

奥行きを考慮した虹の表現

菊池 愛美* 伊藤 貴之**

*お茶の水女子大学大学院 人間文化研究科 数理・情報科学専攻

** お茶の水女子大学 理学部 情報科学科

E-mail: manami@itolab.is.ocha.ac.jp

虹は自然現象の中でも発生条件の厳しいものであるが、映画やドラマ等の映像で用いられることが多い。虹は、空気中の水滴内部での光の反射によって起こる現象であり、この光反射をモデル化することで、CGによる表現が可能である。しかし、CGによって表現された虹を撮影映像に合成する技術に関しては、まだ議論の余地があると考えられる。

本報告では、CGで生成した虹を実写画像に合成する手法を提案する。提案手法では、まず実写画像に撮影された各物体の奥行きを仮想することで、3次元仮想空間を構築する。続いて、ユーザによって定められた位置に虹が見られるように、太陽光線方向を設定し、また3次元仮想空間全体に対して大気中の水滴分布を設定する。そして、実写画像における各画素について、空気中の水滴内部を反射して視点に到達する虹の光の強度を算出する。以上の処理手順により、視点と背景物体との距離による虹の見え方の違いを表現する。

Expression of rainbow considering depth

Manami KIKUCHI* Takayuki ITOH**

*Major of Mathematics and Computer Science, Course of Humanities and Sciences,
Ochanomizu University Graduate School

** Department of Information Sciences, Faculty of Science,
Ochanomizu University

Rainbow is often seen in movies or dramas; however weather condition for seeing rainbow is severe. The rainbow is a phenomenon that happens due to the reflection of light in water drops in the air. It is possible to represent it by computer graphics (CG) by modeling the light reflection. However, there are some issues on the synthesis of the rainbow represented by computer graphics onto real photograph images.

This report proposes a technique for synthesizing the rainbow generated by computer graphics to real photograph images. In the proposed technique, a three-dimensional virtual space is constructed by assigning depth values for each object taken in the photograph images. Sunlight direction and water drop distribution is then set to the three-dimensional space, so that the rainbow is rendered at the desired position in the photograph image. Brightness and color of light of the rainbow that reflects inside the water drops are then calculated for each pixel of the photograph image. The technique realizes the representation of various rainbows depending on the distances between a viewpoint and objects taken in the photograph image.

1. はじめに

自然現象のCG表現手法の中には、大気中の現象をモデル化したものが多く見られる。例えば雲や霧は、大気中の水滴による光の散乱をモデル化することでCG表現が可能である[1]。また例えば、歴気楼や逃げ水などは、大気中の光の屈折をモデル化することでCG表現が可能である[2]。これらの現象をCG表現する手法の多くは、視線方向に沿って光の振る舞いを追跡している。

一方、映画やドラマ等の実写撮影のシーンに自然現象を表現したいときがある。しかし、思い通りの自然現象がいつでも見られるわけではないので、CGとの合成が利便性に適うと思われる。しかしこのようなCGによる表現を撮影映像に合成する技術に関しては、まだ議論の余地があると考えられる。その一つの論点として、実写画像には奥行き情報がないので、そのままでは視線方向に沿った光の追跡ができない、という点があげられる。逆に言えば、実写画像から奥行き情報を推測し、視線方向に沿った光の追跡ができるような仮想3次元空間を作れば、この問題が解決できると考えられる。

そこで本研究では、CGで生成した自然現象を実写画像に合成する一手法を提案する。本研究では、自然現象の中でも虹の表現について試みることにする。虹は、自然現象の中でも発生条件が厳しい現象の1つとして知られている。虹は空気中の水滴内部での光の反射によって起こる現象であり、この光反射をモデル化することで、CGによる表現が可能となっている。本手法では、実写画像に撮影された各物体の奥行きを仮想することで、3次元仮想空間を構築する。また、実写画像の背景物体よりも前方にある水滴の内部を反射して、視点に向かう虹の光の総量を、視点から背景物体までの線積分によって算出する。これにより、水滴源や背景色などの状況に応じて違った見え方をする虹を表現できると考えられる。例えば雨上がりの虹と噴水の周りに見える虹の違い、近くの建築物にかかる虹と空にかかる虹の違い、などを表現できる。

