。測定データを一般化及び圧縮するためには、主成分得点の変化を曲線近似する必要がある。この主成分得点の変化は回帰曲線によって近似した。求めた回帰曲線を図 3.5 及び図 3.6 中に得点とともに示した。第一主成分、第二主成分の回帰曲線はそれぞれ  $t$ (12hours)で、

$$Y_1 = -0.00000773358t^3 + 0.000139393t^2 + 0.0153333t + -0.199624 \quad (3.1)$$

$$Y_2 = 0.00000125553t^5 - 0.0000897086t^4 + 0.002247t^3 + 0.0225962t^2 + 0.0720887t - 0.00850694 \quad (3.2)$$

と表現される。また相関係数はそれぞれ 0.997104、0.87386 であり第一主成分はよく近似出来ているが第二主成分は簡単に定式化できないことがわかる。

最後に定式化したデータをもとに任意に選んだ時間の復元データを示す。図 3.7 は 3 日目(am)、図 3.8 は 12 日目(pm)のオリジナルデータ及び復元データでありそれぞれよく復元できていると思われる。

### 3.2.2 重回帰分析結果

次に分光反射率の変化がある主要な色素量の変化によるものと考えて、これらの色素の分光吸収度をもとに重回帰分析を行った。トマトの成熟過程における色の变化は果実中のクロロフィルが分解されると同時に、赤色のカロテノイド色素であるリコペンが生成される現象である[1]。よってこれらの色素の吸収スペクトルをもとに重回帰分析を行えばその現象を観測できるはずである。分析に用いた色素はクロロフィル a、クロロフィル b、リコペン、 $\beta$ -カロテンである。この 4 つの色素の透過分光吸収度を図 3.9 に示す。

この色素の分光吸収度をもとにした重回帰分析の結果を以下に示す。分光吸収度は単純に各波長、負に変換した値を用いた。考慮する点は多々あると思われるが、波形の特徴は得られると考えた。各成分の分光吸収度はその相対関係がよく表れるように標準化して計算を行った。図 3.10、図 3.11、図 3.12、図 3.13 がそれぞれクロロフィル a、クロロフィル b、リコペン、 $\beta$ -カロテンの係数の変化である。クロロフィルの変化は予想通りほぼ単調な減少となった。しかしリコペンの増加は見られず、ほとんど変化していない。この分析結果は色の变化という点だけを考えれば誤った結果のようには見られない。しかし説明変量とした分光吸収度は透過に対する特性であり、反射の仕組みについては全く考慮していない。つまりこの透過分光吸収度は反射の際の特徴を表現しているわけではないので、分析結果は意味のないものであると言える。

### 3.2.3 色度図上での解析

最後に反射光を CIE の xy 色度図に投影しその変化を分析した。まず測定した内部反射の分光反射率に、用いた白熱灯のスペクトルをかけて反射光のスペクトル分布の時間変化を求めた。これを CIE が定める 2° 視野の標準観測者の等色関数を用いて 3 刺激値 XYZ に変換し、更に xy 色度図上に投影しその変化を調べた。求めた反射光の xy 色度図上の時間変化を図 3.14 に示す。この図から色度の変化は直線になる事がわかる。これを回帰直線で近似すると、

$$y = -0.948569x + 0.929788 \quad (3.3)$$

になる。相関係数は 0.997896 であり、よく近似できていると思われる。

分析の結果、反射光の xy 色度図上の変化が直線になる事について考察する。2

色性反射モデルが成立する場合  $xy$  色度図上の変化は直線になる。これは 2 色を示すそれぞれのベクトルが張る平面と  $xy$  色度面が直線で交わるからである。例として標準 2 色性反射モデルが成立する単色の物体を考える。この場合、その表面色の色度は光源と内部反射光の色度の線形和で表されるので、色度図上では必ずこれら 2 つの座標を結ぶ直線上にある[2]。今回の測定は内部反射光のみなので、表面色は光源以外の何らかの 2 色の和によって表される事がわかる。この 2 色が 2 つの主要な色素によって表されるのか、それ以上の色素が複合した結果として表されるのかは分からないが、モデル化する際には役に立つ情報であると考えられる。

