



本誌「月刊 FDI」にて、2002 年 4 月号から 2012 年 12 月号まで連載していた倉地紀子著「CG コンテンツ」129 編 (564 頁) は。連載開始から 20 年、また 11 年に亘った連載が絶筆となってから本年度で 10 年目の節目となりました。これを基に 2022 年 4 月号(272 号)から本文に再掲載し、全記事内容を当時のままに、2 巻にまとめて発行することと致しました。

なお、当誌にて掲載しております写真図版等はモノクロ印刷となっておりますが、当時は全頁カラー印刷でした。なお、その他の掲載内容は、当時のままといたしましたので、技術面での記載内容などが現状と異なる場合がありますのでご了承ください。

※フッターに掲載年月を表記してあります。

FDI2013ANNEX PART. 1

CGコンテンツ 総集編(PART 1)

2002.04「モンスターズ・インク：テクノロジー・イン・デプス」- アーティスティックなりアリズムをつくりだした影の主役たち
～ 2008.03 3DCG 映画の成熟 - 映画「ビー・ムービー」の CG 技術

72編 285頁 頒価5,000円(消費税込み)

FDI2013ANNEX PART. 2

CGコンテンツ 総集編(PART 2)

2008.04「IMAGINA2008」(前編) — イマジナワードと R&D セッション—
～ 2012.12 「フランケンウィニー」 — ストップモーション・アニメーションの醍醐味を支えた VFX (絶筆)

57編 279頁 頒価5,000円(消費税込み)

※書店及びネットでは販売しておりません。お申し込みは、お問い合わせは、
E-mail : editor@uni-w.com 月刊 FDI 編集部までご連絡ください。



2004 年 CG 技術の新動向～ 1 ～

倉地 紀子

CG というものがこの世に現れて、すでに 20 年の歳月が経つ。そしてその間に、CG は次第に人間の生活に溶け込んでいった。敷居の高い高度な技術とされていた CG が、現在では非常に身近なものになったといえる。しかしながら、CG が人間にとってごく当たり前のコミュニケーションの手段に成長するまでには、CG という概念を作り出した研究とはまた別の、数多くの研究が積み重ねられてきた。そして、その研究は、CG をさらに成熟したコミュニケーションの手段へと成長させる方向へと向かっている。

CG 技術の発展は第 3 段階に

今日までの CG 技術の発展は、大きく 3 段階に分けられる。第 1 段階は、CG の創世記にあたる 80 年代前半から中半にあたる時期で、この時期には、現実の世界の様々な物体を、どのようにして 3DCG によって表現するかということが課題となっていた。

そして、3DCG によって物体を作成するための一通りのパイプラインが定着した後は、第 2 段階として、いかにして現実の世界で人間が見ている通りに描き出すかということが課題となった。現実の世界をいかにしてリアルに描き出すかという課題は、CG が考案される遙か以前からアーティストが探求してきたテーマでもあり、ある意味では際限のない探求を要する課題ともいえる。このため、第 2 段階の研究は、80 年代半ばから長い道のりを経て、今日にまで至っている。しかしながら、コンピュータの性能の著しい向上にも後押しされて、現在では、80 年代半ばには想像もできなかったほどの精度で、現実の世界に見られる光景を、CG によって描きだすことが可能になった。そして、CG による表現様式も

多様化し、CG が目指すリアリズムのレベルも新たな段階に入っていくことになる。

リアリズムの新たなレベルとしては、表現の精度のさらなる向上や表現様式の多様化といった面だけでなく、リアルな表現をいかにインタラクティブに作り出すかということも考えられるようになった。これが第 3 段階の課題といえる。人間が思い描いた通りの光景をコンピュータによって作成できるようにするという第 2 段階の課題は、人間に 1 つの新しいコミュニケーションの手段を与えることになった。第 3 段階では、さらにインタラクティブという要素を加えることによって、コミュニケーションの新たなレベルを目指しているともいえる。

