

# SIGGRAPH'03 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27日(日) から 31日(木) までの5日間に渡り San Diego, California, USA の Convention Center で行われた. 本論文では, SIGGRAPH'03 で発表された論文全 81 件を概説する.

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

# SIGGRAPH'03 Report

## - Summary of 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 2003 annual conference was held from 27th to 31st in July at San Diego, California, USA. This paper gives brief paper summaries in SIGGRAPH'03.

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 30 回目を迎えた CG(Computer Graphics) や interactive technology に関する国際会議である. SIGGRAPH'03 は, 2003 年 7 月 27 日(日) から 31 日(木) までの 5 日間に渡り San Diego, California, USA の Convention Center で行われた. SIGGRAPH'03 では, paper session 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があったが, 本稿では, この会議の本来の主旨である paper session について紹介する. 今年の paper session では 81 件の講演と UIST(User Interface Software and Technology)2002 と I3D(Interactive 3D Graphics)2003 の優秀論文各 3 件の計 87 件の発表が 21 のセッションに分かれ, 7/28(月) から 7/31(木) までの 4 日間開催された. UIST は, 1988 年から開催され, 2002 年で 15 回目を迎えた human-computer interface のソフトウェアや技術的な発表を行うフォーラムであり, ACM SIGCHI(Special Interest Groups on Computer-Human Interaction) の後援のもと 2002 年 10 月 27 ~ 30 日の間, Paris, France で開催された. 一方, I3D は, 1990 年から開催されているリアルタイム処理や interactive 3DCG に関するシンポジウムで, 2003 年 4 月 28~30 日の間, Monterey, California,

USA で開催された.

今年の paper の投稿数は 424 件であり, 昨年よりも 18% 投稿数が増加し, 採択率は 19% となっている. SIGGRAPH2004 の paper session の chair である Dr. Joe Marks によると, 次に挙げる session が注目すべき session とのことである.

1. Character Animation
2. Shadows
3. Human Bodies
4. Reprise of UIST2002 and I3D2003
5. Design & Depiction
6. Computation on GPUs

本論文では, UIST'02 と I3D'03 の優秀論文 6 件を除く 81 件の SIGGRAPH'03 で発表された論文について概説する.

## 2 Texture Synthesis by Example

### 2.1 “GraphCut Textures: Image and Video Synthesis Using Graph Cuts”

Vivek Kwatra, Arno Schödl, Irfan Essa, Greg Turk, Aaron Bobick (Georgia Institute of Technology/GVU Center)

本論文では、テクスチャ合成を行う graph cut を用いた新しい手法を提案する。提案手法は、サンプルとなるテクスチャを繋ぎ合わせて新しいテクスチャを生成する手法であり、新しいテクスチャの配置や最適な繋ぎ目を求める手法について述べている。従来、Efros らの Image Quilting[1]では、繋ぎ合わせるパッチの大きさが決まっていたり、二つの重なったテクスチャの誤差が最小となる繋ぎ目を動的計画法で求めていた。しかしながら、Efros らの手法では、一様な大きさのパッチの重複部分を切って繋ぎ合わせるため、人工的な格子状の構造が生じてしまう。そのため、綺麗に繋ぎ合わせることができなくなってしまうという問題が生じる。提案手法では、重複したパッチに対し、画素を節とし 4 連結の関係にある隣接画素間に辺を持つグラフとして表している。各辺の値として、次式で表される隣接する画素  $t, s$  のパッチ  $A, B$  間の色の差  $M(t, s, A, B)$  を用いる。

$$M(t, s, A, B) = \|A(s) - B(s)\| + \|A(t) - B(t)\| \quad (1)$$

ただし、 $A(s), B(s), A(t), B(t)$  は、それぞれパッチ  $A, B$  の画素  $s, t$  における画素値を表す。このグラフを最小コストで切る辺の集合が繋ぎ目となる。これは、min-cut や max-flow と呼ばれるアルゴリズムで求めることができる古典的なグラフ問題である。パッチとしては、入力テクスチャ全体、もしくは、その一部を利用することで Image Quilting の問題を解決している。また、動的計画法では、過去のパッチ群の重なり具合を記憶することができないため、複数のパッチが重なり合った場合に古いパッチの繋ぎ目が目立ってしまうことがある。graph cut では、複数のパッチが重なって繋ぎ目を決定する際に、過去のパッチの繋ぎ目の評価値を利用して新しい繋ぎ目を見付けることができる。

提案手法は、大きく分けて 2 つのステップから成り立っている。一つ目は、パッチを出力画像のどの位置に配置するかを求める。二つ目は、graph cut を用いて最適な繋ぎ目を求める処理である。パッチの配置位置の決定には、対象画像に合わせて (1) ランダムな配置、(2) サンプルテクスチャ全体をパッチとする手法、(3) サンプルテクスチャの一部をパッチとする手法を用いている。(2) と (3) では、出力画像のどの部分にパッチを配置するかを二乗和誤差を用いて決定している。

画像合成を行った場合、高周波領域よりも低周波領域で不連続性が目立つため、式 (1) に対して、勾配で割った値を適応的なコスト関数として利用している。これによって、勾配が大きいところではコスト関数の値が小さくなり繋ぎ目となりやすく、勾配が小さい変化の少ない場所ではコスト関数値が大きくなり繋ぎ目ができにくくなる。また、元々のサンプルテクスチャ自体にうまく繋ぎ合わせられる部分が無い場合には不連続な繋ぎ目が生じてしまうため、ぼかし処理や multi-resolution splining を施し、目立たなくしている。さらに、パッチの位置決定は全探索であるため、計算量が膨大となってしまう。そこで、FFT(Fast Fourier Transforms) を用いた高速化処理 [2] を施すことで、例えば約 100 万画素からパッチの位置を探索する場合、全探索に比べ計算時間が約 1/100 となる。

画像合成結果として従来手法 [1] よりも良い結果が得られている。また、サンプルテクスチャを回転、鏡映、拡大縮小処理を施したものを入力パッチとして利用することで多様性に富んだ画像の生成が可能であり、遠近感のある画像の生成も可能である。さらに、合成したい領域を対話的に指定することで画像合成を行うことも可能である。また、

提案手法は柔軟な方法であるので、ビデオにもそのまま適用可能で、ビデオ合成を行うことができる。Schödl らの提案した Video Texture[3] は、すでにあるビデオのある部分の映像から別の部分に滑らかに変化する場所を見付け無限に続く映像を生成する手法であるが、類似したフレーム群を見付けだし繋ぎ合わせているため不連続さが目立つ部分が生じてしまう。そのような不連続性を解消するためにブレンディングやモーフィングを用いているが、ビデオの繋ぎ目をブレンディングすると非常にぼやけてしまったり、混沌とした動きにはモーフィングが使えない等の問題点があった。提案手法では、3 次元の時空間テクスチャパッチとしてビデオを扱うことによって、最適な繋ぎ目を 2 つの 3 次元パッチ間で求めることができる。Video Texture で生じていた断続的なぼやけも提案手法では解消することができた。また、非常に気になる周期的な映像の繰り返しも、時間軸におけるランダムな置き換えを行うことによって繰り返しが少ないようになった。さらに、波や煙のように時空間的にあまり動かない映像に対しては、部分的なパッチを繋ぎ合わせることで波や煙が流れる様子が自然に合成できる。

## 2.2 “Wang Tiles for Image and Texture Generation”

Michael F. Cohen(Microsoft Research),  
Jonathan Shade(Wild Tangent), Stefan  
Hiller, Oliver Deussen(Dresden University of  
Technology)

本論文では、小数の Wang Tiles を用いて非周期的なタイルリングを行う簡単な確率的手法を提案する。Wang Tiles を利用する最大の利点は、一度基本タイルを充填してしまえば、非常に大きい非周期的なテクスチャやパターン、幾何構造を必要に応じて実時間で効率的に生成可能なことである。

Wang Tiles は各エッジに色が割り当てられている四角形であり、隣り合う辺の色が一致するように敷き詰める。Wang Tiles を用いた tiling 法は次のようになる。

1. 最初のタイルは任意に選択。
2. 最上段のタイルを敷き詰めて行く; 新しく敷き詰められるタイルの左エッジの色は、その前のタイルの右エッジの色と同じもの。
3. 次の段の左端のタイルを選ぶ; 選ばれるタイルの上エッジの色は、その上のタイルの下エッジと同じ色のもの。
4. 続くエッジもその左タイルの右エッジの色と、上タイルの下エッジの色とを考慮しながら選んで行く。
5. 3, 4 を繰り返し、必要な大きさの画像を生成する。

tile の生成法として大別して次の 2 種類がある。

- a. Wang Tiles の同じ色の辺に対応する画像が同じになるようにインタラクティブに描画する方法。
- b. Wang Tiles の同じ色の辺に対応する画像は綺麗に繋がる必要があるため、ダイヤモンド型に切り取ったサンプル画像を 4 枚組み合わせ、その中心の矩形領域をタイルとする方法。タイルの生成には、ダイヤモンド型のサンプルを少し重複させ、Image Quilting[1] で用いられた手法を用いて繋ぎ目を決定している。8 種類のタイルを生成するためには 4 種類のサンプルが必要であり、16 種類のタイルには 6 種類のサンプルが必要となる。

また、疑似的なランダム分布を求めることは Wang Tiles の効果的な利用方法の一つであるが、Poisson Disk 分布を用いて単純にタイルを生成すると分布に偏りが生じてしまう。そこで、タイル毎に独立に Poisson 分布をする点集合を作成する。そして、合成した後の周囲 8 タイルを含む 9 タイルの領域に含まれる点集合から Voronoi ダイアグラムを作成し、中心に位置するタイルの点の分布が Poisson Disk 分布を満足するように弛緩する手法を提案している。

その他、Wang Tiles の規則にしたがって画像を充填することでテクスチャ合成を行うことが可能であるが、タイルの角の部分において目に見えぬずれが生じてしまう。そこで、繋ぎ合わせる辺に制限を付けることで解決を行っている。さらに、広大な花畑に花が咲いている様子を Wang Tiles を用いて合成する 3 次元アプリケーションの生成手法についても述べられている。

### 2.3 “Synthesis of Progressively Variant Textures on Arbitrary Surfaces”

Jingdan Zhang(Tsinghua University), Kun Zhou(Microsoft Research Asia), Luiz Velho(Instituto de Matemática Pura e Aplicada), Baining Guo, Heung-Yeung Shum(Microsoft Research Asia)

本論文では、ユーザが局所的な多様性を制御可能な連続的に変化するテクスチャを生成し、任意の 3 次元モデルにテクスチャマッピングを行う手法を提案する。従来の均一なテクスチャとは異なり、テクスチャ要素の大きさ、方向、色、形状などの局所的な多様性を表現することができる。また、従来にも生物の成長過程に基づいた哺乳類の模様生成手法 [4] など、テクスチャが連続的に変化する手法も提案されているが、ユーザが 3 次元モデル上のテクスチャの複雑な多様性を制御することはできなかった。

提案手法では、連続した多様性のある 2 次元のテクスチャを作成し任意の 3 次元モデルのサーフェス上で合成する。2 次元テクスチャの生成には、特徴に基づいたワーピングと特徴に基づいたブレンディングの 2 つの方法を用いる。特徴に基づいたワーピングでは、テクスチャ要素の形状の制御を行う。特徴に基づいたブレンディングでは、2 つの均一なテクスチャから連続的に変化するテクスチャを生成する。提案手法で最も大きな問題となることは、サーフェス上で合成テクスチャ要素が連続的に変化することによって、要素そのものが崩壊してしまう傾向にあることである。それを解決するために、顕著なテクスチャ要素に目印を付けた *texton mask* を利用し、合成テクスチャの正しい状態を保持するアルゴリズムを提案している。

### 2.4 “Fragment-Based Image Completion”

Iddo Drori, Daniel Cohen-Or, Hezy Yeshurun(Tel Aviv University)

本論文では、前景や背景の一部が欠落した部分の画像を周囲の画像情報を用いて補間する新たな手法を提案する。提案補間手法は、欠落した画像を視覚的にもっともらしく、滑らかに完全に補間することを目的としている。提案手法では、画像の可視な部分から繰り返し未知の画像を推測し、適切な画像断片を画像中に合成している。

画像編集ソフトウェアなどを用いて、画像が欠落した領域には  $\bar{\alpha}_i = 0$ 、画像が存在する部分には  $\bar{\alpha}_i = 1$  として inverse matte  $\bar{\alpha}_i$  を設定する。付加的に境界部分に  $0 < \bar{\alpha}_i < 1$  となるような値を付けることもできる。この inverse matte 値を confidence map と定義し、画像の補間が進むにつれて値が 1 になるように処理を行う。提案手法は、像が単純であり、周囲に馴染むように画像補間を行うことを第一に考慮している。そのため、confidence map の値が小さい領域では、簡単な平滑化処理を用いることで近似を行っている。この近似処理では、confidence が高い値を持つ画像の領域と一致する基本構造となるように画素の大雑把な分類を行う。その後、近似した領域に confidence が高い領域から例として取った詳細な情報を付け加えることで補間を行う。全ての処理は、注目画素を中心とした円盤状の隣接領域を基に行っている。領域の大きさは画像の持つ基本構造にしたがって適応的に定義される。

## 3 Images, Video, and Texture

### 3.1 “Poisson Image Editing”

Patrick Pérez, Michel Gangnet, Andrew Blake(Microsoft Research UK)

本論文では、画像の細部を失うことなく補間可能な指標ベクトル場 (Guidance Vector Field) に基づく指標付き画像補間 (Guided Interpolation) 手法を提案する。これは、Dirichlet 条件を持つ Poisson 方程式を解くことによって得られる汎用的な画像補間方法である。提案手法の画像編集への応用として、原画像に含まれるオブジェクトを別の対象画像内にシームレスに埋め込む Seamless Cloning と、ユーザが任意に指定した画像領域に対する画像の概観をシームレスに修正する選択領域編集 (Selection Editing) の 2 つの編集ツールについて検討を行っている。これらの編集ツールによる様々なシミュレーション結果を通して、提案手法の有効性が示されている。

画像補間の問題は次のように定式化できる。 $S(\subset R^2)$  上の画像がその閉部分集合  $\Omega$  の内部において未定義であるとする。 $\Omega$  の内部以外で定義された既知の画像を  $f^*$ 、 $\Omega$  内部で定義される未知の補間画像を  $f$  として、 $f$  が  $\Omega$  外部の既知画像  $f^*$  とシームレスに繋げることが目標となる。

最も簡単な補間の方法は、境界条件  $f|_{\partial\Omega} = f^*|_{\partial\Omega}$  の下で Laplace 方程式を解くことであるが、この場合、補間した画像は詳細部分が失われてぼやけてしまうという欠点がある。そこで本論文では指標ベクトル場を導入し、詳細部分を失うことなく画像の補間を行う方法を提案している。

指標ベクトル場  $v$  に基づく指標付き画像補間は、最小化問題として次のように定式化できる。

$$\min_f \int_{\Omega} |\nabla f - v|^2 \quad \text{with } f|_{\partial\Omega} = f^*|_{\partial\Omega}. \quad (2)$$

また、この最小解  $f$  は、以下の Dirichlet 条件を持つ Poisson 方程式を解くことと等価である。

$$\Delta f = \text{div } v \quad \text{over } \Omega, \quad \text{with } f|_{\partial\Omega} = f^*|_{\partial\Omega}. \quad (3)$$

これらを有限差分法で離散化し、SOR 法や V-Cycle Multigrid 法で解いた場合、6 万画素レベルの画像領域の編集に要する処理時間は、Pentium4 を使って 0.4 秒程度である。

Seamless Cloning では、指標ベクトル場として原画像から得られる勾配ベクトル場  $v$  (またはその修正版) を使用することによって、原画像内のオブジェクトを対象画像にシームレスに埋め込むことが可能である。応用例として、特徴部位の置き換え処理がある。提案手法は、穴のあいた複雑な形状のオブジェクトや虹などの半透明なオブジェクトの挿入処理にも適用可能である。