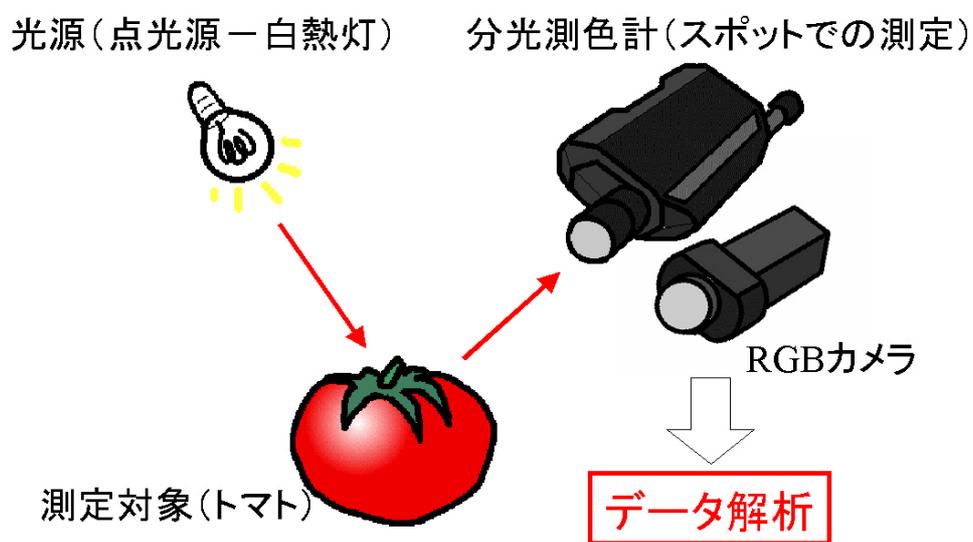


図3.1 実験装置の構成

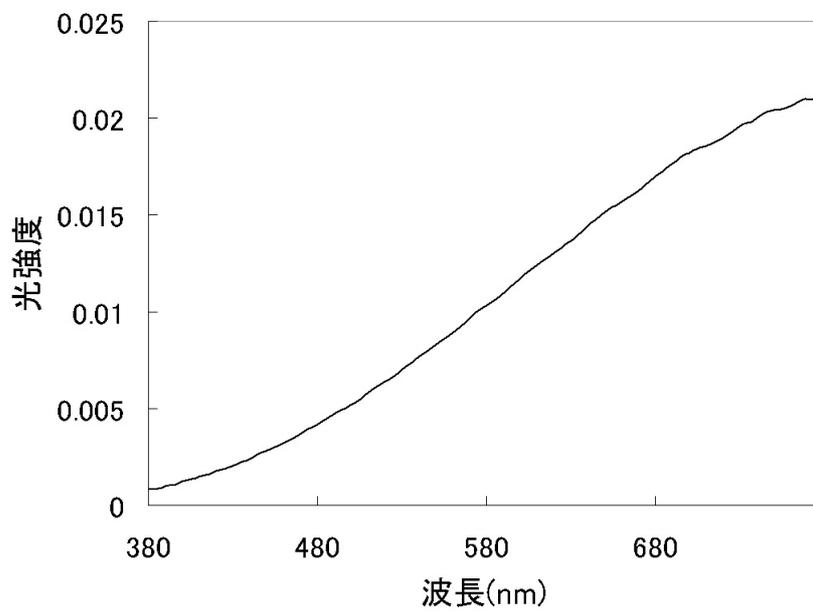


図3.2 光源のスペクトル

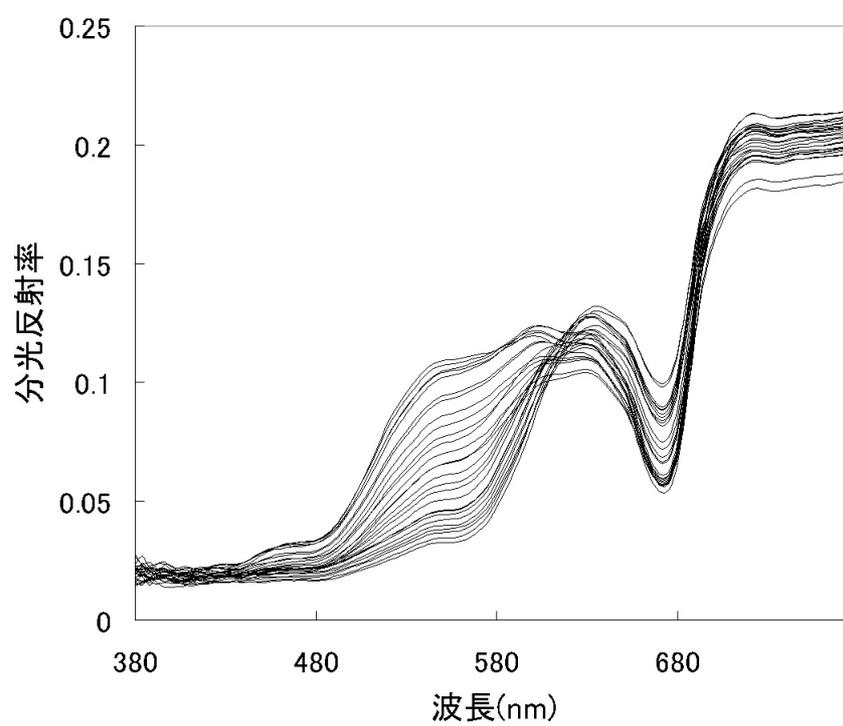


図3.3 分光反射率の時間変化

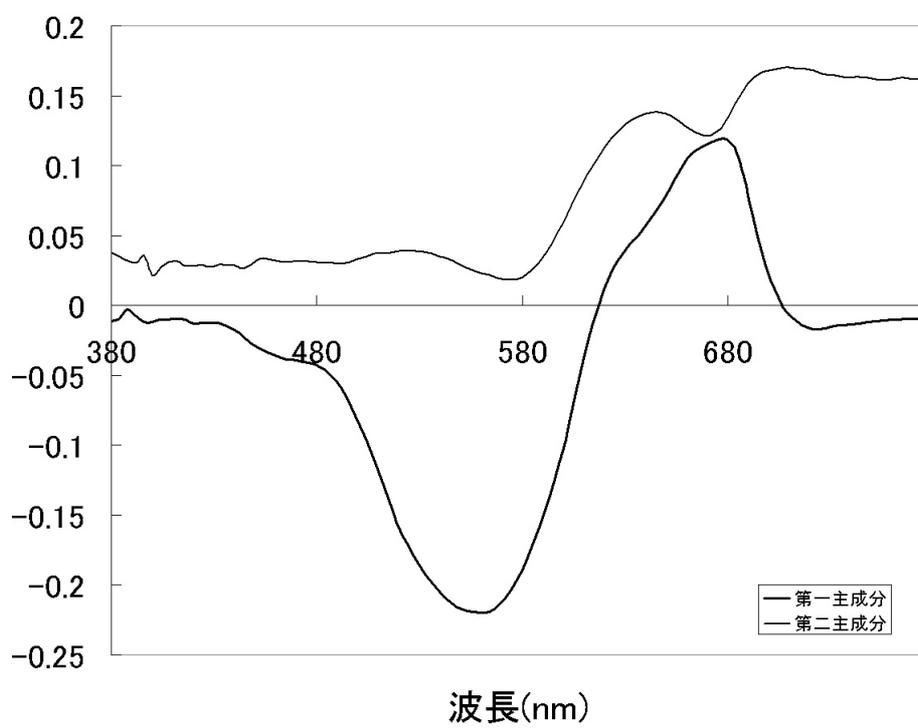


図3.4 固有ベクトル(主成分の係数)

