

# SIGGRAPH'2002 報告

## – 論文概要 –

東京工業大学 大学院 情報理工学研究科

高橋 裕樹

rocky@img.cs.titech.ac.jp

あらまし: SIGGRAPH は, CG(Computer Graphics) と Interactive Technology に関する国際会議である. 今年は, 7月21日から26日までの6日間に渡りアメリカ合衆国テキサス州 San Antonio の Convention Center で行われた. 本論文では, SIGGRAPH'2002 で発表された論文全 67 件を概説する.

キーワード: SIGGRAPH, CG(Computer Graphics), VR(Virtual Reality), Interactive Technology

# SIGGRAPH'2002 Report

## – Summary for papers –

Graduate School of Information Science & Engineering,  
Tokyo Institute of Technology

Hiroki Takahashi

rocky@img.cs.titech.ac.jp

**Abstract:** SIGGRAPH is an international conference related to CG(Computer Graphics) and Interactive Technology. The conference was held from 21st to 26th July at San Antonio, Texas, USA. This paper gives an overview of the proceeding of SIGGRAPH'2002.

Keywords: SIGGRAPH, CG(Computer Graphics), VR(Virtual Reality), Interactive Technology

## 1 はじめに

ACM(Association for Computing Machinery: 米国計算機学会) SIGGRAPH(Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques) Conference は 1967 年に始まり, 今年で 29 回目を向かえた CG(Computer Graphics) や Interactive 技術に関する国際会議である. SIGGRAPH'2002 は, 2002 年 7 月 21 日から 26 日までの 6 日間に渡りアメリカ合衆国テキサス州 San Antonio の Convention Center で行われた. SIGGRAPH'2002 では, 論文発表や学術系あるいは商業系の展示会をはじめとする様々な催しものがあったが, 本論文では, この会議の本来の主旨である論文発表について紹介する. 今年は, 全 67 件の論文発表が 15 のセッションに分かれ, 4 日間行われた. 本論文では, その 67 件の全論文に関して, それぞれの概要について述べる.

## 2 Images and Video

### 2.1 “Video Matting of Complex Scenes”

Yung-Yu Chuang, Aseem Agarwala, Brian Curless(University of Washington), David H. Salesin(University of Washington, Microsoft Research), Richard Szeliski(Microsoft Research)

本論文では, 高品質な alpha matte とビデオから前景抽出を行う video matting について述べている. 提案手法は, 自然画像 matting, オプティカルフローの計算, 背景推定から成り立っている. 背景推定が必要な場合, ユーザによる garbage matte 指定を行い, 前景, 背景, 未知領域への手作業での領域分割を行う. trimaps と呼ぶこの領域分割結果を, 前進方向, 後進方向オプティカルフローを用いてビデオボリューム間で補間する. どこのフローが正しいかという情報に基づいて競合フロー推定を統合する. Bayesian matting では, 動きを伴うカメラで撮影された境界が複雑な動き付きの前景要素の高品質な matte を行うために, フロー付けされた trimaps を用いる. また, 煙の matte 抽出のための新しい方法についても提案している.

### 2.2 “Gradient Domain High Dynamic Range Compression”

Raanan Fattal, Dani Lischinski, Michael Werman(The Hebrew University)

提案手法では, 従来のディスプレイ上にダイナミックレンジの高い画像を表示するための新しい方法を提案している. この方法は, 概念的には簡単であり, 効果的に計算を行っており, 頑健で使いやすい. 勾配の大きさが大きい部分を少なくすることによって輝度画像の勾配場を操作する. 修正した勾配場における Poisson 方程式を解くことに

よって、ダイナミックレンジの低い新しい画像を得ることができる。細かい部分をきれいに保持しながら、光輪や勾配の逆転、局所的なコントラストの損失などの一般的に生じる artifact を抑えることができる。また、提案手法では、一般的な画像の暗い領域を引き立たせることによって画像を強調することも可能である。

### 2.3 “Fast Bilateral Filtering for the Display of High Dynamic Range Images”

Fredo Durand, Julie Dorsey (Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Computer Science)

本論文では、詳細な情報を保ったまま、ダイナミックレンジの高い画像のコントラストを低くする新しい手法を提案している。提案手法では、大局的な変化を符号化した base layer と局所的な特徴を持つ detail layer に分解し、base layer のコントラストだけを小さくすることによって、詳細な情報を保っている。base layer は、bilateral filter と呼ばれるエッジ保存型フィルタを用いて求める。bilateral filter は非線形フィルタで、空間領域の Gaussian と輝度領域での輝度差が大きい画素の重みを減少させる作用関数の積を用いて各画素の重みを計算する。統計学の枠組における bilateral filtering と異方性拡散がどのように関連しているかについて述べる。さらに、輝度領域における部分的な線形近似と適切なサブサンプリングを用いた bilateral filtering の高速化手法についても述べ、2 桁の高速化が行えることを示す。提案手法は、高速かつパラメータを必要としない手法である。

### 2.4 “Photographic Tone Reproduction for Digital Images”

Erik Reinhard, Michael Stark, Peter Shirley (University of Utah), James Ferwerda (Cornell University)

本論文では、写真の世界で 50 年以上幅広く使われて来た Zone System を利用し、新しい tone 再現演算子を提案している。提案手法では、単に実際の写真用の処理を真似るのではなく、Zone System の基本概念を用いて tone 再現の適切な選択を行う。まず、カメラの露光設定に相当する scaling を行い、もし必要であれば、dynamic range 圧縮を行うための自動的な dodging-and-burning 処理<sup>1</sup>を行う。最初に出力画像の色合いの範囲を決める key value と scaling の調整による輝度変換を行う。その結果、多くのダイナミックレンジの高い画像において、提案手法を用いることで、低コントラスト部分でも詳細を保つ事ができる。しかし、ダイナミックレンジが非常に高い画像の場合、詳細を失ってしまうことがある。そのため、dodging-and-burning 処理を行うための局所的 tone 再現アルゴリズムが必要である。本論文では、各画素に対し適切な近傍を自動的に選び、効果的に画素毎の dodging-and-burning 処理を行う。この方法は、フィルムの露光を局所的に変え、最終的な画像の特定の領域を暗くしたり明るくしたりすることができる。

提案した tone reproduction アルゴリズムは比較的簡単に高速であり、幅広い範囲の様々な画像で良い結果を得ている。

<sup>1</sup>dodging:覆い焼き。プリントの一部に光を当てるのを控える。burning:焼き込み。ある部分に光を加える。

source code を入手可能である<sup>2</sup>。

また、論文中の式 (1) が次式の間違いであると、発表で説明があった。

$$\bar{L}_w = \exp \left( \frac{1}{N} \sum_{x,y} \log (\delta + L_w(x,y)) \right) \quad (1)$$

### 2.5 “Transferring Color to Greyscale Images”

Tomihisa Welsh, Michael Ashikhmin, Klaus Mueller (Stony Brook University)

本論文では、元になるカラー画像から対象となるグレースケール画像への色情報の変換によるグレースケール画像の色付けを行う汎用的手法を提案する。一般的にグレースケール画像に色を付けるための正確で客観的な解決方法はないが、提案手法では人間の手間が最小限になるような手法を用いている。提案手法では、色の各構成要素に対して RGB カラーをパレットから選ぶのではなく、原画像全体の色の“雰囲気”を輝度とテクスチャ情報のマッチングを用いて対象画像に適用する。この手法では色彩情報のみが変換され、輝度情報は元のまま保たれる。さらに四角形の見本を用いてユーザが原画像と対象画像の対応する領域を指定することもできる。様々な画像やビデオ映像で良い結果を得ることができ、様々な応用分野で有用であると述べられている。

色変換処理は複数の簡単な処理から構成されている。まず、それぞれの画像を  $l\alpha\beta$  色空間に変換し、輝度値を比較するためにカラー画像の輝度ヒストグラムを定数倍および定数項を加えることによってグレースケール画像への輝度再写像を行う。カラー画像中の  $5 \times 5$  画素の領域から構成されるサンプル群を作成する。サンプルは 200 個程度に制限しランダムに選ぶ。次にグレースケール画像のすべての画素をスキャンラインに沿って、カラー画像のサンプルと最も適合するものを求める。適合の比較は輝度 50% とグレースケール画像全体の統計情報に基づく標準偏差 50% との重みつき平均で行う。最後に色彩値 ( $\alpha, \beta$  チャネル) をグレースケール画像に移し、結果画像を得る。

さらに良い結果を得るために見本を用いる場合は、まず指定した見本の内部でサンプル数を 50 個にして前述と同様の操作を行う。次にエラー距離を  $E$  としてグレースケール画像の周辺画素  $N_g$  と色付けした見本  $N_s$  を  $L_2$  距離で求め、テクスチャのマッチングを行う。

$$E(N_g, N_s) = \sum_{p \in N} [I(p) - S(p)]^2 \quad (2)$$

$I$ : グレースケール画像  
 $S$ : 色付けした見本の輝度  
 $p$ : 周辺画素

ここではカラー画像は使用せず、グレースケール画像中の色付けした見本を使用する。こうすることによって、画像の間違った部分の類似した周辺統計量を持つ画素が対象の見本色を汚くしてしまうことを防ぐことができる。また、テクスチャと輝度が大きく異なる部分であってもユーザの選択によって変換を行うことができるようになる。ビデオの色付けについても上記と同様の手順でおこなう。まず一つの対象フレームを色付けし、その後全フレームを同じ見本を用いて色付けする。

<sup>2</sup><http://www.cs.utah.edu/~reinhard/cdrom/>

本手法を林, 顔, 風景画像に適用した結果, 輝度がはっきりとしたクラスタに分かれていたり, それぞれの領域がはっきりしたテクスチャを持っている場合には良い画像が得られた. しかし, 顔画像では皮膚と唇や, 服と髪を区別するのに  $L_2$  距離では必ずしもうまくいくとは限らなかった.

この手法は医療分析を意図したものではないが, 解剖学の図例や科学分野のプレゼンテーションに用いることも可能である.

### 3 Modeling and Simulation

#### 3.1 “CHARMS: A Simple Framework for Adaptive Simulation”

Eitan Grinspun(California Institute of Technology), Petr Krysl(University of California, San Diego), Peter Schröder(California Institute of Technology)

有限要素法による計算は, シミュレーションにおいて基本的な要素である. しかし, シミュレーションの膨大な計算量を削減するための適応的な計算は非常に価値のあるものであるが, あまり使われていない. 本論文は, CHARMS(Conforming, Hierarchical, Adaptive Refinement Method)を紹介する. 提案手法の原理は, 要素ではなく基底関数を細かくすることである. これによって, 他のアプローチで問題になっていた実装上の問題が解決できる. また, 次元(2次元, 3次元), 要素の種類(三角形, 四角形, 四面体, 六面体), 基底関数の次数(部分線形, 高次 B-Spline, loop subdivision 等)に独立な一般的な手法である.

#### 3.2 “Graphical Modeling and Animation of Ductile Fracture”

James F. O'Brien, Adam W. Bargteil(University of California, Berkeley), Jessica K. Hodgins(Carnegie Mellon University)

本論文では, プラスチックや金属等の延性材料の破碎の様子をリアルにアニメーション化する一手法について述べる. 延性材料に特徴的な塑性による曲げと破損の過程の間の相互作用をモデル化することによって, 純粋な脆性材料モデルよりも, より広範囲な材料に対してリアルな動きを生成することができる. SIGGRAPH99 で発表した論文では, 脆性材料の破碎に対する手法を提案した. そこで, 本論文では, 脆性材料のみならず, 延性材料にも適用可能とするための以前の手法の部分的な変更方法と幾つかの適用例を示す.

提案手法の特徴としては, 全ひずみ成分を塑性変形によるひずみ  $\varepsilon_p$  と弾性変形によるひずみ  $\varepsilon_e$  に分割している. 弾性ひずみのみが生じる場合は,  $\varepsilon_p = 0$ . また,  $\varepsilon_p$  は塑性流れ(一定限度以上の応力を受けて材料に生じる不可逆的なずれ変形)の割合と仮定して随時計算する.

以前の手法を部分的に変更することにより, 広範囲の材料に対して適用可能となるとともに, 可塑性を考慮することで, 破碎の様子を効果的に表現することができる. また, 純粋な弾性材料モデルと可塑性材料モデルに対するシミュレーションのステップ数を比較すると, 衝突が起きている時は同程度だが, その他の時は, 可塑性材料の場合は弾性材料の場合の 2 倍程度であった. 本研究の線形モデル

は, 多くの材料に適用できるが, 今後は非線形モデルへの適用を予定している.

