

果物を例とした3次元CGによる「瑞々しさ」に関する一考察

迫間 健治^{a)}・檜木 悠生^{b)}・釜坂 岳人^{b)}・坂本 真人^{c)}

A Consideration on "Sweetness" by 3D CG with Fruits as an Example

Kenji SAKOMA, Yusei NARAKI, Taketo KAMASAKA, Makoto SAKAMOTO

Abstract

Today, 3D computer graphics (hereinafter referred to as 3DCG) are overflowing with images and videos around us, and 3DCG is permeating our lives. Recently, 3DCG-related technologies such as 3D printers, AR, and VR have been actively researched and developed, and further progress can be expected in the future. 3DCG is a technology for creating images and videos by generating objects in a virtual three-dimensional space. With this technology, various things have recently been made realistically. However, one of the issues that must be solved in the development of this technology is the reproduction of food. In this study, we focused on this issue, especially on the fruit cut. In this paper, we focused on environmental light, specular reflected light, diffuse reflected light, subsurface scattering, and how to hit and reflect light such as participating media. In addition, the research was conducted in consideration of the conditions such as the material. As a result of the execution, I was able to express fresher than the conventional one. However, since this paper focuses on the cut of fruit, it does not cover the skin of fruit, so research on the skin is also an issue. In the future, we will continue to improve so that it can express the freshness of fruit cuts, and also research to express fruit peels.

Keywords: Computer graphics, Ambient light, Specular reflection light, Diffuse reflected light, Subsurface scattering, Fresnel formula

1. はじめに

今日、私たちの身の回りには3次元コンピュータグラフィックス(以下3DCG)で描かれている画像や映像などがあふれており、私たちの生活の中に3DCGが浸透してきている。最近では、3Dプリンタ、AR、VRなど、3DCGに関連する技術の研究・開発も盛んに行われており、今後3DCGのさらなる進歩が期待できる。3DCGとは、仮想の3次元空間内で物体を生成して、画像や映像を作る技術のことである。これを応用した技術として、CAD、VR、AR、シミュレータ、3Dプリンタなどが開発されている。そのような技術に応用された理由の1つとして、3DCGの持つ表現力の高さが挙げられる。木、金属、プラスチック、ガラスなど様々な物質を表現することができ、また、炎、煙、流体など、特定の形状を持たないものも再現可能になってきている。そうした3DCG技術の研究の1つにデジタルフードというものがあり、将来的な実用化を目指し

て研究が行われているデジタルフードは食品の鮮度管理、廃棄処分、新商品の開発シミュレーションなどに関する問題の解決が期待されているが、3DCGの表現力をもってしても、いまだに困難とされているのが、肉・魚・野菜・果物などの生鮮食品や生花の表現である。3DCGは、生鮮食品や生花などの「新鮮さ」や「有機的な彩色」を表現することが苦手なのである。これは、デジタルフードの研究・開発においても避けて通ることはできず、解決しなくてはならない課題の1つである。私は今回の研究において、3DCGの原理を理解しながら、デジタルフードを作成するために必要な技術とは何かを探求するために、いくつかのソフトを使用して学習を行った。また、学習においては、デジタルフードの課題の1つである「瑞々しい果物の表現」を目標に定め、果実特有の皮の光沢、表面の微細な凹凸、とくに果物の切断面の瑞々しさの表現の再現に注力した。

2. 研究の準備

以下では、下記の項目について説明する。

- ・環境光
- ・鏡面反射光

a) 工学専攻機械・情報系コース大学院生

b) 情報システム工学科学部生

c) 情報システム工学科准教授

- ・ 拡散反射光
- ・ 材質設定
- ・ 表面下散乱
- ・ パーティシペイティングメディア
- ・ フレネルの式

2.1 環境光

環境光^{1,2)}(ambient light)とは、3DCG モデルにマテリアル(材質)を設定するための要素の1つ。情景全体に一定の明るさを与えるものであり、物体間や物体内部における光の反射が生み出す間接光を簡易的に表現したい場合に用いる。3DCG 空間において、光が直接当たらない部分が完全な黒色になることを防ぐ効果がある。