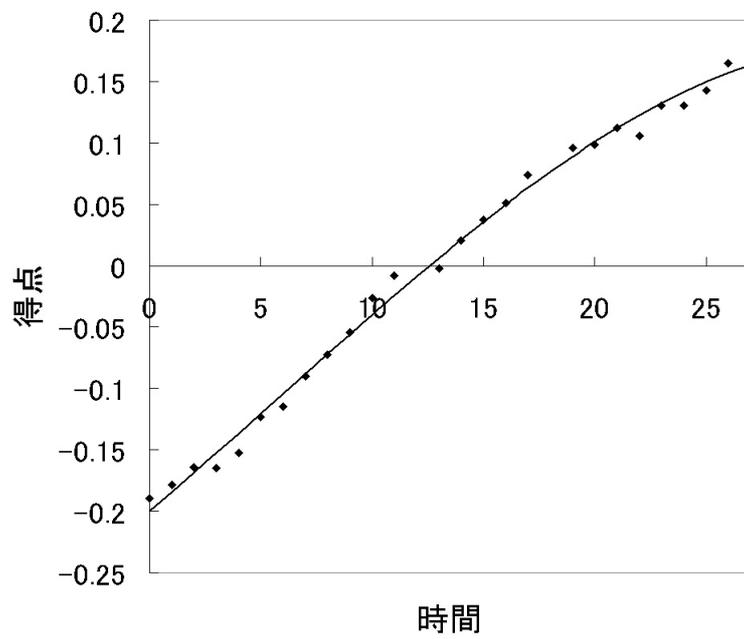


图3.5 第一主成分得点

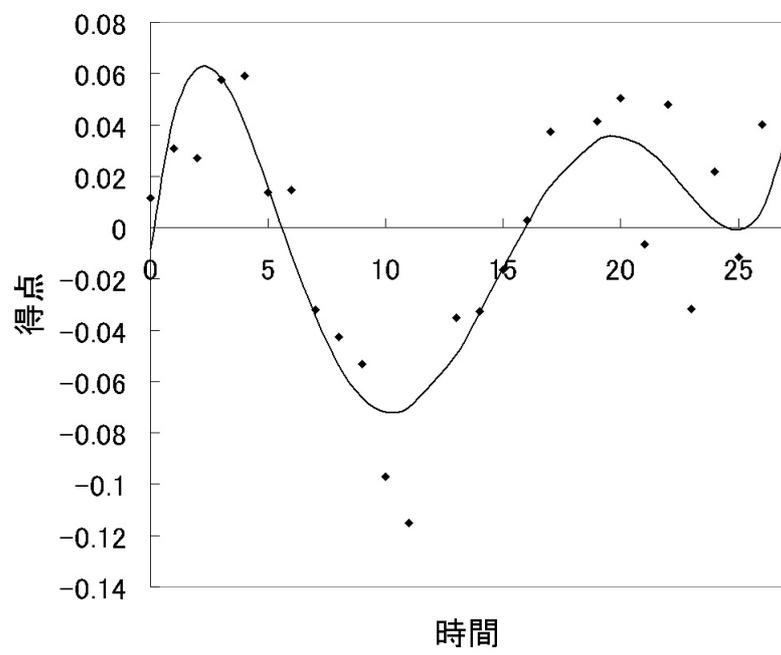


图3.6 第二主成分得点

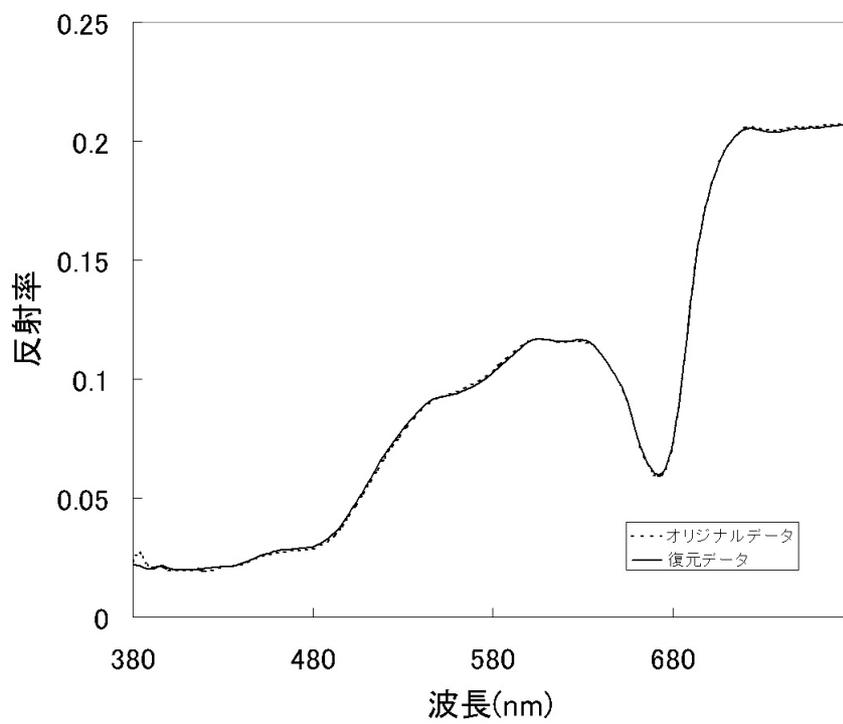


図3.7 3日目(am)の復元スペクトル

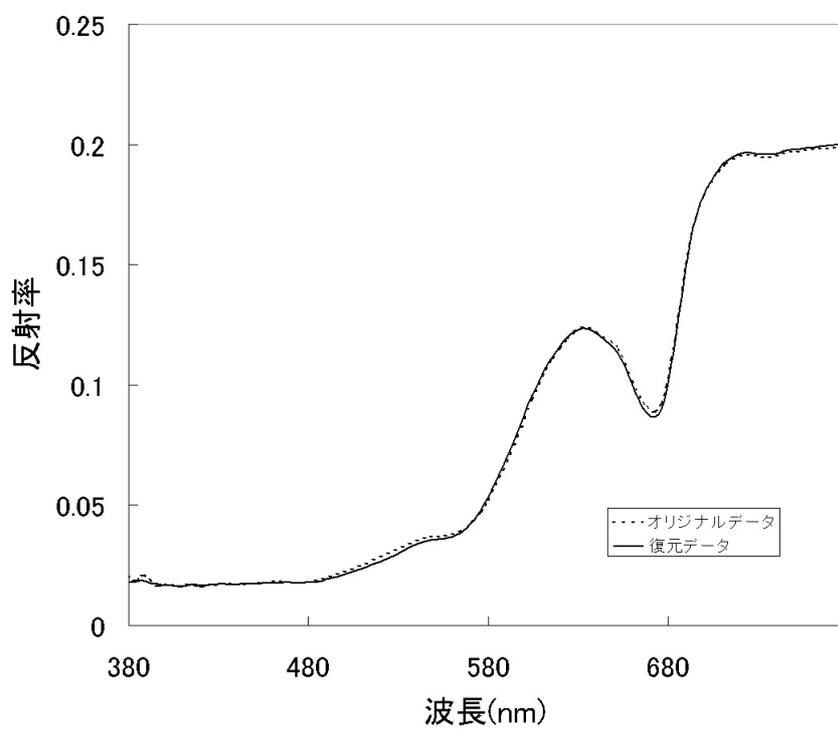


図3.8 12日目(pm)の復元スペクトル

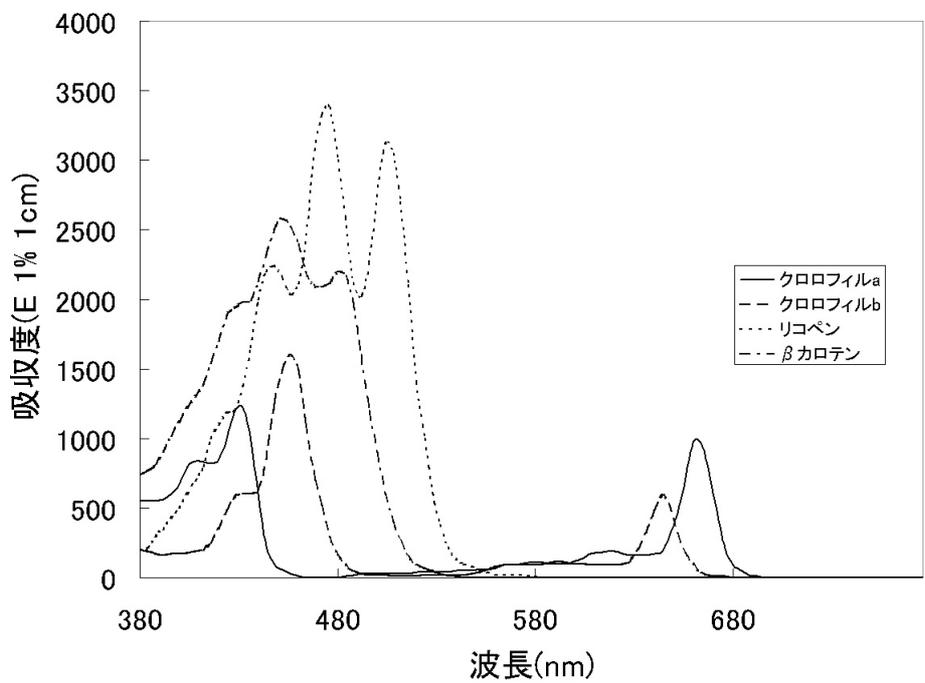


