

## Light Brake Effect: 光が減速した世界

秋山 弘貴<sup>†1</sup> 宮下 芳明<sup>†1</sup>

本稿では、「光速に近い速度で動くオブジェクト」における CG 表現について検討し、CG の代表的なレンダリング技法であるレイトレーシングのアルゴリズムを拡張し、光線追跡時に描画対象となる仮想世界の時間を逆向きに進行させることによって光の速度を鑑みた CG 描画ができるシステムを実装した。そして、このシステムで光速を実世界より遅く設定すると、オブジェクトの動きを誇張する映像効果「Light Brake Effect」が発現することを確認した。この特殊な世界では、高速に移動するオブジェクトに対して伸縮や遅延が起こり、その影にも影響が及ぼされるため、動きを誇張するエフェクトとして効果的であると考えられる。

## Light Brake Effect: The world where light slows down

HIROKI AKIYAMA <sup>†1</sup> and HOMEI MIYASHITA<sup>†1</sup>

In this paper we discuss CG expression of objects moving close to the speed of light. We expanded a ray trace program with the light speed in mind, and developed a rendering system that turns back the clock during tracing calculation. When we slow down the parameter of the light speed in the system, we observed special effects in the rendered images; we called it Light Brake Effect. There fast moving objects and their shadows stretch and get delayed apparently, so we consider the effect as overdramatizing expression.

### 1. はじめに

私たちは、光が一瞬で届くものであると思いがちだが、実際には光は速度を持っているために到達までに遅延が生じている。例えば太陽の光は地球に届くまでには約 8 分を要する

ので、夕日に映える富士山の写真があったとき、そこに写る夕日は富士山よりも約 8 分前の太陽であり、実はそれぞれ異なる時刻の姿が一枚の写真に重なっているのである。一方で、秒速約 30 万キロメートルという光の速度は、現代の私たちの時間感覚ではそれほど速いものではないと考えることもできる。例えば CPU のクロック周波数 3GHz のパソコンが 1 クロックの動作を行っている間に光がどれだけ進んでいるかを考えると、たった 10cm しか進んでいないという計算になる。科学技術の進歩に伴い、光速に対する私たちの意識も今後変わっていくのではないと思われる。

ただ、光速を身近に感じられるほど技術が高速化しなくとも、私たちは光の速さについて思い巡らすことができる。いわば「人間の想像力は光の速さをも超えられる」のであり、サイエンスフィクションの世界、およびその世界観に基づくアニメやゲームでは光の速さと同程度（あるいはそれを超える速さ）で動くことができる設定のキャラクターや乗り物が数多く登場する。このような想像上のオブジェクトを CG で表すとき、どのような表現を用いるのが適切だろうか。光速のパンチが繰り出されるとき、それはどのように見えるのだろうか、あるいはどのように見えてほしいだろうか。

ひとつ考えられるのは、特殊相対論的な世界を可視化する CG システムを用いて描画することである。既存のものでは宇宙レベルでの計算を念頭に置いた Hsiung の REST-frame システム<sup>1)</sup>、あるいは 2 次元画像と奥行き情報によって時間遅れを再現する鶴岡らの手法<sup>2)</sup>などが研究されており、特殊相対論の光行差現象に対応したレンダリングソフト<sup>3)</sup>も公開されている。しかしこれらのシステムのレンダリング結果は、特殊相対論のシミュレーションとしては「正しい」ものであっても、現実感を伴わないことが多い。それはおそらくこれらのシステムの問題ではなく、そもそも光速不変の原理が支配する特殊相対論の世界が、私たちの日常生活からすると非現実的だからではないだろうか。