2.2 鏡面反射光

鏡面反射光(正反射)³⁾(specular reflection light)とは、3DCG モデルにマテリアル(材質)を設定するための要素の1つ。モデルの表面に当たった光を完全に反射し、一方向からの光が別の一方向に反射されて出ていく光のことを指す。鏡や光沢のある金属面で多く発生する。

2.3 拡散反射光

拡散反射光^{4,5)}(diffusereflectionlight)とは、3DCG モデルにマテリアル(材質)を設定するための要素の1つ。モデルの表面に当たった光の反射を単純化し、半球状に均一に拡散する光のことを指す。一般の物質の反射では、鏡面反射と拡散反射の両方の成分が含まれ、一般的に反射率の高い物質ほど鏡面反射の成分が多くなる。

2.4 材質判定

材質設定とは、モデリングした物体の色、光の反射率、光の透過率、光の屈折率などを定義する作業のことで、物体の色、半透明性やみずみずしさを表す性質の情報を決定するものである。

2.5 表面下散乱

表面下散乱⁶⁾とは、皮膚や果物といった半透明物質に起こる現象であり、光が物体内部に入り込み散乱する現象のことである。表面化散乱では、ある物体表面上の点 x_i に入った光が物体内で1回ないし複数回反射して別の点 x_o から出てくる。

2.6 パーティシペイティングメディア

パーティシペイティングメディア⁷⁾とは、領域内の微粒子による光の吸収・散乱の割合が大きい領域のことを指す。半透明物質のように領域内での光の散乱や吸収の割合が大きいものはパーティシペイティングメディアとして扱われる。この種のメディアのレンダリングでは、散乱係数と吸収係数によって散乱と吸収それぞれの度合いを制御する。また、位相関数によって、入射角からみて前方と後

方のどちらにどれだけ優位に散乱するかという特徴を表す。位相関数には、入射方向と散乱方向がなす角度の平均値 g をパラメータとした Henyey-Greenstein 関数(L. G. Henyey, 1941)を用いる。 g とは入射方向と錯乱方向がなす角度の余弦とフェーズ関数⁸⁾との積を全球面上で積分した値である。

$$g = \int_{\Omega_{4\pi}} p(x, \vec{\omega}', \vec{\omega}) \cos\theta d\vec{\omega}$$

$$p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g\cos\theta)^{3/2}}$$

2.7 フレネルの式

フレネルの式⁸⁾とは、界面における光のふるまい(反射・屈折)を記述した式である。屈折率の異なる媒質の境界で、入射した光のエネルギーのうち、どれだけ反射し、どれだけ透過するのを計算することができる。フレネルの式は以下

$$t_p = \frac{2n_A \cos\alpha}{n_B \cos\alpha + n_A \cos\beta} = \frac{2\sin\beta \cos\alpha}{\sin(\alpha + \beta)\cos(\alpha - \beta)}$$

$$r_p = \frac{n_B \cos\alpha - n_A \cos\beta}{n_B \cos\alpha + n_A \cos\beta} = \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)}$$

$$t_s = \frac{2n_A \cos\alpha}{n_A \cos\alpha + n_B \cos\beta} = \frac{2\sin\beta \cos\alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$r_s = \frac{n_A \cos\alpha - n_B \cos\beta}{n_A \cos\alpha + n_B \cos\beta} = -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)}$$