図3.9 4色素の可視吸収スペクトル

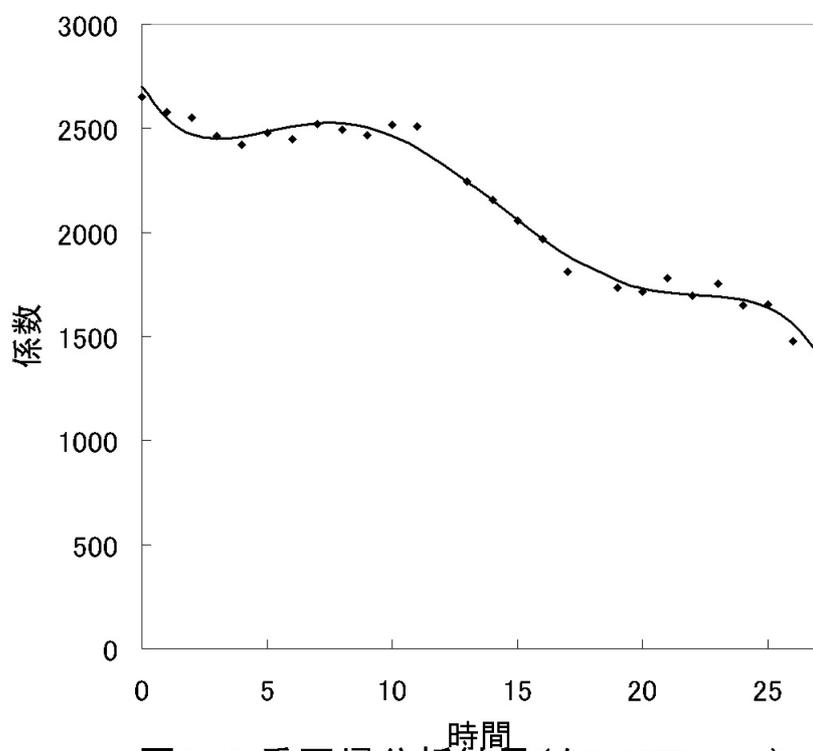


図3.10 重回帰分析結果(クロロフィルa)

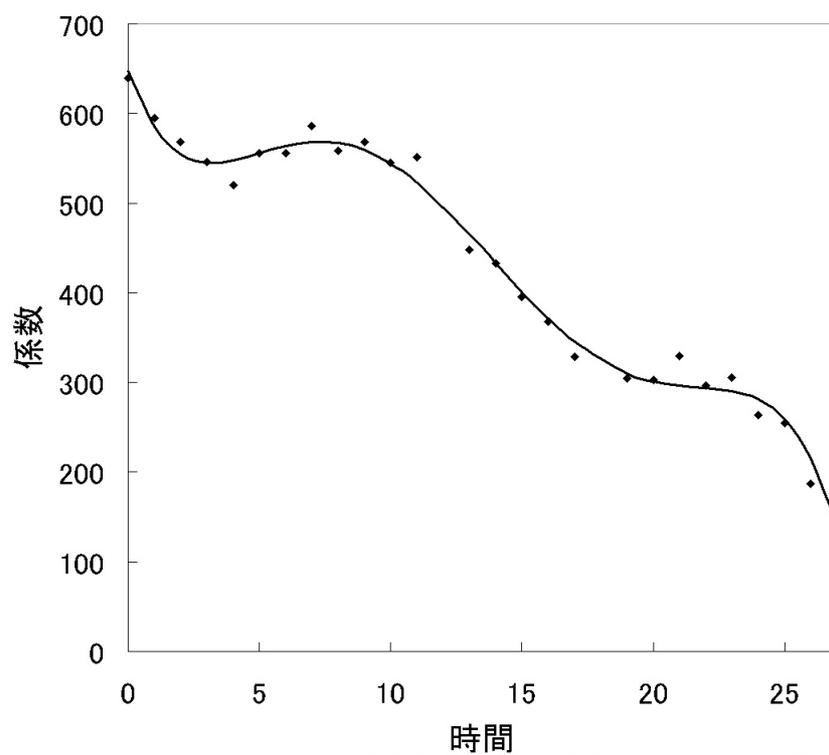


図3.11 重回帰分析結果(クロロフィルb)

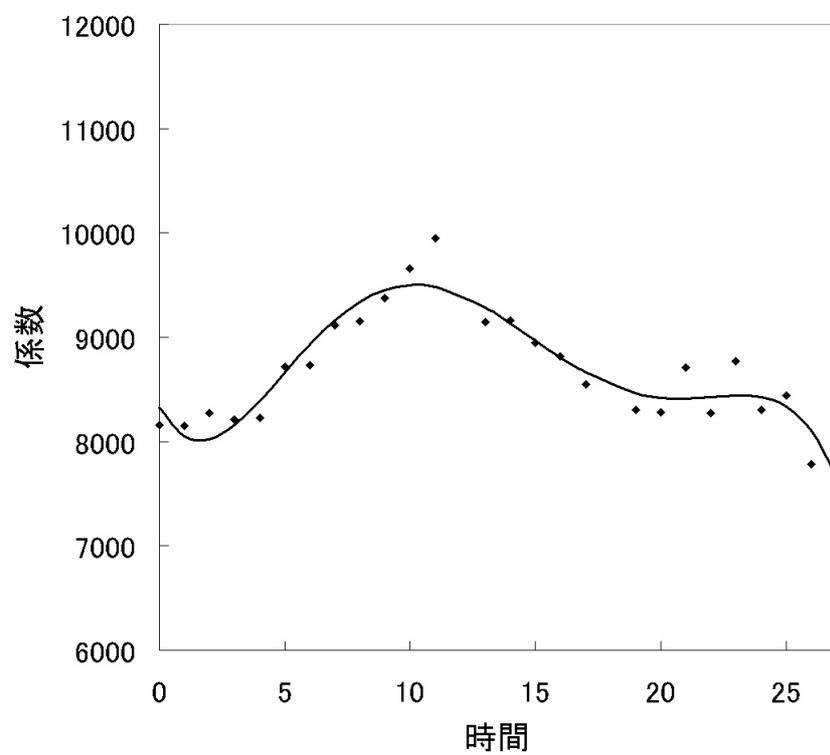


図3.12 重回帰分析結果(リコペン)

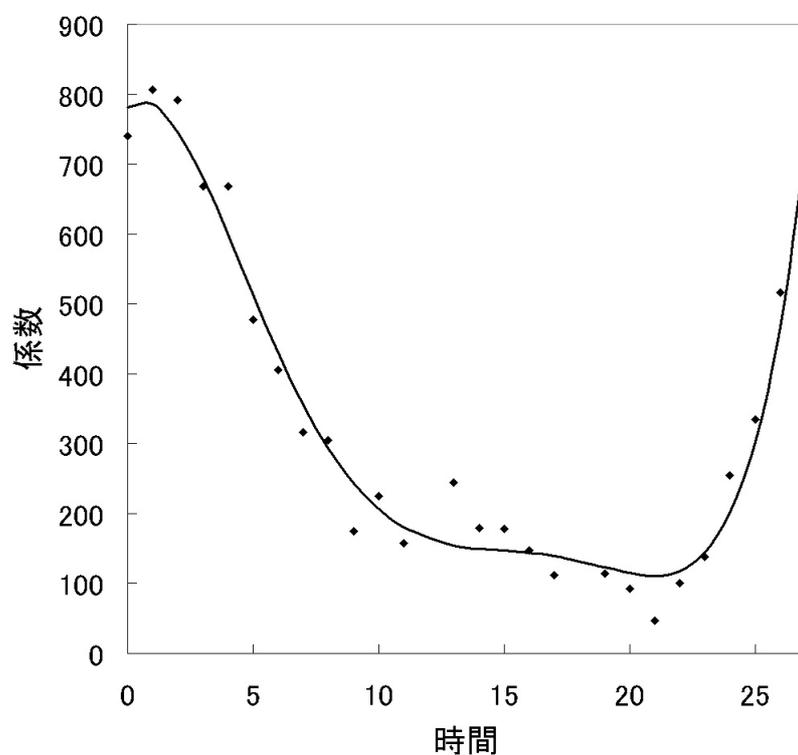


図3.13 重回帰分析結果( $\beta$ カロテン)