選択領域編集は、ユーザが選択した領域に閉じたシームレスな画像処理が可能である。提案手法では、オブジェクト領域を精度良く切り出す必要がなく、これを含んだおおまかな領域指定を行えば十分である。応用例として、選択領域に閉じたローカルな輝度値補正及び色補正処理が述べられている。

### 3.2 “High Dynamic Range Video”

Sing Bing Kang, Matthew Uyttendaele, Simon Winder, Richard Szeliski (Microsoft Research)

本論文では、各フレームの露光が急激に変化する動的なシーンの画像系列から、HDR (High Dynamic Range; 高ダイナミックレンジ) ビデオを生成する手法について述べる。提案手法は次に述べる 3 つの部分から構成されている。

1. 広く利用されている既存の画像センサやビデオカメラを用いて HDR ビデオを生成するため、映像取得中の自動露光制御を行う。シーンの異なる部分の放射輝度マップを取得するためにフレーム毎に露光を知的に変化させる自動ゲインアルゴリズムを提案する。
2. 取得したビデオの動き補償を行い、各フレーム時間で放射輝度マップを推測し、隣接フレーム間での HDR の繋ぎ合わせを行う。
3. 通常のディスプレイに映像を表示するためのトーンマッピングを行う。既存のフレーム毎のアルゴリズムでは、時間方向の不連続性が目に付くため、時間軸方向の隣接フレームから得られる統計量を用いることで、滑らかに時間変化を行う手法を提案する。

### 3.3 “Matchmaker: Constructing Constrained Texture Maps”

Vladislav Kraevoy, Alla Sheffer, Craig Gotsman (Technion - Israel Institute of Technology)

テクスチャマッピングを行うことで、3次元モデルの現実感を増すことができる。良いマッピング結果を得るためには、テクスチャと対象の3次元モデルとの細かい対応付けを行う必要がある。しかしながら、通常良く用いられている平面上でパラメータ化されたメッシュを用いて3次元メッシュへテクスチャマッピングを行う方法では、テクスチャとメッシュの幾何構造の特別な対応付けが考慮されていない。本論文では、Matchmaker と呼ぶ手法を用いて、ユーザが定義した平面上でパラメータ化されたメッシュに対する特徴の対応付けをテクスチャマッピングに反映させる方法について述べる。Matchmaker はテクスチャと3次元モデル間に正しく 1 対 1 対応を成立させるために拘束条件にスコアを導入している。

MatchMaker アルゴリズムは、(1)Virtual Boundary, (2)Matching, (3)Embedding, (4)Smoothing, (5)Post-

Processing の手順から構成される。入力としては、3次元モデルとテクスチャの対応付ける点を各々に対して与えることが前提である。

1. **Virtual Boundary:** 3次元モデルのメッシュを境界付けられた四角形に埋め込む。メッシュの境界とその四角形に囲まれる領域は三角形で分割する。
2. **Matching:** 入力された各々の対応付けられた点により生成される三角形メッシュを互いに Matching する。Steiner vertex を付け加える。
3. **Embedding:** Matching した三角形メッシュを、テクスチャ側の三角形メッシュに対応させ、適切な三角形メッシュを生成する。
4. **Smoothing:** Polygon Smoothing を行う。
5. **Post-Processing:** 後処理

### 3.4 “View-Dependent Displacement Mapping”

Lifeng Wang (Microsoft Research Asia), Xi Wang (Tsinghua University), Xin Tong, Stephen Lin (Microsoft Research Asia), Shimin Hu (Tsinghua University), Baining Guo, Heung-Yeung Shum (Microsoft Research Asia)

本論文では、リアルタイムで中間構造の影付け、隠れ、シルエットなどの視覚効果のレンダリングが可能な VDM (View-dependent Displacement Mapping) と呼ぶ画素に基づいた手法を提案している。また、ハードウェアを用いて高速化を行うことで、60fps (frame per second) 以上のリアルタイムレンダリングが可能である。View-dependent displacement 情報は、テクスチャ上の点  $(x, y)$ 、視線方向ベクトル  $(\theta, \phi)$ 、曲率  $c$  の 5 次元の VDM 関数で表され、視線に依存した変位を与える。次のような処理を行う。

1. VDM を計算し高次のテクスチャとして新しいサーフェスに写像する
2. シルエットを決定する
3. テクスチャ座標の計算
4. ピクセルシェーディング
5. ハードウェアによるリアルタイム処理のためのデータの分解と圧縮

## 4 Parameterization

### 4.1 “Spherical Parameterization and Remeshing”

Emil Praun (University of Utah), Hugues Hoppe (Microsoft Research)

本論文は、曲面の種数 (genus) が 0 である表面を球面領域上で直接パラメータ化するロバストな手法を提案している。本手法の特徴としては次の 2 つが挙げられる。一つは、大きさの変形を少なくするために伸びに基づいた評価値を最小にし、その結果、サンプリング洩れを防いでいる。もう一方は、一様に再分割された多面体領域を用いて球面領域をサンプリングする手法を提案している。この特殊なサンプリングでは、Geometry Images のように完全に規則

的な2次元格子として表現することができる。さらに、多くの処理操作を支援するための単純な拡張規則を持ち合わせている。アプリケーションとしては、幾何的再メッシュ、LOD(Level-of-Detail)、モーフィング、圧縮、滑らかな表面細分割などがある。

#### 4.2 “Globally Smooth Parameterizations With Low Distortion”

Andrei Khodakovsky, Nathan Litke, Peter Schröder(California Institute of Technology)

計算機上で形状を扱う場合、適切にパラメータ化を施すことは非常に重要である。パラメータ化の善し悪しは一般的にパラメータ化の滑らかさと、どの程度歪みを含むかが関係する。パラメータ化は平面のある区切られた領域を表面に写像するので、円形と同位相ではない表面は複数の部分に分割しなければならない。本論文では、任意のトポロジ表面メッシュに対する新しい歪みの少ない大域パラメータ化アルゴリズムを提案する。本手法では、形状の品質と距離的な歪みを評価基準としてオリジナルのメッシュから生成するパッチの配置を最適化している。全体的な滑らかさは、すべてのパッチを同時に緩和することによって成される。この手法に用いる数学的なアルゴリズムは、大きなメッシュを扱う場合でもロバストで数分のオーダーで計算できる必要がある。

パラメータ化のアルゴリズム概要は次のようになっている。

1. オリジナルのメッシュを単純化して基本となる複合体(base complex)を生成する。この手順において、この複合体に含まれずに除去された頂点は特別なパッチの初期化パラメータとして用いられる。
2. 対となった微分演算子がオリジナルのメッシュ全ての頂点のパラメータの計算に用いられる。
3. それぞれのパッチの角となる頂点に対し、頂点の緩和が行われる。
4. 緩和の必要がなくなるまで2と3の手順が繰り返される。

#### 4.3 “Fundamentals of Spherical Parameterization for 3D Meshes”

Craig Gotsman(Technion - Israel Institute of Technology), Xianfeng Gu(Harvard University), Alla Sheffer(Technion - Israel Institute of Technology)

3次元メッシュデータのパラメータ化は、多くのグラフィックスアプリケーション、特にテクスチャマッピングや再メッシュ、モーフィングなどにとって非常に重要な処理である。種数0の閉多様体メッシュは位相的に球面と同値であるため、それらのメッシュにとって球は自然なパラメータ領域である。三角形メッシュを球上でパラメータ化することは、単位球上の3次元位置をメッシュの各頂点に割り当てること、つまり、メッシュの連結性が大きく変化しないこと、重なり合わないように球上の三角形を生成することを意味する。非重複条件を満たすことは、この処理における最も困難で重大な要素である。そこで、本論文では、球面パラメータ化問題を解決するための平面パラメータ化のための重心座標手法の一般化について述べる。種数0の閉多様

体三角形メッシュの全ての可能な球面パラメータ化の正確な数学的特徴を紹介し、それが平面の場合に用いる重心座標系の線形理論の自然な非線形拡張であることを示す。提案手法の正しさをいわゆる平面グラフに関する Coline de Verdiere metric と関連付けることによって証明する。また、それらのパラメータ化の生成手法や制御手法について述べている。

#### 4.4 “Dual Domain Extrapolation”

Bruno Lévy(ISA - INRIA Lorraine)

既存のポリゴン表面のスムージングを行う手法はポリゴンの境界が決定している必要があった。本論文では、表面を推定して拡張することで、この制限を回避した新しい手法を提案する。提案手法は表面の大域的パラメータ化と表面のエッジの曲率の最小化に基づいている。これによって構成される表面はMES(Minimal Energy Surface)の近似となっている。大域のパラメータ化を利用することで表面の滑らかさとポリゴンのメッシュの品質を切り離して扱えるようになった。さらにパラメータ空間でユーザは表面の形状をコントロールすることができる。この手法をローパスフィルタとして用いるとき、もとの画像と等角の新しいメッシュを構成するので、テクスチャを変形することなくスムージングが可能である。

Dual Domain Extrapolationは、次の手順で行う。

1. ポリゴン表面の大域的パラメータを構成する。
2. (optional) 滑らかにしたい領域を選択する。
3. (optional) Constrained Delaunay Triangulationを用いてパラメータ空間内で境界を拡張する。
4. 最大の三角形の外心に新しい頂点を取り、新しいメッシュを作っていく。
5. 新しく作られた頂点と、2.で選択した範囲の頂点の最適化をMES基準による推定により行う。
6. 小さな狭い三角形を取り除く。
7. (optional) 境界のカーブをパラメータ空間で調整する。その後step3~6を再び行う。

### 5 Precomputed Radiance Transfer

#### 5.1 “Bi-Scale Radiance Transfer”

Peter-Pike Sloan(Microsoft Corporation), Xinguo Liu, Heung-Yeung Shum(Microsoft Research Asia), John Snyder(Microsoft Research)

視線に依存した物体の様子を生成するために、Radiance Transferは一般的な光源が物体によってどのように影を落したり散乱したりするかを表す。筆者らは、2種類の大きさで一般化を行う手法を提案している。macro-scaleでは、腕の影が身体にできるような大域的な効果を与えるために、物体表面を粗くサンプリングする。meso-scaleでは、局所的なテクスチャを表現できるように小さなパッチを細かくサンプリングする。低次(25次元)の球面調和関数は、両方のスケールに依存した低周波照明を表現する。レンダリングを行うために、離れた光源を表す係数ベクトルは、まず、粗いメッシュの各頂点における行列によってmacro-scaleに

変換される。得られたベクトルは，meso-scale に生じる空間的な変化を伴う照明半球を表している。RTT(Radiance Transfer Texture)と呼ぶ4次元関数は，空間を表す指標と視線方向の関数として，各照明の基底成分に対する表面のmeso-scaleの応答を表す。macro-scaleで得られたベクトルとRTTから得られるベクトルの25次元の内積によって正しい影の積分が得られる。bi-scale分解は，両方のscaleで，現実的で効果的な陰のレンダリングや動的で低周波光源からの内部反射効果を事前に計算することが可能である。

## 5.2 “All-Frequency Shadows Using Non-linear Wavelet Lighting Approximation”

Ren Ng(Stanford University), Ravi Ramamoorthi(Columbia University), Pat Hanrahan(Stanford University)

本論文では，高解像度環境マップとして表現された全周波数を含み，時間で変化する照明下にある物体のリアルタイムレンダリングのための事前計算を行った照明モデルに基づいた手法を提案する。

従来手法では，はっきりとした影を作る小さい領域の照明かぼやけた影をつくる広範囲にわたる低周波照明に限られていた。提案手法の特長は，環境マップをwavelet基底で近似し，最も大きな項だけ保存する。また，はっきりした影もぼやけた影も両方扱うことが可能であり，リアルタイム処理が可能である。

## 5.3 “Clustered Principal Components for Precomputed Radiance Transfer”

Peter-Pike Sloan(Microsoft Corporation), Jesse Hall, John Hart(University of Illinois at Urbana-Champaign), John Snyder(Microsoft Research)

本論文では，PRT(precomputed radiance transfer)の高速化と，圧縮について述べる。PRTとは物体表面上の多くの点に対して，その点における光の散乱，影，反射などの様子を行列として前もって保存しておくものである。この高次元な行列をCPCA(Clustered Principal Computed Analysis)を用いて圧縮する。CPCAを用いることによって，高次元の行列式は，クラスタごとの重みとして表される。実際の結果画像は，クラスタごとの照明について計算し，その結果に求めた重みをかけることにより，レンダリングされる。また，視点や照明のある位置を固定せずに光沢のある物体をリアルタイムにレンダリングするために，グラフィックスハードウェアを用いる手法についても述べる。本提案手法では，subsurface scatteringとdiffuse objectにも対応している。

CPCAの概略について述べる。表面上の点 $p$ において， $p$ での照明情報を表す $n$ 次元のベクトル $x_p$ があったとする。次元を下げるために，この $x_p$ をaffine subspaceによって近似できるクラスタに分割する。クラスタの中の点 $p$ は次のように表される。

$$x_p \approx \tilde{x}_p = x_0 + w_1^p x_1 + w_2^p x_2 + \dots + w_n^p x_n \quad (4)$$

クラスタに分割する時には，まず初めに平均を決定する。この時に用いる手法にはVQ(Vector Quantization)，

PCA(Principal Computed Analysis)があり，どちらも $\|x_p - x_0\|^2$ を分類の基準として使っている。一方， $\|x_p - \tilde{x}_p\|^2$ を最小化するように分類する方法がある。これはiterative PCAと呼ばれており，VQ, PCAに比べて誤差が少ない。

提案手法のCPCAは既存の手法にくらべて，より圧縮していない画像に近い品質の結果画像になっている。また，レンダリングスピードもリアルタイムに表示するには十分な速度となっている。

## 6 Character Animation

### 6.1 “Rhythmic-Motion Synthesis Based on Motion-Beat Analysis”

Tae-hoon Kim, Sang Il Park, Sung Yong Shin (Korea Advanced Institute of Science and Technology)

人間のようなキャラクタのリアルタイムアニメーションの従来手法では，ダンスをしたり移動したりするリズムカルな動きを扱うことが非常に困難であった。本論文では，リズムカルな様子を保持しながらラベル付けされていないサンプル動作から新しい動きを合成するための新しい手法を提案する。提案手法は，基本的な動きとそれらの遷移を抽出するためにサンプル動作から動きのテンポを取り出す。動きのテンポデータに基づいて，提案手法ではサンプルの動きを表す動作遷移グラフを構成する。

運動学的拘束条件と共にリズムカルな音楽を与えると，提案手法は希望のリズムカルな動きを合成するために，それぞれの節で基本動作を合わせながら遷移確率にしたがってグラフの節から節へとたどっていく。

フレームでの遷移を行う従来手法とは異なり，提案手法は基本動作間の遷移に基づいている。フレームの遷移では，テンポを考慮していないので動きのリズムを保つことはできない。提案手法では，キャラクタのダンスや移動動作の自動生成を行った。

### 6.2 “Motion Synthesis From Annotations”

Okan Arikan, David A. Forsyth, James F. O'Brien(University of California, Berkeley)

本論文では，動きの制御のしやすさを保ちつつユーザが人間の動きを合成する手法について述べる。ユーザは，歩く，走る，ジャンプするなど，ユーザが自由に選べる語彙で与えられた注釈をタイムラインに付けると，システムは動きデータベースから取り出したフレームを集めてアニメーションを生成する。最終的に，特定の時間に特定の動きをするようになる。また，特定の時間に特定の姿勢をとったり，特定の場所に行ったり，特定の方向を向いたりすることができる。注釈は積極的，消極的あるいは特に気にしないように設定することができる。実験データとして用いた動きデータベースは，7分間のアメリカンフットボールの動きである。このデータベースの注釈として選んだ語彙は，Run, Walk, Wave, Jump, Turn Left, Turn Right, Catch, Reach, Carry, Backwards, Crouch, Stand, と Pick up である。これらの注釈の一部は，例えば，turn left while walking, や catch while jumping

and running などのように，同時に指定することができる．

提案システムでは，効果的に探索結果を得て対話的にアニメーション生成を行うために，様々なスケールにおける動的計画法に基づいた新しい探索手法を用いている．生成結果は，滑らかで自然な動きが生成できることを示している．