#### 3.3 “Creating Models of Truss Structures With Optimization”

Jeffrey Smith, Jessica K. Hodgins, Irving Oppenheim(Carnegie Mellon University), Andrew Witkin(Pixar Animation Studios)

本論文は, 橋, 塔, ビルの骨組み等のトラス構造の最適モデルを非線形最適化手法を使って自動生成する手法を提案する.

トラス構造は多数の梁がその約 2 倍の数のジョイントによって接合しているため, 手作業での設計は非常に手間と時間がかかる. そこで, トラスをピンジョイントで接続された梁の集合として表す. ピンジョイントは anchors, loads, free joints の 3 種類に分類され, 次のように初期設計を行う.

- (1) ユーザが地表との設置点 (anchors), および負荷のかかる(路面・展望台の乗る) 接合点 (loads) を設定する.
- (2) ソフトウェアによって自動的に他の接合点 (free joints) が付加される.
- (3) それら全ての接合点 (joints) を自動的に梁でつなぎ合わせる.

free joints は自動的に配置されるが, loads に対して free joints を上下どちらに配置するかはユーザが決定することが出来る. また, 接合点の接続は最近傍の 2 点を結ぶシンプルなアルゴリズムを用いている.

この初期的設計方法に加えて, 建築物の安定性を考慮して最適化するようにする. ユーザが指定した外部からの負担を支えられる質量最小の建築物になるように, 圧力, 張力を考慮して導いた 2 つの方程式を合成した非線形関数を用いて最適化する.

これで建築物の強度については最適化されるが, 個々の梁の強さだけでなくジョイントの位置も設計変数に含めるようにする. 長さが設定値に満たない梁はほとんど負荷がかかっていないものと考えて削除する. こうすることで地形の状態にも対応することの出来る設計となり, デザインも同時に最適化できている.

さらに拘束(ケーブルを優先的に使用する, 左右対象性, 桁の最大長, 障害物回避等)条件を選択することで, 設計者の条件に合わせて様々な複雑な構造を新しく作成することができる.

#### 3.4 “A Procedural Approach to Authoring Solid Models”

Barbara Cutler, Julie Dorsey, Leonard McMillan, Matthias Mueller, Robert Jagnow(Massachusetts Institute of Technology)

層状のソリッドモデルを制作する手続き型のアプローチを提案する. 簡単な記述言語を用いてボリュームの内部構造を定義する. モデルを形作ったり修正するために彫刻操作およびシミュレーション操作がスクリプトを記述することで適用可能である. 提案手法では, シミュレーションを単なるアニメーションの道具としてではなく, モデリングオペレータとして扱う. 通常モデリング技術では, 実世界での効果を把握することは非常に興味深いことである. 本論文では, 複雑なソリッドモデルをシームレスに作り上げ, 修正する簡明な手続き型のアプローチを提案している.

ここ 30 年で rendering は長足の進歩を遂げたが、高い忠実度の幾何学的モデルを作ることは難しい厄介な仕事として残されている。今日のモデル生成ツールは、現在の rendering system が照明や材質、オブジェクトを明示的に指定できるのに対して、形式的な指定様式が欠如していると言う意味で幼稚である。本論文では、層状のソリッドモデルを制作する手続き型のアプローチを提案する。その理由の一つは、簡潔な指定様式が ray-tracing, radiosity, FEM(Finite Element Method), spring-mass モデルなどの様々なシミュレーションが可能になるためである。

## 4 Geometry

### 4.1 “Cut-and-Paste Editing of Multiresolution Surfaces”

Henning Biermann(New York University),  
Ioana Martin, Fausto Bernardini(IBM T.J.  
Watson Research Center), Denis Zorin(New  
York University)

異なる要素を共通の構造に結合するためにカットやペーストという編集作業は幅広く使われている操作である。一般的で、頑健で、効果的なカット&ペースト機能が利用可能であることは、特に、デザインの初期段階におけるサーフェスデザインにも非常に有効である。サーフェスのためのカット&ペースト操作を支える技術は従来から提案されているが、形状の種類に対する制限や実時間で処理が出来ないなどの制限があった。本論文では、multiresolution subdivision surface に基づいた対話可能な処理時間で動作し、直観的なカット&ペースト操作が可能な複数のアルゴリズムを提案する。

### 4.2 “Pointshop 3D: An Interactive System for Point-Based Surface Editing”

Matthias Zwicker, Mark Pauly, Oliver Knoll,  
Markus Gross(ETH Zurich)

本論文では、3次元物体のデータを既存の3次元スクリーンで取り込んだ後、ポイントデータとしてサンプリングする事によって、幾何学的な位置の編集や、表面情報に関するテクスチャリング、フィルタリングなどを対話的に行うことができるシステムを開発した。3次元データをサンプリングしたポイントデータの形式は、従来の2次元ピクセルエディタのデータ形式の基本となるピクセルと良く似ている。そのため、従来の2次元ピクセルエディタで可能な様々な技術を筆者らが提案した PointShop 3D に容易に適用することが可能である。

Pointshop 3D で編集の基本となるものは、3次元の表面をポイントとしてサンプリングしたデータである。まず、3次元データを、座標、法線方向、色、材質、透明度の5種類の属性に分け、ポイントごとに抽出する。この時、ユーザにインタラクティブにサンプリングする領域を指定させることで、処理の簡略化が行える。次に、抽出したポイントを連続なものにするための、再サンプリングを行う。これは、ポイントが不連続のままであると既存の2次元編集の技術が適用できず、様々な処理が困難であるからである。以上の処理が終わると、この後の編集は、全て2次元パラメータ領域内での処理となる。したがって、既存の技術そのまま利用する事が可能となる。提案システムでは、こ

の編集部分に既存の2Dの編集技術には必要なかった彫刻という技術を追加した。

Pointshop 3D で実現可能な機能としては、通常のテクスチャ、アルファブレンディングを用いたテクスチャ、各種フィルタ、表面への各種ブラシを用いたペイント、幾何学データの編集(彫刻)等がある。

### 4.3 “Level Set Surface Editing Operators”

Ken Museth, David E. Breen(California  
Institute of Technology), Ross T.  
Whitaker(University of Utah), Alan H.  
Barr(California Institute of Technology)

サーフェス編集操作の実装のための level set に基づいた枠組を紹介する。Level set モデルは、サーフェスの変形が level set 偏微分方程式における速度によって制御される可変な陰のサーフェスである。本論文では、サーフェス編集操作の集合を生成する速度関数群を定義する。速度関数は、サーフェスの法線方向に成長するサーフェス上の各点の速度を記述する。サーフェスを変形するために必要な全ての情報は、速度関数に集約され、簡単に統一的な枠組を与える。ユーザは、事前に定義されている基本要素を組み合わせて、望む速度関数を作る。サーフェス編集操作は高速に計算され、部分的にも大局的にも適用可能である。level set に基づいた枠組には次のような利点がある。1) 自己交差が存在せず、物理的に実現可能で、簡単に、閉じたサーフェスの生成が保証される。2) level set モデルはトポロジの変更が容易である。3) メッシュモデルにあるようなエッジの連続性やメッシュの質を気にする必要がない。

### 4.4 “Dual Contouring of Hermite Data”

Tao Ju, Frank Losasso, Scott Schaefer, Joe  
Warren(Rice University)

本論文では、エルミートデータ(正確な交点とその法線)でエッジをタグ付けした、符号付きグリッドの新しい境界生成手法を提案する。本手法は、以前のエルミートデータによる境界生成で必要だった、特徴の明示的な特定と処理は不要である。QEF(quadratic error function)用の新しい、数値計算的に安定した表現を用いて、生成した境界を簡略化する八分木ベースの手法を開発した。そして、境界生成手法を単純化した八分木に対して拡張した。この新しい手法は八分木に何の制約も与えず、割れ目に対する処理も必要としない。また、簡略化しても境界の位相は保存される。

現在あるエルミートデータによる輪郭切り取り手法の EMC(Extended Marching Cubes) 法では、尖った角の存在を調べる必要がある。そこで、別の選択肢として次のエルミートデータによる輪郭切り取り法を提案する。まず、符号の変化を示すそれぞれのキューブに2次関数を最小化する場所に頂点を生成する。

$$E[x] = \sum_i (n_i(x - p_i))^2 \quad (3)$$

次に符号の変化を示すそれぞれの edge について、edge を含む4つの cube の最小化する頂点を結び四角をつくる。QEF を輪郭の全ての頂点の配置に用いることによって、この手法は特徴の存在を明示的に調べる必要がなくなる。

一樣なグリッドを利用した輪郭切り取り手法では、明らかな欠点がある。実際の空間はほとんどが同じような空

間で、輪郭となる部分はわずか一部であるが、全てを保持しなければならない。この欠点を解決するために一様なグリッドの代わりに八分木を使う方法がある。まず、符号付き八分木を同種の葉が最も分割されるように生成する。次に異なる葉に QEF を生成し、それを用いて八分木を簡略化する。そして簡略化された八分木に対して再帰的にポリゴンを生成する。

## 5 Parameterization and Meshes

### 5.1 “Interactive Geometry Remeshing”

Pierre Alliez(University of Southern California, INRIA Sophia-Antipolis), Mark Meyer(California Institute of Technology), Mathieu Desbrun(University of Southern California)

本論文では、irregular geometry の柔軟で効果的な対話的再メッシュ手法について述べる。まず、任意のトポロジを持つメッシュをパラメータ空間上の 2 次元 map 列に置き換える。これらの map を用いることで、実時間操作と複雑な操作が可能になる。ユーザは、これらの map を合成して制御 map を作成する。制御 map は、サーフェスパッチのサンプリング濃度を制御する。この制御 map は、対話可能な時間でサンプリングされ、ユーザは簡単にリサンプリングを行うことができる。このサンプリングが完了すると、Delaunay triangulation と高速な最適化が行われ、最終的な完全なメッシュが生成される。

### 5.2 “Geometry Images”

Xianfeng Gu, Steven J. Gortler(Harvard University), Hugues Hoppe(Microsoft Research)

サーフェスの幾何形状は、不規則な三角形メッシュでモデル化されることが多い。

従来の手法では、任意の形状を再メッシュするために準規則的なメッシュを生成していたのに対し、本論文では、Geometry Image と呼ぶ完全に規則的な構造上で任意のサーフェスを再メッシュする。Geometry image では、幾何情報を離散的な  $(r, g, b)$  値の二次元配列としてとらえる。Geometry Image を作成するために、任意のメッシュをエッジ経路のネットワークに沿って切断し、正方形の単一のチャートを生成するようにパラメータ化する。Geometry Image は一般的にスムーズな色変化をした画像になるので、ウェーブレットベースの画像圧縮アルゴリズムを使用して圧縮することができる。また、texture と同じように圧縮して graphics pipeline に送ることができるので、ハードウェア化にも適している。

### 5.3 “Least Squares Conformal Maps for Automatic Texture Atlas Generation”

Bruno Lvy(INRIA Lorraine), Sylvain Petitjean, Nicolas Ray(CNRS), Jerome Mailhot(Alias—Wavefront)

テクスチャアトラスとは、テクスチャマッピングする際の指標となるものである。テクスチャアトラスを利用することによって、効率的にテクスチャマッピングすることが可能となる。しかしながら、従来のテクスチャアトラスでは、パラメータ化に三角形パッチを利用しているためいく

つかの制限があり、単純な境界を持つ多くの小さなチャートを生成してしまう。そして、そのチャート間の不連続性により、一見して人工物であると感じさせてしまうなどの問題も生じている。そこで、本論文では Cauchy-Riemann の最小 2 乗近似方程式に基づいた擬等角写像、最小 2 乗等角写像を提案する。最小 2 乗等角写像により、従来法における問題を軽減することができる。また、それを利用してテクスチャアトラスを自動生成できることも示す。

テクスチャアトラスの作成は、次に示す 3 つの手順から構成される。

- (1) Segmentation: テクスチャマッピングの対象となるモデルを幾つかのチャートに分割する。
- (2) Parameterization: それぞれのチャートを展開する。つまり、2 次元ユークリッド空間の部分空間に対応付ける。
- (3) Packing: 展開されたチャートをテクスチャ空間に集める。