物理現象の論理的な正しさと人間の感じる「リアルさ」に乖離があることは、これまでしばしば指摘されている。稲見は、ゲームのリアルタイム物理シミュレーションにおいて、アリストテレスの運動方程式 ( $F = mv$ ) を採用した方がリアルに感じられることがあると指摘している<sup>4)</sup>。またカートゥーン・アニメーションにみられる非現実的な物理法則（いわゆるマンガ物理学）が子供たちに自然に受け入れられていることもその一例であろう。こうした背景から、CG 表現の研究は「現実世界にあるものをシミュレーションして描く」ことから離れ、「現実世界に存在しないものも、人間にとってリアルに感じられるかたちで描く」方向、あるいは多様な表現手段を提供する方向に進んでいる。本稿第二著者らも、不可能立体をフォトリアルに描画する技法を開発し、自然な物体と見えるように影専用の立体に差し

<sup>†1</sup> 明治大学理工学部情報科学科  
Department of Computer Science, Meiji University

替えて計算するなど、シミュレーションとは異なるアプローチを行っている<sup>5)</sup>。

本稿では、「光速に近い速度で動くオブジェクト」におけるCG表現について検討し、CGの代表的なレンダリング技法であるレイトレーシングのアルゴリズムを拡張し、光線追跡時に描画対象となる仮想世界の時間を逆向きに進行させることによって光の速度を考慮したCG描画ができるシステムを実装した。そして、このシステムで光速を実世界より遅く設定すると、オブジェクトの動きを誇張する映像効果「Light Brake Effect」が発現することを確認した。この特殊な世界では、高速に移動するオブジェクトに対して描画上の伸縮や遅延が起り、その影にも影響が及ぼされるため、動きを誇張するエフェクトとして有用であると考えられる。

動きを誇張する映像効果としてはモーションブラーが一般的であり、Cammaranoらはフォトンマップの各光子へ時間情報を含めた計算を行うことで、より質の高いブラー効果を得ることに成功している<sup>6)</sup>。なお、光速を変化させるコンセプトの研究として松崎らのSnail Light Projector<sup>7)</sup>があるが、プロジェクタとスクリーンを用い映像があたかも超低速で投影されていることを模倣するインタラクションシステムであり、映像表現としての研究ではない。

レイトレーシングの技法はCGだけでなく音響や電波の解析にも使われている。特に音響では音線追跡法と呼ばれる手法で受音源から音線を出して受音源でどのように音が聞こえるかを解析している<sup>8)9)</sup>。音線追跡法ではエコーの発生等を解析するために音速を考慮しており、本研究の光速を考慮することはこれに類似している。音響解析の視点から本研究を見直すと光のエコーの表現と言えるかもしれない。

## 2. アルゴリズム

実世界においては光源から発せられた無数の光線(レイ)がさまざまなオブジェクトに当たって反射を繰り返しながら直進し、最後は目に飛び込み私たちが認識する像となっている。レイトレーシング法は、このレイの道筋を目から逆にたどっていくことで各画素の色を決定する手法である。

従来のレイトレーシング法はレイとオブジェクトの交点計算の繰り返しのみであり、光速が考慮されていない。すなわち瞬時に光が届くことが仮定されているため、レイトレーシング中は「時間を止め」、その静止した空間を対象にして演算を行う。本稿ではこれに対し、光速を考慮したレイトレーシングアルゴリズムを考えたい。なお、本稿ではモデリングはCSGで行い、使える基本立体は平面と2次曲面のみである<sup>10)</sup>。

点  $V = (V_x, V_y, V_z)$  を通り、速度  $V_c$  で方向  $E = (E_x, E_y, E_z)$  に進むレイの時刻  $t$  における位置  $P_r(t) = (x_r(t), y_r(t), z_r(t))$  は

$$P_r(t) = V_c E t + V \quad (1)$$

で表わせる。また、点  $V = (V_x, V_y, V_z)$  を通り、初速度  $V_0$  で方向  $E = (E_x, E_y, E_z)$  で加速度  $A = (a_x, a_y, a_z)$  の物体の時刻  $t$  における位置  $P_o(t) = (x_o(t), y_o(t), z_o(t))$  は

$$P_o(t) = \frac{1}{2} A t^2 + V_0 E t + V \quad (2)$$

である。まず平面は以下の方程式で表わせる。

$$f_p(x, y, z) = ax + by + cz = 0 \quad (3)$$

(a, b, c は平面のパラメータ)

