仮想空間における立体視のための光跡表現

A Stereoscopic Representation of Shafts of Light in Virtual Environments

中村 亜希子[†], 橋本 直己^{††}, 正会員 中嶋 正之[†]

Akiko Nakamura[†], Naoki Hashimoto^{††} and Masayuki Nakajima[†]

Abstract A representation of shafts of light in Computer Graphics(CG) allows us to create high quality images that are beautiful and realistic. However, previous methods to represent these shafts of light take a lot of calculation time and are ineffective for stereoscopic viewing. Therefore, is difficult to using these methods for interactive applications in 3-D virtual environments. We describe a new method to create shafts of light for interactive 3-D applications using stereoscopic images. In this method, the intensity distribution of light is calculated for some texture images, and these images are mapped on a 3-D object that represents the shape of shafts of light. By using a texture mapping function for graphics hardware, the total performance is accelerated enough for interactive applications.

キーワード：コンピュータグラフィックス, 光跡, 立体視, リアルタイム

1. はじめに

CG (Computer Graphics) における光の表現は、光特有の神秘的な美しさと現実感を高める効果が相乗して質の高い映像表現を可能にする。このため、映画やアート作品において CG による光の表現が効果的に利用されている。しかし、リアルタイム性の要求される VR (Virtual Reality) においては、CG による光の表現を取り入れ、リアルタイムで処理することは依然として困難である。近年のグラフィックスハードウェアの進化は目覚しく、様々な映像効果をリアルタイムに表現可能となっており、また、CAVE のような大型仮想環境システムも徐々に普及していることから、インタラクティブな映像環境においても、より現実感の高い仮想空間を実現をする光のリアルタイムなレンダリング処理への需要は今後ますます高まっていくことが予想される。

そこで本研究では、仮想空間においてインタラクシオンを行うことを想定し、奥行き感を持った光跡を高速にレンダリングする手法を提案する。このとき、スポットライトのような点光源から円錐状に広がる光跡の奥行き

感を実現することを目的とする。3次元仮想空間において、奥行きのない光跡をレンダリングすると、その他に表示されている物体と比較して違和感を感じてしまう。光跡とは、光の表現方法の一つであり、大気中の塵や埃などによって光が散乱されて大気中に光の筋が見える現象である。レイトレーシング等による光跡表現¹⁾は膨大な計算時間を必要とし、インタラクティブ性を重視した3次元仮想空間における応用には適していない。また、ハードウェアアクセラレーション機能を利用した高速な光跡表現手法²⁾も提案されているが、仮想空間における光跡の3次元的な広がり表現することが困難である。

上述した問題を解決するために、ハードウェアアクセラレーション機能によって高速に生成された光跡の輝度分布をテクスチャ情報として取得し、これを光跡の空間的分布を表現する3次元モデルにマッピングすることで、奥行き感を伴った光跡表現を実現した。提案手法を用いることにより、従来のリアルタイム3DCGでは実現が困難であった、奥行き感を持つ光跡を利用した照明効果を、簡単かつ高速に実現することが可能になった。

2. 従来の光跡レンダリング手法

従来から、CG において高い映像効果を実現する光のレンダリングに関する研究は数多く試みられている。これらの表現の手法の一つとして、光跡をレンダリングするための手法もいくつか提案されており、光の通過する領域を追跡するレイトレーシング法¹⁾、フォトンマップ法³⁾、ラジオシティ法⁴⁾や、光の通過する領域をスキャンラインから追う手法⁵⁾が広く用いられている。フォ

2002 年 10 月 31 日受付, 2003 年 3 月 28 日再受付, 2003 年 4 月 11 日採録

[†] 東京工業大学 大学院 情報理工学研究科

(〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1, TEL 03-5734-2183)

^{††} 東京工業大学 精密工学研究科

(〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259, TEL 045-924-5050)

[†] Graduate School of Information Science & Engineering, Tokyo Institute of Technology