本論文で提案する最小 2 乗等角写像は (2)Parameterization に相当する(従来法では、三角形パッチを利用)。最小 2 乗等角写像を利用することにより、チャートの数を減少させ、人工物であることを感じさせないテクスチャマッピングを可能にする。つまり、従来法のようにチャートの境界を固定する必要がなく、任意の形状の境界を持つ大きなチャートに分割することができる。また、視覚的な変形と一様でないスケールを最小化することも可能となる。

本稿では、多角形モデルに対する新しいテクスチャマップの自動生成手法のための最小 2 乗等角写像について提案した。そして、最小 2 乗等角写像が視覚的な変形を最小化させる唯一の方法であり、複雑な境界を用いて大きなチャートに分割することができることも証明した。また実際に、スキャナで取り込まれたデータと人工的に作られたデータを用いて本手法を多角形モデルに適用し、良好な結果を得ることができた。これらのことから、本手法の有効性を示すことができた。

### 5.4 “Progressive and Lossless Compression of Arbitrary Simplicial Complexes”

Pierre-Marie Gandoin, Olivier Devillers(INRIA Sophia Antipolis)

幾何データを圧縮する効果的なアルゴリズムは広く提案されているが、それらは、多様体、あるいは、多様体に近い閉じた多面体に対するものである。筆者らは、多様体モデルも三角形の集合や 3 次元 4 面体メッシュも同様に扱う progressive な幾何データ圧縮手法を提案する。提案手法は可逆圧縮である。

既存手法の多くは接続性に依存した順番でメッシュの頂点を数えあげの方法であるが、提案手法は接続性に依存しない kd-tree を用いている。そして、エッジ膨張と頂点分割を用いて符号化できる無矛盾なメッシュ列を計算する。

本論文では、メッシュ列を作成するために幾何データの符号化に kd-tree を用いること、分割する頂点が非明示的に定義されているのでエッジ膨張と頂点分割の符号化手法を改良したこと、頂点分割に付随する簡略化のための符号削減を行う予測手法、4 面体メッシュに対するエッジ膨張の新しい一般化手法を提案している。

## 5.5 “Linear Combination of Transformations”

Marc Alexa(Technische Universitt Darmstadt)

コンピュータグラフィックスでは一般的にジオメトリ変換を正方行列で表す．本論文では幾何学的に意味のある行列表現に基づいた変換の線形演算子，スカラー倍および可換な和を導出する．またこの操作によって，重み付けした変換の組み合わせや変換の補間など，基本ベクトル空間のような変換の線形結合が生成できるようになる．この手法はモーションやアニメーションの合成および分析に有用である．

変換行列  $T$  が与えられたとき，スカラー倍  $\alpha \odot T$  を定義する．これは  $T^\alpha$  とすると，望みの性質が得られる．幸い行列  $M$  に対してさまざまな性質がわかっており，特に最も重要な性質， $M^\alpha M^\beta = M^{\alpha+\beta} = M^\beta M^\alpha$ ， $M^0 = I$  が成り立つ．他の行列のべき乗に関する性質も実数の範囲を超えない．ただし，一般に  $(AB)^\alpha = A^\alpha B^\alpha$  は成り立たない．もう一つの重要な性質は非負の実数の固有値を持つならば連続な  $M$  および  $\alpha$  において自由に  $M^\alpha$  を選ぶことができる．

次に可換な和を定義する．同じ次元の実数正方行列  $A, B$  が与えられたとき，一般に  $AB$  と  $BA$  は異なるが， $A, B$  が可換ならば等しくなる．この性質を他のすべての場合に適用できるように演算子を定義する．

$$A \oplus B = \lim_{n \rightarrow \infty} (A^{\frac{1}{n}} B^{\frac{1}{n}})^n \quad (4)$$

この極限は存在し， $A, B$  は可換となる．

この演算を用いて滑らかなアニメーションを作ることができる． $A$  で表現される変換から  $B$  で表現される変換へのアニメーションは，次式で表される．

$$C(t) = (1-t) \odot A \oplus t \odot B, t \in [0, 1]. \quad (5)$$

開始点と終了点の接線を与えて 3 次ベジエ曲線の補間を行うこともできる．

ログマトリクス表現を使うとどのような変換も任意の基底の線形結合であらわすことができる．たとえば各軸の周りの  $0 < \phi < \pi$  回転  $R_x, R_y, R_z$  があれば変換  $T$  は次のような内積を計算することによって要素を分解することができる．

$$\begin{aligned} x &= \langle \log T, \log R_x \rangle \\ y &= \langle \log T, \log R_y \rangle \\ z &= \langle \log T, \log R_z \rangle \end{aligned} \quad (6)$$

ただし， $\langle a_{ij}, b_{ij} \rangle = \sum a_{ij} b_{ij}$ ．

このような要素に分解することは回転を解析するよりも応用範囲が広く，どのような直交および非直交基底にも適用できる．

Alexa と Müller[2000] による SVD(Singular Value Decomposition) は連続するメッシュのコンパクト基底を生成し，これを分解するとキーフレームの頂点の位置があたえられる．これに前述の線形演算子を用いることができる．例えば 580 以上のキーフレームからなる 17 関節 6 自由度を持つ人型の歩行動作のアニメーションに適用すると 10 個の基本要素で 580 のキーフレームを正確に表現できる．

## 6 Character Animation

### 6.1 “Trainable Videorealistic Speech Animation”

Tony Ezzat, Gadi Geiger, Tomaso Poggio(Massachusetts Institute of Technology, Center for Biological and Computational Learning)

本論文は，機械学習技術によるビデオ映像を合成した発話アニメーション生成器を提案している．まず，発話コーパスを作成するために人間が発話している様子をビデオカメラで撮影する．コーパスの作成後，コーパス中に存在しない全く新しい発声の様子を合成できるようにコーパス中のデータから学習を行う．合成された発声の様子を自然な頭部の動きや目の動きを伴うように背景画像と再合成する．最終結果としては，あたかもビデオカメラで撮影したかのような発話アニメーションが生成される．実行時には，実際の音声系列やテキスト-発話システムから得られた音声を入力とする．

提案手法では，少数の口のプロトタイプから新しく，プロトタイプには存在しないような口の形状を合成する改良型 MMM(Multidimensional Morphable Model) を提案した．また，録画されたビデオコーパスから自動的に学習し，任意の希望する発声に対応した MMM 空間中の軌跡を合成可能な正規化に基づいた軌跡合成手法を提案した．

### 6.2 “Turning to the Masters: Motion Capturing Cartoons”

Christoph Bregler, Lorie Loeb, Erika Chuang, Hrishikesh Deshpande(Stanford University)

本論文では，伝統的な 2 次元アニメーションから動きを抽出し，3 次元モデル，2 次元描画および写真に元の動きを再適用して新しいアニメを制作する既存アニメの再利用に関する技術を扱っている．2 次元の動画から動きを抽出する技術を，モーションキャプチャに対比して Cartoon Capture と称している．

本論文で提案している手法では，既存の 2 次元アニメーションからの動きの抽出として，アフィン変換とキー形状(キーフレーム) 補間を組合わせて使用し，アニメーション中の非剛体形状の変形を追跡を実現している．このモデル形状の変形は，回転  $(a_1, a_2, a_3, a_4)$  と移動  $(d_x, d_y)$  の 6 つのパラメータによるアフィン変換で表される．

線画アニメーションからの動きの抽出は，アフィン変換による変形誤差が最小となる値を推定して実現する．次にキーの荷重を同様に求める．ビデオ画像から抽出する場合は，線画の代わりに画像を対象にして，前述の処理をキー画像に対して全ピクセル位置から処理する．

元のモデルの動きを再適用するとき，元モデルのキー形状と対象となるモデルのキー形状をペアで指定し，対象の動画を生成する．処理は，まず前述の入力とペアの適用対象のキー形状からアフィンモーションを抽出する．次に Cartoon Capture 処理で得られた荷重を用いてキー形状を調整する補関数を使って，入力のアフィンモーションに加えて最終的なアニメーションを生成する．3 次元モデルへ適用も 2 次元の時と同様に行なうが，モデルの選択によってメッシュか NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) に対する制御ベクトルを用いる点が 2 次元と異なる．また補間は線形補間を行っている．

伝統的な 2 次元アニメーションでは，モデルの形状と動きが極端に誇張されて描写されている．このようなアニメ

メーションから動きを抽出するためには、通常3次元で利用されているメーションキャプチャ等の方法では次のような点で実現が困難である。

1. 2次元アニメーションのキャラクタにマーカは付けられない。また関節体の位置を特定することが困難であり、キャラクタのスケルトンや特徴点に依存できない。
2. フレーム数が少なくフレーム間のキャラクタの動きの変化が激しすぎる。通常のメーションキャプチャでは、60～120フレーム/秒であるが、2次元アニメーションでは多くて24フレーム/秒、通常は12フレーム/秒である。

提案手法の特徴として次のような特徴がある。

- a. 2次元アニメーションからのデータで、2次元のみならず3次元モデルにも適用可能である。
- b. 元のアニメーションの特徴的な動きが、再適用したモデルに正確に引き継がれる。
- c. 人間のような多関節体の場合には、部分に分割して処理する。
- d. キー形状を与える必要があり、まだアニメータに負荷がかかる。
- e. 複雑な形状や動きの場合の適合性の改善が必要である。
- f. 動的な条件での対応ができていない。

### 6.3 “Synthesis of Complex Dynamic Character Motion From Simple Animations”

C. Karen Liu, Zoran Popovic(University of Washington)

本論文では、自然なキャラクタの動きを短時間に試作するための汎用的な方法を提案する。アニメータによって与えられた簡単なアニメーションから自然な動きを見つけ出し、ほとんど労力をかけずに比較的複雑で自然な動きを作成可能な手法である。

入力された動きを解析することによって、キャラクタに異なる拘束条件を自動的に決定する新しい拘束条件検出手法について述べる。少数の線形角運動量に関する拘束条件を与えることによって自然な動きが得られることを示す。この簡単な手法は、複雑な筋力の計算を避けることが可能である。簡単な力学的拘束条件を設けることによって、非常に複雑なモデルに込み入った動きをさせるアニメーションを生成することも可能である。

### 6.4 “Integrated Learning for Interactive Synthetic Characters”

Bruce Blumberg, Marc Downie, Yuri Ivanov, Matt Berlin, Michael Patrick Johnson, Bill Tomlinson(Massachusetts Institute of Technology, The Media Laboratory)

対話的な合成キャラクタにおいて、学習能力は非常に重要な性質である。そのため、合成キャラクタが実時間学習を行う実際的な手法について述べる。提案手法は、強化学習に基づいており、また、動物訓練の見識を利用している。次の条件によってキャラクタの学習を単純化している。(a) 彼らの世界における予測可能な規則正しさを利用することができる。(b) どのような指示的信号も最大限利用可能である。(c) 人間が訓練しやすい。

実際の犬を訓練する時に用いられている“clicker training”と呼ばれる方法で訓練可能な自律的に活動する犬を構築した。犬自身の行動空間から新しい行動を合成すると同様に、音響パターンを行動の合図として認識し利用することを学習する能力があることを示す。

本論文では、状態、行動、状態-行動空間を同時に発見することにより生じる3つの問題点を指摘することによって、各々の解決が容易になることを示した。最後に、合成キャラクタを実際に訓練するための発見的知識と設計原理を明らかにした。

## 7 3D Acquisition and Image Based Rendering

### 7.1 “Image-Based 3D Photography Using Opacity Hulls”

Wojciech Matusik(Massachusetts Institute of Technology), Hanspeter Pfister(Mitsubishi Electric Research Lab), Addy Ngan(Massachusetts Institute of Technology), Paul Beardsley, Remo Ziegler(Mitsubishi Electric Research Lab), Leonard McMillan(Massachusetts Institute of Technology)

従来の3次元スキャナでは取得できない物体の、高品質な graphical model を取得、表示するシステムを提案する。提案システムは、鏡面状の物体や毛皮や羽などの羽毛状の物体のモデルを取得可能である。回転盤と2つのプラズマディスプレイ、整列したカメラ、指向性のある照明列からハードウェアは構成されている。複数の視点からの物体の alpha matte を得るために multi-background matting 技術を用いる。Opacity hull を作成するために、alpha matte を用いる。視点に依存した不透明度を持つ visual hull から定義される Opacity hull は、新しい形状表現手法である。複雑な物体のシルエットの可視化と背景との継目のない合成が可能である。表面反射率場をもちいることで任意の見かけの物体の再照明が可能である。

### 7.2 “Real-Time 3D Model Acquisition”

Szymon Rusinkiewicz(Princeton University), Olaf Hall-Holt, Marc Levoy(Stanford University)