下のように表される。

フレネルの式で出てくる、 t_p 、 t_s はそれぞれ、 p 偏光と s 偏光の振幅透過率であり、 r_p 、 r_s はそれぞれ、 p 偏光と s 偏光の振幅反射率である。また、エネルギー透過率 T に関するフレネルの式は、振幅の2乗から求められる。エネルギー反射率およびエネルギー透過率を以下に示す。

$$T_s = \frac{n_B \cos\beta}{n_A \cos\alpha} t_s^2, T_p = \frac{\tan\alpha}{\tan\beta} t_p^2$$

$$R_s = r_s^2, R_p = r_p^2$$

3. 瑞々しい果物の表現

果物の切断面に瑞々しさを持たせるためには、図 1(a)にみられるような、切断面の特徴を表現することが必要になる。

切断面の大きな特徴として、

- ・ 果汁によって濡れている
- ・ 果汁が溢れ出た後に残る細胞壁による細かい凹凸がある
- ・ 果肉が透き通っているの3点があげられる。

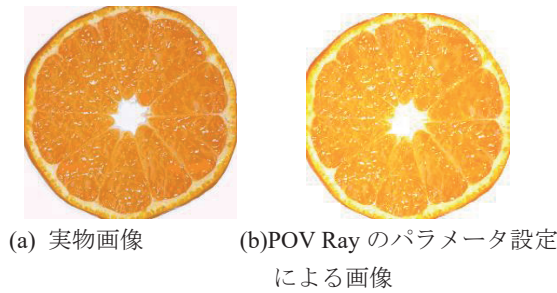


図1 みかんの比較画像

これは、対象やその部位による水分量の違いは見られるものの、多くの対象に共通する特徴である。図1(b)はPOV-Rayにおいてパラメータ調整を行ったものである。ここで使用したパラメータは ambient : 0.60, diffuse : 1.00, specular : 1.00, brilliance : 0.60, roughness : 0.01, ior : 1.33 である。これらのパラメータとはCGにおける光の要素であり、上から環境光や拡散反射光、鏡面反射光、光沢、表面の粗さ、屈折率で、材質設定を定義したパラメータである。図1(b)の画像は、瑞々しさの表現としては不十分であるが、図1(a)と比べ、新鮮さや水分の表現においてより瑞々しさを感じられる働きを示した。

4. 果実断面のモデリング

本研究では、果実断面が空気・果汁・果肉から構成されると考える。果汁のレイアは空気のレイアと果肉のレイアに比べて十分厚さが薄いため、果汁層での散乱は発生しないものと仮定する。また、果汁層での透過光および果肉層での表面下散乱光は、そのまま果肉層および空気に到達すると考える。果肉に入射した光は、果肉層で散乱したのちに入射点と異なる位置から放射される。本研究で提案する果実の切断モデルを図2に示す。

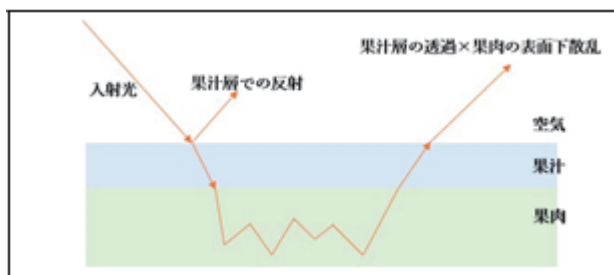


図2 提案する果実断面モデル

図2より、物体内部への伝達を考慮する伝播放射輝度と、液体表面で反射を考慮する反射放射輝度を足し合わせることで、表面の放射輝度が得られる。

4.1 透過モデル

透過モデルでは、果汁層で透過する光の量を求める。空気および果汁の屈折率をそれぞれ n_1 、 n_2 また入射光を ω_i としたとき、透過量 I_t は、

$$I_t = I_L * (1 - \frac{1}{2} F_r(\vec{\omega}_i, n_1, n_2))$$

と表すことができる⁹⁾。 I_L は入射光の輝度を表し、 F_r はフレネル反射を表しており、 p 偏光と s 偏光のエネルギー反射率の平均をとったものである。

4.2 反射モデル

反射モデルでは果汁層で反射する光の量を求める。また、反射モデルとして、拡散反射モデルと鏡面反射モデルの2つに分けて考える。この2つの光の輝度を足し合わせることで、反射放射輝度を求めることができる。