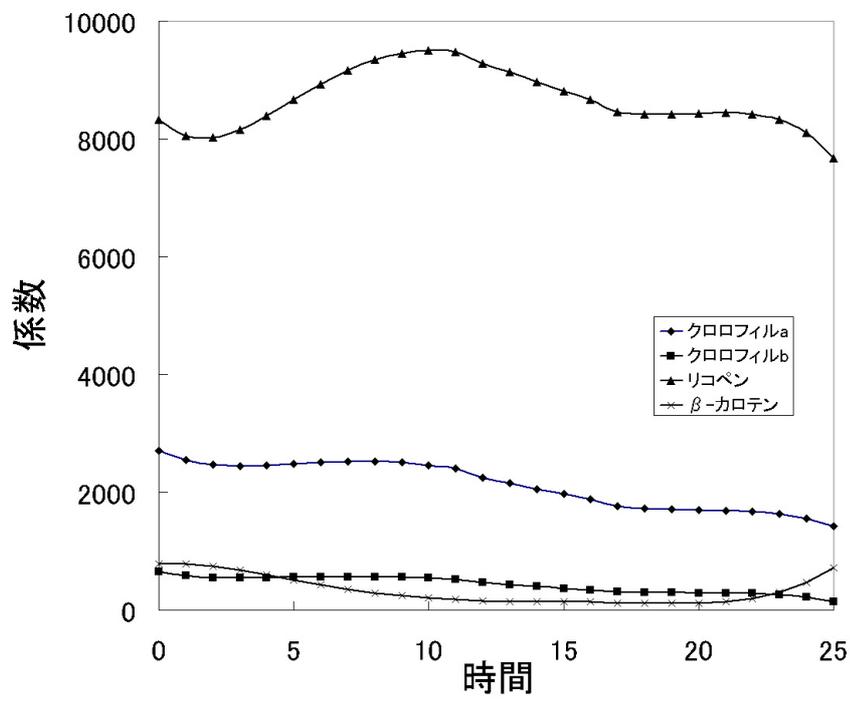


図3.14 重回帰分析結果

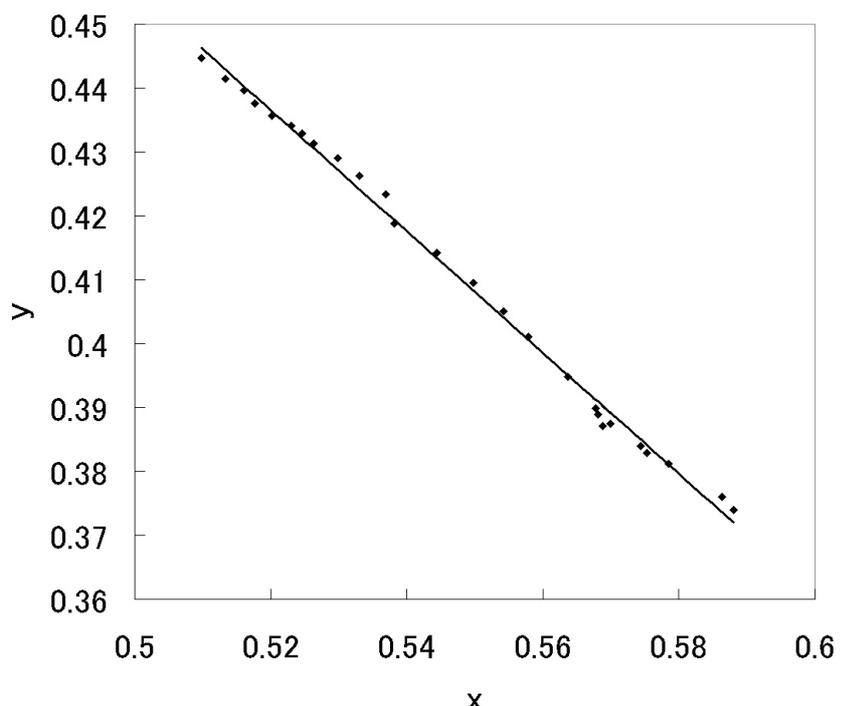


図3.15 色度図上の時間変化

## 参考文献

- [1] 永田 雅靖: “トマト果実に含まれる色素の同時簡便定量法”, 野菜・茶業試験場ニュース, No.40, (1995)
- [2] 富永昌治, 大橋伸一郎: “物体のカラー反射モデル”, 情処論文誌, Vol.33, No.1, pp.37-45 (1992)

- 第 4 章 -

RGB 画像からスペクトル画像の  
生成及び CG による再現

## 4 RGB 画像からスペクトル画像の生成と CG による再現

測定した分光反射率の時間変化と RGB 画像とを対応付けて分光反射率で表現された画像を生成する。そしてこの画像と 3 次元幾何学モデルからこの物体の CG による表現を試みる。

### 4.1 分光反射率によって表現される画像の生成

3 次元物体の色を CG によって正確に再現するために、内部反射の分光反射率で表現された画像の生成を試みる。一般にカラー画像は RGB の値によって表現される。しかし前述のように RGB 画像に含まれる情報は、正確な色再現のためには不十分である。つまり 3 次元物体の色を正確に表現するためには少なくともピクセル単位で内部反射の分光反射率が必要である。このために内部反射の分光反射率で表現される画像を生成しなければならない。

ピクセル単位でスペクトルを測定する事は容易な事ではない。今回用いた分光測色計では一回の測定で可能な測定範囲はわずかに一点である。しかもスポットサイズはかなり大きく細密な計測は困難である。このほかの機器では 1 スキャンライン・ピクセル毎の分光器も存在し、これを平行移動させスキャンする事によって各点でのスペクトルを測定する事も可能である。しかし扱うデータ量は膨大でありシステムも複雑になる。

そこで、もっと簡便な分光反射率で表現された画像の生成方法を考えることにする。

#### 4.1.1 RGB 画像の解析

RGB 画像から分光反射率による画像を生成するために、まずこの RGB 画像を解析する必要がある。RGB 値は 3 次元の情報しか持たないので、一般的にこの値からスペクトルを復元する事は出来ない。しかし本研究で測定したトマトのように、その表面色が何らかの 2 色の線形和で表現可能であるならば、測定したスペクトルと RGB 値の対応付けが出来るのではないかと考えた。ただしこの場合、物体表面全ての色が同様なスペクトルの変化を示すという仮定が成立しなければならない。つまり各点で時間的な変化の差はあるとしても、変化の過程は同じでなければならない。この仮定が成立する事を確認するためにまず RGB 画像の解析を行う事にする。

まず RGB 画像から幾何学成分を取り除き、色度情報のみの抽出を試みる。2 色性反射モデルの原理から、幾何学成分が反射光のスペクトルに与える影響は波長に依存しないと仮定できる。つまり幾何学成分は反射光の輝度(明度)に関与するのみで色度には影響を与えない。3 次元物体を撮影した RGB 画像は幾何学