本論文では、ユーザが対象物体を手に持ち、回転させ、対象物体が走査されている様子を連続的に更新されるモデルとして見る事ができる新しい3次元モデルの取得システムについて述べている。このフィードバックによって、ユーザは、実時間でモデルのデータ欠落部分を見付けることができ、その部分を新たに走査することができる。

提案システムは、実時間(60Hz)でレンジ画像を表示し、ユーザ自身がデータの欠落部分を見付けることができ、視点の決定を対話的に行うことができる。システムは、物体に縞模様系列を投影するためのプロジェクタとその模様を観察するためのビデオカメラを利用する。モデル取得処理は、次のように行う。ユーザが対象物体を手に持ち、ゆっくりと動かす。3次元モデルを生成するために、すでに得られたデータとその瞬間に得られたデータをまとめることによってレンジデータを得る。ここで、対象物体は手に持たれて動いているので、隣接する時刻における物体間には

微小な移動と回転が生じている．そのため，データの配置統合アルゴリズムはそのような状態で正しく動作するように最適化されている．また，ユーザがデータの未取得部分を視覚的に見付けられれば良いので，ディスプレイには粗いモデルがリアルタイム表示される．

### 7.3 “Light Field Mapping: Efficient Representation and Hardware Rendering of Surface Light Fields”

Wei-Chao Chen(University of North Carolina at Chapel Hill), Jean-Yves Bouguet, Michael H. Chu, Radek Grzeszczuk(Intel Corporation)

サーフェス上でパラメータ化された light field は，複雑な反射特性を持つ視点に依存したシーンの見かけを記述する自然で直観的な方法である．実時間で light field を利用するために，グラフィックスアクセラレータに適したコンパクトな表現方法について述べる．light field データを基本となる表面プリミティブに対して分割し，各部分を低次元の関数の小さな集合に分解することによって light field を近似する手法を提案する．近似した light field を標準の画像圧縮手法を用いて入力データの 1/1000 以下に圧縮することができることを示す．最後に，パーソナルコンピュータ上で対話的なフレームレイトで提案したコンパクトな表現から直接，表面の light field を可視化できる画像に基づいたレンダリング手法である light field mapping も提案している．

### 7.4 “Feature-Based Light Field Morphing”

Zhuping Zhang, Lifeng Wang, Baining Guo, Heung-Yeung Shum(Microsoft Research Asia)

light fields で表された 3 次元物体をモーフィングするための特徴に基づいた手法について説明する．提案手法では，従来の Computer Vision や Computer Graphics 技術ではモデル化が非常に困難な対象を画像に基づいてモーフィングする．Light field モーフィングは，3 次元の再構成を行わないかわりに，光線の対応付けを行う．つまり，元の light field と対象の light field の光線間の対応付けである．light field モーフィングにおける 2 つの主要な事柄，特徴指定と可視部分の変化について本論文は述べる．特徴指定に関しては，直観的で使いやすいユーザインタフェースを開発した．このユーザインタフェースの鍵は，直観的に 3 次元ポリゴンとして指定することができ，4 次元光線空間内で光線の対応付けするための仕組みを制御するために利用される特徴ポリゴンである．物体の形状が変化することによって可視部分が変化してしまうのを扱うために，光線空間でのワーピングを提案する．光線空間におけるワーピング物体の形状変化によって生じた任意の大きな穴を埋めることが可能である．それらの穴は，通常，あまりにも大きすぎて従来の画像ワーピングでは適切に扱うことができない．筆者らの手法は，鏡面サーフェスを含む非 Lambertian サーフェスを扱うことができる．

## 8 Animation From Motion Capture

### 8.1 “Motion Textures: A Two-Level Statistical Model for Character Motion Synthesis”

Yan Li, Tianshu Wang, Heung-Yeung Shum(Microsoft Research Asia)

本論文では，統計的にオリジナルのモーションキャプチャデータと似ている複雑な人間の動きを合成するための，motion texture と呼ぶ新しい手法について述べる．キャプチャされた動きの確率的で動的な性質を特徴付ける motion texon の集合とその分布として motion texture を定義する．特に，motion texon は LDS(Liner Dynamic System) によってモデル化され，そのうえ，どれだけ各 texon が別の texon に切り替わる可能性があるかを示す遷移行列によって texon の分布が表される．キャプチャした踊りの動きから motion texon とそれらの関係を学習する最尤法を設計した．学習した motion texture は，新しいアニメーションを自動的に生成するためや対話的にアニメーション系列を編集するために用いることができる．最も興味深いこととして，motion texture は，texon レベルの特定の細かい動きを変更するか分布レベルで新しい振付けをするかのいずれかの異なるレベルで操作することができる．

### 8.2 “Motion Graphs”

Lucas Kovar, Michael Gleicher(University of Wisconsin-Madison), Frederic Pighin(USC Institute for Creative Technologies)

この論文では，モーショングラフを用いて，モーションキャプチャ・データから写実的で制御可能な動きを作り出す手法を提案している．キャプチャーした動きからモーショングラフを自動的に生成して，ユーザが望む動きをこのモーショングラフを検索することにより見つけ出して，パスを合成することにより生成する．

### 8.3 “Interactive Motion Generation from Examples”

Okan Arıkan, D.A. Forsyth(University of California, Berkeley)

本論文は，モーショングラフを利用してモーションキャプチャデータを切り貼りして人の動きをリアルタイムに，対話的に生成することを可能とする手法を提案している．これによってモーションキャプチャ・データが再利用し易くなる．

モーションキャプチャ・データを再利用する場合の課題は，データを組合わせて，自然な動きを合成することが困難なことである．切り貼りしても，変な動きにならないで，元の動きのスタイルが変化しないようにしている．

本論文では，モーショングラフを利用し，多数のモーショングラフを効率的に検索できるようにする技法を提案している．

1. モーションキャプチャデータをフレームで分割して，同種の動きのものに分類する．
2. 制約条件を満足するようなパスを，モーショングラフを検索して合成して作り出す．

3. 合成を行なう時に、動きの不連続性をコスト関数として評価する。
4. 制約条件は、正確な動きを必要とするハードな場と、比較的緩やかなソフトな場合に分けて目的関数を満足するように実施する。
5. モーショングラフの検索は、ランダムサーチにより実施する。このとき高速に実施できるようにモーショングラフのサマライズを行なう。
6. 検索結果をまとめる。合成するパスの評価を実施する。
7. 合成に際し、スムージングを行なう。

#### 8.4 “Interactive Control of Avatars Animated With Human Motion Data”

Jehee Lee, Jinxiang Chai(Carnegie Mellon University), Paul S. A. Reitsma(Brown University), Jessica K. Hodgins(Carnegie Mellon University), Nancy S. Pollard(Brown University)

コンピュータゲームや仮想環境においては、3次元アバタの実時間制御は重要な課題である。しかし、たくさんのアバタの行動レパートリを準備しておく必要があり、また、出来る限り低次元の入力デバイスでユーザがこの行動集合の中からある行動を選択しなくてはならないため、アバタのアニメーションと制御は困難である。豊富なアバタの行動集合を得る魅力的なアプローチとして、そのアプリケーションに適した長くてラベル付けされていない動きデータ系列を集めることがあげられる。本論文では、行動に柔軟性を持たせるための前処理や効率的な探索、実時間アバタ制御のために開発が可能なデータベースについて述べる。柔軟性は motion segment 間のもっともらしい遷移を見付けることで実現でき、得られたグラフの効果的な探索はクラスタリングによって得られる。このデータ構造を用いてアバタの動きを制御するための3種類のインタフェースについて示す。有効な選択肢集合からユーザが動作を選択する方法、ある環境を通る経路を描く方法、ビデオカメラの前で望む動きを実演する方法の3種類である。

#### 8.5 “Motion Capture Assisted Animation: Texturing and Synthesis”

Katherine Pullen, Christoph Bregler(Stanford University)

アニメータが少数のキーフレームを描画するだけで、アニメーションを生成する手法を提案する。その後、アニメーションを誇張するためにモーションキャプチャデータを利用する。キーフレームで指定された関節に詳細な情報を追加する処理をテクスチャリングと呼ぶ。キーフレームで指定されなかった関節は合成する。関節モデルの関節の動きは相互に関連しているため、不完全なデータ集合が与えられたとしても、与えられなかった関節を与えられたものから推測することが可能である。

### 9 Lighting and Appearance

#### 9.1 “Homomorphic Factorization of BRDF-Based Lighting Computation”

Lutz Latta, Andreas Kolb(University of Applied Sciences Wedel)

許容可能な質でリアルタイムアプリケーションが実行可能である BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Functions) の近似手法がいくつか提案されている。最近、McCoolらが提案した Homomorphic Factorization は、様々な状況で異なった質の要求に対して利用可能な一般的な近似手法である。

本論文では、Homomorphic Factorization に基づいた新しい手法を提案する。BRDF を近似する代わりに、global illumination における等方性 BRDF の照明計算を因子分解する。複雑な照明状態にある物質は、一般的にある現在のグラフィックスハードウェアの計算能力を用いて、たった2つのテクスチャでシミュレーション可能である。

新しい手法は、複数の環境マップの前フィルタリング技術に対する一般的な手法であると考えられる。既存の前フィルタリング技術は、特定の BRDF に限定されていたり、3D テクスチャリングなどの高機能なハードウェア能力を必要とする。因子分解を用いると一般的な2次元テクスチャしか必要としない。

#### 9.2 “Frequency Space Environment Map Rendering”

Ravi Ramamoorthi, Pat Hanrahan(Stanford University)

本論文では、自然照明の下で複雑な BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Functions) を持つオブジェクトのリアルタイムレンダリングのための新しい手法を提案している。その手法のアプローチは、spherical frequency space 分析に基づいており、次の3つの利点を含んでいる。

1. 従来は特別な手法でしか決められなかったサンプリングレートとレゾリューションを理論的に分析できるようになった。
2. 効果的な表現とレンダリングのために、SHRM (Spherical Harmonic Reflection Map) と呼んでいる、新しいコンパクトな表現方法を導入した。
3. SHRM を計算するための環境マップのプレフィルタリング計算を高速化した。この論文における周波数領域でのプレフィルタリングアルゴリズムは、従来の角度領域のアプローチよりも劇的に速い。

本論文では次のことが述べられている。

- (1) サンプリングレートとレゾリューションの理論的分析  
従来は、特別な手法で、reflection map のレゾリューションや必要な reflection map の数を決めていた。この研究では、信号処理のフレームワークを使うことによって、エラー分析を可能にし、正確にサンプリングレートとレゾリューションを設定することができるようになった。
- (2) SHRM を用いることによる効果的な表現とレンダリング

ほとんどすべての BRDF について、低次元な SHRM の拡張で十分であることから、レンダリングをリアルタイムに行うことができる。さらに、SHRM は、従来の方法よりも非常にコンパクトで正確である。

- (3) プレフィルタリングの高速化

現在の環境マッピング技術の欠点は、プレフィルタリングに多大な時間が必要なことである。この研究で提案している spherical harmonic transform に基づいた新しいプレフィルタリング手法は、理論的にも実験的にも従来研究より大幅に高速であることを示している。

そして、この論文では、上記の3つの利点を合体させる完全な理論的分析と実用的アルゴリズムのパイプラインを提案している。また、これらの改善点のひとつひとつを分けて従来手法に適用することも可能である。

全体の処理の流れとしては、Inputs → Prefiltering → SHRM Rendering の順に処理される。

次元を減らしながら、数式を変形させていく。そして、低次元でコンパクト、効率的、正確な計算が可能となり、低次元ゆえの高速な計算も可能となった。

プレフィルタリングの主な役割は、次の点にある。

- (a) 角度空間と周波数空間間の記述を効率的にコンバートすること。
- (b) 照明の反射光の係数と BRDF の係数を効率的に計算すること。

このプレフィルタリングを高速化するために、計算量を減らす工夫をしている。実際に理論上の計算量は数次元減少させることができている。実際の計算結果の数値でも計算量が減少していることを示している。

### 9.3 “Precomputed Radiance Transfer for Real-Time Rendering in Dynamic, Low-Frequency Lighting Environments”

Peter-Pike Sloan(Microsoft Research), Jan Kautz(Max-Planck-Institut für Informatik), John Snyder(Microsoft Research)