(2-12-1 Ookayama Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan)

^{††} Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

(4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8503, Japan)

トンマップ法やラジオシティ法では、光を散乱する効果を持たせたある媒体を空間内に放つことによって、光の散乱の結果である光跡をレンダリングすることを可能としている。またスキャンライン法では、影になる部分を Shadow Volume を用いて算出するという特徴を持つ。しかし、今までに挙げた手法では精度の高い画像を生成できる反面、画像生成に多くの計算時間を必要とする。よって、仮想空間でのインタラクションを行うための光跡レンダリング手法には適していない。

一方、レンダリング時間の短縮を目的として、グラフィックスハードウェアを用いて高速に光跡をレンダリングする手法⁶⁾⁷⁾が土橋らによって提案されている。この手法では、光跡の高速なレンダリングが可能となり、光跡内の影も表現可能である。また、安価なグラフィックスハードウェアを利用して、高速な光跡レンダリングを実現することができる。しかし、仮想空間での立体視を考慮していないため、インタラクティブな没入型仮想空間において両眼立体視を行った場合に、適切な両眼立体視差を生成することができない。以上の理由から、奥行き感を持つ光跡を高速にレンダリングする手法の実現が望まれている。

3. 光跡表示アルゴリズムの概要

本節では、仮想空間でのインタラクションを想定した光跡表示アルゴリズムを提案する。光跡のレンダリング手法に求められる要素としては、レンダリング速度、奥行き感、滑らかな輝度変化等が挙げられる。上述した要素のうち、仮想空間において光跡を用いることを考慮すると、リアルタイムに画像を生成することが可能なレンダリング速度が必要となる。さらに、ユーザとのインタラクションを行うためには、視点に依存しない奥行き感と輝度変化を実現する必要がある。よって、本研究で提案する光跡レンダリング手法が満たす必要のある要素は、以下の通りである。

- ・視線方向、視点位置に影響されない奥行き感
- ・視線方向、視点位置に影響されない滑らかな輝度変化
- ・リアルタイムな画像生成を可能とするレンダリング速度

上述の要素を考慮して、2節で挙げた関連研究を特徴毎に比較したものを表1に示す。本提案アルゴリズムでは、視線方向、視点位置に影響されない奥行き感と滑らかな輝度変化を実現するために、3次元モデルを導入する。一般的に、人間が奥行き感を感じる主要因の一つとして、両眼視差が挙げられる。仮想空間においても、両眼視差を再現することで、高い奥行き感を実現することができる。光跡レンダリング時に上述の両眼視差を与えることによって、光跡の奥行き感を与える。このためには、光跡の空間的な広がり的情報を維持したまま光跡

表1 光跡レンダリング手法の特徴比較
The feature comparison of shafts of light rendering technique.

	レンダリング速度	滑らかな輝度変化	奥行き感
レイトレーシング	△	○	×
フォトンマップ	△	◎	×
ハードウェアアクセラレーション	○	○	×

の輝度を計算し、3次元仮想空間内に配置することが必要となる。これらの条件を考慮して、本研究で奥行き感を表現するために採用した3次元モデルを、光跡基準形状と呼ぶ。

次に、リアルタイムなレンダリング速度を実現するために、光跡の輝度を求める部分でグラフィックスハードウェアを利用し、高速に輝度を計算する。ここでは、2節で述べた、グラフィックスハードウェアを利用して、高速に輝度を計算する土橋らの手法⁷⁾を用いる。光跡の輝度分布を計算するためには、大気中の塵などの微粒子による散乱光を視線に沿って積分する必要がある⁸⁾。視線上のある一点に注目した場合、注目点の散乱光の強さを求めるための要素として、光源から注目点の方向へ発せられる光の強さを表す配光特性や、光源からの距離と視点からの距離に影響される光の減衰率が挙げられる。前者は Projective Texture Mapping、後者は Multitexture、視線に沿って各注目点の散乱光の強さを近似的に積分するために Alpha Blending を用い、グラフィックスハードウェアの機能を利用して高速に計算する。この土橋らの手法では、散乱光を視線に沿って積分する部分で、仮想的な平面を利用して輝度を数値積分している。平面を利用すると、光跡の空間的な広がり的情報が損なわれてしまい、両眼視差を含んだ映像を生成することは困難である。

