



2004 年 CG 技術の新動向～ 2 ～

倉地 紀子

今回は、CG 技術の歩みと今後の動向を、ピクサー社のフル 3DCG フィルムにおけるレンダリング技術の基礎を作り上げてきたトニー・アポダカ (Tony Apodaca) 氏と、CG 技術をレンダリング、モデリング、アニメーションという多角的な面から捉えて研究開発をおこない MAYA 上で実装してきたヨース・スタム (Jos Stam) 氏に語ってもらった。

Tony Apodaca—CG の原点は「映画」

アポダカ氏が初めて CG に接するようになったのも、前回紹介したワード氏とほぼ同時期の 1983～1985 年だった。ただ、ワード氏がどちらかというと「光」に対する科学的な興味から CG に導かれていったのに対して、アポダカ氏の場合にはその原点は「映画」にあった。現在の映画 VFX の大御所達と同様に、同氏も映画「スター・ウォーズ」から非常に強い刺激を受けたという。「自分は「右脳」で考えるタイプで、言葉や抽象的な記号よりも、図やイメージによって考えるし、抽象画よりもルネッサンスの絵画の方が好きだ。映画やフォトリアルな映像に惹かれたのも、それが理由だと思う」と同氏は語っている。

そして、ワード氏にとって、CG 技術とは人間の知覚をシミュレートすることを意味していたのに対して、アポダカ氏にとって CG 技術とは、人間のイマジネーションと、現実の世界がもつリアリティとの架け橋を意味している。「自分は、頭の中ではどうやったらリアルな絵が作り出せるかがわかっていると思うし、そのための多くのアイデアを持っている。ただ、残念ながら、絵筆を使ってこれを作り出す技がない。CG はまさに、そういったアイデアを現実

のものとして映像化する術を与えてくれる、理想的な手段だと感じた」とアポダカ氏は語っている。

そんなアポダカ氏は、ピクサー社に入社できたことを、とても幸運だったという。なぜなら、そこには自分と越える豊かな才能を持ったアーティストが勢ぞろいしていて、自分と同じビジョンを分かち合うことができたからだそう。また、このことは、同氏が理想とする技術開発を行っていく上でも、非常に有意義だったようだ。

「"The proof is in the pudding" という英語の諺がいうように、CG 理論は、それによって実際に映像が制作されて、はじめてその価値が実証されたといえる。そして、その理論の発展においても、決して理論の新しさだけを追求するのではなく、むしろその理論を、人間のイマジネーションとコミュニケーションしやすい形に改善していくことの方が大切だと思う」とアポダカ氏はいう。

そして、そのような理論の実装や改善に不可欠なのが、優れたユーザーとの間のキャッチ・ボールだという。CG というものが、コンピュータを用いて人間の創造性を視覚化することを意図していると考ええると、豊かなイマジネーションを持った才能あるアーティストは、最も優れたユーザーといえるだろう。よりパーフェクトな映像を作り出そうという飽くことなき願望を持つユーザーと対峙することによって、開発者はユーザーがその創造性をより広範囲に発揮できるように技術を改善していく。そして、このようなお互いの競い合いが、CG 技術を研ぎ澄ませ、本来あるべき方向へと発展させていくことになるという。

このように、CG 技術開発においては、優れた開発者と優れたユーザーとが密接にコンタクトをとれる環境が、最も理想的な開発環境といえる。このためか、2000 年前後からは、大学の研究室と大手の映像プ

ロダクションとが共同で研究開発を行い、その結果を共著という形で論文に発表するケースや、アカデミックな CG 理論の研究に携わっていた研究者が、その後大手の映像プロダクションに入って実用的な CG 技術の研究に専念するという例も増えてきている。

しかしながら、不思議なことに、アカデミックな CG 理論の研究分野においても、CG の歴史を変えるような画期的な理論を生み出した研究開発者には、アポダカ氏同様に、「自分はちょうど、アーティストが絵筆で描いているのと同じことを、数式やアルゴリズムによって作り出している」と語る人が多い。つまり、上記の密接なコラボレーションとは、必ずしも距離の問題ではなく、共に同じビジョンを持ち同じゴールに向かって着実に歩みを進めていることが、CG 技術の研究開発において最も大切だといえるようだ。