注釈用語彙は，アプリケーションに合わせて選ぶことができ，同時に run and jump するなどの合成動作を指定することも可能である．そして，選ばれた語彙で注釈付けられた動きデータ集合が必要になる．そのため，注釈付けのための効果的な方法として，大規模な動きデータ集合に対しても，迅速かつ簡単に注釈付けができる SVM(Support Vector Machine) を繰り返し利用する手法も述べられている．

### 6.3 “Layered Acting For Character Animation”

Mira Dontcheva, Gary Yngve, Zoran Popović(The University of Washington)

本論文では，対話的なスピードでキャラクタアニメーションの作成や編集が行える演出に基づいた (acting-based) アニメーションシステムについて述べる．提案システムは，通常 1 時間以下という少ない訓練で，すぐに表現力豊かな動きを生成するのに適している．リアルタイムモーションキャプチャでユーザの動きを取り，解析と同時に大画面に反応を返す．複雑な動作は，演出を複数の層に分割することによって作成する．また，本論文では，アニメータとキャラクタ間の暗黙の関係から動作編集を行う新しい手法について述べる．アニメータがある種のキャラクタの動きを真似ると，システムはアニメータの動きとキャラクタの動きの間にある関連性を推測する．アニメータがその真似た動作を少し変えることで，システムはその違いをキャラクタの動きに反映させる．

### 6.4 “Efficient Synthesis of Physically Valid Human Motion”

Anthony C. Fang, Nancy S. Pollard(Brown University)

最適化は少ない入力データから新しいアニメーションの生成可能な方法であるが，物理量の評価や区別は非常に時間がかかってしまうため，物理法則に基づいた最適化は複雑なキャラクタアニメーションに対する調整が困難である．従来手法では，最適化や拘束パラメータに関節のトルクを必要とすることがあった．そのため，関節の自由度を  $D$  とするとそれらのパラメータ一次微分を求めるために  $O(D^2)$  の計算量が必要となる．本論文では，目的関数集合と一次微分の計算が線形時間になる拘束条件について述べる．これらの集合は，地面に接地するという拘束条件などのような物理的な妥当性に関する拘束条件も含んでいる．提案アニメーションシステムは，激しい動的な動きの合成に対して特に有用であり，7 から 22 の自由度を持つキャラクタの鉄棒動作や飛び跳ねる動作の例を示している．

## 7 Visualization and Printing

### 7.1 “Reproducing Color Images With Embedded Metallic Patterns”

Roger D. Hersch, Fabien Collaud(Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne(EPFL)), Patrick Emmel(Clariant International)

標準的なインクとメタリックインクを混ぜ合わせることで，動的に見掛けが変化する画像を生成することができる．そのような画像を生成するための色予測モデルを提案する．本論文では，コーティングされた紙上の標準インクの反射スペクトルの予測手法，標準インクとメタリックインクを混合したものの反射スペクトルの予測手法の 2 つの方法を提案している．それらは，古典的な Clapper-Yule モデルに対し，物理的なドットゲインと非鏡面反射角度におけるメタリックインクの低反射はもちろん，標準インクの広がり，メタリックインクの上に標準インクを印刷した際の付きの悪さも考慮に入れるようにしている．提案手法の適用性をオフセット印刷の幾つかの例を用いて示し，ハイエンドなデザインとセキュリティ応用に対し有益であることを示す．

### 7.2 “Improving Mid-Tone Quality of Variable-Coefficient Error Diffusion Using Threshold

Modulation, Bingfeng Zhou, Xifeng Fang(Peking University)

本論文では，可変係数誤差拡散法 (variable-coefficient error-diffusion algorithm) によって生成された目に見える歪みを削減するためのしきい値変調に基づいた方法を提案する．提案手法では，最適な拡散パラメータ集合と対応するしきい値変調強度の探索にコスト関数を用いる．この新しいパラメータを用いることで，オリジナルの可変係数誤差拡散法と比較して，提案手法が目に見えておかしい部分をより効果的に削減することができる．

### 7.3 “Discrete Multiscale Vector Field Decomposition

Yiying Tong(University of Southern California), Santiago Lombeyda, Anil N. Hirani(California Institute of Technology), Mathieu Desbrun(University of Southern California)

本論文では，任意の四面体を用いて離散的な 3 次元ベクトル場の解析を簡単・正確に行う方法について提案する．提案手法では，ベクトル場を divergence-free part, curl-free part および harmonic part に分解することによって，直感的に幾何的な解析を可能とする．また，複雑な流れ等を正確に解析・可視化する際，提案手法を応用して，主要でない部分の特徴を抑え，特徴的な現象を解析・可視化することが可能となる．提案手法は，各種データの可視化並びに流体及び物体の変形シミュレーション等に幅広く利用することが可能である．

提案手法の主な特徴を次に挙げる．

1. 連続的でない離散的な 3 次元ベクトルに拡張

2. 各四面体内ではベクトル場が一定であると仮定する任意の四面体を使用
3. ベクトル場を, divergence-free part, curl-free part 及び harmonic part に分解
4. 各種データの主要な特徴を解析するために, 比較的小さな特徴をノンリニア方式で分離

#### 7.4 “TreeJuxtaposer: Scalable Tree Comparison Using Focus+Context With Guaranteed Visibility

Tamara Munzner(The University of British Columbia), François Guimbretière(University of Maryland), Serdar Tasiran, Li Zhang, Yunhong Zhou(Hewlett Packard Systems Research Center)

現在の可視化技術において, 大きな木構造の構造的な比較手法は, 部分的にしか支援されおらず, 困難な作業となっている. 本論文では, 数十万ノードの大きさの木構造の比較を行うシステム TreeJuxtaposer を提案する. 強調したい領域は, 常に目に見える形で現われるランドマークとして扱い, 可視性を保証するアイデアを提案する. また, 2つの木構造間の構造的な比較を詳細に行うための新しい方法とある木から別な木に最も良く対応付けられるノードを計算するための nearly-linear algorithm を提案する. さらに, ランドマークが常に表示され一定のフレームレートを保証する side-by-side views の動的なリンクに非常に適した直線で囲まれたナビゲーションのための Focus + Content 技術を紹介する.

## 8 Surfaces

### 8.1 “Multi-Level Partition of Unity Implicits”

Yutaka Ohtake, Alexander Belyaev(MPI Informatik), Marc Alexa(Darmstadt University of Technology), Greg Turk(Georgia Institute of Technology), Hans-Peter Seidel(MPI Informatik)

本論文では, 3D モデルの表現方法として, multi-level partition of unity implicits(MPU) を提案する. MPU はモデルを Octree 分割し, 各分割内のモデルを 2 次関数として表現する. 復元時にはそれらに適切な重み付けを乗じて加える. Octree 分割のサイズを調整することで, モデルの複雑さや精度の要求に対応可能である. 著者らは, MPU はこれまでに良く知られている技法の利点を組み合わせることにより, 何百万ものサンプリング点から構成される非常に精細な 3D モデルをも高速かつ少ないメモリ消費で表現することが可能となり, なおかつノイズやデータの欠損にも強いと主張している.

サンプリング点からなる 3D モデルから MPU モデルを求めるアルゴリズムの概要を次に示す.

1. Octree 分割法によって, 各分割が仕様で与えられる近似誤差を満たすよう 3D モデルを分割する.
2. 各分割の中心点を中心とする円領域内のサンプリング点数が規定の個数以上になるよう, その半径を設定する.

3. 円領域内のサンプリング点を近似する 2 次関数を求める. 角や縁などを適切に扱うため, サンプリング点の傾向により異なる関数を用いる.
4. 復元時は, 各分割の中心点からの距離, および円領域の半径を元にスクリーン上の各点における関数の重みを設定し, それを 2 次関数に乗じて重ね合わせてモデル全体の関数を生成し, Bloomenthal’s polygonizer および Hart sphere tracing method によって可視化を行なう.

既存手法として FastRBF 法と比較すると, Dragon モデルのレンダリングにおいてメモリ使用量を 2/3 に, 計算時間に関しても大幅な改善が見られた. また, MPU を用いると関数に基づいたモデル操作も簡単に行なうことができる.

### 8.2 “Progressive Encoding of Complex Isosurfaces”

Haeyoung Lee, Mathieu Desbrun(University of Southern California), Peter Schröder(California Institute of Technology)

特に複雑な等値面のために設計したプログレッシブ符号化手法を提案する. 提案手法は, 全ての標準的なメッシュ符号器よりも良い rate distortion 性能が得られており, 全ての従来の single rate 等値面符号器上でも性能が向上する. 提案手法は, 鮮鋭な特徴を持つ等値面や持たない等値面, 高次のトポロジや複雑な形状をうまく取り扱うことができる. ボリュームデータの内部/外部関数は適応的な octree を用いることでプログレッシブに伝送され, 一方, 局所的なフレームに基づいた符号化は, 表面サンプルの細かいレベルにおける配置のために用いられる. トポロジの局所的なパターンや幾何形状の局所的滑らかさに対しては, コンテキストに基づいた算術符号化が利用され, 非常に変形が少ない状態で平均 6.10bits/vertex を得た. この値の 0.65bits/vertex だけが連続性データに費されており, 従来の最も良い single rate 等値面符号器に対し 24%の性能向上となっている.

### 8.3 “T-Splines and T-NURCCs”

Thomas W. Sederberg(Brigham Young University), Jianmin Zheng(Zhejiang University), Almaz Bakenov(Embassy of the Kyrgyz Republic to the United States and Canada), Ahmad Nasri(American University of Beirut)

本論文では, T-spline と呼ぶ非一様 B-spline 面の一般化について述べる. T-spline は, 制御格子の T-連結を許容し, 制御点列は全ての制御格子を通過する必要がない. 矛盾のない枠組の中で, T-spline は様々な有用な操作が可能である. 局所的に綺麗にしたり, 異なる knot ベクトルを持った幾つかの B-spline 面を一つの隙間のないモデルに融合したりすることができる. 本論文では,  $C^2$  連続な 3 次の T-spline について説明する. T-NURCCs(Non-Uniform Rational Catmull-Clark Surfaces with T-junctions) は, T-splines と Catmull-Clark surfaces の上位集合である. したがって, T-NURCCs のモデリングプログラムは, 特



殊な場合として NURBS や Catmull-Clark モデルを扱うことができる。

## 8.4 “Anisotropic Polygonal Remeshing”

Pierre Alliez, David Cohen-Steiner, Olivier Devillers(INRIA Sophia-Antipolis), Bruno Lévy(ISA - INRIA Lorraine), Mathieu Desbrun(University of Southern California)

これまで、再メッシュ化の手法はいくつか提案されている。しかし、そのほとんどはメッシュの局所的形状を考慮していない。そこで本論文では、メッシュの局所的形状を利用した新しい再メッシュ化手法を提案する。

本手法から生成されたメッシュは、主に異方性領域では四角形から構成され、等方性領域では三角形から構成される。このアプローチにより、等方性や異方性、密度や曲率を適切に選んだメッシュを柔軟に生成することができる。次に再メッシュ化のおおまかな流れを示す。

1. まず最初に、与えられたメッシュの各頂点で、表面の曲がったテンソルフィールドを推定し、2つの主方向フィールド (principal direction fields) を作成する。次にこれらのフィールドを平滑化し、umbilic 点を見つける。
2. オリジナルの図形のサンプリングを行うために、先程作成した2つの主方向フィールドの曲線に沿った曲線のネットワークを描く。ただし、隣り合う曲線の間隔は局所的な主曲線に依存している。等方性の領域 (umbilic 点のまわりで球状や平面の部分) では、明確な方向性が見えないため、点をサンプリングする。
3. 最後に、異方性領域で曲線の交差点から、生成する新しいメッシュの頂点を取り出す。constrained Delaunay triangulation(CDT)を使い、サンプリングした曲線から最終のエッジを導く。この手法による出力は、曲線の自然な直交性により、大部分が四角形でできた異方性ポリゴンメッシュとなる。

## 9 Shadows

### 9.1 “Shadow Matting and Compositing”

Yung-Yu Chuang, Dan B. Goldman, Brian Curless(The University of Washington), David H. Salesin(The University of Washington and Microsoft Research), Richard Szeliski(Microsoft Research)

本論文では、自然画像から影を抽出し、別な物体に抽出した影を付ける手法を提案する。物理法則に基づいた shadow matting と合成方程式を提案し、それらの方程式を用いて任意の平面背景上にかかった影のある入力画像から shadow matte を取り出す。そして、真直な物体によってできる角度の付いた直線的な影を動かすことによって対象シーンの光度特性と幾何特性を得る。これらの影から、カメラや光源のキャリブレーションをせずに影の displacement map を構成することができる。この displacement map を利用して、オリジナルの shadow matte を変形させる。論文では、照明を制御した室内のシーンと自然光下の屋外のシーンの両方に対して提案手法を用いた実験を行っている。

matting では、フィルムやビデオから前景要素  $F$  を抽出する。compositing では、抽出した前景要素を新しい背景画像  $B$  に配置する。matting や compositing は、従来、次の合成方程式 [5] に基づいている。

$$C = \alpha F + (1 - \alpha)B \quad (5)$$

アルゴリズムの概要は次のようになる。ある画素の観測された色  $C$  を次のようにモデル化する。

$$C = S + \beta I, \quad (6)$$

ここで、 $S$  は影の色、 $I$  は主光源の反射寄与度、 $\beta$  は光源に対する可視度である。 $L$  を影がかかっていない画素の色とする。 $I = L - S$  を式 (6) に代入すると次の shadow compositing equation を得る。

$$C = \beta L + (1 - \beta)S. \quad (7)$$

displacement map の生成は次のように行う。あるシーンで直線状の物体を自由に動かした画像から、各画素に影がかかっているかどうかを時間軸上で解析する。そして、あるフレームにおいて影を作る直線を求める。

### 9.2 “Interactive Shadow Generation in Complex Environments”

Naga K. Govindaraju, Brandon Lloyd, Sung-Eui Yoon, Avneesh Sud, Dinesh Manocha(University of North Carolina at Chapel Hill)

本論文では、複雑な環境下での移動光源による影の生成を、対話型で実現するアルゴリズムを提案する。リアルタイムで影を生成する方法は、大別して次の2種類がある。

1. イメージベースの方法:シャドウ・マッピング  
この方法の特徴は、使いやすいことである。欠点は解像度の関係からエリアシングが問題となる。特に大きなモデルをウォークスルーする場合に問題となる。
2. オブジェクトベースの方法:シャドウ・ボリューム  
この方法ではオブジェクトベースで影を計算するため、エリアシングは避けられる。しかし、非常に大きなモデルを対象とした場合には、計算対象が膨大となり計算時間がかかる。

提案手法は、上記2種類の方法を組み合わせたハイブリッド手法であり、LOD(level of detail) を考慮した PVS(potentially visible set:潜在可視集合) による計算手法を採用している。まず、視点と光源の PVS を計算する。そして、シーングラフを用いてオブジェクトを階層的に表現してサブオブジェクトに分解し、その LOD によってオクルージョン・カリングを実施している。これによって、エリアシングの無いシャープな影を生成できる。処理は、NVIDIA G4 を実装した3台の PC で実施し、7 ~ 25fps でリアルタイム表示できるようになっている。

### 9.3 “A Geometry-Based Soft Shadow Volume Algorithm Using Graphics Hardware”

Ulf Assarsson, Tomas Akenine-Möller(Chalmers University of Technology)

