

【研究室紹介】



研究室紹介

●研究室紹介●

Stanford University

Computer Science
DepartmentComputer Graphics
Laboratory

苗村 健

1. はじめに

日本学術振興会海外特別研究員として、2000年9月より2年間滞在したスタンフォード大学グラフィックスラボについてご紹介します。

2. 組織概要

(1) スタンフォード大学

スタンフォード大学は、サンフランシスコから車で1時間、シリコンバレーに隣接する地域に広大なキャンパスを擁しています。Hewlett-Packard、Sun、SGI、Yahoo、Googleなどがスタンフォード発祥の企業として成功し、そのシリコンバレーとの強固な結び付きで注目を集めています。

2000年の統計によれば、学部生6548名、大学院生7700名であり、大学院生の32%が外国人です。このため、外国人に対するサービスが非常に充実しており、研究生生活だけでは得られない多くの貴重な経験がそこから得られました。

(2) コンピュータサイエンス学科

コンピュータサイエンス学科には、2002年6月現在、専任の教授陣が(TeXを作ったKnuth先生を含む)46名、学生は、学部約430名、修士課程約300名、博士課程約160名が在籍しています。卒論や修論という制度がなく、学部や修士課程では講義や実習に取り組み、研究活動は博士課程から始めます。中途半端な研究よりも、社会で通用する即戦力を養うことが重視されているようです。

日本人の学生は少ないようです(米国の高校を卒業した人がある程度)。その代わりに、日本企業からの客員研究員が10名ほど滞在されています。

(3) コンピュータグラフィックスラボ

実はどこまでがグラフィックスラボなのか、よく分かりません。Webページにリストはありますが、会ったことのない人が何人かいる一方、よく議論する学生は載っていません。ラボの境界が曖昧で、その壁をあまり意識する必要がないようです。

ラボの全体ミーティングは、週に1回で、毎週1名ずつプレゼンをしていきます。1年でちょうど一周しましたので、ラボの一員と見なされているポストクや博士学生の数は40~50名ということになります。これとは別に、プロジェクトミーティングが少数で頻繁に行われています。

教授陣は、Leo Guibas教授(geometry)、Pat Hanrahan教授(rendering、architecture)、Marc Levoy準教授(sensing、modeling、rendering)、Ron Fedkiw助教授(natural phenomena)、Chris Bregler助教授(animation、motion capture)の5名です。これにB. Dally(computer architecture)、M. Horowitz(VLSI; 米Rambus社の創始者)、T. Winograd(HCI)、B. Girod(video)という各分野の教

授陣が加わり、6名のポスドクと、博士課程（Computer Science + Electrical Engineering + Science Computing / Computational Mathematics Program）の学生30～40名が在籍しています。

3. グラフィックスラボにおける教育

この1年で開講された講義は以下の通りです。

- 一般・学部学生向け講義
 - ◆ The Science of Art (Marc)
 - ◆ Introductory Computer Graphics
- 学部・大学院共通講義
 - ◆ Introduction to CG (Marc)
- 大学院講義
 - ◆ Geometric Modeling (Leo)
 - ◆ Image Synthesis Techniques (Pat)
 - ◆ Animation Techniques (Chris)
 - ◆ Geometric Algorithms (Leo)
 - ◆ Level Set Methods (Ron)
- 大学院輪講・演習
 - ◆ Real Time Graphics Architecture (Pat)
 - ◆ Motion Studies (Chris)
 - ◆ Digital Photography and Image-Based Rendering (Marc)
 - ◆ Visualization (Pat)
 - ◆ Topics in Geometric Algorithms (Leo)

コンピュータグラフィックスだけで13の講義が用意されています。4学期制のため1つの講義は3ヶ月弱で、1週間に2回ずつ開講します。

輪講は「ラボ以外のメンバにも公開された研究室ミーティング」といった雰囲気、新鮮なトピックの議論が行われ、出席者の半数は単位を必要としないラボのメンバや教授たちで占められていました。

いくつかの講義では、作品のコンペティションが開かれます。Introduction to CGでは3D CGゲーム、Image Synthesis Techniquesでは高品質CGのコンペティションでした。審査員にはCG界の著名人が招待され、優秀な学生の青田刈りが展開されていました。優勝した学生はSIGGRAPHへの参加費が援助されます。コンペティションの結果は、Webページで公開されています。高品質CGの方にOpenGL生みの親の1人であるKurt Akeleyの作品があります。彼は、現在、博士課程に在学して学生として講義に出席する一方で、Real Time Graphics Architectureの教鞭をとっています。Akeleyは別格です