この平面の中心点が前述の物体のように動く場合、時刻  $t$  での平面の方程式は(2),(3)を用いて

$$f_p(x - x_o(t), y - y_o(t), z - z_o(t)) = 0 \quad (4)$$

となる。この平面とレイとが交点を持つためには  $(x, y, z) = P_r(t)$  のとき(4)が成立すればよい。この時、時刻  $t$  での平面の中心点とレイとの相対座標  $\Delta P = (\Delta x(t), \Delta y(t), \Delta z(t)) = (x_r(t) - x_o(t), y_r(t) - y_o(t), z_r(t) - z_o(t))$  と置くと平面とレイが交わる時の時刻  $t$  は

$$f_p(\Delta x(t), \Delta y(t), \Delta z(t)) = 0 \quad (5)$$

を解くことで求めることができる。また2次曲面は

$$f_s(x, y, z) = \frac{\alpha}{a^2} x^2 + \frac{\beta}{b^2} y^2 + \frac{\gamma}{c^2} z^2 - \delta = 0 \quad (6)$$

(a, b, c,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  は2次曲面のパラメータ)

で表わせられる。この2次曲面の中心点が平面と同様に動く時、2次曲面の中心点とレイとの相対座標を  $\Delta P$  を同様に定義すると、レイとの交点の時刻  $t$  は

$$f_s(\Delta x(t), \Delta y(t), \Delta z(t)) = 0 \quad (7)$$

を解き求めることができる。

本システムでは、光は等速直線運動の振る舞いをみせ、特殊相対論的な世界とは異なり光速の設定を自由に行うことが出来る。また、光速を超える速度で動くオブジェクトについても特別な措置を行うことなく計算を行うことが出来る。

## 3. 実装

提案システムは、Windowsアプリケーションソフトウェアとして実装した(図1)。3Dオ

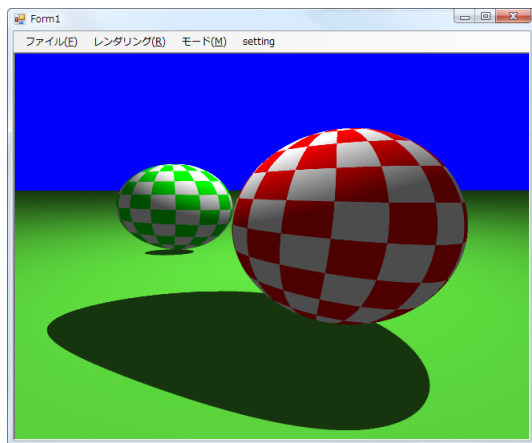


図 1 提案システム

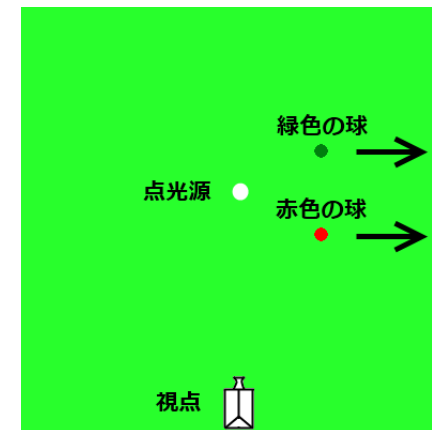


図 2 上から見た位置関係

プロジェクトのデータを読み込んでレンダリング表示を行う。レンダリングでは通常のレイトレーシングと提案手法によるレンダリングが可能である。レンダリングを行う際に動画として出力することも可能である。また光速度を調節可能にしており同じ 3D オブジェクトデータに対しても異なる光速度でのレンダリングが可能である。