2. 関連手法

2.1 虹の表現

虹は、大気中の水滴内部で反射した光が、波長による屈折率の違いによって分光して目に届く現象である。有名なものに、水滴中で1回反射した光線による主虹と、2回反射した光線による副虹がある。図1は主虹をもたらす分光の仕組みを、図2は副虹をもたらす分光の仕組みを図示したものである。平行光源の光線方向、および視点位置が決定されると、主虹や副虹の見られる方向は決定される。主虹は光線方向と視線方向が40~43度の

角度をなす方向に見られ、副虹は光線方向と視線方向が約50度の角度をなす方向に見られる、ということがわかっている。

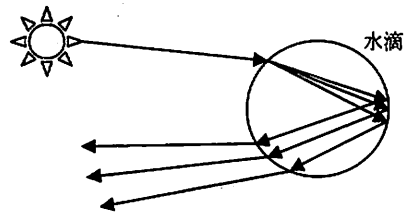


図1：主虹をもたらす水滴中の光の反射

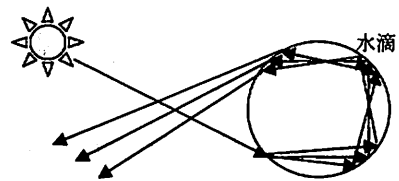


図2：副虹をもたらす水滴中の光の反射

この仕組みを幾何光学の問題としてモデル化し、CGで虹を表現した初期の研究に、伊藤ら[3]による研究がある。この研究では、生成画像を構成する画素ごとに、視線と光線となす角度を算出し、虹が見られる条件を満たす画素においてその色彩を算出することで、虹を表現している。

また最近では芳信ら[4]が、幾何光学の代わりに波動光学の問題として虹をモデル化することで、主虹、副虹だけではなく過剰虹も表現する手法を提案している。文献[4]は虹と実写画像の合成にも言及し、その合成時の係数を自動決定する方法を提案している。文献[4]と違い、本報告では実写画像の奥行き方向を考慮することで、水滴源や背景色に応じて違った見え方をする虹の表現を目指すものである。

2.2 画像への奥行き情報の付加

実写画像に写る物体の3次元形状や奥行き値を算出する手法は、コンピュータビジョンの分野では旧来から研究が進んでいる。初期手法の多くは、2枚以上の画像に写る物体の対応点の位置関係から、その3次元形状や奥行き値を算出するものであった。しかし最近になって、主にイメージベースドレンダリングを目的として、1枚の画像に写る物体の3次元形状や奥行き値を推定する手法が、多く報告されている。

この中でも非常に有名な手法に、Horryらが発表したTour Into The Picture [5]がある。この手法は、入力画像の構図から想定される消失点などを手がかりにして、入

方画像を6面体の箱の内側に貼り付けることで、入力画像の各部位に奥行きを与える。また Derek らが発表した Automatic Photo Pop-up [6]も同様に、入力画像の構図を手がかりにして、入力画像中の物体を屏風状の面に貼り付けることで、入力画像に写る構図を3次元化する。

これらの手法と比較して、本報告の目的に近い手法として、Oh らが発表した Image-based Modeling and Photo Editing [7]に採用されたレイヤー化処理があげられる。この処理では画像上に手書きされた物体境界線などを手がかりにして、画像中の部位をいくつかのレイヤーに分割して、仮想3次元空間を構築する。この結果として、入力画像を構成する各画素に奥行き値を与えることができる。この手法は、文献[5][6]に提案された手法のように、画像に写る物体を画一的に平面に貼り付けるのではなく、物体ごとに分類してレイヤー化できるという意味で、本報告における虹の表現にも有効に適用できるものと思われる。

また他の手法として、計測によるものがあり、代表例として Criminisi ら[8]や Liebowitz ら[9]によるものがある。しかし、これらの手法では仮想3次元構築のために、ユーザとの綿密な対話を必要とする。

3. 提案内容

図3および図4は本手法の処理手順を示したものである。本手法では、まず実写画像に写る物体の奥行き値を入力することで、3次元仮想空間を構築する。続いて3次元仮想空間中の水滴分布、太陽光線の方向、などを決定する。そして、これらを参照して虹を生成し、最後にこれを実写画像と合成する。以下、この処理手順を構成する各処理について述べる。

