

# CG 技術最新動向について

倉田 和夫\*1

## Latest Trends in CG Technology

by

Kazuo KURATA \*1

(received on April 4, 2012 & accepted on July 3, 2012)

### Abstract

Looking back at the history of progress in CG technology which was born in the 1960s, methods to describe 3D models and to render them, which addressed the question of how to represent the shapes of objects as three-dimensional forms using the computer, had been developed by the 1980s to establish the process of CG production from modeling to rendering. Many of the techniques which were developed during this period form the basic framework of CG technology today. Further, since the 1990s, there has been an evolution, in pursuit of how realistic the expression can be, to become a photorealistic technology which simulates the more complex physical principles of the natural world. Since the turn of the century, accompanying the rapid progress in hardware, research has come to be engaged in to utilize GPUs for interactive realism, to introduce new CG techniques from fields of research other than CG, and to produce sounds which match animations in CG or which are made when objects are destroyed. This paper will present a tutorial of the trends in such CG techniques in recent years.

**Keywords:** CG, GI, IBR, IBL, Sound Rendering

**キーワード:** コンピュータグラフィックス、グローバルイルミネーション、イメージベースモデリング・レンダリング、イメージベーストライティング、サウンドレンダリング

## 1. はじめに

コンピュータグラフィックスに始めて出会ったのは1980年頃のことである。大学を出て勤めたばかりのソフト開発会社の資料室であった。何げなく手に取ったコンピュータ関連洋雑誌の不思議な絵(Fig. 1)が目にとまった。説明を読むと、どうもコンピュータを使って描いたらしい。大学の美術部で大型コンピュータを使ってモナリザの画像をラインプリンタに出力して喜んでいた者にとってこの画像は衝撃的だった。後にレイトレーシングという手法が使われていることを知った。これがCGに魅了されるきっかけだった。以来30年の月日が流れ、CGは実写と区別のつかないほどリアルな映像を作り出すまでになった。本稿では、このCG映像マジックを支えるいくつかの興味深い技術について紹介してみたい。合わせて最新の研究動向について報告する。

## 2. リアルの追求

### 2.1 CG 技術の誕生からレイトレーシングまで

CGの歴史は1960年代にアイヴァン・サザーランドのSKETCHPADから始まったとされる。1970年代にはスキャンラインやZバッファ法などの隠面消去法、フォンやブ

\*1 情報通信学部情報メディア学科准教授

Dept. of Information Media Technology, School of Information and Telecommunication Eng.,

Associate Professor

リンによる照明モデル、スムーズシェーディング、テクスチャや環境マッピングなどの基礎理論が開発されている。

1980年代初めには古典的レイトレーシングが登場する。Fig. 1のように鏡面反射や屈折を正確に表現することができるようになった。このレイトレーシングの登場でCGの表現力が飛躍的に進歩する。しかし、レイトレーシング法には大きな欠点があった。当時のコンピュータは処理速度が遅く、シーンの中の物体の数が多くなるとレンダリング時間が指数的に増えてしまうのである。そこで空間分割法をはじめとするいろいろな高速化手法が提案されることになる。1985年にシリコングラフィックス社がグラフィックス処理に特化した高性能ワークステーションを開発し、レイトレーシングによる商用の映像制作が可能になった。この時代はアメリカの西海岸を中心に多くのCG映像プロダクションが設立されコマーシャルや映画にCG映像が使われるようになった。

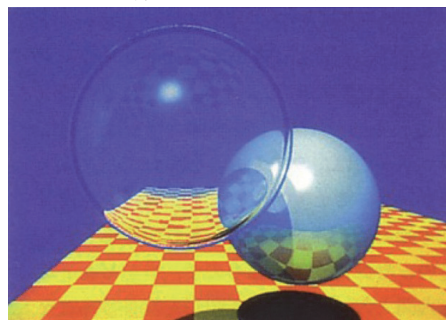


Fig.1 RayTracing (Turner Witted)