成分によって明度が変化しているが色度情報は保持している事になる。そこでピクセル毎に RGB 値から色度情報を得る事が出来るはずである。実際には RGB 値をアフィン変換により 3 刺激値 XYZ に変換し[1]更に xy 色度図上に投影する事が可能である。

こうして変換した値の色度座標上での変化を解析してみる。まず測定対象を撮影した RGB 画像から、表面反射光が少ない任意の数点を選び色度座標(x, y)に変換した。これをプロットしたのが図 4.1 である。図 4.1 からこれらの色度値がほぼある直線上に存在する事が見て取れる。この事から物体表面の全ての点で 2 色性反射モデルが仮定でき、同じ何らかの 2 色の線形和で表現できる事が分かった。

#### 4.1.2 分光反射率の分布と RGB 値の分布の対応づけ

これまでで得たデータから内部反射の分光反射率と画像上の RGB 値との一対一の対応を考える。RGB 画像の解析結果から、測定したスペクトル分布の変化と RGB 値が対応しているであろう事は簡単に予測できる。そこで実際にこの対応付けを行ってみる。分光反射率から計算した反射光の色度座標(x, y)は時間とともに一方向に変化する。つまり RGB 値が示す直線と分光反射率から得た直線が同一のものとなれば対応が取れるはずである。これは XYZ へのアフィン変換部分の問題であり、キャリブレーションが必要である。

以下に実際に対応付けの手順を示す。

はじめに RGB 値を xy 色度図上に投影する必要がある。このためにはカメラの特性が必要で、この特性からアフィン変換行列を作成する。この行列に RGB 値の 3 次元ベクトルをかける事によって XYZ が得られ(2.10)式から色度座標(x, y)が求められる。

つぎに RGB 値から得られた色度座標を反射率から求めた色度座標の変化に対応付ける。反射率から得た色度(x, y)の変化は比例の関係にある。そこで x と y は時間的に同様な変化をすると考えられるので、x のみ或いは y のみで対応づける事にする。今回は x のみを扱う事にし、その対応を時間で表現する(媒介変数を時間とする)。反射率から得た色度 x を時間変化量として表現すると図 4.2 のようになる。この直線の回帰式は、

$$x = 0.00290309t + 0.508672 \quad (4.1)$$

$$t = 341.449x - 173.569 \quad (4.2)$$

であり相関係数はそれぞれ 0.995619、0.995619 である。実際には各ピクセルの RGB 値から求めた x を(4.2)式によって t に変換する。

最後にピクセル毎に求めた時間変数 t から内部反射の分光反射率を復元する。時間変数 t が求めれば、主成分得点の時間変化の回帰式(3.1)と(3.2)を用いて主

成分を復元可能である。この 2 主成分を加算し、更に全分光反射率の平均を加えて内部反射の分光反射率を復元する。こうして RGB 画像からピクセル毎に内部反射の分光反射率を復元する事が出来る。0 時間目の画像をこの方法で復元し白熱灯のスペクトルをかけて RGB に変換した画像を図 4.3 に示す。

#### 4.2 3次元モデルのCGによる表現

実際に3次元モデルをCGによって表現してみる。幾何モデルは実際の対象物(トマト)からレンジファインダを用いてモデリングした。このモデルはメッシュモデル、つまり頂点とそれを結ぶ三角形のデータの集合という一般的な3次元モデルである。光学特性の色情報に関してはRGB画像から分光反射率を推定する事が出来た。これをCGの分野で通常テクスチャマッピングと呼ばれる手法でモデルに貼り付けることにする。シェーディングにはPhongのモデルを用いた。表面の光学特性は測定していないので他の論文[2]から引用する事とする。また既知の光源情報は点光源のスペクトルとその位置情報のみなので、相互反射光は考慮に入れず環境光は任意に定めるものとする。

撮影したRGB画像とシミュレーション結果を比較する事にする。RGBカメラで撮影した0時間目の画像を図4.4に、図4.5に前述の方法によって復元した同時刻の画像を示す。

実際のRGB画像と復元画像を比較すると、復元画像では鮮やかな赤色が表現されていないことがわかる。この理由は測定点での色の変化が十分な範囲を持っていなかったためである。つまり測定したスペクトルデータよりも赤色が強い部分がまるめられてしまったためである。実際に測定時間外を算出したデータは最大時間(27)或いは最小時間(0)とした。値をまるめなければならない理由は、主成分得点の回帰曲線がその範囲でしか意味を持たないためで、測定時間外の値では結果は全く予想出来ないものになってしまう。この解決策は、多点で測定を行いこれを結合或いは補完し広い範囲のデータを得る事である。この場合媒介変数を時間とせず、意味を持たない変数として、その変数に対するxの変化が直線になるように補完すればよいと考えられる。

復元画像の中央部分に不自然な緑色部分があるのがわかる。これはRGB画像が光源のハイライトによって飽和し色度情報を得られないためである。これ意外にも実際のRGB画像を見ると表面反射光が目立つ部分がある。これらの部分では少なくとも正確な色度情報が得られていないと考えるべきである。これを考慮して表面反射が少なくなるように環境を工夫する必要がある。また全ての表面反射を除去する事は出来ないので、幾つかの角度から画像を撮影し補完する必要がある。

カメラで撮影したRGB画像には暗点が多々見られるがこれは復元画像には現

れていない。この理由はこれらの点が色差或いは幾何学成分によって現れるわけではないからである。緑色から赤色に色づいていく過程では色度の変化が最も大きい、腐っていく過程では色度ではなく明度が大きな意味を持つ事になる。よって当然この方法ではトマトが腐敗していく過程を表現する事は出来ないことになる。これは色度のみを用いるこのシステムの大きな問題点である。この問題に対してはやはり明度も含めた3次元色空間での対応づけが必要であると考えられる。