従来の soft shadow アルゴリズムの多くは、エイリアシング、速度の遅さ、影の発生源や影を受ける対象が制限されるという問題があった。これらの問題に対処する強力な soft shadow volume アルゴリズムを提案する。提案手法は、ロバストな半影構造、幾何構造に基づいた可視性計算、および、4次元 texture lookup を用いた単純化された計算から成っている。このアルゴリズムは、プログラマブルグラフィックスハードウェアを用いて実現することができ、その結果の映像は本影 1024 枚を合成して作った映像と見分けがつかない。さらに、このアルゴリズムは、任意の物体の影を作ったり、任意の物体に影を落すことができる。また、提案手法は sampling artifacts を完全に回避することができる。このアルゴリズムは純粋にソフトウェアで、そしてピクセルシェーダ付きの GeForce FX emulator を用いて、実現された。我々のソフトウェアによる実装では本論文に記載した映像を 0.5 から 5frame/sec でレンダリングできた。

半影の生成は CG において、基本的で本質的に難しい問題である。影は、CG のリアリティを上げるだけでなく物体の空間的關係を理解するのに役に立つ。一般的に影は soft である、すなわち半影と本影からできている。提案手法の特長を次に挙げる。

1. 幾何構造に基づいた可視性の計算
2. プログラマブルシェーダのためのアルゴリズム
3. ロバストな半影の計算
4. テクスチャ、あるいは、ビデオテクスチャ付けられた光源

本アルゴリズムは、まずはじめに、鏡面および拡散反射成分のレンダリングを行い、次に V-buffer (Visibility buffer) の soft visibility mask を計算し、これで最初のパスでできたイメージを変調し、最後に環境光を加える。V-buffer は  $\text{pixel}(x, y)$  の可視要素  $v$  を格納していて、点  $p(x, y, z)$  から光源が  $x\%$  見えたら  $v = x/100$  である (ここで  $z$  は Z-buffer の値である)。半影は、front, back, right, left の 4 平面で定義される。シルエットエッジ  $e_0, e_1$  で光源に近い方の端点を  $e_1$  としたとき、 $e_0$  を光源に向かって  $e_1$  と同じ距離になるように移動し、これを  $e'_0$  とする。このエッジに対して front および back plane が生成される。同様に left 及び right plane が生成される。可視性の計算は 2pass で行われ、最初は、Crow の shadow volume アルゴリズムで過評価の本影が計算され V-buffer に格納される。次に、半影を計算し過評価された本影を修正する。

## 9.4 “Shadow Silhouette Maps”

Pradeep Sen, Michael Cammarano, Pat Hanrahan (Stanford University)

shadow maps や shadow volumes は、hard shadow の対話的なレンダリング手法として良く使われている方法である。shadow maps は、完全に照明内に入っているか、あるいは完全に影の中に入っている領域では良い結果が得られるが、影の境界付近では artifact が生じてしまう。一方、shadow volumes は、影の境界を正確に生成するが、時間がかかってしまう。本論文では、幾何的なシルエット上の点の位置を保存することによって影の depth map を増やす silhouette maps という方法を提案する。提案手法は、shadow map と shadow volume のハイブリッドな手法である。shadow volume 手法として、まず、シーン中の幾何構

造からシルエットを決定する。そのシルエットを四辺形に突き出す代わりに、シルエットラインを照明空間のテクスチャに書き出す。この silhouette map と呼ぶテクスチャはシルエット上の点の座標を保存している。標準の depth map と提案した silhouette map を用いて、影付けされた領域を近似するための dual-contouring と似た手法に適用した。提案手法は、プログラマブルグラフィックスハードウェア上でリアルタイムで実行可能である。

## 10 Perception and Manipulation

### 10.1 “Evaluating the Visual Fidelity of Physically Based Animations”

Carol O’Sullivan, John Dingliana, Thanh Giang (Trinity College Dublin), Mary K. Kaiser (NASA Ames Research Center)

物理原則によるアニメーションの視覚的忠実度の評価についての実験から評価基準を作成することを行っている。評価の測定基準作成のために実験を行い、実験結果から評価測定基準を作成し、その検証の実験を実施している。実験・検証ともに、物体の衝突における知覚検出を実施している。

次の 3 種類の歪を感知する実験を実施している。

1. 角度の歪
2. モーメントの歪
3. 物体間のギャップの歪

本論文では、剛体シミュレーションによるアニメーションで、物体の衝突に関して、動きの視覚的な信頼性を測定する数式を提案している。しかし、少ない対象物による単純な動作を対象としており、複数の物体による複雑な動きについては、この手法を一般化することは今後の課題としている。

### 10.2 “Perceptual Metrics for Character Animation: Sensitivity to Errors in Ballistic Motion”

Paul S. A. Reitsma, Nancy S. Pollard (Brown University)

モーションキャプチャデータを繋ぎ合わせたり編集して、より豊かで写実的なキャラクタアニメーションを制作する場合、時として不自然な動きとなることがある。例えば、物理法則に反する動きであったり、キャラクタやその環境に対する力が、不合理であったりすることがある。このような問題解決を、リアルタイムで実現することは、現状では困難である。本論文では、ユーザ要求に合致した動きを作り出すために、人間の動きを知覚する際の不自然な動きを予測する方法を開発することを目的としている。

重力の効果を変えることでジャンプの高さが変わるなどの物理法則に反する動きとなるような場合、熟練者には動きの不自然さを知覚できても、未熟者や一般人は気づかないことが多い。このためには、モーションキャプチャデータを合成して新たな動きを作り出す場合、最適で、物理的に正確な動きとなるように、処理方法を評価したり、モーショングラフを作成したり、より良いアニメーションとするために費やされる時間を管理するには、動き中の不自然

な動きを知覚できるメカニズムが重要である。本論文では、人の飛び跳ねる動きを知覚する場合の不自然な動きの認知感度に関する基準を求めるための実験を実施し、知覚測定基準を作成することを提案している。

本論文では次の方法によって、人間のジャンプ運動における不自然な動きの認知感度測定を行っている。モーションキャプチャされたジャンプに対して人為的操作により、重心の移動速度に対して不自然な動きを付加して、ユーザがこの不自然さに気付く程度(感度)を測定する。

実験結果から、知覚感度は付け加えられた不自然な動きのレベル、種類で変化し、不自然さの有意水準は、多くのアプリケーションで許容できることが分かった。この結果は、モデルの複雑度などの多くの要因に依存しているが、実施した実験環境下での人間の跳躍運動中の不自然な動きを評価する知覚測定法を定義できた。

実験は次の2種類、すなわち、変則的な加速と減速の知覚実験と、有効な重力に対する不自然な動きの知覚実験を実施している。ここでは、加速度の実験について紹介する。

#### (1) 加速度の実験

- 被験者:年齢 18 歳から 42 歳までの 5 人の女性と 7 人の男性。
- 不自然な動きのレベル:小, 中, 大
- 不自然な動きの種類:水平方向, 垂直方向
- 不自然な動きの方法:加速, 減速

#### (2) 加速度の実験結果

- 水平方向の不自然な動きの方が、垂直方向の不自然な動きより検知し易い。
- 加速に対して加えられた不自然な動きの方が、減速に対して加えられた不自然な動きよりも検知し易い。

この結果から、距離および時間に対して、増加方向にある不自然な動きの方が、減少方向にある不自然な動きよりも検知し易いことが分かった。

### 10.3 “Sensation Preserving Simplification for Haptic Rendering”

Miguel A. Otaduy, Ming C. Lin(University of North Carolina at Chapel Hill)

触覚をともなうレンダリングにおいて2つの多面体物体間の高速な衝突判断を行う新しい簡単な“感覚を保存した”アルゴリズムについて述べる。多面体モデルが与えられると、衝突判定によって生じる拘束条件を仮定して、“filtered edge collapse”を用いた多解像度階層化モデルを生成する。そして、作成された階層化モデルは、触覚ディスプレイのための高速な接触反応を計算するために用いられる。複雑な物体と物体のインタラクションを行う触覚ディスプレイのための瞬時の反応を必要とする衝突判定に対して、提案アルゴリズムを適用することが可能であった。従来の手法と比較して、接触時の触覚知覚の低下をほとんど招かず、顕著な更新速度の性能向上が得られた。

## 11 Human Bodies

### 11.1 “Reanimating the Dead: Reconstruction of Expressive Faces From Skull Data”

Kolja Kähler, Jörg Haber, Hans-Peter Seidel(MPI Informatik)

本論文では、頭蓋骨のデータから人間の表情豊かな顔をコンピュータで再構築する方法について提案する。実際には人間の頭蓋骨をベースとした頭部の仮想モデルに頭蓋骨と組織の間の関係を表す統計データを用いて、皮膚や筋肉を結合させることで実現している。

提案手法のおおまかな手順は次のようになっている。

1. 頭蓋骨をスキャンする。
2. 頭蓋骨の標識点となる部分を考慮しながらメッシュ化する。
3. 筋肉を加えた皮膚組織を頭蓋骨に当てはめることによってメッシュ化する。
4. 皮膚組織を織り成すことで、笑った表情を作り上げる。

本手法を採用することで、人間の顔のモデルを再構築するまでにかかる時間が、頭蓋骨をスキャンする時間も含めてわずか数時間となり、ボタン一つで、太った顔や痩せた顔のモデルも実現できるようになった。また、顔の形や配置など、所々では高い合致性を得ることができる。しかしながら、鼻のどっぴり具合などの詳細な部分に関しては现阶段のスキャン技術では正確に捕らえることができない。これらのこともふまえながら、より高度な手法を考えることが今後の課題である。

### 11.2 “Building Efficient, Accurate Character Skins From Examples”

Alex Mohr, Michael Gleicher(University of Wisconsin)

筋肉が膨らむような微妙で細かい皮膚の変形が分かることが良いキャラクターアニメーションには必要である。そのような効果は、従来、とても汎用で強力なツールを提供している商用アニメーションパッケージで作られていた。これらのシステムはアーティストにとって便利で柔軟であるが、汎用性があるために、キャラクターの計算速度が遅かったり、相当なメモリ量を必要とすることがあるため、対話的なシステムでの利用は困難である。その代わりに、対話的システムは高速でメモリ効率の良い特定のキャラクター変形モデルではあるが、アーティストにとっては難しかったり、変形による artifact が生じる。そこで、本論文では、対話的システムでキャラクターを生成するためのハイエンドなシステムでキャラクターアーティストがツールの全ての要素を使うことができるような自動的な枠組について示す。提案手法は、アニメーションシステムで任意に用意されたキャラクターから始める。静的なメッシュとして変形幾何情報と一緒にスケルトンの構成を含んだ例の集合が出力される。これらの例を用いて、システムは高速でメモリ使用量をおさえてオリジナルのデータを最適に近似する変形モデルのパラメータを適合させる。

### 11.3 “Free-Viewpoint Video of Human Actors”

Joel Carranza, Christian Theobalt, Marcus A. Magnor, Hans-Peter Seidel(MPI Informatik)

任意の視点で動的な実 3 次元空間の動きを観測するために、自由視点ビデオでは、ユーザは 3 次元空間で対話的に視点を選ぶことができる。人間の身体とその動きは多くの視覚メディアにおいて中心的な役割を果たし、その身体構造はロバストな動き推定と効果的な可視化のために利用できる。本論文では、動きパラメータを推定し、任意の視点からのアクターの様子を対話的に再描画するために、アクターのパフォーマンスの多視点合成ビデオを用いる手法を提案する。アクターのシルエットを背景セグメンテーションによって合成ビデオフレームから抽出し、3 次元人間身体モデルの姿勢列を決定するために用いる。レンダリングでは、多視点テクスチャリングを用いることによって、身体表面の時間に依存した変化を詳細に再生することができる。モーションキャプチャを利用したシステムはオフラインで実行し、ロバストな動きパラメータ推定が可能で、様々な動きに対応できる。レンダリングは普通のグラフィックスハードウェアでリアルタイムで実行でき、アクターの自然な印象が得られる。

### 11.4 “Continuous Capture of Skin Deformation”

Peter Sand(Massachusetts Institute of Technology), Leonard McMillan(Massachusetts Institute of Technology and University of North Carolina at Chapel Hill), Jovan Popović(Massachusetts Institute of Technology)

一方向から人間を撮影しただけで、人間の 3 次元オブジェクトを生成することは非常に困難である。本論文では、ある特定の一方向からでも人間の動きを撮影することによって完全に近い 3 次元オブジェクトを生成できる手法について述べる。そして最終的には一度特定の構造をデータとして取得すると、モーションキャプチャで新しい動きを取らなくても、違う姿勢や動きを作ることができる。

オブジェクトの各関節間のスケルトンを一つの軸とし、その軸を囲むように針を等角度間隔で配置する。また、関節において針が重なることを許す。この構造から 3 次元ポリゴンを生成するために、この針の包絡線(面)を求める。したがって、針の密度が多い方がより滑らかに肌が繋がる。このような構造において正しく滑らかな 3 次元オブジェクトを得るためには、それぞれの針の長さが適切でなければならない。最初、針の長さを適当な値に決めておく。軸はモーションキャプチャに連動させて、ビデオカメラから得られた人間の輪郭に合うように針の長さを調節する。

### 11.5 “The Space of Human Body Shapes: Reconstruction and Parameterization From Range Scans”

Brett Allen, Brian Curless, Zoran Popović(The University of Washington)

本論文では、スキャンされた人体モデルにおいて、正しくデータとして取り込むことができなかった部分をテンプレートモデルを使って補正する手法について提案する。

スキャンされたモデル表面にテンプレートモデルを合わせるために、テンプレート上のそれぞれの点をアフィン変換によって変形する。この変形後のテンプレートモデルとスキャンされたモデルとの一致の質を、3 つの誤差関数によって評価する。

1. データ誤差: スキャンモデル表面とテンプレートモデル表面との距離。
2. 滑らかさ誤差: テンプレートモデルを変形するときの写像の滑らかさ。
3. マーカ誤差: スキャンモデルにおけるマーカと、それに対応したテンプレートモデルでのマーカとの距離。マーカとは、人体をスキャンするとき用いた体の中の特徴点のこと。

欠落データの補間は次のように行う。

- a. テンプレートモデル上の頂点がスキャンモデルのデータが欠落している部分に対応する場合は、そのデータ誤差を考慮しない。
- b. データ欠落部分に対応するテンプレートモデルは滑らかさ誤差によってのみ影響を受けるため、テンプレート表面の一部が一様に変形することで滑らかに埋められる。

実験に用いた 250 モデル中の 5%未満の例については唇が誤って調整されたが、後はすべてを一致させることができた。この方法は、テンプレートのモデルが補正したいデータモデルに似ているという仮定で行われている。もし、これらのモデルがかなり異なっていると、局所的に違った変形をしなくてはならないが、これは滑らかさ誤差に反してしまうので現状ではうまくできない。

## 12 Light Fields and Visibility

### 12.1 “Ray Space Factorization for From-Region Visibility”

Tommer Leyvand, Olga Sorkine, Daniel Cohen-Or(Tel Aviv University)

領域からの可視判定は本質的に 4 次元であるので、点からの可視判定よりも難しいと考えられている。本論文では、4 次元の可視問題を水平および垂直成分に分解する可視判定法について述べる。2 つの成分の可視性はそれぞれ異なる方法で求める。水平成分は光線空間のパラメータ化に基づいており、垂直成分の可視性は陰を融合することによって求める。提案手法は、水平および垂直方向の操作が最新のグラフィックスハードウェアで共に効果的に実現できるように設計されている。実験結果から、カリングの時間と計算される潜在的に可視な集合の大きさは、ある領域から可視である部分を表す視セルの大きさに依存する。適度な視セルに対して、大きな都市シーンのオクルージョンカリングは 1 秒以下、潜在的に可視な集合の大きさは正確な可視集合の大きさの約 2 倍にしかならなかった。