4.2.1 鏡面反射モデル

鏡面反射モデルでは、鏡面反射係数 ρ_s を用いて、鏡面反射輝度 I_r を以下の式で表す。

$$I_r = I_L * \rho_s * F_r(\vec{\omega}_i, n_1, n_2)$$

4.2.2 拡散反射モデル

拡散反射モデルでは、ランバート反射モデルを用いる。ランバート反射¹⁰⁾とは、拡散反射表面を理想的に扱ったモデルである。この反射は、面の正規化法線ベクトル N と面から光源を指す正規化ベクトル L の内積を使って計算し、入射光の輝度を掛け合わせたものである。

ランバート反射モデル、拡散反射係数 ρ_d を用いて、拡散反射輝度 I_d を以下の式で表す。

$$I_d = I_L * \rho_d * F_r(\vec{\omega}_i, n_1, n_2) * N * L$$

5. 表面下錯乱モデル

表面下散乱は双方向散乱面反射率分布関数(BSSRDF: Bidirectional Scattering Surface Reflectance Function)を用いて表せる。BSSRDFとは、ある点に入射した光が物体の内部で散乱し、入射点とは異なる場所から外部に射出する光の輝度を表す関数である。物体表面の入射位置、方向、射出位置、方向で記述される関数である。本研究では表面下散乱のモデルとしてダイポールモデルを使う。このモデルでは、内部の散乱が入射光と射出光の方向に依存しないと仮定することで、 $f_{BSSRDF}(x_i, \omega_i, x_o, \omega_o)$ を以下のように分解できる。

$$f_{BSSRDF}(x_i, \vec{\omega}_i, x_o, \vec{\omega}_o) = \frac{1}{\pi} F_t(\eta, \vec{\omega}_i) R_d(x_i, x_o) F_t(\eta, \vec{\omega}_o)$$

ここで、 $F_i(\eta, \omega_i)$ は相対屈折率 η の境界面に対し、角度 θ 方向に光が透過する際のフレネルの式である。また、 $R_d(x_i, x_o)$ は、距離 $r = \|x_i - x_o\|$ 離れた2点間での入射光と射出光の減衰を表す散乱項であり、次式で近似される。

$$R_d(r) = \frac{\alpha}{4\pi} \left\{ z_r \left(\sigma_{ir} + \frac{1}{d_r} \right) \frac{e^{-\sigma_{ir} d_r}}{d_r^2} + z_v \left(\sigma_{ir} + \frac{1}{d_v} \right) \frac{e^{-\sigma_{ir} d_v}}{d_v^2} \right\}$$

このとき、各変数は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} d_r &= \sqrt{r^2 + z_r^2}, d_v = \sqrt{r^2 + z_v^2} \\ z_r &= \frac{1}{\sigma'_t}, z_v = z_r \left(1 + \frac{3}{4} A \right) \\ A &= \frac{1 + F_{dr}}{1 - F_{dr}} \\ F_{dr} &= -\frac{1.440}{\eta^2} + \frac{0.710}{\eta} + 0.668 + 0.0636\eta \\ \sigma_{ir} &= \sqrt{3\sigma_a \sigma'_t} \\ \sigma' &= \sigma'_s + \sigma_a, \sigma'_s = \sigma_s(1 - g) \\ \gamma &= \frac{\sigma'_s}{\sigma'_t} \end{aligned}$$

ここで、 σ_s と σ_a はそれぞれ散乱係数、吸収係数と呼ばれるパラメータであり、 g は2章で記述した散乱の等方性を決めるパラメータ、また相対屈折率 η を含めた4つがパラメータとなる。

6. 実行結果

実装環境として、OpenGLとVisualC++を使用し、予備的にモデルとしてStanford Bunnyを用いた。比較画像として、図3(a)は色以外の材質は設定していないもので、図3(b)は本手法を用いたものである。