問題は多々あるが比較的良好に色が表現できていると思われる。また内部反射の分光反射率で表現される画像を生成したことに大きな意義があると思われる。

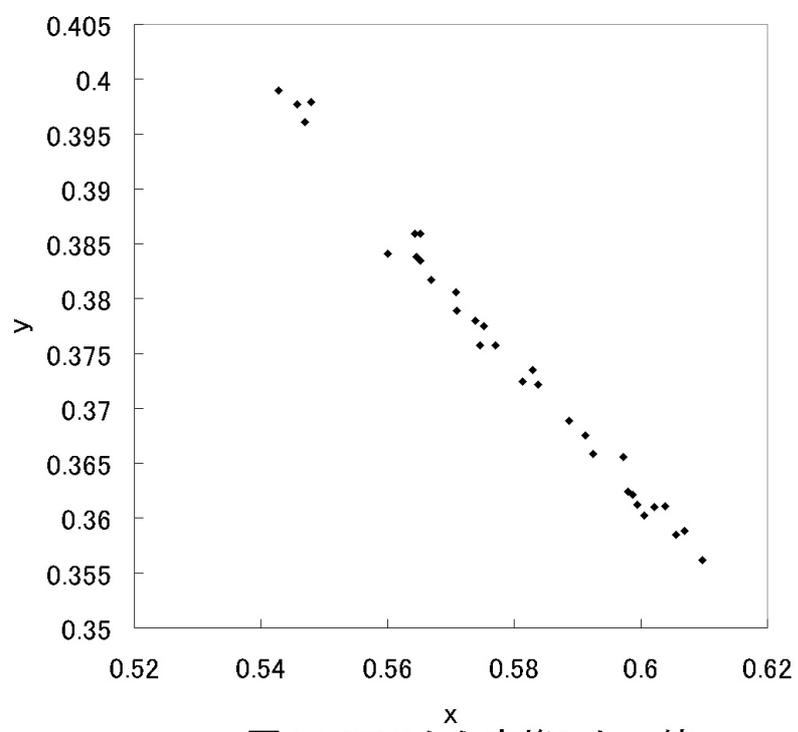


図4.1 RGBから変換したxy値

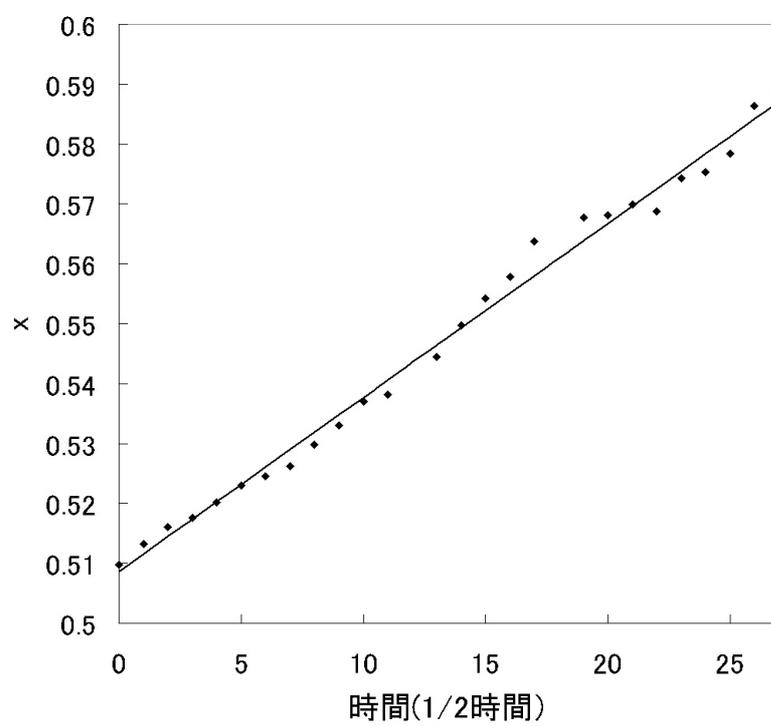


図4.2 x(スペクトルデータ)の時間変化

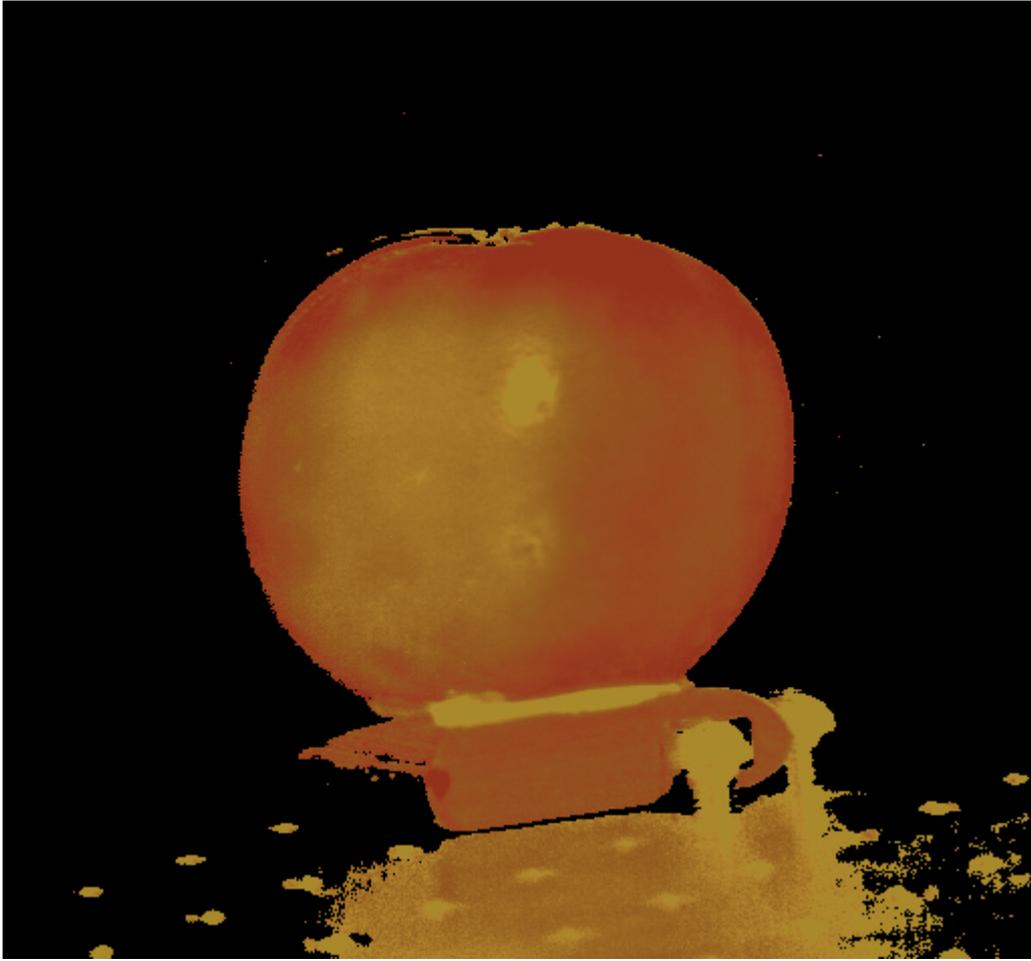


図 4.3 反射率から復元した RGB 画像



図 4.4 0 時間目における RGB 画像

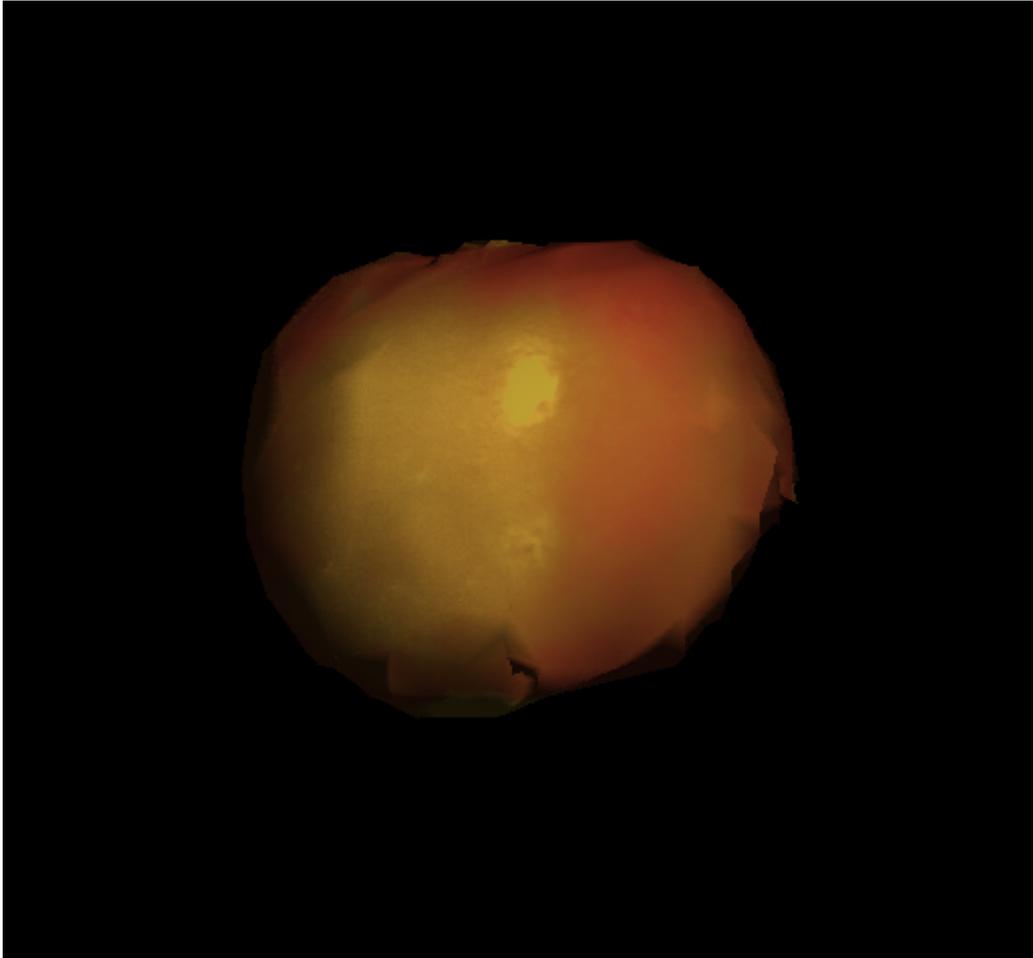


図 4.5 0 時間目の復元画像

## 参考文献

- [1] 山口富士夫: 『実践コンピュータグラフィックス』, 日刊工業新聞社, 東京, (1987)
- [2] 久保田洋孝, 眞鍋佳嗣, 井口征士, “ 果物の光学特性の時間変化の計測と表現 ”, 「画像の認識・理解シンポジウム (MIRU'98)」 (1998)

## - 第 5 章 -

### 結論

## 5 結論

最後に本研究の内容をまとめ、考察の結果生じた問題点を示す。

### 5.1 まとめ

果実表面の色情報をモデル化し表現するために、その時間変化の計測及び分析、パラメータ化を行った。

まず測定対象をトマトとしてその表面の分光反射率の時間変化を測定した。この分光反射率の時間変化のグラフから緑色の部分が減少し赤色の部分が増加するという変化が観測できた。

つぎにこの測定値を主成分分析及び重回帰分析によって統計的に分析した。主成分分析においては2つの主成分で分光反射率の変化を表現できる事がわかった。また第一主成分によって色の変化という特徴がよく表現されていた。重回帰分析では主要成分と思われる4つの色素の分光吸収度を基に分析を行った。しかし物理現象と照らし合わせてみると、良い結果は得られなかった。

更に反射光の色を色度図上に投影しこの変化を調べた。これから色度図上での変化が直線で表される事が観測できた。この事からトマトの表面色が光源以外のある2色で表現出来る事が分かった。

そして、これらの分析の結果をもとにしてRGB画像とスペクトルの時間変化から、分光反射率で表現される画像を生成した。トマトの表面色がある2色の線形和で表現できる事とRGB画像が色度情報を持つ事を利用して、RGB値と反射光のスペクトルを対応付けて分光反射率による画像を生成した。

最後に、この生成した画像と3次元モデルからテクスチャマッピングによってCGによる再現を行った。またこれを実際にRGB画像で撮影した画像と比較しその類似性を確認した。

### 5.2 問題点

まず上げられる問題点は測定対象が自然物体であるため個体差が大きく、品種などによっても特性が異なるので一般化が困難な事である。少なくとも膨大と思われるだけのデータを測定する必要があると思われた。

重回帰分析では実際の物理現象の様子を観測できると考えたが、思わしい結果が得られなかった。これは反射の仕組みを全く考慮していないためで、透過分光吸収度をそのまま用いる事は意味が無いことがわかった。つまり物体内部での反射の仕組みを明らかにし、反射を考慮した色素の分光吸収度を求める必要があると思われる。