提案システムを使いレンダリングした結果が図 3 と図 4 である。どちらも上の図が通常のレイトレーシング、下が提案手法によるレンダリングの結果である。図 3 は、図 2 に示される位置関係で、視点から見て右方向に直線運動する球をレンダリングした結果である。点光源によって上方向から照らしている。図 4 は図 2 から緑の球を取り除き、球の速度を落とし、光源を平行光源に変更してレンダリングを行ったものである。また提案手法でレンダリングを行う時には光速度を物体の速度近くまで落としている。図 3、図 4 のどちらも通常のレイトレーシングと提案手法とで異なる結果となっている。以下にこれについて詳しく述べる。

#### 4. Light Brake Effect

実装したシステムでオブジェクトを運動させ、光速度をオブジェクトの速度に近いオーダーにまで下げていくと、実世界には見られない映像効果が観測できた。筆者らはこれらの効果を Light Brake Effect と命名した。以下、その主な実例を挙げる。

##### 4.1 見掛け上の同時性崩壊

本稿冒頭での夕日と富士山の例のように、光速を遅くすると、遠くにあるオブジェクトからの反射光が届くのにかかる時間と、近くにあるオブジェクトからの反射光が届くのにかかる時間の差が大きくなるため、遠くにあるものほど過去の姿となり、近くにあるものほど今に近い姿になる。すなわち、オブジェクトと視点の距離によって見掛け上の時間がずれるので、ある時刻  $t$  に同時に起きていることが、実際に同時に起きているように見えない。

この効果は、実際にオブジェクトがある位置（実位置）と視点から見えるオブジェクトの位置（視位置）がずれていることから生じ、視点 - オブジェクト間の視線方向における相対速度によってその効果や強さが変化する。

##### 4.2 オブジェクトの遅延

上記の現象はオブジェクトが動くときに顕著に現れ、視点から少し遠くにあるだけでオブジェクトは実際の状態とずれて見える。図 3 を上下で比較すると、視点近くの赤色の球体は実位置とのずれが少なく、視点から離れている緑色の球体は実位置とのずれが大きくなっており、並んで移動していても奥のオブジェクトは遅れて見える。

##### 4.3 影の遅延

遅延の効果は影にも現れ、オブジェクトと影との位置関係においてオブジェクトとその影

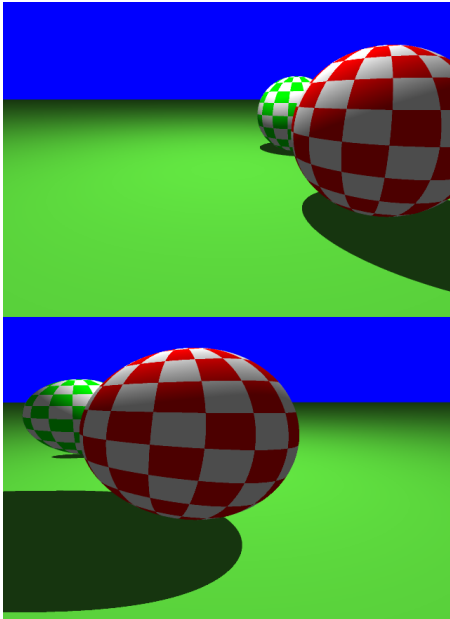


図 3 物体遅延・物体伸縮 (上: 通常のレイトレーシング 下: 光速を遅くしたレイトレーシング)

がずれて見える。図 4 の 2 つのレンダリング結果を比較すると、赤色の球体の影が提案手法でのレンダリングでは影が遅れているため進行方向と逆向きの斜めに傾いている。影の遅延現象は図 3 にも現れている。