本論文では、物体に任意の光が当たった場合の影や反射などの光の効果を、あらかじめ関数を用意することによってリアルタイムでレンダリングする新しい手法を提案する。

まず、物体に対して無限遠から光を当てた場合の影の付き方を計算し、伝達ベクトルと伝達行列を用意する。さらに、周囲の光源情報を球面調和関数で表す。

対象物体に光沢がない場合、物体の各点における伝達ベクトルを周囲の光源情報の関数の係数として計算する。対象物体に光沢がある場合、伝達行列を周囲の光源情報の関数の係数として計算し、さらにその物体の BRDF を適用する。

提案手法によって、影や反射等の光の効果をリアルタイムでレンダリングすることができた。

### 9.4 “Interactive Global Illumination in Dynamic Scenes”

Parag Tole, Fabio Pellacini, Bruce Walter, Donald P. Greenberg(Cornell University)

本論文では、動的なシーンにおける対話的に global illumination の計算を行うシステムを提案する。提案システムは、双方向パストレーサのような高品質の計算結果をキャッシュする新しい方法である、陰影キャッシュを利用する。

陰影キャッシュは、各々の頂点に対して大まかに計算された陰影の、オブジェクト空間における階層的サブディビジョンメッシュである。この陰影キャッシュをハードウェアベースの補間やテクスチャマッピングで利用することによって高いフレームレートを実現する。

このシステムは、動的なシーンや移動する光源に対して効率的な計算を行い、事前計算を利用せずに数秒で有意

なフィードバックを提供する。このことから、陰影キャッシュは、照明デザインやレンダリング中のモデルのためのツールに効果を発揮する。

### 9.5 “A Lighting Reproduction Approach to Live-Action Compositing”

Paul Debevec, Andreas Wenger, Chris Tchou, Andrew Gardner, Jamie Waese, Tim Hawkins(USC Institute for Creative Technologies)

本論文では、virtual set 内の俳優に仮想環境からの自然な照明が当たるようなライブパフォーマンスの合成が可能である処理について述べる。本研究で用いている照明ステージは、 $2m$  の球の内側に向けて RGB 光を照射するダイオード群が俳優に向けられている。そこでは、実世界あるいは仮想的な照明環境を模倣するために、それぞれの照明を任意の色や輝度に設定することが可能である。俳優に当てられた可視光スペクトル照明の影響を受けずに背景に俳優を合成するための2台のデジタルカメラによる赤外光画像合成システムを作成した。環境からの照明を俳優が受けるように正しい色を演出するため、システムの色応答を校正する。

## 10 Shadows, Translucency, and Visibility

### 10.1 “Perspective Shadow Maps”

Marc Stamminger, George Drettakis (REVES/INRIA Sophia-Antipolis)

Shadow map は、そのエイリアシングの問題にもかかわらず、影の生成において最も広く用いられている方法である。本論文では、perspective shadow maps を導入する。これは normalized device coordinate space で—すなわち、透視変換後の座標で—生成され、その結果ほとんどオーバーヘッドなしでエイリアシングを著しく減らすことができる。

影は CG 映像において重要な要素であって、シーンの空間関係の理解を助け、合成画像に現実感を付与する。影生成の挑戦の歴史は CG の早い時期まで遡り、clipping や shadow volume に基づいたアルゴリズムのように種々の幾何学的アルゴリズムが導入された。これらのアルゴリズムはロバストネス、データ構造やレンダリングオーバーヘッドの問題があり、さらに静止画用であった。

最初に、点光源に対する Shadow-map の aliasing 問題の定式化を行う。shadow-map の1画素の光束が、 $r_s$  離れた  $\alpha$  傾いた面に作る影の大きさは  $d_s r_s / \cos \alpha$  である。画像面におけるその大きさは次式で与えられる。

$$d = d_s \frac{r_s \cos \beta}{r_i \cos \alpha} \quad (7)$$

$d$  が画像の画素サイズ  $d_i$  より大きいとき、すなわち  $d_s r_s / r_i$  が大きいときアンダーサンプリングが生じる (perspective-aliasing)。  $r_s / r_i$  が定数に近いときエイリアシングを避けることができる。本論文に示すように、これは透視変換後に shadow-map を生成することによって実現することができる。  $\cos \beta / \cos \alpha$  が大きいときもエイリアシングが生ずるが (projection-aliasing)、projection-aliasing はここでは扱わない。

perspective shadow map はシーンをまず post-perspective space に変換しそれから shadow-map を生成する．これを上から垂直に光が射しているケースについて説明する．この場合地面に落ちる shadow-map の画素の大きさは画像の画素サイズとほぼ等しくエイリアシングを完全に防ぐことができる．

提案手法を適用するためには，シーンを perspective-space に変換し，次に光源を同じく変換し，shadow-map を生成する．いろいろなケースについて次に述べる．

無限遠の光源は透視変換によって，スクリーンに平行な場合を除いて有限，すなわち  $z = (f + n)/(f - n)$  の光源になる．光源が後方にあるときは光は一点に集光し光の順序が逆になり (“inverted-point-light”), depth テストが逆になる．

点光源が視点より後ろにあるとき，透視座標系では光源は無有限遠より遠くなる．

post-perspective space においては，unit-cube における平行投影となり，視点までの距離  $r_i$  による perspective-aliasing は防止することができる．しかし，post-perspective space においても点光源になる場合は aliasing が生ずる．理想的には光線がスクリーンに平行か視点のある面にある時である．最悪は光が前方から来るときである．

ここまでは，重要な問題を無視して，viewing-frustum だけについて述べている．すなわち，shadow-map は frustum 中の物体と frustum に影を落とす frustum 外の物体を含む必要がある．透視変換においては，直線は直線に変換されるが，直線上の点の順番は変化する可能性がある．これは直線がカメラ面をよぎる時に生ずる．これを処理するために，視点を影を作る物体の後ろまで下げてから shadow-map を生成する．

## 10.2 “A User Interface for Interactive Cinematic Shadow Design”

Fabio Pellacini, Parag Tole, Donald P. Greenberg(Cornell University)

影を配置する問題は，照明と物体の相対的な関係に依存するため，直観的には分かりにくく，困難な作業となる．モデラーの作業の簡略化を目的として，3次元環境内における影をデザインするためのユーザインタフェースについて述べる．提案したインタフェースでは，物体や照明と同様に高次のモデリングプリミティブとして影を扱う．影を変形するために，ユーザは，シーン中のある表面上に2次元物体が存在するかのように，影を移動，拡大縮小，回転したりするだけで良い．

ユーザが影を変形させる場合，システムは要求に応じて照明か物体を移動し，マウスの動きに伴って実時間で更新される．操作を簡単にするために，ユーザは，キャラクタの顔に影がかからないように強いるなどの拘束条件を指定することができる．必要であればマウスの動きを制限することで，そのような拘束条件も実時間で確認できる．提案インタフェースには，コンピュータアニメーションで良く使われる疑似 shadow も統合した．これで，シーン中のある表面に影や，影ではない領域を描画することが可能になる．

## 10.3 “Robust Epsilon Visibility”

Florent Duguet, George Drettakis(REVES/INRIA Sophia-Antipolis)

本論文では，実世界モデルでロバストにシャドウの境界を計算するための新しいシステムティックな方法を提案している．従来の手法では，複雑なシーンや入力されるポリゴンに問題がある(二重に重なっている等)場合は，シャドウをうまく描けなかった．ロバスト性の問題，アルゴリズムの複雑性やメモリ制限などにより，あまり実用的ではなかった．Virtual Reality やゲーム等のインタラクティブなアプリケーションでは，オブジェクトの接続性は必ずしも与えられるわけではなく，再構築されるわけでもなく，交差するポリゴンがシーンにしばしば現れる．これらの問題はすべて，ジオメトリックアルゴリズムではロバスト性の問題につながる．

提案手法では，シャドウをつける従来のフレームワークでの可視性の再定義を行い， $\epsilon$  メソッドを使って一般化した ESL(External Stabbing Lines) をロバストに計算するアルゴリズムとシャドウの境界を接続するための手法を洗練させた．その結果，複雑なモデルでもロバストにシャドウを計算できるようになり，適用画像の見た目もシャドウらしく見える結果となった．ただ，この手法の問題点としては，従来手法と同様に可視性の計算複雑性の制限を受けており，非常に複雑なモデルの場合，計算量が多くなることである．

シャドウをつけるかどうかの問題は，光が通る道筋の中でどれだけ邪魔をするポリゴンが存在するかをチェックすることである．この手法では，ESL を使って，その線に微小変数  $\epsilon$  による大きさに幅を持たせてシャドウを計算する．その  $\epsilon$  により頂点や線を拡大化(edge, vertice  $\rightarrow$  shaft, sphere) する．

本手法では，ESL が比較対象となる頂点や線に対して，その ESL が通り抜けることができる(この場合頂点や線を generator とする)か，通り抜けることができない(この場合頂点や線を blocker とする)かを判断する．そして，どのポリゴンにも妨害されない ESL が正しい ESL と判断される．

実際は，多くの頂点，線，それらからなるポリゴンを対象に多くの ESL が列挙され，検証をして削除できるものはできるだけ削除，マージできるものはできるだけマージする．冗長な ESL を削除をする場合の判断基準は次の2種類がある．

1. 結合条件 shaft の中に generator が含まれているかどうか
2. 位相条件 shaft の中に比較対象になっている ESL が完全に含まれているかどうか

この2つの条件が満たされたときのみ対象の ESL を削除できる．マージの場合も同様に shaft の太さを考えて， $\epsilon$  の値が大きいほど shaft の太さも大きくなるので，複数の ESL がある場合，他の shaft の中に含まれてしまった ESL はマージされる．

最後に，ESL の shaft が多面ポリゴンを通過するとき，ESL が多面ポリゴンによって block されるかどうかを決定するロバストな方法が必要となる．この場合は，シーンで多面ポリゴンが互いの接続情報を持っている場合と持っていない場合で手法が変わり，特に接続情報を持っていない場合は，Blocker-fan 構造手法を用いる．これで，ESL がその多面ポリゴンを通過するか否かを決定する．

筆者らは，そこそこよい計算速度でよい結果を出せたのではないかと述べている．また，ロバスト性の観点から，大抵のロバスト性の問題を議論するときは失敗の可能性を検討する必要がある．本手法のように  $\epsilon$  メソッドの利用は block されるべきでない ESL は決して block しない．逆に，列挙した中の block されるべき ESL を削除できていない

場合が考えられるが、これは頂点や線やポリゴンでこの該当 ESL に接続されていないものはないので、つまり全部接続された状態になっているので問題にはならない。よって、出力では一貫性が保たれており、ロバストな手法と言える。

#### 10.4 “A Rapid Hierarchical Rendering Technique for Translucent Materials”

Henrik Wann Jensen(Stanford University),  
Juan Buhler(PDI/DreamWorks)

本論文では半透明物体のための効率的な 2 パスレンダリングを提案する。surface における放射束密度の計算と物体内部の光の散乱の評価を分けた。これは 2 パスに分離することによって行われ、第一パスでは、surface の選ばれた点における放射束密度の計算を行い、第二パスでは、放射束密度に基づいた拡散を評価する。このアプローチは半透明物体のレンダリングの従来の方法に比して格段に高速であり、スキャンラインレンダリングと global illumination method をシームレスに統合するという利点を持つ。

半透明物体の外見を表現するには subsurface-scattering を模擬する必要がある。従来から subsurface-scattering は Lambertian-diffuse-reflection として近似されてきた。

最近になって、これは Hanrahan と Krueger によって、重要な directional-effect を考慮するために single-scattering を用いて改良された。彼等はモデルを表現するのに結局 BRDF を用いた。BRDF は一点の scattering だけを考慮しているだけで、材質の中の複数の点の間の光の伝播を模擬することはできない。これは surface を光を通す材質として扱うことを意味する。

さらに最近になって、Jensen らは半透明物体の中の光の scattering を diffusion-process としてモデリングすることを提案し、これは Monte Carlo Ray-tracing が不効率な highly-scattering-media で特によく機能した。Jensen らは dipole-diffusion 近似を提案し、これが実際の半透明物体からの散乱光の実測値をよく一致することを発見した。これを用いて BSSRDF(Bidirectional Scattering Surface Reflectance Function) を定式化した。これはある点の発光を surface 上のすべての点の入射光に対応付けるものである。

Jensen の BSSRDF は Monte Carlo photon tracing に比してずっと高速であるが、surface における入射光の分布をサンプリングする必要があるため、従来の BRDF に比べてまだかなり高負荷である。さらに光源からの直接光による材質内の scattering を扱うのみで、global-illumination を扱うためにどのように発展させればよいか明らかでない。