## 2.2 リアルなライティングの再現

古典的レイトレーシング法では光源までの光の経路を視点から逆にたどる方法をとっている。即ち、直接光源から出た光が反射や屈折して届く成分のみが計算される。しかし、我々を取り巻く現実の空間は机の下やカーテンの閉まった部屋など直接光の届かない場所も壁や床などの明るさの影響を受ける。この間接的な光を考慮すると映像のリアリティが格段に高くなる。1980年代の中ごろにこの間接光を考慮したグローバルイルミネーション(広域照明)手法が開発される。この手法は物体表面の光のエネルギーの保存を表すレンダリング方程式を解くもので、ラジオシティ法とモンテカルモレイトレーシング(MCRT)という2つの方法が知られている。ラジオシティ法は、物体表面が拡散反射するとみなして熱伝導や弾性体の力の伝播を解析する手法である。シーン内のすべての表面を小さな領域パッチに分割し、光のエネルギーの受け渡しを有限要素法を用いて、連立方程式として解く方法である。鏡面反射成分はラジオシティ法を前処理としてレイトレーシング法で付加される。もう一つの方法MCRTでは、物体のある点での反射光の強さは、その点を中心とする半球面上のあらゆる方向から入射してくる光(光源からの光や反射して入ってくる光など)に物体表面上の反射の特徴を表す BRDF 関数を掛けたものを積分する。MCRTは古典的レイトレーシングと同様にレイを視点から逆にトレースし物体表面とぶつくとモンテカルモサンプリングという方法でランダムな方向にレイを反射させる。これを光源に到達するまで繰り返す。このMCRTではラジオシティ法ではできない反射や屈折を正確に表現できる。しかし、物体表面の反射があらゆる方向に均一である場合はうまく計算できるが、方向に偏りがある場合は対応できないという欠点もある。1990年に、この欠点を補う方法として視点と光源の双方向からレイを追跡する双方向レイトレーシングという手法が登場する。



Fig.2 Radiosity

その後1990年代の中ごろには、MCRTを効率的に実行し、MCRTでは表現できなかったコースティクス(Fig.3の右側の透明なガラス玉の床の模様、集光効果という)まで表現できるフォトンマッピング<sup>5)</sup>という手法が登場する。フォトンマッピング法では、光源からの光の追跡と視点

からの光の追跡を2段階に分けて行う。第1段階で光源から光のエネルギーを持たせたフォトン(光子)をランダムな方向に多数飛ばし、物体表面にぶつくとそのエネルギー(フォトン)を記録する。第2段階で視点から光を追跡し、物体表面に交わると記録したエネルギーを加味してレンダリングする。