#### 4.4 オブジェクトの伸縮

また、提案システムで光速を遅くすると、動いているオブジェクトの「大きさ」も実際の大きさとは異なって見える。前述したオブジェクトの遅延は、二つ以上のオブジェクトについて視点に近いものと遠いものにおけるずれであったが、一つのオブジェクトだけでも視点に近い部分と遠い部分とでずれが生まれる。図 3 は視点とオブジェクトの距離が小さくなるように動いているところをレンダリングしたため、上と比べ両方の球は見かけ上の横幅が長くなって見える。オブジェクトの伸縮現象は図 4 にも現れており、また伸縮現象は影にも適用されている。

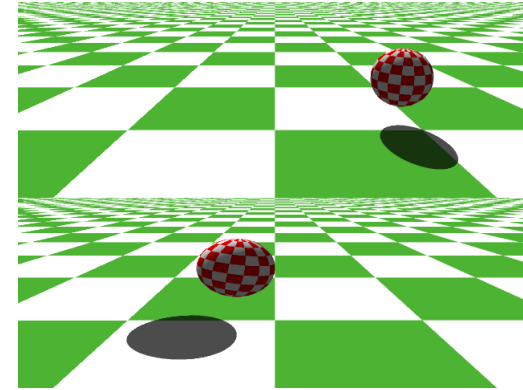


図 4 影遅延 (上: 通常のレイトレーシング 下: 光速を遅くしたレイトレーシング)

## 5. 作 例

提案したシステムで実際につくった作品を上げる。図 5 は向かい合う二つの視点から二人の間を等速で通過する 2 つのボールを観測しているところである。時間がたつにつれてボールが自分を通り過ぎていくが図 5(a) では赤いボールが先に通り過ぎ、その後にピンクのボールが通り過ぎる。対して反対側 (図 5(b)) から見るとピンクのボールが先に通り過ぎ、その後赤いボールが通り過ぎる。どちらのボール実際には平行に進んでいるが見える映像は自分に近いほうのボールが先に進んでいてももう一方が遅れて見える。また、この二つとは違う視点からこのボールを観測するとこの 2 つの視点とは異なる状態のボールが観測できる。このようにオブジェクトの遅延具合が視点によって変わることを利用している作品である。

図 6 はある一定の速度で進むリニアモーターカーを光速を落として提案したシステムでレンダリングした結果 (図 6(a)) と通常のレイトレーシングレンダリングしたもののうち図 6(a) と同じ位置に見える時のレンダリング結果図 6(b) である。光の速度はリニアモーターカーの速度近くまで落としている。(b) が実際の車体の長さであるのに対して (a) では Light Brake Effect によって大きく車体が引き伸ばされている。 $t$  は (a), (b) それぞれの一番上を基準にした時の時間であるが一番下の位置に見えるまでにかかる時間が異なっている。これによって見掛け上の物体がより速くなっているように見える。