本論文で、半透明物体のレンダリングに対する高速で汎用的な 2 パスレンダリング法を提案する。このアプローチは二つのキーアイデアに基づいている。第一のアイデアは、入射光の計算と BSSRDF の評価を 2 パスアプローチにより分離することである。第一のパスでは surface 上の選ばれた点における入射光 (irradiance) を計算し、第二パスではその irradiance を用いて diffusion-approximation を評価する。

第二のアイデアは diffusion-approximation の rapid-hierarchical evaluation である。このアプローチは与えられた surface に対して入射光の計算を一度だけしかしないので、直接 BSSRDF をサンプリングするのに比して際立って高速である。

この論文のもう一つの寄与は、半透明物体の scattering-parameter の定式化である。半透明物体の

scattering-property が diffuse-reflectance と average-scattering-distance からできることを示す。

## 11 Soft Things

### 11.1 “DyRT: Dynamic Response Textures for Real Time Deformation Simulation With Graphics Hardware”

Doug L. James, Dinesh K. Pai(The University of British Columbia)

本論文では、DyRT(Dynamic Response Texture) を用いた幾何学的に複雑で、対話的で、物理モデルに基づき、ポリウムで構成された CPU に負荷がかからない動的変形モデルを提案する。DyRT は、商用グラフィックスハードウェアを用い、付加的なレンダリング処理として従来のアニメーションに適用することができる。DyRt のシミュレーション処理では、剛体の動作によって引き起こる modal vibration モデルを事前に計算する手法を用いている。

### 11.2 “Interactive Skeleton-Driven Dynamic Deformations”

Steve Capell, Seth Green, Brian Curless,  
Tom Duchamp, Zoran Popovic(University of Washington)

本論文では、伸縮自在に変形するキャラクタのスケルトン起動型のアニメーションについて述べる。キャラクタはポリウム状の粗い制御格子にはめ込まれており、有限要素法を適用する場合には構造を与える必要がある。スケルトンによる制御を実現するために、単純なスケルトンの骨に沿った直線の拘束条件を導入する。骨は、制御格子のエッジに一致するように作成され、効果的に拘束条件を適用することができる。計算の高速化のために、ポリウム状のメッシュの領域と特定の骨を対応付け、局所的に線形シミュレーションを行い、各時間ステップ毎に混合する。細かい操作を行うために制御格子状に階層基底を定義しており、シミュレーションは、Level of Detail に適応している。

### 11.3 “Robust Treatment of Collisions, Contact, and Friction for Cloth Animation”

Robert Bridson, Ronald P. Fedkiw(Stanford University), John Anderson(Industrial Light + Magic)

布の衝突、接触及び摩擦のシミュレーションを効率的に行うアルゴリズムについて述べる。このアルゴリズムでは、布の折れ曲がりやしわ等の複雑な動きが干渉せずにシミュレーション可能であるとともに、正確な布の厚さのモデリングをも可能にする。また、シミュレーション結果のデータを基に、滑らかで干渉のないレンダリングをする後処理の方法について述べる。

提案手法の主な特徴を次に列挙する。

1. 布のモデルを mass-spring model で表現する。
2. 稜線と角の質点の質量を若干重くする。

3. タイムステップ毎に、三角メッシュのノードの速度計算結果から、バネの変形が 10%以内になるように計算する。
4. 上記ひずみ制限に加え、ひずみ速度も制限する。
5. 伸張・剪断等の布内部の力学的な記述と衝突過程のアルゴリズムを分割する。
6. 物体の接近及び衝突を検知するために、axis-aligned bounding box を使用する。
7. 斥力を適用することにより、非常に接近した物体同士の間隔を連続的な衝突回数を減少させる。
8. 物体が近づいている時は非弾性の斥力を、離れていく時はバネモデルの斥力を使う。
9. シミュレーション結果のノードデータを基に、メッシュ稜線の中にノードを追加するメッシュの再分画を繰り返して、滑らかなレンダリングをする。

提案手法は、複雑な布の折れ曲がりやしわ等の動きを効果的に表現できる。交差のないシミュレーション結果のデータを使って再分画の後処理をすることによって、質の高いアニメーションができる。計算時間は、PentiumIII 1.2GHz を用いて、150×150 ノードの布で、1 フレーム当たり約 2 分を要する。

#### 11.4 “Stable but Responsive Cloth”

Kwang-Jin Choi, Hyeong-Seok Ko(Seoul National University)

一般的な衣服は、人間の 90%以上を覆っている。したがって、リアルなアニメーションを作成する場合、衣服のリアルなアニメーションが必須となっている。従来の研究においては、“implicit method” 用いて剛性方程式を解きクロス・シミュレーションに成功した例が報告されている<sup>3</sup>。

衣服のリアルなアニメーションを作成するためのもう一つの重要な性質は、布が折れ曲がるような “buckling behavior” を表現することである。この特性を持たないアニメーションは不自然になってしまう。それに関わらず、多くの研究では buckling behavior を考慮していなかったが、ようやく最近指摘されるようになってきた。本論文では、この問題に対する安定、かつ、現実的な解決方法について述べる。

クロス・シミュレーションを行う場合には、一般的に物理モデルが使用される。従来の研究では、三角形のメッシュの各頂点にパーティクルを配置して物理モデルを作成することが多いが、本研究では、四角形のメッシュの各頂点にパーティクルを配置して物理モデルを作成する。さらに、伸び/せん断と曲げ/圧縮に対して、物理モデルを使い分け、それぞれの動きを引き起こすために必要なエネルギーを表す関数を定義する。パーティクルの運動方程式は、そのパーティクルがもつエネルギー、パーティクルに外部から加えられる力(ただし、減衰力は使用しない)、パーティクルの形状や質量を示すマトリックスによって記述され、この方程式を “implicit method” を用いて高速に解いている。

本論文のオリジナリティは、減衰力を使用せずに、安定で、実用的な “post-buckling” の不安定さを表現することができた最初の手法であるところである。

<sup>3</sup>Siggraph'98 の論文集の表紙ともなった、“Large Steps in Cloth Simulation”の著者である David Baraff と Andrew Witkin により、[Baraff and Witkin 1998; Volino and Magnenat-Thalmann 2000]で報告されている。余談ではあるが、両氏は、映画「モンスターズ・インク」で必要とされたクロス・シミュレーションなど、その他必要とされるであろうシミュレーションの全てを含んだシステムの開発を行った。

## 12 Humans and Animals

### 12.1 “Articulated Body Deformation from Range Scan Data”

Brett Allen, Brian Curless, Zoran Popovic(University of Washington)

本論文では、スケルトンからの身体変形計算を例題に基づいて行う手法について述べる。提案手法の例題データには、レンジスキャナで取得した様々な姿勢の人間の身体が含まれている。レンジデータを取得する際に同時に取得したマーカを利用し、スケルトンの運動を求め各データの姿勢を確定する。姿勢付けが可能な再分割サーフェスのテンプレートをを用いて、全ての取得したデータ相互に共通なパラメータを求める。変形の詳細な様子は、このサーフェスからの変位として表され、変位マップ内で穴は滑らかに埋められる。最終的に、姿勢空間における k 最近傍補間を用いてレンジデータを合成する。

### 12.2 “Interactive Multi-Resolution Hair Modeling and Editing”

Tae-Yong Kim, Ulrich Neumann(University of Southern California)

人間の髪の毛のモデリングは、非常に困難な作業である。本論文では、ユーザが様々なヘアスタイルを作成することが可能なヘアモデリングシステムについて述べる。提案する MHM(Multiresolution Hair Modeling) システムは、静的な誘引力のため様々なスケールで隣接する髪の毛の束が束を形成する傾向があるという観測に基づいている。いくつかの髪の毛の束を頭に配置することで、初期段階の髪の毛モデルは、すぐに作ることができる。初期の髪の毛の束を段階的に分割することによって、より細かいヘアスタイルの調整が可能である。ユーザは、任意のレベル、最終的には髪の毛 1 本から構成される髪の毛の束を編集することができる。ユーザが素早く様々な髪型を作ることができるように、髪の毛をカーブしたり、拡大縮小したり、コピー/ペーストなどの高機能な編集ツールが用意されている。

### 12.3 “Modeling and Rendering of Realistic Feathers”

Yanyun Chen, Yingqing Xu, Baining Guo, Heung-Yeung Shum(Microsoft Research Asia)

本論文では、羽と鳥のリアリスティックなモデリングとレンダリングを行う手法について述べる。羽は L-system で記述可能な枝状構造である。パラメトリックな L-system を利用することによって、少数のパラメータを変更することで、異なる種類や形の羽を容易に生成することができる。羽の形状のばらつきも L-system で可能である。羽をリアリスティックにレンダリングするために、羽の詳細部までも表現する効果的な BTF(Bidirectional Texture Function) を生成した。効率化のためにグラフィックスハードウェアを利用しながら、L-system を組み込んだレンダリングアルゴリズムと BTF を用いて写真のようにリアルな羽が生成できる。このような枠組に基づき、ユーザがいくつかのキーとなる羽を作成するだけで、鳥の異なる部位の羽を自動的に生成するシステムを開発し、リアルな鳥のレンダリング結果を得ることができた。

## 12.4 “Eyes Alive”

SooHa P. Lee(University of Pennsylvania),  
Jeremy B. Badler(The Smith-Kettlewell  
Eye Research Institute), Norman I.  
Badler(University of Pennsylvania)

人間の顔モデルのアニメーションが自然に見えるためには、人間の目に見える動作と矛盾のない目の動きを付け加えるべきである。顔を向かい合わせた対話では、視線の方向、saccade、視線の動きを通して、目は会話の変化や思考過程の動因を表す。本論文では、saccadeの実験的モデルと眼球の追跡データによる統計的モデルに基づいて、目の動きモデルを作成した。コミュニケーション中に自然で効果的な目の動きを表現できるかどうかを評価するために、静止した目を使用したアニメーション、ランダムなsaccadeだけを使ったアニメーション、統計的に導き出したsaccadeを使ったアニメーションを比較した。

## 12.5 “Physiological Measures of Presence in Virtual Environments”

Michael Meehan, Brent Insko, Mary Whitton,  
Frederick P. Brooks, Jr.(University of North  
Carolina at Chapel Hill)

仮想環境の質や効果の共通のものさしは、体験者の中に引き起こされる実在感 (presence) の量である。実在感とは、仮想環境中のそこにいる感覚として定義されることが多い。実在感を計測する最良の方法については様々な議論が行われ、実在感の研究者らは、信頼性、確実性を備え、高感度で客観的な計測手法を必要とし、探してきた。

本論文では、仮想環境を現実と感じる度合に対して、仮想環境において引き起こされる生理的な反応は、その仮想環境に対応する現実世界によって引き起こされる生理反応と類似しており、存在感が大きい場合、反応も大きくなると仮定した。この仮定を検証するために、3種類の実験を行い、生理反応を用いることが信頼性、確実性を備えた、高感度で客観的な計測手法であることを示した。

実験では、恐怖感の無い仮想的な部屋とストレスのかかる仮想的な高所における被験者の生理反応を比較した。心拍数の変化は、実在感のものさしとして我々の要求を満たすものであり、皮膚のコンダクタンスの変化は心拍数の変化ほど有意ではなく、皮膚の温度変化は全く有意ではなかった。さらに、仮想環境に受動的な触覚要素を加えた場合、実在感は増し、フレームレートが高くなるに従い、存在感が増すことが示された。

## 13 Texture Synthesis

### 13.1 “Self-Similarity Based Texture Editing”

Stephen Brooks, Neil Dodgson(University of  
Cambridge)

意図した作用が画像全体に施されるように、自己相似を利用した簡単な対話的テクスチャ編集手法について示す。最近の綺麗にテクスチャ合成が行える階層的な手法から発想し、提案手法もテクスチャ内に存在する画素の類似性を評価するために多様な大きさの画像の近傍情報を用いている。しかし、新しいテクスチャを生成するための隣接領域のマッチングは行わない。その代わりに、元のテクスチャ自身に複写編集操作を目的として類似した隣接領域を配置

することによって基本的に新しいテクスチャを生成している。この一般的な手法は、テクスチャ描画、模造、ワーピングに適用される。これらの大局的操作は対話的に施され、ほとんどの場合、単一のマウスの動きだけで指示できる。

### 13.2 “Jigsaw Image Mosaics”

Junhwan Kim, Fabio Pellacini(Cornell University)