## 12.2 “Structured Importance Sampling of Environment Maps”

Sameer Agarwal(University of California, San Diego), Ravi Ramamoorthi(Columbia University), Serge Belongie, Henrik Wann Jensen(University of California, San Diego)

本論文ではイメージベースドライティングにおける環境マップの Structured importance sampling と呼ぶ新たなサンプリング手法を提案している。既存のモンテカルロ法に基づいた方法である Stratified sampling(可視な範囲からランダムにサンプリング), Importance sampling(各ピクセルの輝度に比例した確率分布に基づいてサンプリング), Stratified importance sampling(二つの手法を合わせたもの)と比べて高速で、かつ少ないサンプル数で高品質のレンダリングを行なうことができる。

まず、環境マップを可視性と輝度を考慮した尺度によって階層化し、さらに各々の階層において、明るい層ほど多くのサンプル点を含むように決めた適切なサンプル数で、ほぼ均等な大きさのセルになるようにマップを分割する。これによって、次のような利点が得られる。

1. 事前にセル内の各ピクセルの持つ輝度を合計しておくことができ、また、セルの中央のサンプル点にその輝度を持つ directional light があるものとして考えることで、イメージベースドライティングに対応していないレンダラでも同様のことができるようになり、同時にサンプリングノイズの軽減とレンダリングの高速化がはかれる。
2. セルを重要度に基づいて事前に整列しておくことで、ピクセル当たりのサンプル数を更に減らすことができる。

## 12.3 “Relighting With 4D Incident Light Fields”

Vincent Masselus, Pieter Peers, Philip Dutré, Yves D. Willems(Katholieke Universiteit Leuven)

環境の照明を表している 4 次元 incident light field によって照らされている実物体の再照明を行う手法について述べる。light field の角度と空間が多様に変化することを利用して、高い現実感をともなった物体への再照明を行うことができる。

移動光源としてプロジェクタを取り付けた構台を用いて、様々な位置、角度から照明を当てた物体の写真を記録する。得られた基本画像は物体の全反射率場の部分集合を作成するために用いる。この反射場を用いて、任意の incident light field で再照明され、固定カメラから観測される物体の画像を生成する。また、データの削減とデータ取得時間の短縮のために、効果的なデータ取得方法を提案している。

## 12.4 “Accurate Light Source Acquisition and Rendering”

Michael Goesele(MPI Informatik), Xavier Graneir, Wolfgang Heidrich(The University of British Columbia), Hans-Peter Seidel(MPI Informatik)

本論文では、光学的なフィルタを用いて光源データを正確に取得する方法を 2 種類示す。また、取得した光源データを用いて、大域照明レンダリングへの適用例を示す。光源データ取得は次のように行う。

1. 光線が、サンプリング平面  $S$  上の基底関数に基づく半透明のフィルタを通過
2. この通過光線の計測平面  $M$  上での放射照度を計測
3. この計測結果から、フィルタを通過した光源の放射輝度を計算

計測方法として次の 2 種類を行った。

1. Setup A
  - デジタルカメラの光学系をフィルタに交換 ( $S$ )
  - 計測面  $M$  に CCD カメラ
  - コンパクトで操作が容易
  - フィルタサイズ、照明の入射角が制限される
2. Setup B
  - 計測面  $M$  に Diffuse Reflector
  - 広域の計測が可能
  - キャリブレーションが難しい

## 13 Points

### 13.1 “Combining Edges and Points for Interactive High-Quality Rendering”

Kavita Bala, Bruce J. Walter, Donald P. Greenberg(Cornell University)

本論文では、大域照明のような高精細なシェーディングで複雑なシーンをレンダリングし表示する対話的な方法について述べる。提案手法は、対話的に高品質な画像を生成するためにまばらにサンプリングされた陰(点)と解析的に計算された不連続性(エッジ)を結合する。edge-and-point 画像は、エッジと点を合わせたもので、不連続性を考慮しながら、近くのポイントサンプルから高速で、テーブル駆動のピクセルシェーディング補間が可能な新しいコンパクトな表現である。edge-and-point レンダラは、シェーディングサンプルを集めるために任意のシェーダが利用可能な、拡張可能なレンダラである。シルエットや陰のエッジのようなシェーディングの不連続な部分是对話的な速度で見つけることができる。作成したソフトウェアは、大域照明などの高品質な照明効果や幾何的に複雑な物体を含むシーンにおいて対話的なナビゲーションや物体操作をサポートしている。対話的レンダリングでは、デスクトップ PC で高品質な画像を 8~14fps でレンダリングしている。

### 13.2 “Shape Modeling With Point-Sampled Geometry”

Mark Pauly, Richard Keiser(ETH Zürich), Leif P. Kobbelt(RWTH Aachen), Markus Gross(ETH Zürich)

本論文では、3 次元オブジェクト表面(曲面)上から取られた標本点集合に基づく新しい形状モデリングの手法を提

案する．提案手法では，従来の標本点集合による曲面表現に，これらで近似される曲面の陰関数表現を組み合わせたハイブリッドな曲面の表現方法を実現している点に新規性がある．

このハイブリッドな表現方法により，CSG (Constructive Solid Geometry) のような 3 次元オブジェクトの合成が標本点集合同士のブール演算によって容易に求められるだけでなく，オブジェクト (またはその一部) を曲げる，延ばす，ねじるといった滑らかかつグローバルな変形が実現可能である．さらに，オブジェクトの一部を延ばして自分自身に繋げるなど，トポロジーを変えてしまうような処理も同様に実現可能である．

本手法は，三角メッシュで表現されたオブジェクトの変形に比べて実装が容易であり，数値的にも安定したアルゴリズムが得られる．100 万サンプル程度のモデルであれば，通常のデスクトップ PC でインタラクティブなスピードでの処理が可能である．

本モデルではある曲面上の標本点の集合

$$P = \{p_i = (x_i, y_i, z_i) | 1 \leq i \leq n\} \quad (8)$$

によってその曲面を近似する．ここで，各標本点は位置座標以外に通常カラー等の属性を有している．提案手法はこの標本点による曲面表現を拡張し，標本点集合から推定した連続な MLS 曲面 (Moving Least Squares Surface) をモデルに導入する．MLS 曲面  $S$  は，点  $r \in R^3$  から MLS 曲面上への射影作用素  $\Psi(P, r)$  による不動点として次のように陰に定義される:

$$S = \{x \in R^3 | \Psi(P, x) = x\} \quad (9)$$

この MLS 曲面の推定には MLS カーネル関数が使用されるが，ここでどのような関数を選択するかによって，平滑化の度合いなど得られる MLS 曲面の特徴を変えることが可能である．

標本点集合で表現されたオブジェクトに対しては，CSG と同等の図形を容易に表現することができる．本論文では，一方のオブジェクトの標本点が他方のオブジェクトの内部か外部かを判定し，その結果から簡単なブール演算を行うことにより，2 つのオブジェクトの和集合や差集合を生成している．この際，2 つのオブジェクトが交差して得られる曲線上に新たな標本点を生成し，オブジェクト同士の交差曲線を正確に表現する手法についても検討がなされている．

ブール演算に加え，標本点ベースのオブジェクト変形手法についても提案する．オブジェクト曲面上で変形を行う領域を決め，それ以外の領域を 0 領域と呼ぶ．また，変形を行う領域内部に制御ハンドルとなる領域 (1 領域と呼ぶ) を定義し，これを平行移動および回転によって移動させる．オブジェクトの変形は 0 領域と 1 領域を blending 関数によって滑らかに繋げることによって実現される．

オブジェクトの変形にあたっては，変形した領域が自分自身と交わらないかどうかを常に検出し，自身に交差した変形領域はブール演算により元のオブジェクトと合成する．これにより，コーヒークップの取っ手のようなオブジェクトが生成可能となる．また，大きく変形した領域では標本点の密度が元に比べて低くなり，細部の表現が困難となることから，変形の度合いに応じて適宜標本点を追加し，カラー情報などもあわせて補間する方法などについても述べている．

### 13.3 “Interactive Boolean Operations on Surfel-Bounded Solids”

Bart Adams, Philip Dutré (Katholieke Universiteit Leuven)

本論文では，surfel (surface element) で覆われた自由形状ソリッドに対する対話的なブール演算を行うアルゴリズムを提案する．surfel が，もう一方の surfel に囲まれたソリッドの境界の内側にあるかどうかを調べる高速な内外判定を導入する．これによって複雑なソリッドの加算，減算，交わりを対話的速度でできるようになる．このアルゴリズムは，演算による新しい幾何構造の構築，および，表示のどちらも高速にできる．ソリッドの合成において生じる分解能の問題を解決するために，再サンプリング演算を提案する．この演算は他のソリッドの表面と交わっている surfel を再サンプリングすることによって，シャープなエッジを表現できる．このアルゴリズムは自由形状ソリッドを対話的に編集する理想的なツールであると筆者らは述べている．

CSG は長年 CG における有用なツールであった．論理演算も自由形状ソリッドを編集する汎用的な道具であって，加算，減算や交わりによってより複雑なモデルを作ることができる．本論文では，論理演算を surfel で囲まれた自由形状ソリッドを編集する直感的に対話的な道具として提案する．Surfel というのは，方向を持った 3 次元空間内の点と考えることができ，それが表している表面の局所的な小領域と法線を表している．従って，ソリッド A とソリッド B の論理演算を行う時，ソリッドの上の surfel の大部分は相手のソリッドの完全に内側か外側であって，少数の surfel だけが相手方のソリッドの表面と交わる．我々のアルゴリズムは次の 2 ステップからできている．

1. 両方のソリッドの surfel を相手方のソリッドの内側か外側かまたは表面と交わりかを分類する．
2. 交わっている surfel の再サンプリングを行う．

本論文で扱うオブジェクトは，その表面が surfel で表現されたソリッドである．各 surfel  $s$  は，位置  $x_s$  と影響半径  $r_s$  と法線  $n_s$  を持つ．すなわち， $n_s$  に垂直な，中心  $x_s$  半径  $r_s$  の円である．

二つのソリッド A と B から新しい surfel に囲まれたソリッドを作るとき，A, B どちらの surfel が新しいソリッドに含まれるかを，高速に決定する必要がある．論理演算によって，A と B の異なった部分が新しいソリッドの境界になる．例えば， $A-B$  においては，B の外側の A の部分と A の内側の B の反対の表面である．

各ソリッドに対して，surfel を含みかつ所定の深さに達していなければ，再帰的に分割して Octree を生成する．空のセルは内側または外側のどちらかに分類される．葉のセルは，境界セルか内側または外側の空のセルである．空のセルを分類するに当たって，次の 3 つの場合がある．

1. 空のセルが一つだけ空では無い隣接セルを持つ
2. 空のセルが二つ以上空では無い隣接セルを持つ
3. 空のセルが空では無い隣接セルを持たない

内外判定は，1) 空では無い隣接セルと同じ，2) 空では無い隣接セルの一つと同じ，3) 隣接セルをまず判定しそれと同じ，の 3 種類に判定する．

境界セルは，二つの平行な平面で，内部，外部，境界の三つに分割される．

ソリッド A, B に対して octree を使って根から再帰的に内外判定を行い，境界セルに対しては二つの境界平面につ

いてテストを行う。もし，surfel  $s$  が二つの境界平面の間にある場合は，相手方のソリッドで最も近い surfel  $t$  との交差を調べ，交差している時は surfel  $s$  は相手方のソリッドと交差していると判定する。

### 13.4 “Sequential Point Trees”

Carsten Dachsbacher, Christian Vogelgsang, Marc Stamminger(University of Erlangen)

近年，GPU(Graphics Processing Unit)の開発が進み，CPU(Central Processing Unit)の負担を軽減してより迅速な処理が実現できるようになってきた。特に，ゲーム等に多く取り入れられているリアルタイムレンダリングをより高速化するために様々な方式が提案されてきた。本論文は，その一つである LOD(Level of Detail)を GPU 上で単純な頂点処理で，ほぼ完全に実行できるアルゴリズムを提案している。

提案手法では，GPUでのポイントレンダリングをベースに，点群をレンダリングする。SPT(Sequential Point Trees)は，階層的なポイントベースにしているが，CPUが他のタスクを実行中に，GPUでの連続処理が代替することができる。ここでは，カメラ(視点)から見えない面(背面)を除去する等を最適化する方法を提示している。

複雑な形状のレンダリングに対して，ポイントベースでレンダリングは大変有効な手段であった。しかし，そこで使われるトライアングルベースドスキャンラインレンダリングは処理時間が掛かるものであった。LODは幾何的に見えない部分を取り除くには良い方法である。その他様々な改善例が上げられているが，どれも CPU に大きな負荷のかかるものであった。そこで，高画質の画像を得るために GPU でのポイントレンダリングが検討されてきた。本論文では，この GPU でのポイントレンダリングに焦点を合せている。GPU の性能を最大限活用して，CPU はレンダリングとは別の目的に使うことを目標にしている。これは，ゲームなどのようなインタラクティブなものに重要である。提案手法は，最近の Q-Splat(群点による描画方法のひとつで，大量の群点を高速処理することができる手法)や POP(点とポリゴンとの両方を階層構造レンダリングする手法)をベースにしているが，階層的なレンダリングは本連続処理に置き換えている。

SPT で，LOD を非常に単純な頂点プログラムを使用して，GPU 上でほぼ完全に処理ができた。任意のオブジェクトのポイントベースの LOD のレンダリングができた。提案手法では，既存の GPU 上で 1 秒に 5,000 万ポイントの処理を達成した。これは低い CPU 負荷で実現された。また，ポイントとポリゴンの複合レンダリングも容易に統合できた。同一の GPU で，Q-Splat は 660 万ポイントであった。

## 14 Modeling and Simplification

### 14.1 “Twister: A Space-Warp Operator for the Two-Handed Editing of 3D Shapes”

Ignacio Llamas, Byungmoon Kim, Joshua Gargus, Jarek Rossignac, Chris D. Shaw(Georgia Institute of Technology)

Twister は，デザイナーが 3D オブジェクトを直感的に創造し変形させることを可能にするツールである。デザイナーは両手に持った 6 自由度の磁気トラックをあたかも自分の手のように操り，画面上の 3D オブジェクトの一部を掴んで曲げる，引っ張る，捻るなど自由に変形させることが可能である。また，結果はリアルタイムで画面にフィードバックされるため，デザイナーにとって非常に効率の良いツールである。Twister の特徴は，次の 4 点である。

1. 掴む・引っ張る動作をベースとし，両手による操作を可能とした。
2. 両手の位置と回転の計 12 個のパラメータのみを変形に使用。
3. 空間を『捻る』効果と，効果範囲の減衰，および重み付けによる両手操作を実現する変換関数の提案。
4. 結果のリアルタイムフィードバックを実現。

本論文では，Twister で用いた空間の変形の実現手法について述べている。

任意の点  $P$  を捻ることによる点の移動は，捻りの軸ベクトル  $D$  および  $D$  が通る点  $A$ ，軸を中心とした捻りの角度  $a$  と軸に沿った移動距離  $d$  によって完全に求めることが可能である [6]。物体を掴んだ点を始点  $O$  とし，物体を離れた点を終点  $O'$  とする。 $O$  および  $O'$  におけるトラックの向きにより定まる直交ベクトルを  $(U, V, W)$  および  $(U', V', W')$  とすると， $D, a, d$  は次式で求められる。

$$D := UU' \times VV' + VV' \times WW' + WW' \times UU' \quad (10)$$

$$D := \frac{D}{|D|} \quad (11)$$

$$a := 2 \sin^{-1} \left( \frac{|UU'|}{2|D \times U|} \right) \quad (12)$$

$$d := D \cdot OO' \quad (13)$$

また，点  $O$  を通り，法線ベクトル  $D$  を持つ平面状に点  $O'$  を投影した点  $O''$  及び， $OO''$  の中点  $M$  としたとき，点  $A$  は次式で求められる。

$$A := M + \frac{D \cdot OO'}{2} \tan \left( \frac{a}{2} \right) \quad (14)$$

変形の影響は点  $O$  から半径  $r$  の球の内部に限定される。球内の任意の空間上の点  $P$  に対して，変形に対する重み  $t(P)$  は次式で定義する。

$$t(P) := \cos^2 \left( \frac{|OP|}{r} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \quad (15)$$