フォトリアルな映像に魅せられて CG の世界に足を踏み入れたアポダカ氏だが、同氏がいう「現実の世界がもつリアリティ」とは、一般的に考えられているフォトリアルizmとは少し違っている。「CG は、リアルな映像としてまず写真を目標にしてきた。どうやったら、写真のような映像が作り出せるかという問題に、長年取り組んできた。その結果、もちろん、人間がもっとも身近に目にしている自然物や人間の表現に関しては、まだ完全とはいえないが、現在この目標は、ほぼ達成された。

そして、絵描きが模写をこなせるようになった後に自分自身の作品を作り出そうとするように、CG が目指すリアリズムのレベルも次の段階に移っているとアポダカ氏は指摘する。そして、CG が最終的に目指すべきリアリズムを「フォト・シュールリアリズム (Photosurrealism)」という言葉で表している。「アーティストは、映像

を通して、人間が日常の生活で得ることのできないメッセージを送ろうとする。CG映像がそのような目的を達成するためには、それが現実の世界を超えたリアリズム、つまりアーティストのビジョンから作り出されたリアリズムにマッチできるようにする必要がある」と同氏は語っている。

インタラクティブ・フォトリアリズム

その一方で、アボダカ氏は、CGが目指す新たなリアリズムのもう一つの方向性として、「インタラクティブ・フォトリアリズム」というものをあげている。そして、この方向性の研究は、もっとも輝かしい未来を予測できる研究分野だという。GPUプログラミングやGPUシェーダなどの登場によって、ソフトウェアと同様な高度なレンダリング技術をハードウェア化することができるようになり、これまでただひたすらに大量のポリゴンを高速で処理することだけしか目標がなかったハードウェア・グラフィックスの研究分野が非常に活気づいている。

逆に、高度なレンダリング技術の研究分野でも、その研究成果を容易にリアルタイム化することが可能となり、大きな刺激を受けている。そして、これら両方の世界の活性化に加えて、新しい世代の技術者が子供の頃から3Dビデオゲームなどのインタラクティブ・パフォーマンスに慣れ親しんできていることも、インタラクティブ・フォトリアリズムの研究開発を躍進させる要因となるだろうと、アボダカ氏は指摘している。また、同時に、これまで停滞気味だった、バーチャル・リアリティ（VR）の研究も息を吹き返すことが予測できるそうで、「インタラクティブ・フォトリアリズムの研究は、パーソナルVRデバイスや、その上で動くこれまでの世代のVRとは比べものにならないほど精緻なリアリズムを可能にするはずだ。

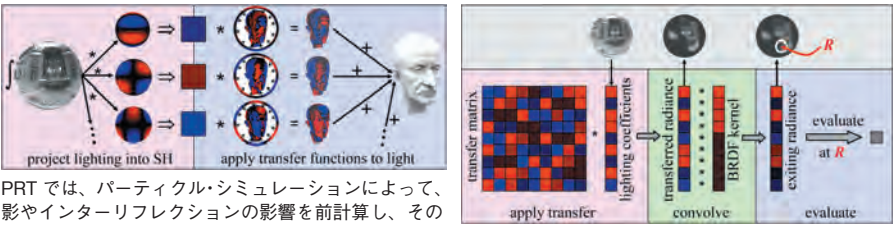
ただ、おそらくそれらは、VRとは違った名前の新しい技術として登場することになるだろう」と語っている。そして、未来のCGの研究開発においても、何度も失敗を繰り返しながらも、飽くことなき探究心で研究が続けられるであろう課題として、バーチャル・アクターをあげている。「実際の人間の体の動きや顔の表情は、人間が考えている以上に本当に微妙なもので、これをCGで精緻に作り出すことは、今後10年の研究を経ても、まだ可能になるかどうかはわからない」というのが率直な意見のようだ。