が、一般の学生が3ヶ月で作成する作品としては、目を見張るものがあります。

4. グラフィックスラボにおける研究

研究活動の重心は、ACM SIGGRAPHに置かれています。2000年から2002年までの3年間で、それぞれ（8件、11件、10件）のペーパーが採録になりました。この数が、いかに他を圧倒するものであるか、SIGGRAPHをご存知の方ならお分かり頂けるでしょう。このうち、教授陣が連名でない学生やポスドクだけの論文が、（2件、2件、2件）でした。いくつかの研究を簡単に紹介します。紙面の都合で、文献の列挙を省きますが、文献のタイトルに現れる文言をボールド体で記し、その後にSIGGRAPHにおける発表年数を併記しておきます。

（1）形状やテクスチャのモデル化と描画

Digital Michelangelo Project (2000) では、ミケランジェロが作り出した数々の彫刻を、0.29 mm 間隔、奥行き分解能 50 μ m という精度のレンジファインダを用いて3次元形状計測しました。517cmのダビデ像の場合には、20億ポリゴンで32GBというデータを1ヶ月かけて測定したそうです。このプロジェクトは、1997年1月から始まり、200万ドル（2億円強）の予算で、30名前後のメンバがイタリアに長期滞在して成し遂げられました（1998年9月から1999年6月まで）。現在、ここで得られたデータを公開し、グラフィックスのみならず、工学以外の分野と連携した研究が進められています。



図1 Digital Michelangelo

まず、このような大規模なデータを効率的に表示・伝送する手法が必要でした。**QSplat** (2000) は、この目的で開発された階層的な手法です。一方、時間をかけて計測してもデータに欠損はつきものです。この苦い経験を活かし、計測をインタラクティブに行うことによって、

所望のデータを迅速に得ることができる **Real-Time 3D Model Acquisition** (2002) システムが開発されました。被写体を手に握り、データの欲しい部分を計測部の方向にかざしながらゆっくり動かしていくと、次第に全体の形状データが得られます。Cyberware で 0.25mm×0.33mm 精度の計測に 30 分かかるところを、0.75mm×0.5mm 精度の計測が 4 分で行えるようになりました。

そのほかに、自然なテクスチャを高速合成する **Fast Texture Synthesis using Tree-structured Vector Quantization** (2000)、これを様々な曲面上に展開する **Texture Synthesis over Arbitrary Manifold Surfaces** (2001) の研究などがあります。

(2) 動きのモデル化と描画

Turning to the Masters (2002) では、ディズニーなどのアニメーションにおける大げさな動きをモーションキャプチャして、Expressive な動きを CG に与える手法が提案されています。リアルさを追求するものではなく、むしろアニメーションにおける職人技をデジタル技術に取り込む試みです。

Motion Capture Assisted Animation (2002) では、キーフレームアニメーションの補間にモーションキャプチャデータを利用しています。例えば、人が歩くシーケンスにおいて、下半身のキーフレームだけを作成すれば、自動的に上半身の動きをモーションキャプチャデータから補ってくれます。

(3) 物理現象のモデル化と描画

Night Sky (2001)、**Liquid** (2001)、**Water Surface** (2002)、**Smoke** (2001)、**Fire** (2002)、**Cloth** (2002) など、様々な物理現象を描き出す努力が続けられています。これらは、物理現象の単なるビジュアライゼーションという理学的な研究に留まりません。映像制作現場において、作業を効率的に行うことができる程度に高速かつ高品質であるという要件を満たすアルゴリズムが開発されています。現在、1 フレームに数分程度の計算時間になっています。

物体表面の光学特性についても、高い関心が寄せられています。**Inverse Rendering** (2001) の研究では、形状既知の物体の写真を用いて、光源位置や物体表面の反射率分布特性 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function) を推定するために、球面調和関数を用いる手法が提案されています。この研究によって、反射特性と光源分布の推定精度を球面調和関数の周波数領域において議論する理論的枠組みが与えられました。

さらに、物体表面下で起きる光の散乱まで考慮に入れた BSSRDF (Bidirectional Scattering Surface Reflectance Distribution Function) モデルを高速描画する手法の検討が進められています。この方法を用いると、大理石や小さな生物のように光が透けて見える半透明物質の描画が可能になります。従来のモデルでプラスチックのように見えていた人肌にも、みずみずしい質感が与えられます。**Practical Model for Subsurface Light Transport** (2001) では、従来手法で 1250 分かかっていた計算が 5 分にまで短縮されました。さらに、**Rapid Hierarchical Rendering Technique for Translucent Material** (2002) では、2001 年の手法で 18 分かかる処理が 7 秒にまで短縮されました。



図2 Subsurface Light Transport

そのほかに、ぼやけた影を描き出す **Image-Based Methods for Rendering Soft Shadows** (2000) の研究などがあります。