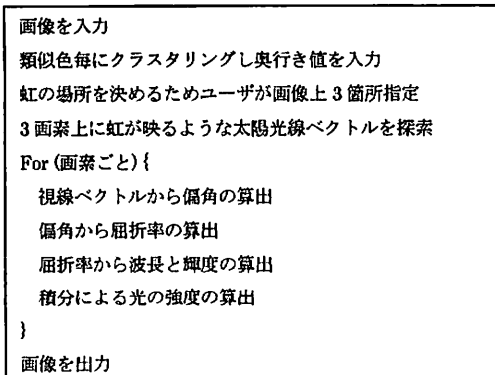


図3：本手法の処理手順（擬似コード）

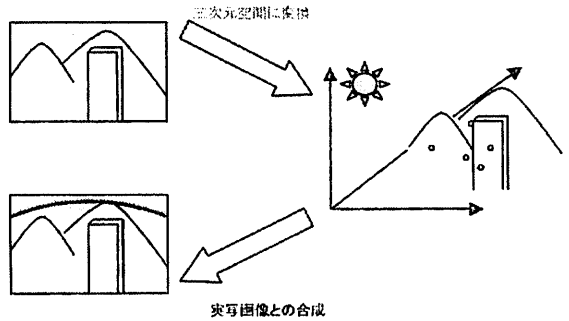


図4：本手法の処理手順

3.1.3 次元仮想空間の構築

現時点の実装では、まず k-means 法を用いて実写画像の画素値をクラスタリングし、代表色を得る。本手法では代表色ごとに奥行き値を入力することで、実写画像から3次元空間を構築する。本報告では以下、実写画像の水平方向を x 軸、垂直方向を y 軸、奥行き方向を z 軸とし、視点を原点とする 3次元直交座標系で表現される 3次元仮想空間を扱うものとする。

天空などの背景、山などの遠方物体、家や人などの近隣物体、などが異なる色彩で写っている画像の場合には、代表色ごとに奥行き値を入力することで、概略的な 3次元仮想空間を得ることができる。ただし、実写画像の代表的な物体どうし、あるいは物体と背景が同じ代表色で括られる場合には、不具合を生じることがある。この点は改良が必要である。

3.2 虹を表現するための入力情報の決定

虹の明るさは空気中の水滴量によって決定される。本手法では空気中の水滴量を、3次元の分布関数 w で設定する。雨上がりの虹を表現するには、広域にわたってある程度一様な水滴量をもつような分布関数を設定する。滝や噴水のまわりの虹を表現するには、局所的に非常に濃い水滴量をもつような分布関数を設定する。

虹の見える方向は太陽光線の方向によって決定される。しかしユーザビリティを考えると、光線方向を入力したら虹の見える方向が決定される、というインターフェースが必ずしも好まれるとは限らない。むしろ、デザイナーが意図する「虹を表現したい実写画像上の位置」を先に指定し、その指定に沿った条件を計算機が自動設定する、という手法のほうが好まれる場合もあると考えられる。

本手法ではこの考え方を採用し、まずユーザに「虹を表現したい実写画像上の位置」を対話的に3箇所指定さ

せる。この3箇所の画素に対応する3次元仮想空間上のx座標値およびy座標値を $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ とする。また、これら3画素のz座標値はいずれも、スクリーンの奥行き値となる。以下、この奥行き値をzとする。このとき、スクリーンの奥行き値は入力画像の画角を考慮するものとする。視線から出発して、ユーザが指定した画素を通過する方向ベクトル(視線ベクトル) $\vec{e} = (x, y, z)$ と、太陽光線ベクトル $\vec{s} = (s_x, s_y, s_z)$ とのなす偏角 d は、以下の数式で算出される

$$d = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{e}|^2 + |\vec{s}|^2 - |\vec{e} - \vec{s}|^2}{2|\vec{e}||\vec{s}|} \right) \quad (1)$$

また虹が見られる条件により、以下の不等式が成立する。

$$40 \leq d \leq 43 \quad (2)$$

ユーザが指定した3画素について、 d が式(5)を満たすような太陽光線ベクトル $\vec{s} = (s_x, s_y, s_z)$ を計算し、3画素すべてにおいて式(2)を満たす太陽光線ベクトルを列挙する。

この「ユーザが指定した数箇所を通過する虹が見られる」という条件を満たす光線方向は、一般的には一意に定まらない。そこで本手法では、この条件を満たす光線方向の例をいくつか提示し、その中からユーザが光線方向を選択する、という方法をとる(図5参照)。