インタラクティブなフォトリアリズムを象徴する新技術の登場は、GPU技術の急速な進化に後押しされて、まずレンダリン

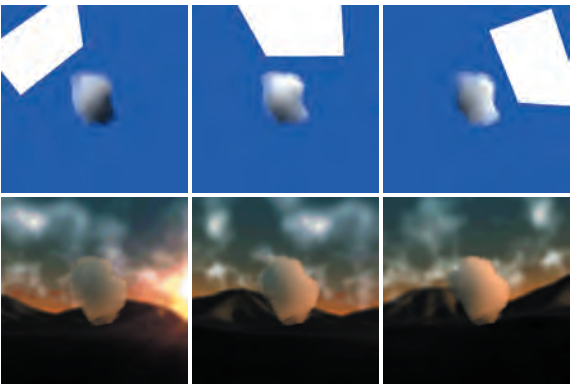
リアルタイム・フォトリアリズム（PRT）
2002年にPeter-Pike Sloanによって発表されたPRT(Precomputed Radiance Transfer)という手法では、これまでの環境マップを用いたGPU上のリアルタイム・レンダリングでは不可能だった、影やインターリフレクションの効果も加えることが可能となった。
”Precomputed Radiance Transfer for Real-Time Rendering in Dynamic, Low-Frequency Lighting Environments” (Peter-Pike Sloan, Proceedintgs of Siggraph2002)



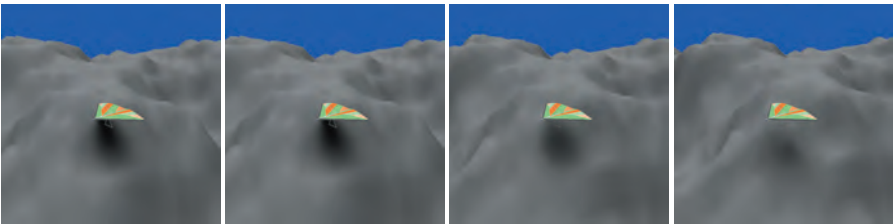
(左) 環境マップを用いたGPU上のグローバル・イルミネーション影やインターリフレクションの影響は加味されていない。
(右) PRTを用いたGPU上のグローバルイルミネーション影やインターリフレクションの影響も加味されている。



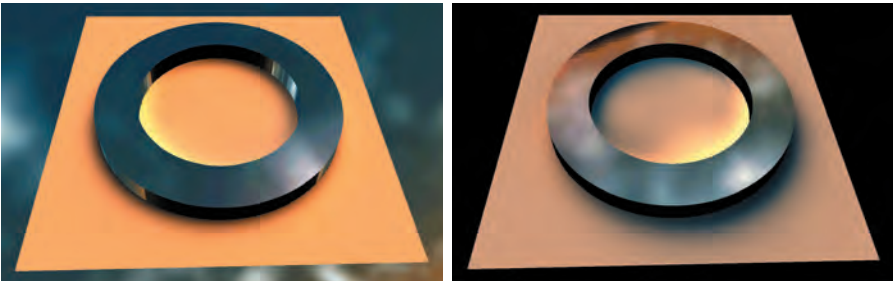
PRTでは、パーティクル・シミュレーションによって、影やインターリフレクションの影響を前計算し、その結果をベクトルや行列といった非線形な形で蓄えておく。影やインターリフレクションといった、物理的には非線形な効果を、非線形なデータとして近似することによって、レイトレースと必要としないGPU上のレンダリングが可能となった。



PRTは、空間全体を分割したボクセル単位でシミュレーションの前計算を行うことによって、ボリュームメトリックな物体のレンダリングを行うこともできる。
(上) 白い板を光源と考えて雲をレンダリングしたもの。
(下) 背景の写真を光源と考えて雲をレンダリングしたもの。



PRTはシミュレーションとレンダリングという2段階の計算処理で構成されており、環境からの光を追跡するシミュレーションを前処理で行うというアプローチは、フォトンマッピング法とも共通している。したがって、コースティックスの表現も可能だ。ただし、フォトンマッピング法では、シミュレーションの結果が線形表現として蓄えられないため、レイを用いたレンダリングが必要とされるのに対して、PRTではシミュレーションの結果が線形表現となっているため、レイを用いずにGPU上でリアルタイムにレンダリングできる。