本研究では、上述した光跡基準形状を用いることで、光跡の空間的な広がり的情報を維持したまま輝度の数値積分を行う。光跡基準形状を用いるにあたって、考慮しなければならないこととして、光跡の輝度がある部分には、輝度を計算するための3次元モデルを等間隔に配置する必要がある、ということである。例えば、3次元モデルとして円錐を用いた場合、3次元モデルが等間隔に配置されないため、図1のように滑らかな輝度変化が失われてしまう。図1の右図の一部を拡大したものを図1左に示した。

ここで、土橋らの手法と本研究での提案手法を比較したものを、図2に示す。テクスチャをマッピングする領域が減少したことで、提案手法ではレンダリング速度が向上した。

これ以降、光源からの光が減衰しないと仮定した場合に、光が通過する範囲を、光跡の表示範囲と呼ぶ。このとき、光跡基準形状は光跡の表示範囲に配置される必要がある。本提案アルゴリズムの詳細については、後の4

図 1 3 次元モデルとして円錐を用いた場合
Use cone model for 3D model.

図 2 既存手法と提案手法
Exist method and proposed method.

節で述べる。

4. 仮想空間における輝度分布と光跡基準形状

本節では、まず始めに 3 節で述べた光跡基準形状を用いて光跡のレンダリングを行う手法について述べる。次に、ユーザとのインタラクションを想定した場合に、光跡の自由な移動と回転を実現する手法について述べる。

4.1 光跡基準形状を用いた光跡のレンダリング

まず始めに、光跡の表示範囲を求める。次に、視点から見える光跡の表示範囲を覆うような 3 次元モデルを用意する。光跡の奥行き感に最も大きな影響を与えているのは、視点から見て一番近い所に存在し、かつ、輝度を有した形状である。そこで、この形状を 3 次元モデルで近似することで光跡の奥行き感を表現する。このようにして得られた 3 次元モデルが、光跡基準形状となる。続いて、3 次元仮想空間内の光跡表示範囲を覆う位置に 1 つめの光跡基準形状を配置し、仮想空間内の輝度を等間隔に計算して積分するために、光跡基準形状と同じ形の 3 次元モデルを、光跡の中心軸に対して平行移動し、等間隔に複数個配置する。これは、輝度計算時の数値積分を行う際に、均等な条件を揃えることによって、精度の高い光跡を表示するためである。このときの光跡基準形状の配置の様子を図 3 に示す。

次に、光跡の輝度を計算する方法について述べる。まず、各基準形状をメッシュ状に分割し、各メッシュに対して配光特性および減衰率を計算して輝度分布を求める。この際、配光特性は光源の輝度に応じたライトマップを、光源の向きを考慮して光跡基準形状にプロジェクトするようにテクスチャ座標を自動生成し、プロジェクトされたライトマップの値から計算する。さらに、Alpha Blending を用いて、各光跡基準形状の輝度を足し合わせる。

図 3 光跡基準形状の配置
Arrangement of shafts of light model.