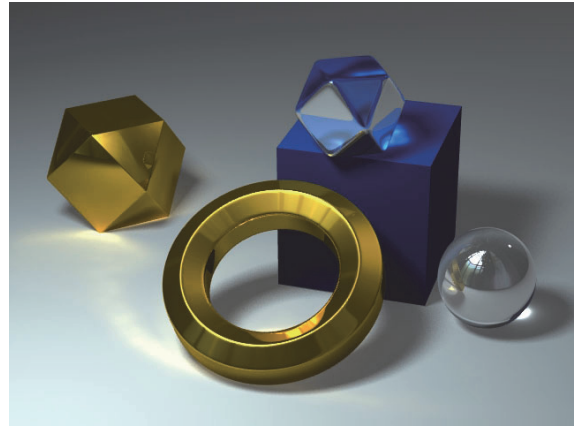


Fig.3 caustics

## 2.3 新しい可能性 イメージベースの技術

写真測量の分野では、写真から立体物を復元するための手法(ステレオという)が古くから知られている。1990年代になるとこのステレオの手法をモデリングやレンダリングに応用する研究が行われる。この撮影した写真から様々な情報を取り出し応用することをイメージベースと呼ぶ。この手法は、「2つの異なった視点から撮影された2枚の画像上で、対応する5点が分れば2つの視点の位置、方向および5点の空間位置が計算できる」という理論に基づいている。すでにロボットビジョンやコンピュータビジョンの分野では多くの研究が進められている。処理手順は、まずカメラで撮影した画像のディストーション(歪)の補正を行う。あらかじめ格子状のチェックボードを撮影した画像からディストーションの補正関数を作成する。次に撮影された複数の画像を補正関数で補正後、同じ対象物の対応する点を見つけ出す。最後に対応点から空間上の座標を算出する。CGの分野では複数の画像の各ピクセル毎のデプス(奥行き)がわかっている場合、それらの情報を補間して任意の視点からレンダリングした画像を生成するイメージワープという手法が既に知られていた。当時話題になったAppleのQuickTime VRはこの手法を使っている。デプスフロムステレオと呼ばれるステレオの手法を用いれば、デプスがわかっていない画像にデプスを割り当てることができる。デプスフロムステレオは、撮影された複数の写真に対して対応する点を見つけ出し、カメラの位置や方向パラメータを復元する。撮影された視点から基本となる画像(キーイメージ)を3D空間上に射影し、任意の視点から見た画像(オフセットイメージ)を作成する。このキーイメージとオフセットイメージの対応点のずれからデプスを求めることができる。1990年代の中ごろに、この考え方を基にしてイメージベースモデリング&レンダリングとして体系化された論文<sup>6)</sup>が登場する。Fig.4はこの論文のイメー

ジベーストモデリングによる時計台のモデリング結果である。一番左の図は復元すべきエッジを緑の線でマークしたもの。左から2番目の図は復元された3Dモデル。右から2番目の図は復元モデルを撮影画像に重ねて復元結果を確認したもの。右端の図は最終的に撮影が不可能な任意の視点から見た時計台をレンダリングしたものである。この手法の処理手順は、(1)最初にステレオの手法を使って複数視点で撮影された画像から大まかな3Dモデルを復元する。(2)復元した3Dモデルに撮影画像をマッピングする。(3)大まかに復元された3Dモデルの幾何学的な情報を基にデプスフロムステレオを用いて正確な対応点を見つけ出す。(4)任意の視点からのレンダリングをする。イメージベーストレンダリング(IBR)は映画「The Matrix」の“bullet time shots”の中で主人公の周りをカメラが360°移動するシーンの背景のレンダリングに使われている。

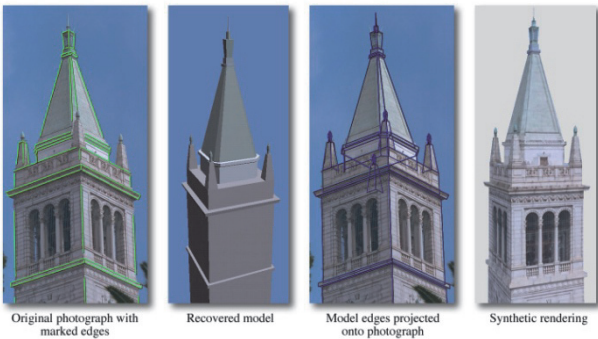


Fig.4 Modeling and Rendering Architecture from Photographs (Debevec, Taylor, and Malik 1996)

イメージベースの技術はその後ライティングの技術へと発展する。映画のVFXにおいては実写映像とCG映像の合成が不可欠である。このとき、リアルな合成を行うには実写を撮影したときのライティング条件をできるだけ正確に再現してCGのレンダリングをしなければならない。イメージベーストライティング(IBL)の論文<sup>7)</sup>でのIBLの実行プロセスは、(1)背景画像を撮影する。(2)合成したいCG物体が置かれる位置に周りが映りこむ金属球を置き撮影する。Light Probeと呼ぶ。(Fig.5)(3)視点からのレイを球の表面で反射させLight Probeの対応ピクセルの値を背景の3Dモデルにマッピングする。(4)背景の3Dモデルの各点の値を光源としてレンダリングする。(5)背景画像とCG画像を合成する。