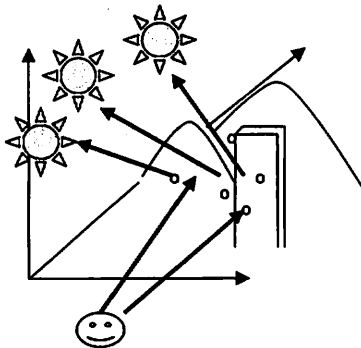


図5：虹と太陽の方向

3.3 各画素の輝度の算出

虹が見られる画素において、水滴内部を反射して視点に届く光の波長は一定である。また波長は屈折率の関数であり、屈折率は偏角の関数である。そこで提案手法では、まず各画素に対して偏角を算出し、そこから屈折率、波長、の順に算出する。

まず各画素に対して、前節に示した方法で決定した太

陽光線ベクトル $\vec{s} = (s_x, s_y, s_z)$ と視線ベクトルの偏角を求める。主虹を表現する場合には、この偏角が40~43度となる画素には虹が映る。算出された偏角がこの範囲内でない場合には、この画素には虹が映らないので、以下の処理を省略する。

続いて、各々の偏角に対して、その画素において水滴内部を反射して視点に到達する光線に対応する水の屈折率を産出する。ここでは、主虹をつくる偏角の範囲40~43度から可視光線に対する水の屈折率の範囲1.331~1.343が導出されるような変換式を導入する。

続いて、その画素において水滴内部を反射して視点に到達する光線の波長を算出する。ここでは、屈折率と波長は反比例する性質を利用して、屈折率の範囲から波長の範囲380~780[nm]が算出されるような変換式を導入する。

以上の手順により、水滴内部を反射して視点に到達する光の波長を、各画素に対して算出することができる。こうして算出された波長から、視点に到達する光の色相を算出する。ここで光の色相は波長に対する連続関数として算出が可能である(図6参照)が、現時点での実装では、波長に対応する色相値をあらかじめ格納した配列を用いて、それを補間して算出している。



図6：可視光線

3.4 虹の色相と強度の算出

続いて、各画素の奥行き値と、空気中の水滴量の分布関数を用いて、虹を構成する光の強度を算出する手順を説明する。本手法では、3.3節にて説明した手法で光の波長を算出した際に、この波長が可視光線の範囲内にあるときには、以下の処理によって光の強度を算出する。

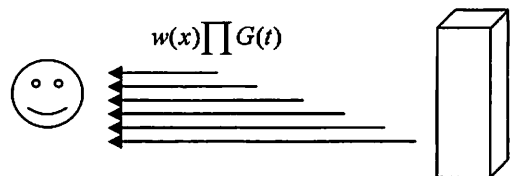


図7：ある視線方向における光の強度の割合

図7は、太陽光が水滴内部で反射してできる虹の光線

と読み取った実写画像の物体からの光線を表したものである。

ここで水滴濃度を $w(x)$ 、光が減衰せずに通過する割合を $G(x)$ とする。 x は視線上の位置を表すものとする。水滴濃度と減衰率は位置の関数で表せるので、 x における水滴が視点光の強度は、式(3)に比例する値になる。

$$w(x) \prod G(t) \quad (3)$$

視点に届く光の強度は、視線上の視点から背景物体までの各位置における水滴の反射光の強度の総和になる。式(1)を視点から背景物体まで積分する式(4)により、視点に届く光の強度を得ることができる。

$$\int_0^d w(x) \prod G(t) dx \quad (4)$$

ここで d は背景物体までの距離、または水滴を反射した光が視点に届く量が無視できるほど小さくなる距離である。

以上の処理によって算出された虹の色相と強度を用いて、虹の画素値を算出し、文献[4]に示す手法などを用いて実写画像の画素値と合成する。

入力画像と同じ大きさで虹のみが表示された画像と入力画像を適合させる。その際、各画素の輝度が 255 を超えないように調節する必要がある。各画素において、RGB 値を足し合わせどれか 1 つでも 255 を超えた場合、3 つの値の中の最大値が 255 になるような処理を施すことにする。

4. 実行結果

図 8 は、視点の後ろから太陽光線が差し込んでいることを想定して、実写画像に虹を合成したものである。虹は手前の木の奥に分布する水滴によって発生しており、木と重なっている部分は木に隠れて見えなくなっている。なお、図 8 は主虹のみを表現した実行例となっているが、反射回数を変更することで、副虹についても表現できると考える。