ことによって、奥行き感と光跡全体の輝度を表現する。

この光跡基準形状を用いることで、光源からの光がスクリーンに直接あたらない場合、すなわち、スクリーンと光跡の表示範囲が交わらない場合に、光跡の奥行き感を表すことができる。しかし、光跡基準形状を用いた場合でも、スクリーンと光跡の表示範囲が交わる場合には、対応できない。そこで、光跡の向いている方向によっては、光跡基準形状以外の 3 次元モデルを考える必要がある。

4.2 光跡基準形状の拡張

本提案アルゴリズムでは、光跡基準形状では表現できない部分を補うために、3 次元モデルとして球を採用する。以下に球を採用する主な理由を述べる。第 1 に、テクスチャ座標を計算する場合の計算量を減少させることが可能である。第 2 に、光源からの光が向いている方向が、視点方向である場合に光跡の立体感を得ることができる。第 3 に、光源からの光が向いている方向が視点方向である場合に、滑らかな輝度変化が得られる。実際には円錐等、他の形状を持つ 3 次元モデルでのレンダリングも行ったが、球を用いることによってレンダリング速度と輝度の滑らかな変化の両方の要素をバランスよく満たすことができたため、球を採用した。

球を用いて光跡をレンダリングするときの基本概念を図 4(a) に示す。まず始めに、光源位置を中心として、半径を等間隔に増やしながら、球を複数個配置する。光が向いていない方向には、ポリゴンを配置する必要がないので、半球を複数個配置すると、レンダリング速度を向上させることが可能となる。それぞれの球をメッシュ状に分割し、各メッシュに対して輝度を計算する。メッシュ状に分割するとき、図 4(b) のように分割する。これは、一番輝度変化が大きい部分に対し細かい分割を行うためである。

また、球形を 3 次元モデルとして採用した場合、配光特性を計算するとき、ライトマップをプロジェクトするように、テクスチャ座標の自動生成をする必要はない。ある点の配光特性の値が、その点から光跡の中心軸に降ろした垂線の長さ按比例することを利用してテクスチャ座標を求めることにより、ハードウェアによるテク

図 4 球を用いた光跡のレンダリング
Shafts of light rendering in using sphere model.

スチャ座標の自動生成を行うよりも、計算量を減少させることができる。以上の作業により、光源からの光が視線方向を向いている場合に、奥行き感と滑らかな輝度変化を持った光跡をレンダリングすることが可能となる。

4.3 光跡の自由な移動と回転

本項では、視線方向、視点位置に影響されない奥行き感と滑らかな輝度を実現するための手法について述べる。この2つの要素を実現することによって、光跡の自由な回転と移動が可能になる。

4.1 節で述べたように、奥行き感を持つ光跡のレンダリングアルゴリズムとしては、光跡基準形状を用いる手法が有効である。しかし、光跡基準形状を用いる手法では、光源からの光が視線方向を向いた場合に、滑らかな輝度変化が得られない。滑らかな輝度変化が失われている様子を図5(a)に示す。ユーザとのインタラクションの過程で滑らかな輝度変化が失われることは望ましくないため、光源からの光が向いている方向と視点位置の関係から、光跡を表示するために用いる3次元モデルを使い分ける必要がある。

光跡基準形状を用いている場合に、輪郭が目立つのは、光跡の表示範囲とスクリーンが交わる時である。このときに、光跡基準形状がスクリーンにより切断され、切断面がエッジとして結果画像に残る結果となる。光跡の表示範囲とスクリーンが交わる場合の位置関係の一例を図5(b)に示す。

このような状況を避けるため、光跡基準形状の拡張を用いて、光跡の表示範囲とスクリーンが交わる場合は球、それ以外の場合には、光跡の表示範囲を覆う形の光跡基準形状を用いることによって、視点位置や光源からの光の向きに影響されずに、光跡の滑らかな輝度変化と奥行き感を保つことが可能となる。

5. 光跡の立体表示の実現結果

本節では、提案した手法に対して仮想空間で光跡を用いる場合に必要とされる要素各々に対して評価、および考察を行った。ここで用いた環境では、CPUとしてPentium4 2GHzを搭載したPCに、NVIDIA社のGeForce3搭載のグラフィックスボードを使用した。立体

図 5 自由な移動と回転
Free movement and free rotation.

図 6 光跡基準形状を用いた光跡レンダリング過程
Rendering process in using shafts of light model.