現在の CG 技術は、まさにこの第 3 段階の入り口にあり、その課題のもとに、CG 技術の流れは大きく変わろうとしている。そこで、このような新たな転換期において、CG 技術が何を目指していくべきかということを、CG 技術の初期段階から長年にわたって研究開発に携わり、その歴史を変える成果を残してきた人々の視点から紹介していく。今回はまず、フォトリャリスティック・レンダリングの研究開発の歴史を担ってきたともいえるグレッグ・ワード (Greg Ward) 氏に、レンダリング技術の変遷と今後の動向を、同氏の視点から語ってもらった。

perceptually-based rendering

大学時代にコンピュータ・サイエンスを専攻していたワード氏は、アルバイトでパークレイ大学の付属研究所に勤務する機会を得た。そして、そこで出会った人々から大きな感化を受け、コンピュータ・グラフィックスを博士論文のテーマとして選んだという。1983 年から 1985 年という、

CG 技術の発展の上で、ちょうど第 1 期から第 2 期に移ろうとする時期で、これまでできなかった何かを可能にしようと、毎年のように新しい CG 理論が生み出されていった。当時、パークレイ研究所で日照条件を復元するという課題に臨んでいた同氏は、その傍らで、フォトリャリスティック・レンダラーの開発にも取り組んでいた。ただ、その研究開発の方向性は、当時の Siggraph を賑わせていた CG 技術のトレンドとは若干違っていたようだ。

1985 年に発表されたレンダリング方程式を基点として、当時の研究開発者の関心は、もっぱら物理的に正確な光の伝播を視覚化することに集まっていた。しかしながら、ワード氏が重点をおいていたのは、まず人間が 3D の世界とコミュニケーションするためのユーザインターフェースだった。そして、このユーザインターフェースを用いて、人間が「知覚」した世界を視覚化することが目指された。ワード氏にとって、レンダリングとは、人間の視覚に外部から物理的に入り込んだ光が、人間の脳によって知覚されるまでの工程を、いかにしてうまくシミュレートするかを意味しているという。そして、同氏はこれを perceptually-based rendering (「知覚」に基づいたレンダリング) と呼んでいる。

実際のところ、人間の知覚能力にはいままもって未知の部分が多く、いかなる物理法則を適用し、コンピュータによる精密な計算を行っても、これを正確に再現することは不可能とされている。ただ、ある特定の条件のもとでは、その複雑な人間の知覚システムを非常に単純化することができる。つまり必要とされるのは、物理法則をそのまま視覚化することではなく、目的に応じてシミュレートする要素を最小限に絞り込

み、単純なモデルとして視覚化することだといえる。そして、このような方向性のもとに作り出されたのが、レンダリング方程式の解法となっているグローバル・イルミネーション (GI) というレンダリング技法を、史上初めてツール化した、RADIANCE というソフトウェアだった。

1986 年には、その基本となる機能がほぼ整えられた RADIANCE だが、特に学術的な目的では現在でも頻繁に活用されている。また、80 年代後半から 90 年代初頭にかけてワード氏が論文発表した数々のレンダリング技法も、すべて RADIANCE 上で実装されている。

代表的なものとしては、物体表面上の各点における光の強さを物体表面の形状に沿って補間するイラディアン・キャッシュ (irradiance cash) と呼ばれる手法や、方向性をもった材質の反射特性 (異方性反射) をガウス関数によってモデル化したワード・モデル (Ward Gaussian Reflectance Model) などがある。

反射特性

GI では、物体表面上の各サンプル点における光の強さを独立に計算し、それらのサンプル点で物体表面を覆いつくすことによって、物体表面全体にわたる光の強さの積分計算を近似するという考え方に基づいている。したがってイラディアン・キャッシュにみられる「補間」という考え方は、本来の GI の考え方に反するものともいえるが、実質的にはこれによって、視覚的にはほぼ正確な計算結果が得られ、計算負荷の重い GI の計算をおこなうサンプル点の数を減らすことによって、レンダリング全体にかかる計算時間を大幅に短縮することができる。イラディアン・キャッシュの考え方は、特に最近のリアルタイム GI の研究には欠かせないものとなっている。