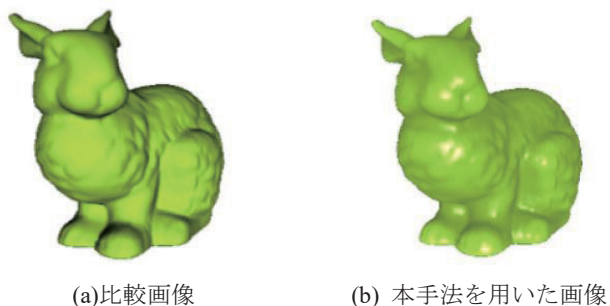


図3 「瑞々しさ」の表現結果

図3(a)と図3(b)を比べると、図3(b)のほうが、半透明性と瑞々しさといった表現ができていることがわかる。

7. 考察

本研究では、果物や野菜のもつ「瑞々しさ」に着目し、その表現手法を提案した。今回提案した果実断面モデルは

単純な透過、反射モデルを用いたが、それでも「瑞々しさ」の表現に関して十分な結果を残したと考える。しかし、今回は切断面だけに着目しているため、果実の外皮の表現にはまた別の方法が必要であると感している。

7.1 今後の課題

今後インタラクティブに結果画像を生成する文献¹⁾のようなインターフェースへ本手法を組み込むことで、瑞々しい果物や野菜を対話的に描けると考えられる。ほかにも表面の粗さを表現した様々な反射モデルや透過モデルがあり、それらを取り入れることでより実物に近づけられると考えられる。今回は切断面に着目した研究を行ったが、果物の外皮などをよりリアルに表現する研究²⁾なども進められており、それらと組み合わせることでより再現できると考えられる。また、果物一つ一つに適切なパラメータを見出すことができれば、デジタルフードは実物の写真と見違えるようなリアルなものに近づくと考える。今後、そのような方面でも研究を進める必要がある。

8 まとめ

今回の研究を進める中で、リアリティを追求した表現には、3DCGの技術的な課題の解決だけでなく、3DCGの制作工程上の工夫も必要なのだと感じた。CGの基礎となる技術が開発されてから現在まで、およそ50年の間に、CG技術は急速な成長を遂げ、3DCGという技術が開発されるまでに至ったが、未だに解決すべき課題が多く残されている。表現を替えると、3DCGはこれからも進歩する可能性を持った発展途上の技術ということである。また、3DCGを応用したARやVRといった分野が現在急速に普及している。新しい分野が出てきた今、これまでとは違う見方ができ、また新しい3DCGの進化が期待できる。

参考文献

- 1)坪井遼. 果物を例とした3次元CGによる鮮度の写実的描写に関する一考察. 宮崎大学, 2016, 卒業論文.
- 2)株式会社ボーナデジタル, 「ambient-CG用語辞典」『CGWORLDEntry.jp』. アクセス日 2020/1/24.
- 3)小室日出樹, (2000). POV-Rayで学ぶ実習コンピュータグラフィックス. アスキー出版局.
- 4)ジャパンセンサー株式会社.
[Online].<https://www.japansensor.co.jp/faq/968/index.html>.
アクセス日 2020/1/25.
- 5)株式会社ボーナデジタル, 「diffuse-CG用語辞典」『CGWORLDEntry.jp』. アクセス日 2020/1/24.
- 6)hiroshi harada. Blender入門.
[Online].<https://www.blender3d.biz/contactus.html>.
アクセス日 2020/1/29
- 7)倉地紀子. (2008). 『CG Magic: レンダリング』. オーム社.
[Online].https://www.mext.go.jp/content/1407196_21_1_1_

- 2.pdf
- 8) Max Born and Emil Wolf, Principles of Optics, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- 9) H. W. Jensen et al. "Rendering of Wet Materials," Proceedings of the Seventh Eurographics Workshop on Rendering, pp. 273-282, 1999.
- 10) Warren J. Smith. Modern Optical Engineering. McGraw-Hill. pp. 228-256.3) 文部科学省:「産学官連携による人の地域循環教育プログラムの研究開発」,(access 2020.02.12). [Online]. https://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/detail/_icsFiles/afieldfile/2019/09/11/1420971_20.pdf