視は、ELSA社の3D REVERATORを用いて、17インチCRTディスプレイ上で行った。

5.1 光跡の奥行き感の実現

光跡基準形状を用いる提案手法によって光跡表現を行った結果を図6に示す。図6(a)は光跡の表示範囲を白、光跡の表示範囲外を黒で示したものである。図6(b)は(a)の範囲を覆うように用意された光跡基準形状の概形である。このとき、光源からの光は真下を向いているので、光跡基本形状は下が底面となるような円錐の視点から見える部分をポリゴンで近似したものとなる。この光跡基本形状を複数個配置し、それぞれ輝度を計算して得られた結果が図6(c)である。

光跡基準形状を利用することによって、テクスチャの適用領域が減少したことから高速化が可能となり、20fpsの描画速度を得ることができた。さらに、被験者6名による奥行き感に関する評価実験を行った。提案手法と既存手法⁷⁾をそれぞれ5秒ずつ表示し、これを1セットとして10回繰り返した。提示する順はランダムに決定し立体視をしてもらった結果、より奥行き感を感じられる光跡を選択させた。実験結果を表2に示す。被験者6名中、5名が提案手法による光跡が、より奥行き感を感じると評価しており、被験者全体において提案手法が支持された割合は81.6%であった。以上に示された通り、提案手法を用いて光跡を表示した場合、より強い奥行き感を表現することが可能となる。

表 2 提案手法と従来手法の奥行き間に関する比較
The stereoscopic image comparison of proposed method and exist method.

被験者	A	B	C	D	E	F
提案手法を支持した割合	100 %	60%	100%	90%	40%	100%

5.2 輝度変化とレンダリング速度

本研究で提案する手法において、レンダリング速度に影響を与えている要素として、光跡基準形状の数、光跡基準形状の分割数などが考えられる。これらの要素は主にユーザにより指定される。

レンダリング速度と光跡基準形状数は反比例するため、画質を向上させるとレンダリング時間を多く必要とする。分割数も同様で、3次元モデルの分割数を増加させれば画質も向上するが、計算時間を多く必要とするようになる。よって、光跡基準形状の数や分割数を状況に応じて変化させることによって、画質とレンダリング速度のどちらを優先するかを選択できるようにするのが望ましい。

光跡のレンダリング速度に影響を与える3つの要素のうち、分割数と光跡基準形状の数を変化させた際の光跡の表示結果を示す。光跡基準形状の分割数を変化させたときの結果画像を図7、また、その際のレンダリング速度の変化を表3に示す。同様に、光跡基準形状の個数を変化させたときの結果画像を図8に示し、そのレンダリング速度変化を表4に示す。

一般的に仮想空間でのインタラクションに必要とされるレンダリング速度は、15fps~30fpsである。以上の結果より、仮想空間でのインタラクションを想定した場合に必要とされる20.0fps程度のレンダリング速度を維持したまま、体験者に対して違和感の少ない結果画像を表示することが充分可能であると言える。さらに、提案手法では分割数や光跡基準形状の個数を容易に変更できるため、画質とレンダリング速度のどちらを優先するか、

図 7 光跡基準形状の分割数変化と結果画像
The number of division of model and result.

図 8 光跡基準形状の個数変化と結果画像
The num of models and result.

表 3 分割数変化とレンダリング速度
The number of division of model and rendering speed.

図 7	(a)	(b)	(c)
3次元モデルの数	15 個	15 個	15 個
分割数	10 × 10	20 × 20	40 × 40
レンダリング速度	85.6fps	25.6fps	11.9fps

表 4 光跡基準形状の個数変化とレンダリング速度
The num of models and rendering speed.