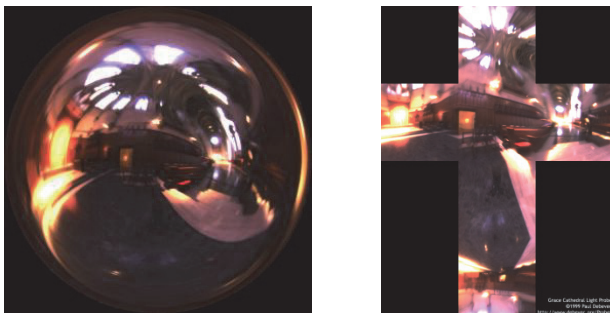


Fig.5 Light Probe

その後、(3)、(4)のステップを改良して環境マップを光

源と考えてライティングする方法が開発されている。

## 2.4 リアルな皮膚や大理石の再現

CGでは物体表面に当たった光は表面で反射するものと仮定してモデル化している。しかし、現実の世界では人間の肌や大理石、コップに入ったミルクなどは物体に当たった光の一部が物体内部に入り込む。そして物体内部で反射を繰り返して入射した位置と異なる位置から外部に出る。このような光の挙動はサブサーフェススキャタリングと呼ばれる。サブサーフェス内で一度だけ散乱するシングルスキャタリングと複数回散乱するマルチスキャタリングに分けてモデル化する方法がとられる。シングルスキャタリングは光の経路が決まっているので光の伝達を表す方程式(LTE)を使って経路に沿って積分したボリュームレンダリング方程式を解くことで求められる。一方マルチスキャタリングモデルでは複数回複雑に散乱するためにボリュームレンダリング方程式を使うことができない。ましてや、光の粒子と物体内部の散乱成分の衝突を個々に求めることは非常に難しい。ところが、煙や霧や雲などのように領域内の微粒子によって光が吸収されたり散乱されたりすることが多い媒体(パーティシペイティングメディアという)の場合、光の粒子の動きが淘汰されるディフュージョン(diffusion)という性質がある。ディフュージョンが進行する様子はディフュージョン方程式で記述される。マルチスキャタリングをディフュージョン方程式で解く方法は連立微分方程式を解かなければならないが、これは実用的ではない。この問題を解決したのは2001年にシングルスキャタリングモデルとマルチスキャタリングモデルをBSSRDF関数としてモデル化するまったく別のアイデアであった。このBSSRDF関数は光がサブサーフェス内に入射した位置とサブサーフェス内から出射した位置の距離だけに依存する関数となっており非常に扱いやすい。この論文<sup>8)</sup>の登場で物理的に正確なサブサーフェススキャタリングが実用化された。Fig.6の左の画像はマルチスキャタリングなしでレンダリングしたもの。右側の画像はマルチスキャタリングを考慮したもので、よりリアルな表現となっている。このBSSRDF関数モデルは映画でも「ハリーポッター秘密の部屋」のドビーというキャラクターの肌の質感をリアルに復元するために使われている。



Fig.6 (a)BRDF (b)BSSRDF  
(Henrik Wann Jensen 2001)

## 2.5 サウンドレンダリング<sup>3)</sup>

2010年のSIGGRAPHで音をテーマとした3つの論文が登場し注目を集めた。CGにおける音の研究は1980年代後半から行われていたようだが、CGアニメーションに連動した音を生成させるサウンドレンダリングという分野

が 1992 年に登場した同名の論文から登場する。このサウンドレンダリングの論文<sup>9)</sup>では音の伝達を計算するプロセスでレイトレーシングの考え方を音の伝達に適用しサウンドトレーシングの考え方が示されている。音源を発生した音が物体と干渉し観測者のもとに到達する軌跡をトレースすることで音の強さの変化を計算するというものである。ここでの音の伝播はオーディオ・シミュレーションに見られるような物理学に基づいた理論ではなく CG アニメーションに如何にシンクロさせるかというものである。2001 年になると物理的に正確なサウンドレンダリングの手法に関する 2 つの重要な論文が登場する。一つは有限要素法を使って物体の変形を正確に計算し、その結果物体の表面の振動とその伝播の仕方を正確に計算するものである。もう一つは物体表面の振動は外界からのインパクトに対するレスポンスと考え、変形の計算をする代わりに直接レスポンスに相当する音波を計算する方法をとっている。レスポンスの計算は特定の周波数領域ごとに区切って行い、すべての周波数にわたって足し合わせた音をレスポンスとした。この 2 つの論文は以降のサウンドレンダリングの研究に大きな影響を与えたと言われている。その後のサウンドレンダリング研究は物理的に正確にシミュレートする方向の研究が進んでいる。2009 年には流体シミュレーションをベースにリアルな水の音を生成する論文 Harmonic Fluids が注目を集めた。この手法では水の音の音源を球状のバブルが水面を振動させると考えて音の生成をシミュレートしていた。2010 年にはさらにバブルの形状やシミュレーションの自由度をあげた Sounding Liquids が大きな面積をもった水の音をシミュレートすることを可能にした。