本論文では、任意の形の画像タイルを使って最終的な絵を構成するJIM(Jigsaw Image Mosaic)と呼ぶ新しい種類のmosaicを紹介する。Jigsaw Image Mosaicの生成は、次の問題点を解決することである。任意形状の入れ物画像と任意形状の画像タイルの集合が与えられたとき、入れ物にできるだけぎっしりと入力入れ物画像から取った色と似た色のタイルを詰める。選択肢として、視覚的に楽しめる効果を得るためにタイルを少しだけ変形することもある。PhotomosaicやSimulated Decorative Mosaicsのような既存のアルゴリズムの拡張としてmosaicing問題に対する一般的なエネルギーに基づいた枠組について紹介する。mosaicingエネルギー関数 $E$ を最小化するタイルの配置を得る問題としてmosaicを定義する。

$$E = w_C \cdot E_C + w_G \cdot E_G + w_O \cdot E_O + w_D \cdot E_D \quad (8)$$

エネルギーは荷重和で定義される。ここで、 $E_C$ は色エネルギー、 $E_G$ はすき間のエネルギー、 $E_O$ は重なり具合を表すエネルギー、そして、 $E_D$ は変形の度合を表すエネルギーである。処理の手順としては次のようになる。

1. **Packing:** 変形度合を表すエネルギー $E_D$ を使わずにタイルを選択して配置する。Best First Searchを用い、一度に一つのタイルを配置する。
2. **Refinement:** active contours (*snakes*)を用いて、位置を変更したり必要であれば変形して、配置を改良する。
3. **Adjustment:** それぞれのタイルを置いたり、画像を歪ませることで、最終的なmosaicを組み立てる。

また、許容可能な計算量でmosaicing問題を解く高速なアルゴリズムについても述べる。アルゴリズムの最適化は、次のように行う。

- (1) **Placing a tile:** 新しいタイルを配置する前に、各領域がおおよそタイルの大きさの平均値と等しくなっているCVD(Central Voronoid Diagram)を作成する。
- (2) **Branch & Bound with Look-Ahead:** 新しいタイルを配置する場合、次の繰り返しの際に入れ物を満たすことが難しくなるように、そのタイルにペナルティを与える。これを実現するために、タイルを配置したあとに入れ物がどのようにみえるかという項をエネルギー式に追加する。
- (3) **Container cleanup:** 小さい断片を削除する。
- (4) **Geometric hashing:** 線形探索の代わりに、前処理の段階で四角形のグリッドを作成し、それぞれのタイルや向きを投票する。

### 13.3 “Synthesis of Bidirectional Texture Functions on Arbitrary Surfaces”

Xin Tong(Microsoft Research Asia), Jingdan Zhang(Tsinghua University), Ligang Liu(Microsoft Research Asia), Xi Wang(Tsinghua University), Baining Guo, Heung-Yeung Shum(Microsoft Research Asia)

BTF(Bidirectional Texture Function) は、空間的に異なったサーフェスの反射率とサーフェスの中間構造の両方から生じるテクスチャを記述する 6 次元関数である。本論文では、サンプルとなる BTF から任意のサーフェス上の BTF を合成するためのアルゴリズムについて述べる。サーフェスの BTF 合成における主な問題点は、サーフェス上の一貫した中間構造を必要とすることであり、そのためにサンプル BTF 中の膨大な量のデータを取り扱わなければならないことである。提案手法は、surface textons に基づいて BTF 合成を行う方法であり、そしてそれは合成処理を容易にするためにサンプル BTF から本質的な情報を抽出する。Surface textons を使った高速な BTF 合成のために、k-coherent search と呼ぶ一般化探索手法についても述べる。提案アルゴリズムを用いた BTF 合成は、全ての視/照明条件において BTF サンプルと類似して見えるだけでなく、視/照明方向が変化した場合においても一貫した中間構造を呈示する。さらに、合成した BTF は自然にそして継ぎ目なく対象サーフェスに張り付けられる。

### 13.4 “Hierarchical Pattern Mapping”

Cyril Soler, Marie-Paule Cani, Alexis Angelidis(iMAGIS/GRAVIR - CNRS/INPG/INRIA/UJF)

本論文では、任意の形状の surface に対して、surface を階層的に分割し、1 毎の画像を様々な大きさや形に切り出して張り付けることによって 1 枚の画像からテクスチャを切れ目無く、大きな変形も与えずに張り付けるアルゴリズムを提案した。

### 13.5 “Improving Noise”

Ken Perlin(New York University)

以前のノイズアルゴリズムに存在する 2 つの欠陥、2 次補間の不連続性と最適ではない勾配計算手法を修正する。この問題点を解決することによって、見かけと速度の両方が良くなった。勾配計算方法の変更も一般的な数学的参照基準として定義しやすくなった。

## 14 Graphics Hardware

### 14.1 “The SAGE Graphics Architecture”

Michael F. Deering, David Naegle(Sun Microsystems, Inc.)

SAGE(Scalable, Advanced Graphics Environment) は、新しいハイエンドで、多チップのレンダリングアーキテクチャである。各 SAGE ボードは、1 秒につき 80,000,000 以上の全体に照明があたり、テクスチャが付き、アンチエイリアシングされた三角形をレンダリングすることができる。SAGE はビデオレートのハードウェアに初めて高品質

なアンチエイリアシングフィルタを提供している。これを実現するために、フレームバッファの概念を最終出力画素当たり 1 ~ 16 個の非一様に配置されたサンプル間のサンプルバッファを完全にダブルバッファ化することによって置き換える。

サンプルのビデオ出力走査は、従来の RAMDAC に取って代わる 5 × 5 のプログラム可能な再構成フィルタとバンドパスフィルタによって畳み込むことが必要である。各々の SAGE ボードは 4 つの並列レンダリングサブユニットを持ち、2 つまでのビデオ出力チャンネルをサポートしている。

### 14.2 “Chromium: A Stream Processing Framework for Interactive Rendering on Clusters”

Greg Humphreys, Mike Houston, Yi-Ren Ng(Stanford University), Randall Frank, Sean Ahern(Lawrence Livermore National Laboratory), Peter Kirchner, Jim Klosowski(IBM Research)

Chromium は、WireGL をより汎用的なアルゴリズムに対応できるように拡張したものである。(WireGL は並列レンダリングを行うための API で、ディスプレイホストでは OpenGL のドライバとして実装されているため、OpenGL アプリケーションであれば変更なしで動かすことができる。分散レンダリングの方式は sort-first 方式である。)

Chromium には次のような特徴がある。

1. **sort-first** レンダリング: 矩形タイル状にフレームバッファを細分化して並列クラスタでレンダリングする。
2. **sort-last** レンダリング: 3D データセットを分割して、それぞれ並列にレンダリングし、それぞれの Z バッファに従って合成する。
3. **ハイブリッドレンダリング**: sort-first と sort-last を組み合わせで構成することも可能である。
4. **OpenGL Command Stream Filtering**: NPR effect の実装などのために、OpenGL の命令の流れを Stream Processing Unit(SPU) により遮断、変形できる。
5. 多くの OpenGL プログラムが修正なしで Chromium で使用できる。

パフォーマンス測定として次の評価を行っている。

- a. sort-last 方式で並列ボリュームレンダリングを行った場合の性能評価
- b. 頂点数が少なくレンダリング回数が多いデモを用いた integration の性能評価
- c. hiddenline などの OpenGL 命令を遮断する処理をする場合の性能評価

### 14.3 “Ray Tracing on Programmable Graphics Hardware”

Timothy J. Purcell, Ian Buck(Stanford University), William R. Mark(NVIDIA) Pat Hanrahan(Stanford University)

リアルタイムなレイトレーシングの実現は、コンピュータグラフィックス業界の長年の目標であった。近年、専用の

チップを使ったリアルタイムなレイトレーシングが実現された。グラフィックスハードウェアの進歩は目覚しく、プログラマブルな部分がどんどん増えてきている。そこで、本論文では、グラフィックスハードウェアにレイトレーシングアルゴリズムを搭載する方法、今の CPU と GPU の比較についての議論、グラフィックスハードウェアにレイトレーシングを搭載した時に必要となる計算量とバンド幅の算出について述べる。本論文で提案する手法は、Whitted Ray Tracer, Ray Caster, Path Tracer, Shadow Caster などにも対応している。

グラフィックスハードウェアにレイトレーシングをのせるために、我々はレイトレーシングを4つのステージに分けた。必要なデータの利用は、そのステージ内に限定することで、グラフィックスハードウェアの性能を引き出す事が可能となる。また、提案システムでは、geometry 情報は、あらかじめ高速なデータリストのような形で保存されている事が前提となる。

Streaming Ray Tracing は、4つのステージを持つ。カメラ位置を入力とし、1画素に対応する1本の光線を発生させ、その光線群を出力とする。高速にアクセスできるように保存した3次元空間の中で、光線と交差する voxel を発見し、Triangle が含まれている voxel を次のステージに渡す。Triangle と光線が交わっていれば、次のステージに渡す。法線情報と材質情報を貰い、シェーディングを行い、色を計算する。この時、影や second ray が発生した場合は、2つめのステージに戻る。

これは、グラフィックハードウェアで簡単なループや枝別れが可能となった場合、ハードウェアに載せる事が出来る。

本論文で提案した手法を用いた場合、multipass なハードウェアと branching なハードウェアを使用を仮定した時に必要となる計算量と、バンド幅を算出した。これは、C++ で書いたプログラムでシミュレーションを行った結果である。この結果から、リアルタイムでレイトレーシングが実現出来ると言う事が出来る。今回の論文で用いた新しいグラフィックスハードウェアの技術は、このままグラフィックスハードウェアが進化し続ければ、近いうちに必ず実現される機能である事は確かである。

#### 14.4 “Shader-Driven Compilation of Rendering Assets”

Paul Lalonde, Eric Schenk(Electronic Arts (Canada) Inc.)

コンシューマグラフィックスハードウェアでは、ターゲット API やハードウェアの形式にジオメトリデータを変換しておく前処理によって、レンダリング性能を向上させている。ジオメトリデータの様々な要素は実行時にシェーディングプログラムと一緒に描画される。

本論文では、シェーディングプログラムの手法を用いて、前処理でジオメトリデータをコンパイルするシステムを提案する。ジオメトリデータをターゲットハードウェア向けのネイティブなデータ構造に変換し、これらのデータ構造をレンダリングするのに必要な操作を記述するコードストリームにアセンブルする。本コンパイラは典型的なコード・コンパイラのような構造を取っており、3D モデリングパッケージとプラットフォーム非依存のシェーダからのジオメトリデータとアトリビュート出力を読みこみ、プラットフォーム非依存の最適化を実行するフロントエンド、およびターゲットプラットフォーム依存の最適化を行い、ターゲットプラットフォーム用のデータ構造とコードストリームを生成するバックエンドを備えている。

本コンパイラは4つのプラットフォームをターゲットにしており、うち3つはお互い極端に異なっている。全てのプラットフォームにおいて、コンパイルしたデータおよびコードストリームは、実際に使用される状況下で、ハンドコーディングしたデータおよびコードストリームを上回るパフォーマンスを達成している。

## 15 Fluids and Fire

### 15.1 “Physically Based Modeling and Animation of Fire”

Duc Nguyen, Ronald P. Fedkiw, Henrik Wann Jensen(Stanford University)

本論文では、炎の物理ベースのモデリングおよびアニメーション手法を提案している。本手法は、流線流と乱流の炎の両方に適しており、固体やガス燃料の燃焼アニメーションに利用可能である。気化燃料や高温のガス状生成物をモデル化するために、非圧縮流体のナビエ・ストークス方程式を用いている。

本論文のオリジナリティは、気化燃料が化学反応を起こして高温のガス状生成物を形成するときに発生する膨張と、固体が気化するときに発生する膨張の物理モデルの提案にある。高温のガス状生成物、煙や煤は浮力の影響を受けて浮遊し、黒体放射モデルを用いてレンダリングしている。また、化学反応が激しく起きている炎の青い芯の部分もモデル化している。本手法では、炎と物体との相互作用が可能で、可燃物に炎が燃え移る様子も表現可能である。

火、および、炎のモデル化について見落とされがちなことは、高温のガス生成物が作られる化学反応の際に起こる燃焼の膨張である。この膨張が炎の視覚的なふくらみを持たせているのと同時に、視覚的な揺れにも関係している。非圧縮流体方程式だけでは、膨張を表現できないので、本論文では、流線流の炎のモデルを提案している。これは、ガス状の燃料が高温のガス生成物へと移り変わる化学反応領域を閉曲面で表すことで実現している。