(4) 並列アーキテクチャ

CG の高速描画は高度な並列処理によって達成されます。これには、描画する物体ごとの並列化と、合成画像の部分領域ごとの並列化が鍵になります。物体ごとの並列処理から画面領域ごとの並列処理に切り替えるタイミングに応じて、sort-first、sort-middle、sort-last などの並列アーキテクチャが提案されています。それぞれのアーキテクチャには得意とする描画対象があり、それぞれの利点をバランスよく取り入れる並列アーキテクチャとして、**Pomegranate** (2000) が提案されました。

一方、より実践的な研究として、sort-first 型の並列化を PC クラスタ上で容易に実現する **WireGL** (2001) が開発されました。その特徴は、OpenGL の DLL (Dynamic-

Link Library) を WireGL のそれに取り替えることで、OpenGL アプリケーションの再コンパイルを必要とせずに、複数の PC による並列レンダリングを実現する点です。それぞれの PC から出力される画像をそのまま複数のプロジェクタで投影することもできますが、**Lightning-2** (2001) を用いてハード的に画像を統合することもできます。この成果は、PC クラスタ上で sort-last 型の並列化も可能にする自由度の高い **Chromium** (2002) へと引き継がれています。安価な PC を組み合わせて、高解像度かつ高速のレンダリングを実現する枠組みが整いつつあります。

(5) Programmable Hardware の応用

PC 用のグラフィックスカードの性能は、この数年で飛躍的に向上しました。特に、固定的な処理しかできなかったハードウェアがプログラム可能なものに置き変わった点に大きな進展がありました。しかし、このプログラムにはアセンブラレベルの知識を要し、使い易いものではありませんでした。グラフィックスハードウェアのプログラミングを容易にする高級言語 (RTSL: Real-Time Shading Language) として、**Real-Time Procedural Shading System** (2001) が実装されました。この試みは、2002 年に nVIDIA 社から発表された Cg (C for Graphics) と目的を同じくするものですが、Cg はハード寄り (低レベル) の記述を目的としており、ハリウッド映画で利用される RenderMan の記法に近い RTSL は高レベルの仕様と位置付けられます。RTSL から Cg へのコンバータの実装が進めば、プログラム開発者の選択肢はさらに広がります。

具体的な応用例としては、複雑な照明環境を描き出す Environment Map 処理を PC 上でインタラクティブに行う手法が開発されました。**Efficient Representation for Irradiance Environment Maps** (2001) では、描画対象を完全拡散面に限定し、球面調和関数によるローパスフィルタを利用した効率的な処理が実装されています。さらに **Frequency Space Environment Map Rendering** (2002) では、より複雑な反射特性の物体表面に対象を拡張し、複雑な照明環境において複雑な反射をする物体をインタラクティブに描き出すことができるようになりました。物体から光源および観察者までの距離が十分に遠い場合に成り立つ近似処理になっていますが、違和感のない描画結果が得られています。

さらに **Ray Tracing on Programmable Graphics Hardware** (2002) では、実時間光線追跡法の実装に向け

た基礎的な検討が始められています。

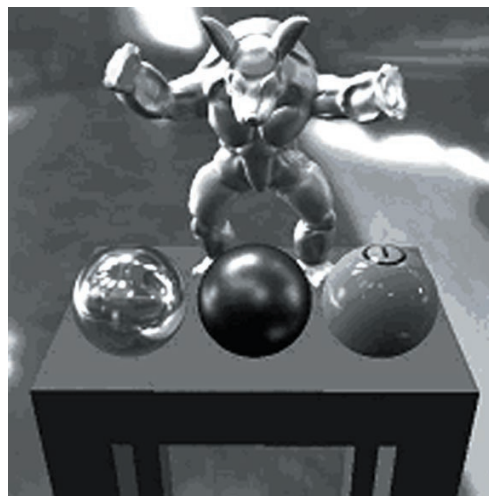


図3 Frequency Space Environment Map Rendering

(6) そのほか

目的地までの道順を、直感的に分かり易い線図に描き直す **Rendering Effective Route Maps** (2001) が、下記の URL で利用可能です。

<http://www.mapblast.com>

5. むすび

私の関心は Light Field Rendering にあったのですが、刺激に溢れるラボで多くのことを学ぶことができました。少し脱線して、ラボの同僚にあたる Henrik 博士に教えてもらいながら「フォトンマッピング—実写に迫るコンピュータグラフィックス」という彼の名著の翻訳本をオーム社から出版しました。Light Field 関連をはじめとして、ここでは書ききれなかったことがたくさんあります。下記の URL で、ほとんどすべての論文、デモやライブラリ、コンペティションの結果、講義資料などが公開されています。是非、ご活用ください。

<http://graphics.stanford.edu>

東京大学工学部電子情報工学科

〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

TEL: 03-5841-6668

E-MAIL: naemura@hc.t.u-tokyo.ac.jp

URL: <http://www.hc.t.u-tokyo.ac.jp/~naemura>