図 8	(a)	(b)	(c)
3次元モデルの数	10 個	15 個	30 個
分割数	20 × 20	20 × 20	20 × 20
レンダリング速度	39.0fps	26.1fps	13.2fps

状況に応じて変更することが可能である。よって、様々な仮想環境において立体視を伴った光跡を用いることが可能となり、既存手法と比較して、インタラクションに向いていると考えられる。

5.3 提案手法を用いた様々な照明効果

ライトマップとして様々なテクスチャを用いることによって、多様な照明効果を実現することが可能である。シャドウマップを用いて、仮想空間内にある他の物体との干渉が発生したときの結果画像を図9に示す。画像サイズが1600pixels × 1200pixelsの場合、描画速度23.0fpsを実現している。

6. おわりに

本研究では、リアルタイム性を要求される仮想環境における光跡表現の高速で実用的なレンダリング手法を提案した。光跡の奥行き感に注目し、奥行き感と光跡の滑らかな輝度変化を実現するのに適した3次元形状を導入した。これにより、リアルタイムでの光跡のレンダリングが可能となった。

今後の課題としては、光跡と実物体とのインタラクション等を取り入れたり、光跡と仮想物体との干渉時に生じる輝度変化部分の円滑化等が挙げられる。

使用したライトマップ

結果画像

図 9 様々な照明効果
Various lighting effects.

また、本提案手法を容易に利用可能にするためのライブラリ化も行っていく予定である。

〔文 献〕

- 1) 金沢, 牧野: “レイ・トレーシングによる光跡の表現”, 信学総全大, p. 377 (1997).
- 2) Y. Dobashi, T. Yamamoto and T. Nishita: “Interactive Rendering Method for Displaying Shafts of Light”, Pacific Graphics2000, pp. 31-47 (2000).
- 3) H. W. Jansen and P. H. Christensen: “Efficient Simulation of Light Transport in Scenes with Participating Media using Photon Maps”, Proc. SIGGRAPH'98, pp. 311-320 (1998).
- 4) H. E. Rushmeier and K. E. Torrance: “The Zonal Method for Calculating Light Intensities in The Presence of a Participating Medium”, Computer Graphics, **21**, 4, pp. 293-302 (1987).
- 5) N. Max: “Atmospheric Illumination and Shadows”, Computer Graphics, **20**, 4, pp. 117-124 (1986).
- 6) 上橋, 山本: “散乱光強度のアダプティブサンプリングによるグラフィックスハードウェアを利用した光跡の高精度・高速レンダリング”, 信学情報・システムソサイエティ大会, **D-12-30**, p. 205 (2001).
- 7) 上橋, 山本, 西田: “グラフィックスハードウェアを用いた光跡の高精度・高速レンダリング法”, 映情学誌, **55**, 7, pp. 1019-1024 (2001).
- 8) T. Nishita, Y. Miyazaki and E. Nakamae: “A Shading Model for Atmospheric Scattering Considering Luminous Intensity Distribution of Light Sources”, Computer Graphics, **21**, 4, pp. 303-310 (1987).

なかむら あきこ
中村亜希子 2001 年, 東京工業大学情報工学科卒業。現在, 同大学院博士前期課程 (計算工学専攻) に在学中。主として NPR に関する研究に従事。

はしもと なおき
橋本直己 1997 年, 東京工業大学工学部情報工学科卒業。1999 年, 同大学院博士前期課程 (計算工学専攻) 修了。2001 年, 同大学院博士後期課程 (計算工学専攻) 修了。同年, 同大精密工学研究所助手。現在に至る。主として パーチャルリアリティ・大型ディスプレイ装置に関する研究に従事。工学博士。

なかじま まさゆき
中嶋正之 1969 年, 東京工業大学工学部電気工学科卒業。1975 年, 同大学院博士課程修了。同年, 同大勤務。1983 年, 同大画像情報工学研究施設助教授。1992 年, 同大電気電子工学専攻教授。1994 年, 同大学院情報理工学研究科教授。現在に至る。コンピュータグラフィックス, コンピュータアニメーション, 画像処理の研究に従事。工学博士, 正会員。