分光反射率画像を生成する際の問題点は、まず、もととなるスペクトルデータ

が不十分であった事である。十分なデータが得られていなかったため完全な対応付けが出来なかった。やはり多点で測定してこれを補完し、全ての変化の範囲を網羅する必要がある。予め全ての変化を網羅するデータが必要であるという事はシステム上の問題点と言えるかもしれないが、システムを一般化できればこれを以って余りあるものとなるであろう。

次に問題となるのは RGB 値から 3 刺激値 XYZ への変換である。本研究では試行錯誤で変換行列を求めているので、何ら物理的な確証を持たない。この部分は重要な役割を有するので物理的な理由付けのもとで変換行列を求める必要がある。

RGB 画像から色度情報を抽出する際に問題となるのが表面反射成分である。この成分が無視できない程強い場合、色度図上だけではなく 3 次元色空間においても対応を付けが出来ない。通常どの点で観測しても全く表面反射が入らないようにする事は出来ない。しかし表面反射成分が内部反射成分より十分弱いと仮定してこれを無視する事が出来る。これに対して少なくとも画像内で目に見える程強い表面反射光は明らかに問題となる。なぜなら値に光源の情報が多分に含まれてしまい、物体固有の情報を抽出できないからである。この光源情報を RGB 画像から除去するのは不可能であるため何らかの形で補間する必要がある。実際の方法としては前述のように多角度から測定し相互補完するなどの処理が必要である。またハロゲンランプのような理想的な点光源を用いて表面反射光が広がりを持たないように工夫する事も出来るであろう。

本研究では色度のみの対応付けを行ったが、これだけでは不十分であり明度も含めた 3 次元で対応付けを行わなければならない。例えトマトの表面色が 2 色で表現できるとしても、腐っていく過程などは色度の変化ではなく明度の変化なので当然その情報が必要である。また実験結果の考察でも述べたが色度の違いだけでは表現できないようなイレギュラーな点も存在するので、こういう場合もモデル化できるようにしなければならない。明度も含めた 3 次元での対応付けを行うためには、システムが複雑になる上に実際に可能であるかは非常に疑問であるが、最終的には行わなければならない過程であろう。

## 謝辞

本研究に対して御指導下さった慶応義塾大学理工学部電気工学科の栢木寛教授、小原寛教授に深く感謝申し上げます。

東京大学生産技術研究所において研究の環境を提供して頂き、同時に多くの助言をして下さった池内克史教授に深く感謝申し上げます。また佐藤洋一講師には日頃から度重なる議論の場と多くの助言を与えて頂いた事に感謝致します。加えて東京大学生産技術研究所第3部池内研究室の皆様には研究生活を支えて下さった事に心から感謝致します。

そして慶応義塾大学理工学部電気工学科栢木研究室・小原研究室の先輩方、同輩の皆様には公私にわたって細やかな配慮をいただき研究を支えてくれた事に感謝しています。

最後に研究を行うにあたり精神的な支えとなってくれた両親、兄と妹に心から感謝致します。