デフューズの表現には秀でていたものの、スペキュラーなどの高周波数の光お表現と苦手としていた PRT を改善した手法が、2003 年には発表された。映像はこの手法によってサブサーフェース・スキャタリングの効果を表現したもの。異なった 2 種類の写真を光源として計算を行っている。

"Clustered Principal Components for Precomputed Radiance Transfer"(Proceedings of Siggraph2003, Peter-Pike Sloan)



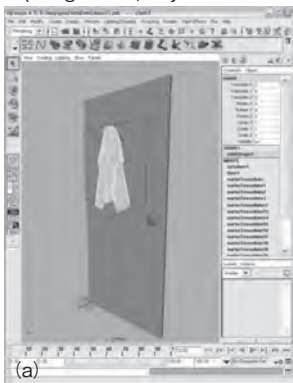
ピーター＝バイク・スローン

グの分野から起こってきているが、アニメーションの中でも、物理的な法則に基づいて物体を動かすシミュレーション技術に関しては、レンダリング技術のすぐ後を追う形で、新しい GPU 技術を積極的に取り入れた技法が芽を吹きはじめている。そして、これらの研究では、これまでレンダリング、モデリング、アニメーションというそれぞれのカテゴリーの中の、さらに細かい各専門分野において特化した研究をおこなってきた研究者が、それらをすべて統合した視点から、新しいシミュレーションの技法を考案しようとしている。そして、そのような研究体制を 10 年以上前からとってきた、いわばのパイオニアともいえるのが、ヨース・スタム (Jos Stam) 氏だ。

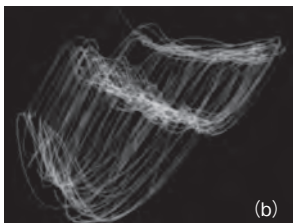
リアルタイム・フォトリアリズム (PRT の発展形)



リアルタイム・フォトリアリズムを、動きとライティングの両面から捉えた手法も登場した。
"Precomputing Interactive Dynamic Deformable Scenes"
(Doug James, Kayvon Fatahalian, Proceedings of Siggraph2003)



物体同士の干渉がないものと仮定した静的なシミュレーションを市販パッケージのシミュレーションツールと用いておこなっておく。

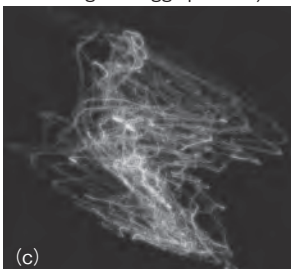


(a) の計算結果をもとにして、外部からの衝撃に対するレスポンスとして、動的なシミュレーションをリアルタイムに算出する。

前回紹介した BTF と PRT とを融合して、より効率的で精度の高いグローバルイルミネーションの計算を行う手法も発表された。

(a) は BTF だけでレンダリングを行ったもので、ローカルな光のエフェクトは正確に捉えられているが、グローバルな影やインターリフレクションなどは捉えられていない。

(b) は BTF と PRT を用いたレンダリングをおこなったもので、グローバルな影やインターリフレクションの影響まで捉えられている。



(b) で算出されたレスポンスをもとにして、もっとも特徴のある動きをする点において、PRT によって光に対するレスポンスを算出する。他の点におけるレスポンスは、それらを補間することに寄って求められる。



リアルタイムの変形シミュレーションと、PRT によるリアルタイム・レンダリングによって算出された結果映像。動きのレスポンスとそれに呼応した光のレスポンスの両者がリアルタイムに計算されている。