"Ward Gaussian Reflectance Model (1992)"
写真を用いた計測とガウス関数によって異方性反射をシンプルにモデル化した。



実写



等方性反射モデルによるレンダリング



異方性反射モデルによるレンダリング

また、一般的に方向性をもたない材質の反射特性 (等方性反射) は単純なモデルによってかなり正確に表現できるのに対して、方向性をもった材質の反射特性 (異方性反射) に関しては、物理的な法則を考慮した複雑な反射モデルを用いなければ、反射する光の挙動を正確に表現することができなかった。ところが、ワード氏は、物理的な特性をガウス関数によって近似した反射モデルを、まず等方性反射に対して作成し、その拡張モデル (パラメータの数を 1 つ増やしたもの) として、異方性反射の反射モデルを定義した。そして、この近似モデルの物理的な正確さを補うために、実際に物体表面を視点とライトの方向を変化させて撮影した写真を計測することによって、反射モデルのパラメータの値を決定している。厳密な意味で物理的に正確とはいえないが、限りなくシンプルなモデルによって、人間の目が限りなく正確だと「知覚」できるように意図されていたといえる。90 年代初頭に考案されたこの異方性反射モデルは、現在でも頻繁に活用されているだけでなく、写真を用いて物体表面の反射特性を定義するというアプローチは、その後の研究に大きな影響を与えた。

HDR 画像

CG レンダリングの歴史の上で、写真を用いたレンダリング技法の登場は、レンダリング技術の流れを大きく変えることになった。写真を用いたレンダリング技法としては、90 年代半ばから後半にかけて、ポール・デベヴェック (Paul Debevec) によって体系化されたイメージ・ベースド・レンダリング (IBR) や、同氏によって考案されたイメージ・ベースド・ライティング (IBL) がその出発点とされているが、ワード氏はそれに先立つ研究成果を残している。IBL とは、撮影された画像の各ピクセルを光

源に見立ててレンダリングを行うことを意味しており、そのためには、各ピクセルが現実のシーンの光の強さを正確に捉えている必要がある。そして、各ピクセルの値が、現実のシーンの光の強さ (ラディアン) に等しくなっているような画像は、HDR 画像と呼ばれる。撮影された画像から HDR 画像を作成する手法も、IBL に先立ってデベヴェック氏によって考案されたが、HDR ファイル・フォーマットや HDR 対応のトーン・マッピング (tone mapping) に相当する技法を最初に考案したのは、ワード氏だった。それまでの画像ファイル・フォーマットでは、一般的に 8 ビット RGB と呼ばれる、RGB それぞれの値を 0 から 255 までの整数で表わす形式がとられていた。GI でどれほど精密な計算を行っても、その結果算出された実数値を 8 ビット RGB で正確に近似することは難しい。そこでワード氏は、広域にわたる実数の領域をできるだけ密に埋め尽くすることができるような、コンパクトなデータフォーマットとして、RGBE というファイル・フォーマットを考え出した。そして、この RGBE フォーマットはのちに HDR 画像フォーマットとして定着していくことになる。

一方のトーン・マッピングとは、画像データからディスプレイ上に表示するデータへの変換を意味しており、ワード氏は、HDR 画像フォーマットで表されたデータを、人間の目の知覚に合わせて 8 ビット RGB の値に変換する方法を考案した。実際のところ、HDR 理論を発表したデベヴェック氏ははたと困ったのは、無限の実数領域で算出された値を、どのような画像ファイル・フォーマットとしてデータ化し、さらにそのデータを、どのようにしてフレームバッファに表示するための 8 ビット RGB 形式に変換するかという問題だった。幸運にもそれに先立つワード氏の研究があったからこそ、



異方性反射モデルによるレンダリング



広域にわたる浮動小数点型データとして算出された HDR 画像は、ディスプレイ・デバイスに表示するために、トーン・マッピングによって、各チャンネルが8ビットの RGB データに変換される。適切なトーン・マッピングによって変換されない限り、最終的に正確な画像を表示することができない。



フィルム撮影した写真をスキヤニングして表示したもの。

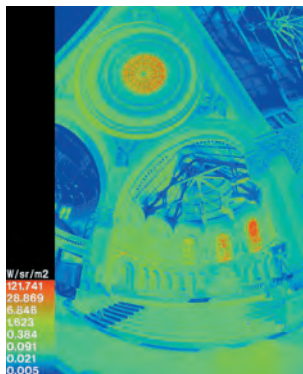


HDR 画像全体を従来の (HDR 対応ではない) 線形補間のトーン・マッピングによって表示したもの。



HDR 画像の中で輝度が一定値以下 (全体の輝度の 0.1% 以下) の部分を、(HDR 対応ではない) 線形補間のトーン・マッピングによって表示したもの。

(HDR 対応ではない) 線形補間のトーン・マッピングにおけるエラーの大きさを5段階に分けて表示。青から赤に変化するにつれて、その部分でのエラーの値が大きくなっている。従来のトーンマッピングが HDR 画像の一部しか正確に変換できないことを示している。