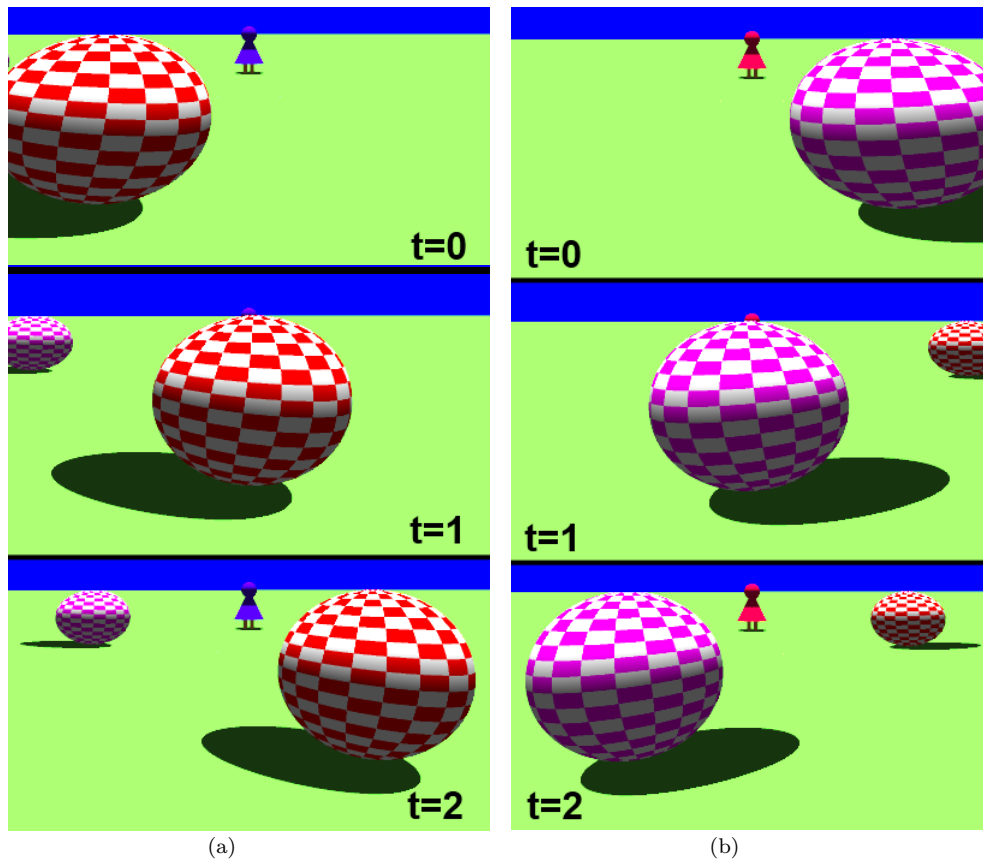
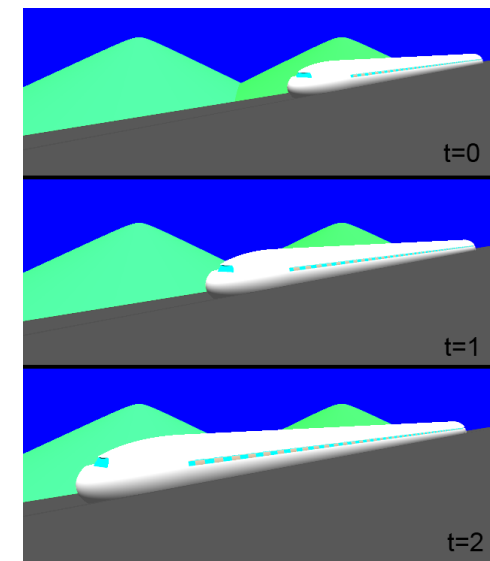


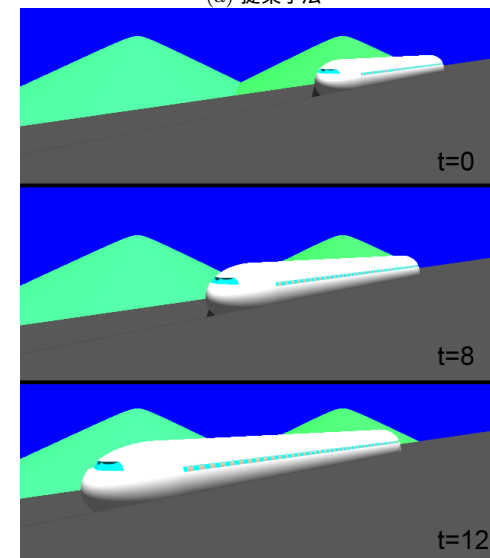
図 5 作例 1:向かい合う人とボールの動き

## 6. まとめ・今後の課題

本稿では、レイトレーシング技法を光の進む速さを考慮したものに拡張し、光線追跡時に描画対象となる仮想世界の時間を逆向きに進行させて計算を行うシステムを実装した。また、そのシステム上で光の速度に近いオブジェクトを描画、光の速度を遅くした描画を試み



