

ポリウムレイトレーシングを用いた逃げ水現象のシミュレーション

5U-2

曾我 有紀子 中島 久美 川田 亜矢子 市川 哲彦 佐藤 浩史 藤代 一成

お茶の水女子大学 理学部

1 はじめに

我々の身近に観測される逃げ水現象は、蜃気楼の一種で、温度勾配の激しい空気によって光が屈折し起こる現象である。従来のレイトレーシングは真空が前提であるが、M.Bergerらは、空気層を、屈折率の違う何枚もの薄いガラスの層を重ね、ゆらぎやノイズを付加することで疑似的に表現し、蜃気楼らしい景観を創成することに成功している[1]。しかし、彼らの方法では空気中の屈折率を固定しているため、より現実的な蜃気楼や陽炎を表現するためには、人為的な視覚効果を加えなければならない。そこで本研究では、空間をボクセルに分割し、空間各点での光の挙動を集積できるポリウムレイトレーシングを用い、与えるポリウムデータを時間依存させることによって、物理的原理に合致した逃げ水の表現と陽炎の生成を同時に試みる。

本稿は以下のように構成されている。次節でまず逃げ水現象の物理的原理を述べた後、3節ではポリウムレイトレーシングを用いる理由、4節では具体的な画像生成の手続きを示す。最後に、結果の画像を考察し、今後の展望を述べて本稿を閉じることにする。

2 逃げ水現象の原理

蜃気楼は、気温や気圧などの要因で、空気の密度に変化が起こり、この空気を通過する光が屈折することにより引き起こされる自然現象である。屈折率の複雑・微妙な違いによって様々な形の蜃気楼が生成されるが、本研究では蜃気楼の中でも下位蜃気楼に限って考察を進める。下位蜃気楼の起こる条件は、地表面に近いほど屈折率が低くなるような空気層が生成されることである。

Volume Ray Tracing of Inferior Mirages
Yukiko SOGA, Kumi NAKAJIMA, Ayako KAWADA,
Yoshihiko ICHIKAWA, Hiroshi SATO, and Issei FUJISHIRO
Faculty of Science, Ochanomizu University

光は冷たい空気（屈折率大）の方向へ曲がる性質を持っているので、対象物体を出た光は下に凸のカーブを描き視点に入る。この結果、実像の下に像が映り地面がぬれているようにみえる[2]。これがいわゆる「逃げ水」である。しかし、厳密にいうと、これらの層の境界では絶えず対流が起こっており、屈折率の違う空気が複雑に混ざり合うことから、同時に「陽炎」も生成される。本稿ではこれを含め逃げ水現象と呼ぶ。

3 大気モデルとポリウムレイトレーシング

M.Bergerらは、従来のレイトレーサーを用いて、蜃気楼を作り出した[1]。そこでは、空気層が、屈折率の違う何枚ものガラス板の層を重ねることで表現されている。しかしガラス板では、空気層の境界または内部での対流による微妙な変化や、時間による温度・屈折率の変化には対応できない。そこで、本研究ではポリウムレイトレーシングに空気中の屈折率のポリウムデータを与えることで、自然科学の知見に基づく蜃気楼のシミュレーションを試みる。すなわち、空間をボクセルに分割し、各ボクセルに屈折率データを与える。その内部の屈折率は、trilinear補間により求めることとし、空気層内部の屈折率の微妙かつ複雑な差も表現できるようにする。また、屈折率ポリウムデータを時間依存させることで、一時的な空気の濃淡のむらによって生じる陽炎も表現可能となる。屈折率のポリウムデータは、熱拡散方程式、大気の気温と屈折率との関係を表す関数[3]を用いることから得られる。なお、反射・回折・散乱に関しては、屈折と比較し、現象に与える効果が微小であるために、本研究においては考慮しないこととする。

従来のレイトレーシングで扱う3次元空間は真空が前提であったが、オブジェクトのない空間においても空気のような媒体の存在を考慮するポリウムレイトレーシングは、自然現象のよりフォトリアリスティックな表現を可能にする有効な技法の一つと考えられる。