### 3. 最新 SIGGRAPH 論文の動向

#### 3.1 発表論文の注目傾向

Table 1 は 2005 年から 2011 年までの SIGGRAPH で研究発表セッションの分野別論文数である。総論文数をみると隔年で増減が見られる。SIGGRAPH では論文数を決めているわけではないのに不思議である。昨年の論文の傾向として Rendering 関連の研究が少なくなり、シミュレーション関連の発表が多くなっている。とりわけ実世界のデータを取得して応用する研究が増える傾向にある。全 115 論文中 33 件が実世界データ/既存データ関連の研究である。レンダリング関連では DOF, ソフトシャドウ, モーションブラー, アンチエイリアシングなどのぼかし系の高速化手法の論文が半数を占めている。

#### 3.2 SIGGRAPH2011 の注目論文

##### (1) A Versatile HDR Video Production System (Tocci)

コンピューテーショナルフォトグラフィ。

2 つのビームスプリッター(ハーフミラー)を使って 3 つの異なる解像度の CCD に同時に撮影するカメラを製作した。

##### (2) Motion-Capture from Body-Mounted Cameras (Shiratori)

人体にカメラを装着。従来のモーションキャプチャーの逆の発想。周囲の風景から人体の動きを計算する。

大掛かりな装置設備が不要。屋外でも使えるメリットがある。

##### (3) Toward High-Quality Model Contact Sound (Zheng and James)

物体同士の衝突音を解析的に生成する。完全な剛体だけでなく表面に微細構造を持つ物体同士の摩擦も考慮。2009 年の水の音, 2010 年の大きな波の音の研究に続く音の研究シリーズ。

##### (4) Depixelizing Pixel Art (Kopf)

解像度の非常に粗いピクセルアートから、高解像度でも滑らかな輪郭のペイント画像を出力する手法。ゲーム関係者の注目を集めた。

## 4. 最後に

本稿を書くにあたり倉地紀子氏の書籍<sup>1)</sup>および雑誌「CGworld」の記事 ADVANCE<sup>3)</sup>を参考にさせていただいた。また 2011 年 9 月に開催された画像電子学会のセミナーの資料<sup>4)</sup>も参考にした。ここに感謝する次第である。

Table 1 The number of research presentation

Fields	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Imaging	15	20	25	19	15	17	21
Rendering	37	28	27	22	18	26	13
Simulation	9	4	9	5	5	11	14
Animation	15	10	20	21	13	24	9
Interaction	2	2	5	6	5	2	3
Modeling	20	22	22	17	22	23	22
Total	98	86	108	90	78	103	82

## 参考文献

- 1) 倉地紀子「CG Magic : レンダリング」オーム社, 2007 第4章 p59-86、第5章 pp91-114、第7章 p133-148
- 2) H. W. Jensen 「フォトンマッピング」 オーム社, 2001
- 3) 雑誌 CGWorld 通巻144号~147号記事 ADVANCE Vol 10~13
- 4) ビジュアルコンピューティングの基礎と新展開 画像電子学会第35回秋季セミナー予稿, 2011 国際会議報告「CG研究の最前線」柿本正憲
- 5) Henrik W. Jensen. "Global illumination using photon maps". In Proceedings of the eurographics workshop on Rendering techniques '96
- 6) Paul E. Debevec et al., "Modering and Rendering Architecture from Photograph2", Proceedings of SIGGRAPH 1996
- 7) Paul E. Debevec, "Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography", In SIGGRAPH 1998
- 8) Henrik W. Jensen et al., "A practical model for subsurface light transport". In SIGGRAPH 2001
- 9) Tapio Takala et al., "Sound Rendering", Proceedings of SIGGRAPH 1992