Greg Ward によって考案された、HDR 対応のトーン・マッピングによって表示したもの。右は、人間の目の知覚に基づいたトーン・マッピングが用いられている。



HDR 理論の実用化が可能になったと、デベヴェック氏本人も語っている。

CG 理論のトレンドは実用的な視点へ

いかなる技術も、まずはある特定の表現に対して新しい技法が考案され、次にそれをより汎用的なものへ発展させるという方向性がとられる。この汎用化は、アカデミックな視点からの研究では、より複雑な表現を可能にすることへの挑戦を意味しているのに対して、実用的な視点からの研究では、より柔軟で自由度の高い技術に改善することを意味している。ワード氏の場合には、85 年当初から、一貫して実用的な視点に立った研究を行ってきたといえ、その研究の原点は、人間の「知覚」に基づいた単純なモデルを、できる限り人間がコ

ミュニケーションしやすい形に改善していくところにあったようだ。

実際のところ、CG 技術の成熟に伴って、CG 理論のトレンドは、アカデミックな視点から実用的な視点へと移ってきている。このためか、ワード氏が発表した理論や技法の多くは、発表された当時よりも、むしろ 90 年代半ば以降になって、より広く活用されるようになった。なにより、CG 技術の発展の上で、これほど重要な理論を数多く作り出してきたにも関わらず、Siggraph の論文として選出されたものは、数えるほどしかない。イラディアン・キャッシュやトーン・マッピングの論文も、結局 Siggraph 論文として選出されることはなく、逆にこれらの論文中的技法が、現在欠かすことのできないものとして活用されているというの

は、なんとも皮肉な話に思える。「Siggraph 論文には、独特のトーンが必要なんだ」とワード氏は苦笑している。

BTF (Bidirectional Texture Function) 技法

ある意味で、時代を先取りした研究成果を残してきたワード氏が、今大きな期待を寄せているのは、ハードウェア・レンダリングとイメージ・ベースのレンダリング技法との新しい結びつきだという。ハードウェア・レンダリングに関しては、21 世紀を目前にして、ボードに依存せずにコーディングが可能なプログラマブル・グラフィックス・ハードウェアが登場し、C 言語とほぼ同じ感覚でプログラムやシェーダーを記述することも可能となった。そこで、よりリアルな表現を目指してこれまで開発されてきた様々な技法のアルゴリズムを、このような新しいハードウェア技術の視点から見直し、より効率的な新しい技法として生まれ変わらせるということが考えられるようになってきている。実際のところ、環境マップを用いた IBL のアルゴリズムを GPU レンダリングの視点から構築した手法が、ここ 1、2 年数多く発表されている。ただ、このような動きに加えて、ワード氏が着目しているのは、撮影された画像を用いて物体表面の反射特性を定義する BTF (Bidirectional Texture Function) という技法だ。物体表面上の微妙な陰影ま

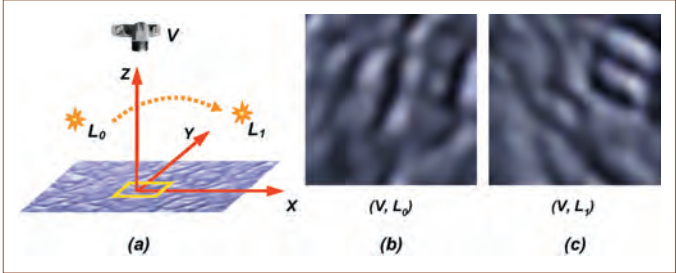
様々な材質を用いて実際に作成された BTF データ。Web 上で公開されており (<http://www1.cs.columbia.edu/CAVE/curel/>)、BTF 理論の実証に頻繁に活用されている。