4 逃げ水画像生成の手続き

本節では、逃げ水画像を生成するための手続きを示す。4.1では、ボリュームデータを得る方法について述べ、4.2ではボリュームレイトレーシングを用いた具体的な逃げ水画像の生成法を示す。

4.1 屈折率ボリュームデータの計算

- Step1: 蜃気楼が実際に生じる環境の温度（初期条件、境界条件）を与える
- Step2: 熱拡散方程式より時刻 t における温度の3次元分布を得る
- Step3: 屈折率のボリュームデータ $n(x, y, z, t)$ を Step2 の温度データから計算により求める [3]

4.2 逃げ水画像の生成

- Step1: 空間を直交メッシュに分割し、各ボクセル (x, y, z) には 4.1 で求めた屈折率データ $n(x, y, z, t)$ を与える
- Step2: 視線から、ある Pixel を通過する RAY を発生させる
- Step3: 一定の間隔で RAY を区切り、1番近い点における屈折率を、その点の含まれるキューブの8頂点ボクセルのデータを trilinear 補間することにより求める
- Step4: RAY の屈折計算を行ない、そこから再び RAY を進める
- Step5: Step3 から Step4 を、RAY が物体にあたるか、もしくは一定回数行なうまで繰り返し、レイトレーシングのアルゴリズムに基づき、Pixel を発色する
- Step6: Step2 から Step5 を全ての Pixel について繰り返して行なう

以上の 4.1, 4.2 を時刻 t を変化させることにより、蜃気楼の時間的な変化や陽炎の効果を表現する。なお、本研究の基礎となるレイトレーシングプログラムは、文献 [4] から採用した。

5 シミュレーション例

次の図は逃げ水の生成例である。ピラミッドが地面に映り、あたかも水面に反射しているように見え、逃げ水現象が引き起こされている。

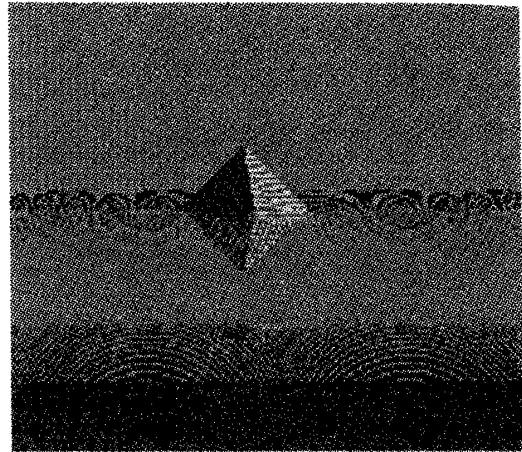


図 逃げ水のシミュレーション画像

6 まとめと今後の課題

本稿は、ボリュームレイトレーシングを用い、自然科学に基づく逃げ水現象のシミュレーション方法を提案した。今後の課題として以下の2点が挙げられる。

- ボクセル上のボリュームデータの性質に応じて、RAY のリサンプリング間隔を適応的に決定するように改良する
- 空気による光の反射・回折・散乱を考慮することにより、多様な光学現象（星のまたたきや太陽の歪み現象など）のシミュレーションを試みる

参考文献

- [1] Berger, M., Trout, T., and Levit, N., "Ray tracing mirages," *IEEE Comput. Graphics Appl.* **10**, 36-41 (1990).
- [2] Greenler, R., *Rainbows, Halos and Glories*, Cambridge U. Press, Cambridge (1980).
- [3] Lehn, W. H., and El-Arini, M. B., "Computer-graphics analysis of atmospheric refraction," *Appl. Opt.* **17**, 3146-3151 (1978).
- [4] 千葉, 村岡, C による CG レイトレーシング, サイエンス社 (1991)
- [5] Kaufman, A., Cohen, D., and Yagel, R., "Volume graphics," *IEEE Comput. Graphics Appl.* **7**, 51-65 (1993).