重み  $t$  を考慮した時の点  $P$  の移動距離は  $t_d$ ，ねじりの角度は  $t_a$  となる。

両手を同時に用いる場合，一方の手の影響範囲内に他方の手の位置が含まれると問題が発生するため，他方の手の位置で  $t$  の値が 0 となるよう影響範囲である球の一部をスケールリングし，重み  $t$  の値を変化させる。その後，各々の手の操作による変形を計算し，それらを足し合わせることで両手操作による変形結果を得る。

Twister システムを C++ および OpenGL を用いて実現した。Dual Pentium3 866MHz, 256MB RAM, nVIDIA Quadro4 900 XGL のシステムで，3 ボタンの Polhemus Fastrak 磁気トラックを用いた場合，30,000 頂点相当で平均 20fps のリアルタイムの表示が可能であった。また，このシステムでは，影響範囲  $r$  をトラックのボタン操作と移動のみで簡単に変更できるインターフェースとした。

## 14.2 “Instant Architecture”

Peter Wonka(Georgia Institute of Technology), Michael Wimmer(Vienna University of Technology), François X. Sillion(ARTIS/INRIA Rhône-Alpes), William Ribarsky(Georgia Institute of Technology)

本論文では、建築物の自動モデリングを行う新しい手法を提案する。建物のデザインは split grammars という形の概念を扱う新しいタイプのパラメータセット文法によって行われる。また、さまざまな種類のスタイルやデザインを含むアイデアを取り入れた建物を設計するために必要な柔軟性を、attribute matching system と separate control grammar によって提供する。この文法の適応性によって、建物のデザインは利用可能なデータの量に応じて一般的なものから、特定の目標に非常に近いものまでが得られる。

従来研究との基本的な違いは、文法規則の大規模なデータベースを用意し、それぞれのオブジェクトをモデリングするために個々の文法を作成するのではなく、同一のルールデータベースに基づくさまざまなデザインのモデルを作成した点である。

本システムの中心部分は、空間的な属性設計文法である split grammar である。この文法は単純な属性を持つ形から構成される建物の 3D レイアウトの作成に用いられる。まず基本的な形状から始まり、その建物の正面、さらに分割して窓の敷居、軒といった個々のデザインを生成する。この属性は後処理でそれぞれの形状のジオメトリとマテリアルを定義するのに用いられる。

control grammar は split grammar によって作成された形状に、属性を割り当てるのに用いられる。生成の手順は次のようになる。

1. split grammar によってルールデータベースから現在の形状に一致するすべてのルールを検索する。
2. attribute matching system が現在の形状の属性と候補となるルールに基づくルールを選択する。
3. 属性を現在の形状から、選択されたルールによって生成されたすべての形状へコピーする。
4. control grammar によってデザインを空間的に割り振る。(たとえば、建物の 1 階は別の属性を割り当てるなど)
5. split grammar が現在のルールに従って再帰的に呼び出される。

## 14.3 “Simplifying Complex Environments Using Incremental Textured Depth Meshes”

Andrew Wilson, Dinesh Manocha(University of North Carolina at Chapel Hill)

Image-based impostors は、大規模で複雑な環境をレンダリングする際に頻繁に使用されている手法である。例えば、建築モデルをインタラクティブに表示する場合に、視点から離れているシーンを表示に用いることによって計算コストなどを抑えている。本論文では、image-based impostors の中の TDM(Texture Depth Mesh) を改善した ITDM(Incremental Textured Depth Mesh) について提案する。

従来手法である TDM を改善した新しい手法は、次の 3 つの特長を持つ。

1. 全景の見える範囲のサンプル点を生成する。
2. TDM で問題となっていた skins などの不自然さを発見する。
3. 異なる範囲のサンプル点の冗長性を排除する。

提案手法を、約 1,250 万ポリゴンからなる複雑な発電所のウォークスルーに対して適用し、TDM と LOD とを表示結果のクオリティ、レンダリング速度の点で比較した。その結果、LOD とほぼ同程度のクオリティを得られていることが分かる。また、TDM で生じている skins の問題点は見られない。また、レンダリング速度は 20-40fps 程度となっている。

## 14.4 “Billboard Clouds for Extreme Model Simplification”

Xavier Décoret, Frédo Durand(Massachusetts Institute of Technology), François X. Sillion(ARTIS/INRIA Rhône-Alpes), Julie Dorsey(Yale University)

本論文では、billboard clouds というリアルタイムレンダリングの効果的な単純化手法を提案する。これは平面ポリゴンの集合で構成されているモデルをテクスチャマップと透明度マップを用いて表現する新しい手法である。これは従来の distance geometry 法を使って表面を滑らかにする方法とは異なり、効果的に平面間のずれを埋め、任意のモデルの単純化を行うことができる手法である。本論文で紹介している billboard clouds は、大きさ、向き、テクスチャの解像度には依存せず、最大の利点はトポロジカルな情報を一切必要としない点である。

準備段階として平面空間に対するモデルの密度を見積もる。密度は validity, coverage, penalty の 3 つの値から求める。validity は平面が表面を単純化したものとして適切かどうかを示し、coverage は validity によって適切であるとされた平面の集合を示す。penalty は不要な面を削除するために使われる。密度はこの coverage から penalty を引いたものを使う。次にそれを使って入力モデルに近似する面の集合を選択する最適化アルゴリズムを適用する。まず最高密度でモデルを作り上げ、それを崩壊するまで削っていき、全ての平面が崩壊したところでその面に一致するテクスチャを計算する。

本手法におけるレンダリングのスピードは、例えば 4,300 個のポリゴンでできている恐竜を 51 秒で描くことができる。

## 15 Fluids and Smoke

### 15.1 “Smoke Simulation for Large-Scale Phenomena”

Nick Rasmussen(Industrial Light + Magic), Duc Quang Nguyen(Stanford University and Industrial Light + Magic), Willi Geiger(Industrial Light + Magic), Ronald P. Fedkiw(Stanford University and Industrial Light + Magic)

本論文では、原爆の爆発のような非常に詳細で大規模な対象のシミュレーションのための効果的な方法について述べる。流体力学で生成された速度場におけるパーティクル



ルの動きをシミュレーションすることでこのような現象をとらえる。提案手法の特長は、メモリをあまり使用せずに対話的速度で非常に詳細な 3 次元の激しい速度場を生成することである。物理学に基づいた 2 次元高精細流れ場を周期的に空間に張り付けられる適度な大きさの 3 次元 Kolmogorov 速度場と組み合わせることが提案手法の基本的なアイデアである。

## 15.2 “Animating Suspended Particle Explosions”

Bryan E. Feldman, James F. O'Brien, Okan Arikan(University of California, Berkeley)

本論文では、上昇する爆風を構成する粒子の動きをモデル化する方法について述べる。提案手法では、数的に面倒なモデル化や、大部分は目に見えない爆風をモデル化するのではなく、空気および熱いガスの運動を説明するために比較的安定した圧縮不可能な流体モデルを使用する。fluid's divergence field は、爆発およびガスの燃焼結果の生成、膨張を表すために直接操作される。パーティクルは流体の動きに沿って運ばれ、このパーティクルの動きから微粒子状の燃料やすすの運動が求められる。燃焼は、粒子および fluid's divergence field を用いて、簡単で効率的なプロセスを使用してモデル化される。さらに提案手法は、可燃性の液体をスプレーしたものを近似するのに十分な柔軟性を持っている。このモデルを採用することで、計算時間が数秒ですむようになる。

空気および燃焼物を囲んでいる燃える粒子の運動から、上昇していく爆炎の外観が求められるので、これらのコンポーネントと、これらの相互作用の各々をモデル化する。具体的には、流体モデル、微粒子モデル、それらに作用する爆発、ふたつのモデルの相互作用、これをコンポーネントとしてモデル化する。ユーザは、初期条件を設定することで爆発のタイプを指定することができる。シミュレーション結果が実際の爆発から得られた観察結果と一致するように設計されている。

シミュレーションは Matlab を用いて行い、C 言語でレンダリングを行った。爆風の一連の振る舞いを示すいくつかの例、例えば炎を噴射するノズルや、壁際での爆発、閉所での爆発、同時期に発生する複数の爆風などのシミュレーション結果を示した。提案モデルでは、数学的に不安定な爆風をモデル化することを回避するので、シミュレーションされたフレームに対して必要な計算時間は、わずか数秒である。

## 15.3 “Keyframe Control of Smoke Simulations”

Adrien Treuille, Antoine McNamara, Zoran Popović(The University of Washington), Jos Stam(Alias—Wavefront)

従来、自然な煙のアニメーションの生成手法は存在するが、煙の状態をユーザが自由に変化させることはできなかった。そこで、本論文では、ユーザの定義したキーフレームに変形する煙のアニメーションを生成する手法を提案する。

煙を変化させるパラメータを全てベクトル  $u$  で表す。この  $u$  は、例えば風の強さ、発生位置、方向などである。ある  $u$  の元で作成したアニメーションの悪さを評価関数  $\varphi(u)$

で表す。この評価関数  $\varphi(u)$  を最小にするように  $u$  を求めて、その  $u$  の元でアニメーションを作成することにする。アニメーションの良さは以下の 2 点で測る。

1. できるだけキーフレームに適合するアニメーションであること
2. できるだけ煙に加える力を小さくすること

この最小化問題は次のようにして解いている。まず、 $\frac{d\varphi}{du}(u)$  を計算する。この計算結果を準ニュートン法に適合して  $u$  を計算している。

この手法は単純な短いアニメーションに対しては有効だが、複雑で長いアニメーションではあまり良い結果は得られない。これは、アニメーションが長くなればなるほど、たくさんのキーフレームが必要になり、コントロールのパラメータ次元が増えれば増えるほど、計算に膨大な時間がかかってしまうことに起因する。この問題を解消するために、Layered Multiple Shooting という方法を使っている。Layered Multiple Shooting とは、1 つの大きな問題をいくつかの小さな問題に分割し、その小さな問題に対してそれぞれ最小化問題を解くことによって、大きな問題の解を得る手法である。

実際には、大きな問題を A,B,C,D という小さな問題に分割する。この A,B,C,D に対して最小化問題を解く。次にその計算結果を E,F,G と分割した小問題に利用して、再び E,F,G に対して最小化問題を解く。ここで得られた計算結果を利用して、再び A,B,C,D の最小化問題を解く。これを何度か繰り返すことにより、大きな最小化問題を解いている。

## 15.4 “Flows on Surfaces of Arbitrary Topology”

Jos Stam(Alias—Wavefront)

本論文では、任意トポロジーの滑らかな曲面上で流体フローのシミュレーションを実現する手法を提案する。

近年では、優れたアルゴリズムと高速なハードウェアの出現により、流体フローのシミュレーションをリアルタイムで行うことが可能となったが、多くの場合、流体が 2 次元もしくは 3 次元の矩形領域の領域に閉じ込められているという仮定の下で実現される。曲面上のフローとしては、地球上の大気のシミュレーションとして、物理の分野では球面上のフローに関する研究が盛んに行われているが、これを任意トポロジーの曲面上に拡張した例はほとんど見られない。この点で本研究には新規性があると考えられる。

技術的には、従来の平坦な 2 次元領域における流体フローの解法を Catmul-Clark 曲面上の一般座標系と結びつけることにより、任意曲面上の流体解析を実現したものと考えられる。

著者の実装した任意トポロジー曲面上の流体フローソルバは、流体の密度や粒子にかかる力などをインタラクティブに指定でき、(通常の解像度の画像であれば) その影響をリアルタイムのシミュレーションにより確認できる。

たいへん美しい模様が任意形状の複雑な曲面上に描けるので、CG の分野においては実用的なアプリケーションとして使用できると考えられる。

本論文では、曲面の表現方法として Catmul-Clark 再分割曲面を使用している。Catmul-Clark 曲面は任意トポロジーのメッシュに対する piecewise bi-cubic B-spline 曲面を一般化したもので、ベースとなるメッシュを適当に再分

割ることによって得られる。著者の流体フローのアルゴリズムでは、曲面上の異なる2点において接ベクトルの比較を行う必要があるが、Catmul-Clark 曲面ではグローバルなアトラス(座標系)を導入できることから、この問題をクリアすることができる

著者により提案された安定流体ソルバのアルゴリズムは、次式で表される非圧縮性の Navier-Stokes 方程式を解くことによって得られる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = P\{-(u \cdot \nabla)u + \nu \nabla^2 u + f\} \quad (16)$$

ここで、 $u$  は流体の速度、 $\nu$  は粘性、 $f$  は外力を表す。また、 $P$  は、ベクトル場を divergence free 成分に射影する演算子である。

今回の提案は、これを曲がった一般化座標に拡張するため、曲面上の各点にリーマン計量を導入し、曲面の歪みを考慮した形に上記の PDE(Partial Differential Equation) を修正したものと考えることができる。

### 15.5 “Real-Time Rendering of Aerodynamic Sound Using Sound Textures Based on Computational Fluid Dynamics”

Yoshinori Dobashi, Tsuyoshi Yamamoto(Hokkaido University), Tomoyuki Nishita(The University of Tokyo)

CGにおけるほとんどの研究が画像を生成することに焦点を当てている。しかし、最近では、物体の動きに合わせた音の自動生成を行う研究も行われるようになってきた。本論文では、剣を振ったり、風が吹いてでるような空気力学に基づく音(aerodynamic sound)を生成する手法について述べる。流体力学を用いた aerodynamic sound 用の音テクスチャの生成手法と音テクスチャを用いた物体の動きにあった aerodynamic sound の実時間レンダリングについて述べる。提案手法の利点としては次のようなことが挙げられる。

1. 物体の動きと風速に対応した音が合成できる。
2. 物体形状にしたがった音の合成ができる。
3. 音のリアルタイムレンダリングが可能である。
4. ステレオ効果とドップラー効果を考慮可能である。

提案手法では、物体表面上の圧力変化を CFD(Computational Fluid Dynamics) を用いて事前計算し、音テクスチャとして保存する。音テクスチャは、物体の動きや風速に応じた aerodynamic sound をリアルタイムでレンダリングするために用いられる。ユーザは、物体の動きや風速を指定することも可能である。

## 16 Scattering and Reflectance Measurement

### 16.1 “Measuring Bidirectional Texture Reflectance With a Kaleidoscope”

Jefferson Y. Han, Ken Perlin(New York University)

機械的な動きを必要とせず、任意の照明状態で surface in situ の計測ができ、小さくて、持ち運び可能で、安価な表面の BTF(Bidirectional Texture Function) を計測するための新しい手法を提案する。同時に多数の方向から同じサンプル表面を見ることが出来る万華鏡を利用している。同様に、一つの光源を用いるだけで、多数の方向から表面に照明を当てることも可能である。

### 16.2 “Linear Light Source Reflectometry”

Andrew Gardner, Chris Tchou, Tim Hawkins, Paul Debevec (University of Southern California Institute for Creative Technologies)

本論文は、線光源を一度通す間に物体の表面の空間的に変化する反射成分を測定する技術について述べる。照明として点光源ではなく線光源を使うことによって表面の各点における拡散色、鏡面色、鏡面粗さの信頼性の高い観測、推測が行える。使用する反射計測装置は簡単で安価に作る事ができるが、光源は一方向に動いてカメラの視点は固定する必要がある。提案するモデル当てはめ手法では、まず、動線光源の照明下で拡散、鏡面反射ローブがどのように現れるかを表す反射テーブルをレンダリングする。そして、どの反射モデルパラメータが観測された反射値に一番近い値を作り出すのかを決めるために、各画素に対してその一連の輝度値と表にまとめられた反射ローブを比較する。異なる角度で2度線光源を照射することによって、画素毎の反射パラメータだけではなく、面法線も推測することができる。さらに、このシステムでは物体の画素毎の高さマップを記録し、その画素毎の半透明性も推定する。従来の hardware shading algorithm を用いて、キャプチャした物体のリアルタイムレンダリングを行った結果を示している。