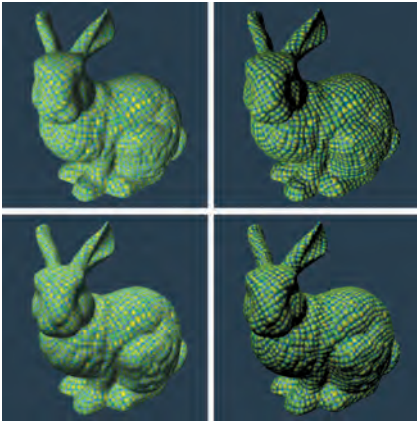
BTF データを用いているものの、このレンダリング方法では、位置の変化による反射特性の変化はまだ考慮されていない。

BTF レンダリングは、視点とライトの方向を変化させて小領域を撮影した複数の画像を用いて、任意の視点とライトの方向に対する物体の見え方を復元するという考え方に基いている。

また、ある点をレンダリングした値が、小領域を撮影したテクスチャ内のすべてのピクセルを吟味して決定されるため、小領域内の位置の変化による反射特性の変化を考慮することができる。



(b) は視点位置 V ライト位置 L_0 で撮影した画像、(c) は同じ視点位置でライト位置を L_1 に変えた撮影した画像



左：テクスチャ・マッピングによる画像
右：BTF レンダリングによる画像

BTF レンダリングによって作成された画像。CU-ReT database の各データ（右上の四角形のテクスチャ）を用いてレンダリングを行った。



で表現するためには、表面上のある点に入射する光やその点から反射された光が、物体表面上の凹凸によって遮られるという現象も考慮する必要がある。このような現象は、物体表面全体に細かくサンプリングを行い、それぞれの点で物理的に正確な反射

ではなく、物体表面上のある小領域を視点とライトの方向を変化させて撮影した 1 セットのテクスチャとして与えられる。このため、BTF データは、上記のような物体表面上の凹凸が光に及ぼす影響まで含めて反射特性を定義することができる。そこ

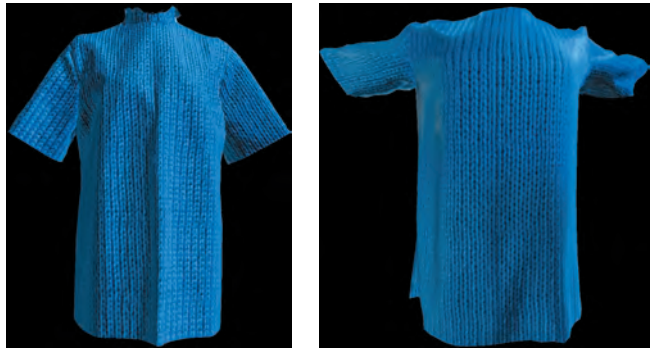
BTF レンダリング法では、データ量の増大と、その計算工程が数多くの再帰計算を含んでいることが、大きな難点となっている。そして、この 2 つの問題を解決するために、2003 年後半からは、代数的な手法を導入した BTF レンダリング法が登場し、大きな注目を集めている。



Local PCA を用いた手法
(Bonn University:
<http://cg.cs.uni-bonn.de/project-pages/RealReflect/>)



Local PCA を用いた BTF レンダリング。画像の中央の正方形が BTF データ。左は上段の BTF データを用いて、右は下段の BTF データを用いて、レンダリングを行ったもの。



上記の BTF レンダリングと環境マップによる GPU 上のリアルタイム・レンダリングを組み合わせるレンダリングを行ったもの。

モデルを用いて反射特性を設定し、GI の計算を密にこなうことによって、正確に算出することができる。しかしながら、その計算負荷は非常に重くなる。ところが、BTF では、反射特性が、1 つの関数式によって

で、BTF データを用いて、小領域内における位置の変化による反射特性の変化を捉え、これをレンダリングに反映させる方法が考え出されるようになった。

これが 2002 年から登場した BTF レンダリングと呼ばれるレンダリング技法だ。これまで、物体表面上の反射特性に関しては、幾何学的な反射モデルによってこれを近似するという、80 年代に考案された手法がそのまま受け継がれてきたといえる。ワード氏は、BTF のような新しいコンセプトから生み出された反射特性の表現方法を IBL と結びつけ、さらにそれを GPU レンダリングの視点から練り直して作り出される、インタラクティブなリアリティに、大きな可能性を感じているようだ。

Noriko Kurachi