(a) 提案手法



(b) 通常のレイトレーシング

図 6 作例 2:光速リニアモーターカー

た．その結果，見かけ上の同時性崩壊・オブジェクトの遅延・影の遅延・オブジェクトの伸縮といった映像効果が発現した．本稿ではその効果を「Light Brake Effect」と名付けた．

Light Brake Effect は，定性的な表現を用いて説明するならば以下のように書ける：

遠くにあるものは遅れて見える．パレードの行列がこちらに向かってやってくる時，行列の後ろにいる人たちは実際は遅れていなくても遅れて見える．一面のひまわり畑があったとき，手前の花が枯れていても奥の花は元気に咲いている．速く動くオブジェクトは，自らの影を引き離し，速度を下げると影に追いつかれる．車が手前に向かってくる場合は大きく見え，奥に去っていく場合は小さく見える．

本稿の冒頭で問題提起した「光速のパンチ」を本稿のアルゴリズムで描画するなら，パンチを受ける側から見たとき，素早く繰り出されるパンチほどグローブが大きく見え，またそのグローブが自らの影を引き離すという映像表現になるだろう．このような描写は，現実世界とは違う「誤った描写」であるし，また特殊相対論的な描写とも異なる．しかし筆者らは，この描写表現が，現実世界をどことなくデフォルメしたようなものにとらえており，そこに「リアリティ」を感じている．

今回実装したシステムは，独自形式のプリミティブなオブジェクトしか読み込めないが，今後は一般的な 3D ファイルフォーマットに対応し，Light Brake Effect が発揮される CG コンテンツを用意したい．また，光のドップラー効果を導入したいと考えている．理論的には，音のドップラー効果と同様にオブジェクトが視線方向に対してどのように動いているかで周波数（色）が変わるはずであり，オブジェクトが視点より遠ざかると，波長が伸びて赤っぽく見え（赤方偏移），逆にオブジェクトが視点に近づくと波長が縮み，光が青っぽく見える（青方偏移）ことになる．前述の光速のパンチの例えだと，早く繰り出されるパンチほどグローブが青く見える効果が期待される．

## 参 考 文 献

- 1) Hsiung, P.-K. and Dunn, R. H. P.: Visualizing relativistic effects in spacetime, *Supercomputing '89: Proceedings of the 1989 ACM/IEEE conference on Supercomputing*, New York, NY, USA, ACM, pp.2597-606 (1989).
- 2) 鶴岡修平，河口洋一郎：奥行き情報を用いた画像合成による特殊相対論的可視化とその応用（グラフィックスと CAD），情報処理学会研究報告， Vol.2009, No.12, pp.61-66 (2009/2/16・17).
- 3) 特殊相対論的レイトレーシング，<http://render.s73.xrea.com/program.html>.
- 4) 稲見昌彦，八谷和彦，橋本 直，福地健太郎：R2:Real × Reality, コンピュータビジョ

- ン・拡張現実感に関する普通じゃない勉強会 2.0，<http://kougaku-navi.net/vrarxr/> (2009 年 6 月 20 日).
- 5) 篠原祐樹，宮下芳明：不可能立体の写実的表現手法の提案， Vol.2009, No.19, pp.95-102 (2009).
- 6) Cammarano, M. and Jensen, H.W.: Time dependent photon mapping, *EGRW '02: Proceedings of the 13th Eurographics workshop on Rendering*, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, Eurographics Association, pp.135-144 (2002).
- 7) 松崎圭佑，甲田春樹，岩井大輔，佐藤宏介：Snail Light Projector: 超低速光速を模倣した時空間映像インタラクション，インタラクション 2009 論文集，No.1, pp.19-20 (2009).
- 8) 日本建築学会編：室内音場予測手法-理論と応用-，丸善 (2001).
- 9) 一則和地：音線追跡法によるホールの音響シミュレーションの一事例：環境工学，学術講演梗概集. 計画系， Vol.59, pp.51-52 (19840910).
- 10) 千葉，松岡：C による CG レイトレーシング，サイエンス社 (1991).