図 9 は、実際にカメラで撮影した虹である。この実写画像を実行結果と比較すると、実写された虹のほうが太い幅をもち、また色の境界が不鮮明であるように見える。この理由は、以下の通りであると考えられる。空気中の水滴を反射して視点に到達する光線の一部は、その過程において空気中の浮遊物の反射や屈折を受ける。この結果として、虹を構成する光線には小さな乱反射が見られ、結果として幅が膨張し、色がにじみあって不鮮明になる

と考えられる。虹のリアリティをさらに追求するためには、このような効果を表現できるような改良が必要であると考えられる。

5. むすび

本報告では、ユーザとの対話によって実写画像に CG で生成した虹を合成する表現手法を提案した。

今後の課題として、以下の点が挙げられる。

- 滝や噴水など、さまざまな場面における虹の表現
- ユーザが指定した虹発生の条件と、画像内の天候などの状況の矛盾の発見
- k-menas 法に用いる代表色数、画像中の物体の奥行き値、などの自動設定
- k-means 法以外の画像処理方法
- 虹以外の自然現象への適用

参考文献

- [1] Nishita T., Dobashi Y., Nakamae E., Display of Clouds Taking Account Multiple Anisotropic Scattering and Sky Light, ACM SIGGRAPH '96, pp. 379-386, 1996.
- [2] 齋藤, 牧野, 大石, レイトレーシング法を用いた異方性不均質透明体の表現, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J76-D-II, No.8, pp.1755-1762, 1993.
- [3] 伊藤, 牧野, 齋藤, 大石, コンピュータグラフィックスにおける分光モデルに関する検討, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J75-D-II, No. 11, pp.1986-1989, 1992.
- [4] 芳信, 金田, 「波動工学に基づく虹のレンダリングと背景実写画像との合成」, 信学技報 ITS2004-77, IE2004-211, pp. 65-70, 2005.
- [5] Horry Y., Anjo K.-I., Shin S., Tour into the picture: using a spidery mesh interface to make animation from a single image, ACM SIGGRAPH '97, pp225-232, 1997.
- [6] Derek H., Alexei A.-E., Martial H., Automatic Photo Pop-up, ACM SIGGRAPH '05, 2005.
- [7] B. M. Oh, M. Chen, J. Dorsey, F. Durand, Image-Based Modeling and Photo Editing, ACM SIGGRAPH '01, p433-442, 2001.
- [8] A. Criminisi, I. Reid, A. Zisserman, Single View Metrology, journal of Computer Vision 4, 2, pp123-148, 2000.
- [9] D. Liebowitz, A. Criminisi, A. Zisserman, Creating architectural model from images, Proc. Eurographics, vol.18, pp39-50, 1999.

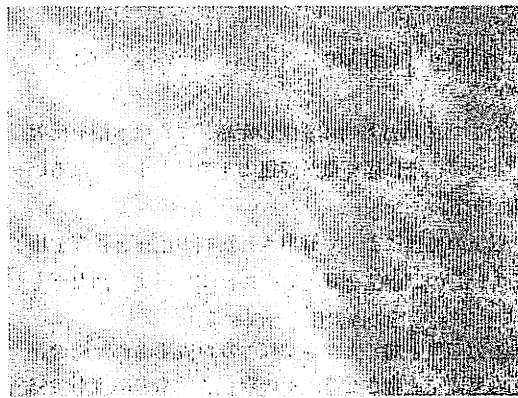
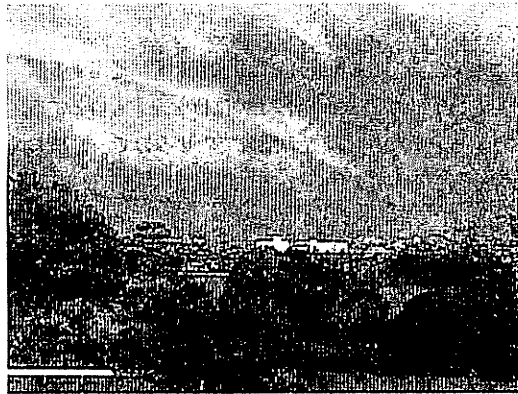


図 9 : 虹の実写画像



図 8 : 実行結果