MAYA のサブディビジョン・サーフェースや流体シミュレーションなどの機能は、同氏の理論をもとに実装されたものだ。

Jos Stam--CG 技術の原点はアート

多岐にわたるスタム氏の研究成果の中でも最もよく知られているのが、セミ・ラグランジアン法 (Semi-Lagrangian) と呼ばれる、流体シミュレーションに不



ヨース・スタム氏

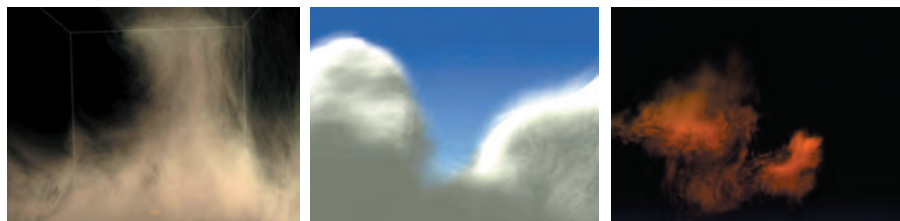
可欠な流体運動方程式の高速な解法で、この解法は、流体シミュレーションというものを CG アニメーションの視点から捉え直している点が大きな特徴となっている (注 1)。

流体シミュレーションでは、流体が満たす領域全体を一律な 6 面体に分割し、それぞれの 6 面体の中心点における速度、圧力、温度、密度などを変数とする方程式を記述する。方程式は各 6 面体に対してひとつずつ作成され、これらの連立微分方程式を解いて、各 6 面体の中心点における速度や圧力などの物理量を算出する。一般的に方程式は、現在のステップと 1 つ前のステップで算出された物理量をもとにして、次のステップの物理量が算出される。このため、流体の動きに急激な変化が起こったような場合には、計算を行う時間の幅 (タイム・ステップ) を非常に細かく取らないと、求めるべき解を通り越して、解を検出することができなくなってしまう。

そこで、スタム氏は、それぞれの点における速度ベクトルをたどって軌跡を作成し、ある点における次のステップの速度は、他の点において 1 つ前のステップで算出された速度が、この軌跡に沿って移動するパーティクルによって運ばれてくると考えた。このように考えると、次のステップの速度があらかじめ推測できているため、ある程度大きなタイム・ステップを用いても解が発散することなく、安定した状態で高速に解を算出することができる。

CG の分野では、流体の動きをパーティクル・アニメーションによって近似するラグランジアン法とよばれる手法が古くからもちいられてきていた。スタム氏の解法は、学術的あるいは産業的な流体シミュレーションとラグランジアン法との折衷という意味で、セミ・ランジアン法と呼ばれるようになったようだ。そして、これ以後 CG の分野に登場した流体シミュレーションのほとんどの技法が、その方程式の解法として、セミ・ラグランジアン法を用いている。

セミ・ラグランジアン法は大胆な仮説と近似に基づいている。このため、厳密な意味で物理的に正確とはいえないが、計算プロセスを単純化し、計算効率を大幅に向上することができる。そしてなにより、視覚的には、物理的に正確な流体運動方程式の解法を用いた場合と、ほとんど変わらない精度が得られることが大きな魅力となっている。そして、この魅力こそがスタム氏にとっての CG 技術の本質といえるようだ。「リアリズムの表現のために、物理的な数式が必要だとは決して思わない。もともと



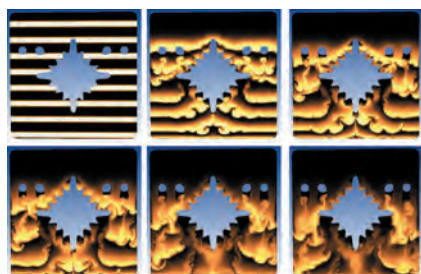
セミ・ラグランジアン法を考案した論文「Stable Fluids」の画像



Stable Fluids の手法をさらに発展させて、「渦」の表現まで可能にした。

"Visual Simulation of Smoke"

(Ronald Fedkiw, Jos Stam, Henrik Wann Jensen, Proceedings of Siggraph2002)



任意の形状のサーフェス上での流体シミュレーションを可能にした。

物理的な理論は、特定の条件のもとで行われた実験結果に基づいている。いいかえると、非常に限られた環境においてこそ成り立つもので、これを実際に現実の世界に適用して、そこに見られるリアリズムがつくりだせるという保障はない。