1. データの取得と登録
2. 反射モデル: データ当てはめに用いた反射モデルは、単純で物理的に正確な isotropic Gaussian lobe model[7]。
3. 平面に対するモデル当てはめ
  - (a) 反射テーブルの生成
  - (b) 拡散色の推定
  - (c) 鏡面色と粗さの推定
4. 非平面に対するモデル当てはめ
  - (a) 奥行き推定
  - (b) 面法線の推定
  - (c) 面法線の調整
5. 透明度の推定

### 16.3 “A Data-Driven Reflectance Model”

Wojciech Matusik(Massachusetts Institute of Technology), Hanspeter Pfister, Matthew Brand(Mitsubishi Electric Research Laboratories (MERL)), Leonard McMillan (Massachusetts Institute of Technology and University of North Carolina at Chapel Hill)

解析的な反射率モデルの代わりに、測定した反射率データに基づいた BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Functions) が生成可能なモデルを提案する。提案モデルでは、各 BRDF を測定したデータの密度集合として表す。これによって、新しい BRDF をその集合のデータの内挿や外挿で生成することができるようになる。新しい BRDF の生成には、直感的に意味のあるパラメータを用いてユーザが指示できるようになっている。ここでは *redness*, *greenness*, *blueness*, *specularness*, *diffuseness*, *glossiness*, *metallic-like*, *plastic-like*, *roughness*, *silverness*, *gold-like*, *fabriclike*, *acrylic-like*, *greasiness*, *dustiness*, *rubber-like* の 16 種を用いている。

球状のサンプルのまわりに光源を回転させてカメラで撮影し、130 種類以上の素材の反射率の測定を行った。データの解析では、45 次元の線形空間と 15 次元の非線形の様体の両方を用いて分析している。

#### 16.4 “Image-Based Skin Color and Texture Analysis/Synthesis by Extracting Hemoglobin and Melanin Information in the Skin”

Norimichi Tsumura (Chiba University),  
Nobutoshi Ojima (Kao Corporation),  
Kayoko Sato (Chiba University), Mitsuhiro Shiraishi (Kao Corporation),  
Hideto Shimizu (Chiba University), Hirohide Nabeshima, Syuuichi Akazaki, Kimihiko Hori (Kao Corporation), Yoichi Miyake (Chiba University)

本論文では、物理学と生理学に基づいた画像処理によるデジタル画像のための E-cosmetic 関数を提案する。実際の肌の色とテクスチャの解析や合成手法について説明する。簡単な色ベクトル解析を行うことで顔の陰を取り除く。以前提案した独立成分分析によるヘモグロビンとメラニン要素を取り出す手法を用いて陰の無い画像を解析する。

UV-B 放射とメチルニコチンの湿布を腕に貼る実験によって、解析手法の生理学的な妥当性と陰の除去効果を確認した。タンニンやアルコール消費による顔の変化を合成し、実際の顔色の変化と比較した結果、非常に類似していることが示された。年齢や化粧品による色素のテクスチャ変化を合成する手法も提案している。50 歳の女性を 20 歳の女性の肌に変化させることもできた。

#### 16.5 “Light Scattering From Human Hair Fibers”

Stephen R. Marschner (Cornell University),  
Henrik Wann Jensen (University of California, San Diego),  
Mike Cammarano (Stanford University), Steve Worley (Worley Laboratories),  
Pat Hanrahan (Stanford University)

CG においては、髪の毛からの光の散乱は、通常、Kajiya と Kay の古典的な現象モデルを用いて作成されている。本論文では、Kajiya と Kay のモデルでは予測できない視覚的に重要な効果を表す個々の髪の毛の繊維からの散乱光の新しい計測手法を提案する。提案手法では、従来の計測手法に加え複数の鏡面ハイライトと髪の毛を軸とした回転によ

る散乱も計測する。円柱に対する解析的散乱関数に基づいて、計測結果に見られる散乱の振舞いに質的に匹敵する髪の毛のための現実的なシェーディングモデルを提案する。写真とレンダリング画像を比較し、提案手法が現実の髪の毛の見かけに匹敵する能力があることを示す。

## 17 Hardware and Displays

### 17.1 “Delay Streams for Graphics Hardware”

Timo Aila (Helsinki University of Technology and Hybrid Graphics, Ltd.), Ville Miettinen (Hybrid Graphics, Ltd. and University of Helsinki), Petri Nordlund (Bitboys Oy)

ハードウェアによる隠面消去として Z バッファ法は広く知られているが、最近、タイル (例えば、 $8 \times 8$  ピクセル) を単位とした Z バッファを用いた低解像度 Z バッファによるタイルベースの隠面消去と、従来からのピクセル単位の Z バッファによる隠面消去を併用する方式が提案されている。本論文では、この低解像度 Z バッファを用いたタイルベース隠面消去を実行するパイプライン処理において、1 回目の Z 比較テストの後にその他のデータを遅延ストリーム FIFO に入れ、遅延させて Z 比較を行なう方式を提案する。面 A がタイルベース Z 比較で可視と判断されると FIFO の中に入れられ、遠くの Z 値は  $Z_a$  に書き換えられる。次の面 B が処理されるわけであるが、面 B の方が近くにある場合には、面 B も可視と判断され、次の処理に行く。ここで面 A を遅延させてもう一度、可視かどうかを判断すると、面 B によって不可視であると判断されることがあり、その場合には処理を中止するというものである。提案手法によって、ピクセル描画を  $1/2$  から  $1/4$  に減らすことができるというものである。

### 17.2 “Graphics for the Masses: A Hardware Rasterization Architecture for Mobile Phones”

Tomas Akenine-Möller (Chalmers University of Technology and Ericsson Mobile Platforms), Jacob Ström (Ericsson Research)

携帯電話は、レンダリング能力を兼ね備えた最も普及したデバイスの一つである。そのようなデバイス上の資源は非常に貧弱であるため、それらのレンダリング能力は非常に制限されている。少量のメモリ、狭い帯域幅、特殊な用途向けの小さいチップ領域、そして、電力消費量が制限されている。ディスプレイの解像度が小さいことも課題である。1 画素に対する角度が比較的大いため、高精度な画像を生成するためには高品質なレンダリングが必要である。

携帯のレンダリング能力を向上するために、テクスチャが貼られた三角形を走査するための新しいハードウェアアーキテクチャを提案する。外部メモリのアクセスが最もエネルギーを消費する操作の一つであり、携帯電話はできる限り電力消費を抑える必要があるため、提案アーキテクチャはメモリの帯域幅を節約することに焦点を当てている。したがって、提案システムは 3 つの新しい重要な技術を含んでいる。

1. 従来の安価な仕組みと同コストで高い質を得られる安価なマルチサンプリングの仕組み。
2. 共一次ミップマッピングに比較的近い質のテクスチャ圧縮を含むテクスチャの縮小化システム
3. 著しい量の Zバッファの読み込みを避けスキャンラインに基づいたカリングの仕組み

ソフトウエアシミュレーションの結果、3つの方法を一緒に用いることで、著しくメモリの大域幅を削減することができ、電力消費も抑えることが示された。

### 17.3 “iLamps: Geometrically Aware and Self-Configuring Projectors”

Ramesh Raskar, Jeroen van Baar, Paul Beardsley, Thomas Willwacher, Srinivas Rao, Cliff Forlines(Mitsubishi Electric Research Laboratories (MERL))

本論文はデジタルカメラと傾きセンサを持ったプロジェクタについて述べる。iLampsの意味は intelligent, locale-aware, mobile projectors である。

提案しているプロジェクタは幾何学位置を自分で意識している。プロセッサとマンマシンインタフェース、傾きセンサ、カメラ、ネットワークインタフェースを持っている。キーストーン補正、方向補正機能、自動的な明るさ、ズーム、フォーカスの調整機能、3次元的な幾何学位置/テクスチャの取り込み機能、インテリジェントなカメラのフラッシュ機能などを持っている。

投影方式は投影面に適応することができる。例えば、2つの壁が交わる角に投影する場合にも補正して幾何学的にきれいな画像をみることができる。補正にはメッシュを表示してカメラで読取り、幾何学的な計算がされる。また、平面だけでなく、球面などの非平面にも投影することができる。

適応型ディスプレイとして使用することができる。これはカメラからピーコードと呼ばれる丸いカラーコードを読取り、そのマークに応じて説明するものを映像で写し出すというものである。

プロジェクタをクラスタとして複数台並べると、自動的にシームレスなマルチ大画面表示システムを構築することができる。平面にもシームレスのマルチ大画面を表示することができるし、ドームのような非平面にもシームレスのマルチ大画面を構築することができる。シームレスにするには各画面をオーバーラップさせ、オーバーラップ部分のピクセルを幾何学的に位置補正することと、輝度を滑らかに変えることによって実現することができる。PCで行なう場合にはテクスチャマッピングを応用することによって実現することができる。

### 17.4 “blue-c: A Spatially Immersive Display and 3D Video Portal for Telepresence”

Markus Gross, Stephan Würmlin, Martin Naef, Edouard Lamboray, Christian Spagno, Andreas Kunz, Esther Koller-Meier, Thomas Svoboda, Luc Van Gool, Silke Lang, Kai Strehlke, Andrew Vande Moere(ETH Zürich), Oliver Staadt(University of California, Davis)

Blue-c は、没入型表示装置の一種である CAVE の新しい方式である。本方式では、リアルタイムで、インタラクティブ性を持った三次元映像システムを使用して、新しい試みを行なっている。

3枚のパネルを使い、PDLC(Phase Dispersed Liquid Crystal) という電圧をかけると on-off(透明 不透明)になる構造のパネルを使用している。これは、パネル内の被写体を、パネルの外にあるビデオカメラで撮るためである。複数のビデオカメラで、3次元撮影を行う。ビデオカメラで撮影する際に、被写体に LED(1万個)からの光を照射する。

まず、右目用の映像を表示するために、右目用のプロジェクタと眼鏡のシャッタを開く。その際、パネルは不透明になっており、その上に映像が投影されている。次に、パネルが透明になり、ほぼ同時に、右目用のプロジェクタと眼鏡のシャッタが閉じられ、LEDからの照射とビデオカメラでの撮影が行われる。その間、その光が目に入らないように、両眼のシャッタが閉じた状態になる。その次の瞬間に、パネルは再び不透明になり、左目用の画像が投影され、眼鏡の左目用シャッタが開かれる。これによって、3次元映像を表示し、同時に、3次元映像を撮影することができる。さらに、それをリアルタイムで、パネルに表示できる。そのサイクルは 16msec. である。

## 18 Design and Depiction

### 18.1 “Designing Effective Step-By-Step Assembly Instructions”

Maneesh Agrawala(Microsoft Research), Doantam Phan, Julie Heiser, John Haymaker, Jeff Klingner, Pat Hanrahan, Barbara Tversky(Stanford University)

本論文では、組み立て説明書を作り出す手法について述べる。提案手法は、認知心理学の組み立ての概念モデルと組み立て情報を視覚的に伝える効果的な方法に基づいている。組み立て説明書を作成するための高次のツールを提供するシステムを作成する。本研究の広義の目標としては、人間がどのように視覚的な説明書を作り出し使うのかを理解することである。

次に2つの基本処理を示す。

1. **Planning:** 多くの物体は様々な方法で組み立てることができる。ユーザが簡単に理解でき、それにしたがって組み立てることができる組み立て操作の手順を選ぶ必要がある。
2. **Presentation:** 組み立て操作を描画する方法は多数存在する。組み立て手順の流れ図として分かりやすく示すことが必要である。

入力情報を次に示す。

1. **Geometry:** 最終的に組み上げられた物体の部品のそれぞれの幾何学情報
2. **Orientations:** デフォルトのカメラ視線と組み立ての方向
3. **Groupings:** 機能的、意味的、幾何的な属性に基づいてグループ化された部品のラベリング
4. **Ordering Constraints:** 組み立て手順の拘束条件

最小入力情報は、部品の幾何情報、デフォルトカメラ視線と物体の向きである。それ以外の情報はオプションであり、情報が無くてもシステムは有用な操作手順を生成する。

提案手法を用いて作成されたいくつかの組み立て説明書が示されている。低レベルの幾何、可視計算に処理時間の多くが費されているが、これらの最適化に関しては本論文の目的ではない。

## 18.2 “Adaptive Grid-Based Document Layout”

Charles Jacobs(Microsoft Research), Wilmot Li, Evan Schrier(The University of Washington), David Bargeron, David H. Salesin(Microsoft Research)

新聞や雑誌などの商業印刷物では grid-based のページレイアウトは一般的となっている。しかし、任意の電子的なディスプレイに対して簡単に自動的に適応的なデザインをする良い手法ははまだ提案されていない。提案手法では、ページの大きさの範囲や他の見えの条件にどのように適応するか知識を持つ grid-based テンプレート集合としてレイアウト様式を符号化する。それらのテンプレートは、様々な種類のレイアウト要素を含んでおり、拘束条件に基づいた関係によって、図の大きさやアスペクト比などのコンテンツ自身の属性とコンテンツが表示された際の見えの状態の属性の両方の関数として、単にそれらの要素をどのように配置するかを定義する。テンプレートとコンテンツを明確に分けて保持する XML に基づいた記述法について述べる。また、プロトタイプシステムの様々な部分、ページのフォーマットのためのレイアウトエンジン、ページ間のコンテンツの大局的で最適な割り当てを決めるためのページ付け器、コンテンツを伴ったテンプレートの最適なペアリングと適応的なテンプレートの生成を対話的に行うための GUI(Graphical User Interface) について述べる。

## 18.3 “Suggestive Contours for Conveying Shape”

Doug DeCarlo(Rutgers University), Adam Finkelstein(Princeton University), Szymon Rusinkiewicz(Princeton University), Anthony Santella(Rutgers University)

本論文ではラインを用いて形状を表現するノンフォトリアリスティックレンダリングシステムについて述べる。提案手法では、輪郭や creases のみでなく suggestive contour という新たなタイプの描画されるべきラインを定義、導入することによって形状を表現している。suggestive contour は表面上で人間がはっきりと知覚できる部分を描いたものである。

輪郭とは、 $n(p) \cdot v(p) = 0$  を満たす点列である。ここで、 $p \in S$  は表面上の点、 $n(p)$  は点  $p$  での表面の法線を表し、 $v$  は  $v(p) = c - p$  で表現される視線ベクトルである。それに対し、Suggestive contours は、ある視点から見た場合、“ほとんど”輪郭である位置、つまり、 $n(p) \cdot v(p)$  が極小値である点であり、隣接視点から見た時に輪郭となる点である。言い替えると、この点は、曲率が 0 となる点であり、また曲率の方向微分が正となる点である。

このような suggestive contour という概念を導入するこ

とによって、より確かな表面形状を可視化することが可能となる。我々の知覚的能力はそのようなレンダリングから視覚情報を受け取ることができ、それらは輪郭のみで描かれたものより豊かで詳細な形状情報を表現することが可能になる。

## 18.4 “Coherent Stylized Silhouettes”

Robert D. Kalnins, Philip L. Davidson, Lee Markosian, Adam Finkelstein(Princeton University)

時間的な一貫性をもった 3 次元モデルのアニメーションの stylized silhouettes をレンダリングする手法について述べる。一貫性を持たせた映像を生成することは、NPR(non-photorealistic rendering) における一つの重要な課題である。フレーム間に明らかな対応点が存在しないので、特にシルエットに対しては非常に困難である。時間的な一貫性に対して頑健なシステムを用いて stylized silhouettes に対する様々な一貫性をもった効果が生成できることを示す。提案手法は、適度に複雑なモデルのリアルタイムレンダリングが可能であり、対話的なアプリケーションやオフラインアニメーションの両方に適した手法である。