閉曲面は、ガス状の燃料が高温のガス生成物へと変わる化学反応領域をたどるために使われている。それから、ガス状の燃料と高温のガス生成物の両者は、それぞれ独立した非圧縮流体の方程式を用いて別々にモデリングしている。表面でガスが化学反応する場合、質量と運動量が変わるという事実を用いると、これらの非圧縮流体の方程式は、同時に関連し合いながら更新されていく。

本論文では、視覚的に正確なモデルを得るために、温度の時間経過に基づく状態の変化を用いている。もし、燃料が固体または液体であるならば、初期段階でガス状態になるまで燃料を加熱する。燃料ガスは、閉曲面と青い芯の領域の始まりに一致するところで燃焼温度になる。その後、最高温度に達するまで上昇し、放射冷却効果およびその他の複雑な原因によって温度は下がる。温度が下がる場合、完全に黄橙色がみえなくなるまで黒体放射はずっと起こり続けている。

### 15.2 “Structural Modeling of Flames for a Production Environment”

Arnauld Lamorlette, Nick Foster(PDI/DreamWorks)

炎のアニメーションを制作する際に用いられてきた手法には、大きく分けて現象を直接的に計算して求める方法と、パーティクルシステムの2つがある。直接的に求める

方法は煙の発生などでは有効だが、炎自体の動きを計算するには使いにくく、パーティクルシステムではアニメータの負担が大きい。大きなシステムでは炎のコントロールのしやすさや、能率がリアルさと同じよう求められる。本論文では、燃焼の物理モデルを作成する代わりに、炎の様子を決定する要素が自然界において統計的であることを利用して、炎のアニメーション生成におけるリアルさと制御の容易性、能率の両方の利点を実現している。

システムは以下の手順で構成される。

1. 炎は B-Spline 曲線で構成される。これらは炎の芯となる。
2. それぞれのカーブが、物理的に基づいた風の場合や設定した風の場に従って時間経過による移動を行う。カーブはつながりを保つため再サンプリングされる。
3. 決められた寿命によりカーブは消えたり、分かれたりする。
4. 円筒状の断面を用いて可視部分の構築を行う。
5. Procedural noise が断面に適用され、単純な形状の断面がリアルな物に変化する。Procedural noise は熱浮力によって決定される。
6. Kolmogorov noise が炎の乱流を断面に加える。
7. それぞれの粒子がレンダリングされる。色は元の断面に使われていたデータを利用する。明るさは炎の密度を用いた式で計算される。また、透明度については背後にある物体と炎の明るさによって計算を行う。

これら一連の作業において、アニメータは炎の形状や色などを直接的にコントロールを行う事ができる。加えて、大きな動きも風の場の和で定義することができる。

### 15.3 “Animation and Rendering of Complex Water Surfaces”

Douglas P. Enright, Stephen R. Marschner, Ronald P. Fedkiw(Stanford University)

本論文では、グラスに注ぐ水や波の崩れる様子などをリアルに再現できる水のレンダリングおよびアニメーションの手法を提案する。

水の表面をモデリングするための手法として、“particle level set method”と呼ぶ新しい“thickened” front tracking 法を提案している。これは、水の表面を追跡する方法で、質量の無い目印を付けたパーティクルと動的な陰的サーフェスを結合したハイブリッドな表面追跡手法である。また、視覚的にリアルな水の表面の動きを得るためにサーフェスにおける速度の新しい取扱い方も提案する。質量の無い目印付きのパーティクルと陰的関数で表されているサーフェスの両方の動きとも計算の基礎になるメッシュ上の速度に依存している。水の表面を横切り、空気で占められている領域へ入る速度を外挿することによって、視覚的に良い結果を得ることができる。

### 15.4 “Image Based Flow Visualization”

Jarke J. van Wijk(Technische Universiteit Eindhoven)

新しい2次元流体の流れの可視化手法を提案する。提案手法は、染料の移流と崩壊に基づいている。これらの過程は、流れアニメーションの各フレームを前の画像の歪んだ形といくつかの背景画像の混合されたものとして定義することによってシミュレーションする。後者の画像には、高周

波成分を取り除くために、時間と空間でフィルタリングしたホワイトノイズの系列を用いる。全ての処理は画像だけで行われるので、IBFV(Image Based Flow Visualization)と名付けた。IBFVを用いて広範囲な可視化技術をまねることが可能である。流れは、line integral convolutionとスポットノイズを持つ動くテクスチャとして可視化することができる。矢印のプロット、流線、パーティクルや位相的な画像は、特別な染料を追加することで生成できる。任意のメッシュ上で定義された不安定な流れも扱うことができる。IBFVは、標準のグラフィックスハードウェアを用いて、高性能を得ることができる。通常は、パソコンの標準のグラフィックカードで、50フレーム/秒の速度を得ることができる。IBFVは、理解、解析、実装が簡単である。

## 16 Painting and Non-Photorealistic Graphics

### 16.1 “WYSIWYG NPR: Drawing Strokes Directly on 3D Models”

Robert D. Kalnins, Lee Markosian(Princeton University), Barbara J. Meier, Michael A. Kowalski, Joseph C. Lee(Brown University), Philip L. Davidson, Matthew Webb(Princeton University), John F. Hughes(Brown University), Adam Finkelstein(Princeton University)

提案システムは、デザイナーが3次元モデルに直接様々な情報を付加することによって、そのデザイナー個人的な審美眼に基づいたNPR(Non-Photorealistic Rendering)を可能にする。そのために、まずデザイナーはブラシスタイルを選択し、1つ以上の視点からストロークを描く。もし、定義されていない任意の視点からシーンをレンダリングする場合には、元の形を保ったまま適切にストロークの数や位置を決めてレンダリングを行う。

次に、『フルーツ缶』のレンダリング処理過程を例として、全体的なアルゴリズムの流れを説明する<sup>4</sup>。

- (1) 3次元モデルをロードする。3次元モデルは、最初、一般的なシルエットで表されており、下地と背景色のみが示されている。
- (2) あらかじめ作成されたリストから、漫画調の下地を選択する。次に、背景色をグレーに設定し、あらかじめ生成した紙テクスチャを貼り付ける。そして、光源を調整し、缶の右側が光るようにする。
- (3) ストローク描画として、以前に作成したブラシリストの中から、黒鉛筆スタイルを選択する。次に、シルエットの描画を行う。シルエットはすでに黄色のハイライトで表示されている。そのハイライトになっている部分にスケッチ風のストロークを描き、“apply”ボタンを押すと、その他の全てのシルエットに今描いたスケッチ風のストロークが適用される。次にある折り目になっている部分、例えばこの缶では、缶の上面と側面が交わる部分を描く。一つの折り目を選択し、そこにストロークをスケッチ風に描く。その他の折り目部分にも同じようなスケッチスタイルが描かれる。
- (4) 缶にラベルを貼るためには、転写模様部分のストロークをそのまま直接表面に描く。必要に応じて、視点を移動し、ブラシの色や他の属性を変える。

<sup>4</sup>論文中の図2を参照。

- (5) ハッチングをしたい場合、ハッチングモードに切替え、陰を付けたい部分におおまかな平行線を描く。

## 16.2 “Painting and Rendering Textures on Unparameterized Models”

David (grue) DeBry, Jonathan Gibbs, Deborah DeLeon Petty, Nate Robins(Thrown Clear Productions)

モデル上のテクスチャの品質は、しばしばモデルの2次元テクスチャ平面へのパラメータ化によって制限される。複雑な形状のモデルでは、このパラメータ化が非常に困難で、人手によってまかなわれている。本論文では、この2次元パラメータを排除し、適応的な octree によってテクスチャを3次元空間に記録する。本質的に異なったトポロジ間でのマッピングを行わないので、テクスチャらしい縫目状模様や伸長が生じない。

## 16.3 “Stylization and Abstraction of Photographs”

Doug DeCarlo, Anthony Santella(Rutgers University)

人間がある画像を見た場合、特に意識することなくその画像を理解することができる。これは、画像の中の視覚的情報を利用する人間の推論構造の正確さと巧妙さを示すものである。

良い情報デザインとは、イメージ内の有用な情報を明確にすることである。本論文では、計算機を用いて、この目標に沿うような写真の様式化および抽象化法を提案する。

本システムの目的は、より良くデザインされた画像を自動的に生成するものである。このためには、人間はシステムとインタラクションを行う必要がある。この際、マウスなどを用いるのではなく、eye-tracker を用いることによって「ただ画像を見るだけ良い」。提案システムでは、eye-tracker から得られた情報を変換し、画像のどの部分が重要な情報をもっているかを予測する。この予測に基づき、ディテールを潰したり、太いエッジを付加したり、各領域毎に平均色で塗り変えたりなど、画像の単純化作業が行われる。エッジ検出には Canny edge detection を、領域の segmentation には Comaniciu and Meer らの Mean Shift Algorithm を利用しており、この二つのアルゴリズムを組み合わせることでさらに良い結果を得ることができる。

## 16.4 “Object-Based Image Editing”

William Barrett, Alan Cheney(Brigham Young University)

リアルタイムアニメーションと静止デジタル写真の操作のための OBIE(Object-Based Image Editing) 手法を提案する。個々の画像中のオブジェクトを選択し、マウスを使った簡単な操作で、画素単位というよりもオブジェクト単位での拡大縮小、伸ばしたり、曲げたり、変形させたり、あるいは、消したりすることもできる。このとき、自動的に穴埋めもしてくれる。OBIE は、非常に少ない画像編集時間でユーザがオブジェクトの形状、大きさ、位置の直接的かつ局所的な制御を可能としている。

オブジェクトの選択は、watershed algorithm によって検出された領域群を手作業で集めることによって行う。オブジェクトは、三角形メッシュに分割され、OpenGL のテ

クスチャマッピングハードウェアでのリアルタイム変形が可能になる。anchor point を利用することで、オブジェクト全体もしくはオブジェクトの一部に対して移動、拡大縮小、回転、伸び、曲げ、消去などの編集操作を対話的に行える。シリンダと Bezier 曲線を用いることで、間接的なオブジェクトの形状操作も用意されている。オブジェクトが移動することによって生じる穴は、周囲のテクスチャに基づいて実時間で埋め尽くされる。

オブジェクトを伸ばしたり拡大縮小させる場合、テクスチャの顆粒質感や大きさを保つ方法も提案している。また、既に存在するテクスチャを用いて、画像の他の部分にテクスチャを描画するテクスチャブラシも用意した。

OBIE は、数秒、あるいは、数十秒での、対話的で、高度な画像オブジェクトの編集作業が可能である。

## 16.5 “Octree Textures”

David Benson, Joel Davis(Industrial Light + Magic)

2次元イメージマップ集合を使ったテクスチャリングは、確立され広まっている手法であるが、多くの制限がある。特に、陰的サーフェスや再分割曲面、非常に密集したあるいは細かい多面体メッシュなどで表現されたものに対するテクスチャ空間でのモデルのパラメータ化は非常に困難である。本論文では、octree に基づいた新しい種類のテクスチャの利用手法を提案する。サーフェスそれ自身以外のパラメータ化を必要とせず、なおかつ2次元マップと同様なデータ量しか必要としない。さらに、適応的で詳細な規則的なサーフェスのサンプリングが可能であり、サーフェス境界における連続性が保証されている。本論文では、octree テクスチャを用いた、テクスチャの生成、ペインティング、保存、処理、およびレンダリングについて述べる。

## 17 おわりに

本論文では、SIGGRAPH'2002 の論文 67 件の概要について述べた。

SIGGRAPH における論文発表は、レンダリング手法、アニメーション、モデリング、3次元計測、レンダリングハードウェア、画像処理/CV(Computer Vision) 技術を利用した画像/映像生成手法など、多岐に渡っている。各論文の概要説明に関しては、極力、オリジナルの論文の主張を正確に表現することを心がけたが、筆者らの能力不足によって十分にオリジナル論文の論点を表現できていない可能性がある。ほとんどの論文は、Internet 経由<sup>5</sup>で入手可能であるので、実験結果や詳細は、各著者の web page や論文を参照して頂きたい。

## 謝辞

本資料の作成にあたり、東京工業大学 大学院 情報理工学 研究科 中嶋研究室のみなさんに協力して頂いたことを感謝致します。

<sup>5</sup>各論文の URL の所在は、<http://www.cs.brown.edu/tor/sig2002.html> のページを参考にした