逆に、絵画の世界では物理的な理論などまったく用いずに、実にみごとなリアリズムが作り出されてきた。そして、時代や文化の移り変わりによってリアリズムの定義も変化している。もちろん、物理的な理論や数式は、現実の世界に見られる複雑な現象を単純な形にモデル化したり、それをアルゴリズム化したりする上では非常に便利だといえる。ただ、結論からいえば、「見た目がよければそれでよし」だと思う。もし、アルゴリズム上で物理的な法則など全く使わずに、視覚的に現実の世界と寸分たがわぬリアリズムが作り出せたとしたら、それはすばらしいことだ」と同氏は語っている。

スタム氏にとってCG技術の原点はアートにあるという。もっとも、同氏がいうアートとは映像制作に限らず、絵画や建築

から科学に到るまでの非常に広義な意味でのアート、たとえていえばルネサンス時代のアートに近い。絵が好きだったというスタム氏は、最終的には絵筆ではなく数式やコードによってそれを描くことを選択したものの、その基本的な姿勢はなんらアーティストと変わらないと自分でも認識しているようだ。それゆえ、スタム氏が考えるシミュレーションとは、単に現実の世界に見られる物理法則をそのままコピーすることではなく、むしろ、アーティストの創造性を、手作業だけでは不可能な方向性に向かって発揮させるための手段と考えられている。

シミュレーションというものを非常に多面的に捉えているのも、人間の創造性という計り知れない複雑さを持った対象物とコミュニケーションするためといえるようだ。たとえば、テクスチャ・マッピングは、現状では一枚一枚描かれたテクスチャをマッピングするという作業工程になっているが、シミュレーションで作成されたテクスチャをマッピングすることによって、アーティストが作り出したアートに、時間軸に沿った現実の世界の表情の変化を加えることができるという。そして、このような考え方を発展させて、同氏は2003年に、流体シミュレーションとサブディビジョン・サーフェスの手法を融合させ、自然界にはありえないような任意の形状をもったサーフェス上で、人間の創意工夫のもとに流体シミュレーションの計算を行うことを可能にした(注2)。

GPU 技術の進化で変わる CG 技術

CG 技術の大きな転換期の重要な要素として、スタム氏も GPU 技術の急激な進化を上げている。そして、GPU 上のプログラムやシェーダの導入によって、これまでの技術が考えられていた空間の次元を、実用的なレベルでさらに1つまた1つと上げていくことが可能になるだろうと予測している。たとえば、ボリウム・レンダリングでは、視点とライトという2つの軸があり、視点方向の軸に沿って積分計算がおこなわれていた。これに対して、時間軸を加え時間方向にも積分をおこなうことによって、物理的な正確さを保ったボリウムメトリックなモーション・ブラーが可能となる。これは、映画エフェクトなどにおいては非常に効果的な手法になるだろうとスタム氏はいう。

また、空間の次元を上げて考える対象は、このようなシミュレーションのアルゴリズムだけにはとどまらない。たとえば、CG が作り出した3Dのデータは現在でも2Dのモニタ上に表示されるが、デバイス技術の進化に伴って、ユーザがもうひとつ上の次元で、3Dのバーチャル・ワールドと直接コミュニケーションできるような手段も登場するだろうと同氏は予測している。

スタム氏からは非常に広い視野をもった発明家という印象を受けたが、もともとこの世に現れた発明や発見の実に多くが、人間の創造性を視覚化するため、いいかえるとアートのために生み出されている。たとえば、絵の具にしても写真にしても、最初はアートのために発明された「新技術」だった。ところが、やがてこれらは人間の日常生活に深く溶け込んでいき、誰もこれを「技術」だと意識することさえなくなった。3DCG に関してもやがてはそうなる日がくるのだろう。

CG 技術はまさにこの地点を目指しているともいえる。ただ、人間のリアリズムに対する欲求には限りがなく、それに答えるための技術はまた新たな探求の旅に出ることになる。それはもはや「CG 技術」とはまったく違ったコンセプトの「新技術」となっているのかもしれないが、そこで目指されているリアリズムも、それぞれの時代にアーティストが追求してきたものと、究極的にはなんら変わりはないのかもしれない。

注1) 「Stable Fluids」

(Proceedings of Siggraph'99, Jos Stam)

注2) 「Flows on Surfaces of Arbitrary Topology」

(Proceedings of Siggraph2003, Jos Stam)

Noriko Kurachi