## 19 Dynamics

### 19.1 “Untangling Cloth”

David Baraff, Andrew Witkin, Michael Kass(Pixar Animation Studios)

布と布の衝突反応の欠如は、多くの布シミュレーションシステムの重大な欠点である。布と布の衝突を扱う従来の手法では、近くの布領域が互いに貫きあうかどうかを決定するために履歴を用いていた。履歴に基づいた手法の最大の落とし穴は、からみあっている部分では誤差が大きくなってしまうことである。例えば肘や膝の曲げなど、いつもキャラクタの身体それ自体が交差しているため、キャラクタアニメーションの生成において特に重大な問題となっている。本論文では、各シミュレーションステップにおいて布メッシュの大域的な交差解析に基づいた履歴を用いない布の衝突反応アルゴリズムを提案する。

### 19.2 “Nonconvex Rigid Bodies With Stacking”

Eran Guendelman, Robert Bridson, Ronald P. Fedkiw(Stanford University)

衝突、接触、摩擦、積み重ねなどの相互作用を行う非凸状剛体のシミュレーションについて述べる。三角形パッチと格子上で定義された符号付き距離関数の両方でモデルを表現することで、様々な利点を得ることができることを示す。衝突や接触処理アルゴリズムを融合した時間積分の新しい方法について述べる。提案手法が摩擦を持つ傾いた平面上を滑べったり止まったりするブロックの理論的な結果と一致することを示す。また、新しい衝撃伝播アルゴリズムも提案している。

### 19.3 “Precomputing Interactive Dynamic Deformable Scenes”

Doug L. James, Kayvon Fatahalian(Carnegie Mellon University)

物理法則に基づいた対話的なシーンの変形を行う事前計算を行ったデータ駆動型モデルについて述べる。提案手法では、自己接触や大域照明効果を含む非線形変形のハードウェアを用いた実時間合成とユーザの操作が可能である。ある種の対話的な変形シーンにおいて、特定のユーザ操作で、最小の実行コストでシミュレーションが行える複雑さと対話性の間のバランスを決めることが提案手法の最終目標である。

実行時に対話的な力学再生が効果的に行えるように物体の変形の状態を状態空間モデルに保存する。保存コストの制限と効果を高めるために、PCA(Principal Component Analysis)を用いる。また、IRF(Impulse Response Functions)も同様に保存する。

### 19.4 “Realistic Modeling of Bird Flight Animations”

Jia-chi Wu, Zoran Popović(The University of Washington)

本論文では、与えられた軌跡に沿って鳥が飛ぶ様子を合成する物理法則に基づいた方法について述べる。飛び立ったり、飛び回ったり、急降下したり、回転したり、着地したりするような様々な飛行操作を行う動きをそれぞれの鳥毎に生成する。弾力性のある可変な羽を持つスケルトンの関節モデルとして鳥をモデル化する。順動力学シミュレーションにおける関節のトルクと時間に関する空気力学的力を適用することで鳥の動きを生成する。最も自然な動きを生成する羽ばたきパラメータに最適化することでそれぞれの羽ばたき動作を個別に生成する。この詳細な鳥の飛行モデルを用いることで、飛び立ち、飛び回る、急激な降下、回転、着地などの様々な行動を行う異なった鳥の飛行動作を生成することが可能である。

## 20 Computation on GPUs

### 20.1 “Cg: A System for Programming Graphics Hardware in a C-like Language”

William R. Mark(University of Texas at Austin), R. Steven Glanville, Kurt Akeley, Mark J. Kilgard(NVIDIA Corporation)

最近の実時間グラフィックスアーキテクチャはプログラム可能な浮動小数点処理を行う頂点やフラグメントプロセッサを含んでいる。それらのストリーミングプロセッサをプログラミングするために設計したプログラミング可能な言語と支援システムについて述べる。提案言語は、アプリケーションに特有のシェーディング言語というよりも、ハードウェア指向で汎用的な言語であるというC言語の哲学を受け継いでいる。

### 20.2 “Linear Algebra Operators for GPU Implementation of Numerical Algorithms”

Jens Krüger, Rüdiger Westermann(University of Technology Munich)

GPU上で数値計算を行う技術、特に代数方程式の高速化に焦点をあてた手法について述べる。この手法は特に2次元の波動方程式や非圧縮性のNavier-Stokes方程式等を用いる物理現象のシミュレーションに対して有効である。

GPU上での行列の内部表現を示す。概念はテクスチャマップに行列を格納し、算術演算を実行するためにピクセルシェーダを利用する。従来手法には、次のような欠点があった。

- 1次元テクスチャの最大サイズの限界が1つのテクスチャマップに格納できるベクトルの要素数を少なくしている。
- 1次元テクスチャをレンダリングすることは、矩形の2次元テクスチャをレンダリングするよりも非常に遅い。
- 1次元のベクトルシミュレーションの結果を利用する時、最終的にデータを2次元テクスチャに再配置しなくてはならない。
- この表現では効果的な行列とベクトルの積の計算ができない。

これを改善するため、行列の対角ベクトルを2次元テクスチャマップに格納するようにする。次のような利点が挙げられる。

- より大きいベクトルが1つの単一テクスチャ要素に格納できる。
- 矩形の2次元テクスチャでレンダリングされているためベクトルの算術演算が高速である。
- 2次元gridでデータが表現されているベクトルが、データを視覚化するために直接レンダリング可能である。
- 行列とベクトルの乗算が、ベクトル同士の掛け算が有効であるように配置されている。
- 行列とベクトルの乗算の結果が既に適切で再配置の必要が無い。

最も利益が大きいのは疎行列(帯行列)の場合である。グラフィックチップはピクセルシェーダ2.0の命令セットをサポートしているので基本演算を簡単なピクセルシェーダで実現する。

その他にベクトルの縮小化がある。これは過去のパスの結果を再帰的に結合することによって、複合のレンダリングパス上のベクトル要素を結合するものである。

ベクトル同士、行列とベクトルの算術演算はソフトウェアの実装より12~15倍高速化した。高速化はベクトルや行列をRGBAテクスチャとして内部的に格納していることに大きく影響されている。連続した4つのエントリを1つのRGBA texelとして格納することで、同時に4倍のエントリを処理できる。平均して $512^2$ の長さのベクトル同士の乗算は0.2ms掛かる。また、 $1024^2$ や $2048^2$ では、それぞれ0.72msと2.8msと性能が落ちる。 $4096^2$ のfull行列では約0.23sで実行されるが疎帯行列では同サイズ(10個の非0対角行列内包)で0.72msである。

ソフトウェアと比較して最も効果が薄かったのは縮小処理で、1つのRGBAテクスチャに4つの要素を格納しても約3倍しか早くならなかった。 $1024^2$ を縮小するのにGPU

で約 1.6ms 掛かる．2048<sup>2</sup> では 5.4ms であった．その原因はこの種の演算に使われるピクセルシェーダがベクトル同士の乗算に使われるものよりもかなり複雑であったことによる．

### 20.3 “Sparse Matrix Solvers on the GPU: Conjugate Gradients and Multigrid”

Jeff Bolz, Ian Farmer, Eitan Grinspun, Peter Schröder(California Institute of Technology)

多くの CG アプリケーションでは，数値シミュレーションを必要とすることが非常に多い．本論文では，そのような計算を GPU 上で行う効果的な手法について示す．広範囲に有用な sparse matrix conjugate gradient solver と regula-grid multigrid solver を実装した．メッシュの平滑化やパラメータ化から流体解析にわたる範囲のリアルタイムアプリケーションに対し効果的であり，NVIDIA の GeForce FX で幾何学的フローや流体シミュレーションが実行できることを示している．

### 20.4 “Nonlinear Optimization Framework for Image-Based Modeling on Programmable Graphics Hardware”

Karl E. Hillebrand(University of North Carolina at Chapel Hill), Sergey Molinov(Intel Corporation), Radek Grzeszczuk(Intel Corporation)

グラフィックスハードウェアは固定関数のパイプラインから一般的な目的のストリームプロセッサのように，よりプログラム可能な構成に変化してきている．本論文では，通常 CG と関連しないある種の一般的なアルゴリズムをそのようなグラフィックスハードウェア上で実現可能であることを示す．特に，データストリーミングプロセスとして，最近のグラフィックスプロセッサに非常に適合している非線形最適化の計算を行う．提案手法は，一般的な記述を用いて image-based modeling 問題の大規模で様々なクラスを表すことに用いることができるため，これらの問題を解くことに適している．light field mapping 近似と空間的な BRDF に Lafortune モデルを当てはめる 2 つの別個の image-based modeling 問題に提案手法を適用させることができた．CPU 上での実装と GPU での実装の実行速度を比較したところ，5 倍以上の処理速度が得られた．

## 21 Meshes

### 21.1 “Out-of-Core Compression for Gigantic Polygon Meshes”

Martin Isenburg(University of North Carolina at Chapel Hill), Stefan Gumhold(University of Tübingen)

本論文では，非常に大きなポリゴンメッシュを圧縮してストリーミング可能なものに変える方法を提案する．従来，

圧縮アルゴリズムは提案されているが，非常に大きなメッシュに利用可能な手法はなかった．

連結性の符号化は次のように行う．ある面が active boundary(今までに結合してできた境界)に対して一つのエッジを分け合うとき，一つの頂点は free vertex となる．これに対して，次の三つの場合が考えられる．

1. **add:** free vertex がどの境界上にもない時．境界にその頂点を付加する．
2. **split:** free vertex が active boundary 上にある時．active boundary を二つに分割し，より小さい境界を残す．
3. **merge:** free vertex がまだ active boundary に含まれていない境界上にある時．これら二つの境界を合わせる．分割でより小さい境界選ぶことで，メモリの使用量がかなり減る．

幾何情報の符号化は次のように行う．それぞれの頂点に座標を与える．parallelogram rule[8] を使うと，今求めたい三角形面のそれぞれの頂点座標が，隣接する三角形面の頂点の座標から推測することができる．また，最初に選んだ三角形面にはこの規則は適用できないが，三つのうち一点の座標を決めれば delta-coding[9] によって残りの二点を推測することができる．頂点座標を他の座標から推測するようにすることで，圧縮をしている．

今までにあった類似技術よりも圧縮率は約 25% 低くなり，ディスクからのロード時間も減った．

### 21.2 “Non-Iterative, Feature-Preserving Mesh Smoothing”

Thouis R. Jones, Frédo Durand(Massachusetts Institute of Technology), Mathieu Desbrun(University of Southern California)

3次元モデル作成において，3次元スキャナで計測したデータのノイズは避けられない問題である．本論文では，頑健な統計学と表面の局所一次予測器に基づいた高速で頑健なメッシュ平滑化手法を提案する．従来手法は全て局所的で繰り返しを行う手法であるが，局所的な推定量の頑健さによって繰り返しを行わずに特徴を保存したフィルタリングを行うことができる．

### 21.3 “Bilateral Mesh Denoising”

Shachar Fleishman, Iddo Drori, Daniel Cohen-Or(Tel Aviv University)

高速で，効果的で，簡単な異方性メッシュのノイズ除去手法を提案する．局所的な隣接頂点を用いて，法線方向にメッシュの頂点をフィルタリングする．提案手法は，bilateral filtering に基づいている．

3次元モデルを計測すると，ノイズは必ず発生する．ノイズ除去アルゴリズムは，そのノイズを削除しながらモデル本来の特徴を残す必要がある．ノイズ除去は，点群をメッシュに変換する前か後のどちらかで行われる．接続情報は表面の位相で暗に定義され，隣接サンプルへの高速なアクセス手法として利用できるため，提案アルゴリズムはメッシュ上で行う．

通常，次の 3 つの理由から，2次元のノイズ除去アルゴリズムを 3次元に直接適用することは困難である．

1. 不規則性: 画像とは異なり, 接続性とサンプリングの両方において不規則である.
2. 収縮: 画像におけるノイズ除去アルゴリズムは一般的にエネルギーを保存していない. エネルギーを保存しないことは, 画像においては目につきづらいが, メッシュにおいてはメッシュの収縮として明白に現われる.
3. Drifting: 画像のノイズ除去技術の単純な適応は頂点の drift として知られるアーティファクトを生じてしまい, メッシュの規則性が損なわれてしまう.

提案アルゴリズムは, bilateral filtering アルゴリズムを 3次元メッシュに適応するものである. 提案手法では, 特徴を保持しながらメッシュからノイズを除去することが可能である. さらに, 提案手法は, 概念も実装も単純であるという点で優れている.

## 21.4 “Hierarchical Mesh Decomposition Using Fuzzy Clustering and Cuts”

Sagi Katz(Technion - Israel Institute of Technology), Ayellet Tal(Technion - Israel Institute of Technology and Princeton University)

新しいメッシュ分解手法を提案する. メッシュ分解は, 大きなメッシュを小さな部分に分解するために用いる. 多くの理由からメッシュ分解は有用である. 例えば, 大きなメッシュを扱うことは非効率で遅く, メッシュを意味のある部分に分解することで容易にアニメーションを行うことが可能である.

従来のメッシュ分解手法では, 過分割と要素間の境界のジャギーという 2つの問題点を抱えていた. 過分割とは, 一つのメッシュを多数の部分に分けすぎてしまうことである. 過分割は, 物体が小さいくぼみを持っている場合に生じてしまう. 境界のジャギーは, 分割後のメッシュ間の境界が直線とならない場合に生じる.

提案アルゴリズムは大きく分けて次の 4つのステップから構成されている.

1. メッシュ内の全ての面の組み合わせに対する距離を指定する.
2. 初期分割を計算し, 各パッチに含まれる可能性を各面に指定する.
3. クラスタリングを繰り返し行う仕組みを用いて確率を更新しファジイ分割を計算する.
4. ファジイ分割を最終的な形に変形させることで, 要素間の正確な境界を構成する,

提案手法は, 意味のある要素を見つけ出し, 要素間の正確な境界を生成することが可能である.

## 22 おわりに

本論文では, SIGGRAPH'03の論文 81 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, 多岐にわたっている. 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が, 何かに役立てば幸いである. 多くの論文は, Internet 経由<sup>1</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 計算工学専攻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. また, 本論文を良くするために, 非常に有益なアドバイスを頂きました査読者の方々に感謝致します.

## 参考文献

- [1] A. A. Efros and W. T. Freeman: “Image quilting for texture synthesis and transfer”, Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press, pp. 341–346 (2001).
- [2] S. L. Kithau, M. S. Drew and T. Möller: “Full search content independent block matching based on the fast fourier transform”, In ICIP02, Vol. I, pp. 669–672 (2002).
- [3] A. Schödl, R. Szeliski, D. H. Salesin and I. Essa: “Video textures”, Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 489–498 (2000).
- [4] M. Walter, A. Fournier and D. Menevaux: “Integrating shape and pattern in mammalian models”, Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press, pp. 317–326 (2001).
- [5] T. Porter and T. Duff: “Compositing digital images”, Proceedings of the 11th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press, pp. 253–259 (1984).
- [6] J. R. Rossignac and J. J. Kim: “Computing and visualizing pose-interpolating 3d motions”, Computer Aided Design, **33**, 4, pp. 279–291 (2001).
- [7] G. J. Ward: “Measuring and modeling anisotropic reflection”, Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press, pp. 265–272 (1992).
- [8] C. Touma and C. Gotsman: “Triangle mesh compression”, In Graphics Interface'98 Conference Proceedings, pp. 26–34 (1998).
- [9] M. Deering: “Geometry compression”, Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press, pp. 13–20 (1995).

<sup>1</sup>各論文の URL の所在は, <http://www.cs.brown.edu/tor/sig2003.html> のページを参考にした