

## 慶應 SFC における CG 教育

金井崇\* 脇田玲† 千代倉弘明\*

\*慶應義塾大学 環境情報学部 †慶應義塾大学 政策・メディア研究科

E-mail: {kanai/wakita/chiyo}@sfc.keio.ac.jp

本報告では、慶應義塾大学 SFC (湘南・藤沢キャンパス) における CG, 形状モデリング教育を総括し、特に CG 教育についての詳細を説明する。慶應 SFC では、CG の研究・開発に必要な基本ツールや理論、プログラミング技術、最先端技術などを広くカバーするようカリキュラムが組まれている。またこれらの教育に必要なインフラや環境についても説明する。

### Computer Graphics Educations in Keio SFC

TAKASHI KANAI\* AKIRA WAKITA† HIROAKI CHIYOKURA\*

\*Keio University, Faculty of Environmental Information

†Keio University, Graduate School of Media and Governance

E-mail: {kanai/wakita/chiyo}@sfc.keio.ac.jp

In this paper we review an overview of computer graphics / geometric modeling educations in Keio University SFC (Shonan-Fujisawa Campus). Lectures and practices for CG in Keio SFC include the study of basic tools and theories in the areas of mathematics and computer science, graphics programming techniques, the latest technologies, and so on. These are all needed for the research and development in computer graphics. In addition, we explain the infrastructure we use and the computational environment we prepare for these educations.

#### 1 はじめに

本報告では、慶應義塾大学湘南・藤沢キャンパス (SFC) におけるコンピュータグラフィクス (CG) 教育についての様々な試みと現状について説明する。本キャンパスでは、平成 13 年度からの大学院のプログラム制の移行に伴い大幅なカリキュラムの見直しが行われ、今年はその 1 年目にあたる。ここではその新カリキュラムの特徴と、新カリキュラムにおける CG/モデリング教育の位置づけ、そして、実際の CG 関係の講義・実習の詳細について述べたい。また、これらの講義・実習に使われている教材やインフラ・環境についても合わせて説明する。

#### 2 メディアデザインクラスタ

平成 13 年度より、大学院 (政策・メディア研究科) がプログラム制に移行したのに伴い、カリキュラムが大幅に改定された。専門性を高めるための拠点とすることを目的として、最先端の重点領域研究を 15 のクラスターに分類し、教員・学生はその中の最低 1 つの

クラスターに属している。この中で、CG やモデリングに関係する教員・大学院生は「メディアデザイン」クラスターに属している。メディアデザインクラスターは、デジタルコンテンツビジネスにおけるプロデューサーや CEO、クリエイティブディレクター、テクニカルディレクターや CTO を排出するためのプロフェッショナルスクールであり、スタジオ制とレビュー制の 2 つのシステムにより、専門的な研究活動を行っている。大学院の講義はなく、いくつかの科目で学部との共通科目となっている。

#### 3 カリキュラムについて

CG 系の講義の詳細を述べる前に、慶應 SFC 独自のカリキュラムについて述べたい。

慶應 SFC では、そのキャンパスの理念から、多くの大学で採用されている (と思われる)、まず基礎を勉強し最後にそれを応用して卒業研究を行う「基礎積上げ型」のカリキュラムを採用していない。これは、実社会における最先端の問題の多くは複数分野にまたがるため、そもそもどのような基礎知識が必要なのかと

いうこと自体、実際に問題に取り組んでみないとわからないことが多い、ということからである。

そのかわり、プロジェクト中心のカリキュラムを採用している。すなわち、クラスターや研究プロジェクト(研究会、といった方が通りがよいかもしれない)の中から最も自分が興味のあるものを見つけ、それを遂行するために必要な基礎知識や技術を、授業や自習を通して並行して学ぶ、というスタイルである。研究会も2年次から所属(履修)可能である。

このため、カリキュラムは非常に自由度の高いものとなっている。講義・実習は、大まかに外国語科目、汎用科目、専門科目、クラスター科目の4つに分けることができる。それぞれ科目によって難易度もまちまちであるが、学生は、基本的には学年によらずどの科目も自由に選ぶことができる。いわば自分の興味とレベルにあわせた履修ができるのである。例えば1年生でもクラスター科目をとることができれば、大学院生でも基本的な科目を履修することが可能なシステムになっている。また、学部(総合政策学部、環境情報学部)間によるカリキュラムの違いはほとんどないといつて良い。

各教員は、最低でも年に4コマ担当することになっているが、講義の内容は特に専門科目やクラスター科目ではその内容は教員の裁量にまかされている。また、専任の教員以外でも、他大学・企業の方や大学院の博士課程の学生が非常勤講師として教鞭にたつことで、全体的に学生数に対する教員の数は多いと思われる。

## 4 CG系基礎科目

ここではCG系の基礎科目について述べる。この基礎科目は、CGのプログラミングの導入科目のグラフィックスプログラミングと、CGシステム開発論の二つがある。グラフィックスプログラミングに関しては[1]を参考にされたい。ここではCGシステム開発論について説明する。

### 4.1 CGシステム開発論

CGシステム開発論は、CGシステムの開発・コーディングに必要な知識や技術の導入についての講義・実習を行っている。具体的には、データ構造とアルゴリズム、グラフ理論、計算幾何学、デジタル幾何学、空間幾何学といったCGの背景にある数学、計算機科学の理論やツールを、CGを題材にして学ぶことを主眼としている。

これらのトピックは、実は他の講義でも一部行われ

ている。例えば、「データ構造とプログラミング」という実習科目が独立して存在する。にもかかわらず、本講義で上記の数学的な理論の学習を含めている理由として、一つに受講者の知識レベルがまちまちであることが挙げられる。前述のカリキュラムの特徴により、自由に科目を選択した1年生から4年生までの受講者がいるため、どの科目を事前に履修しているかが予測できないからである。「前提科目」というものを設定することで、ある程度は履修者を絞ることはできるが、取るか取らないかは自由である。また、大学入試の影響も大きいと考えられる。SFCでは数学は選択科目であり、必ずしも全員が高校数学をきちんと学んでいるとは限らないからである。CGでは数学の知識は必須である、という考えから、このような科目を設置した次第である。

この科目は、講義と実習半々により進められる。授業の前半で、理論と課題の説明を行い、後半はプログラミング実習の時間にあてている。課題は、サンプルプログラムを穴埋めするような形の通常課題と、その応用として難易度の高いエクストラ課題とに分けている。なお、グラフィックスのプログラミングについては、必要になった時点でその都度説明を行っている。以下に半期分のシラバスを示す。また、図1に、課題の一例である、四分木データ構造を示す。これは、

円上にランダムに点を与えたとき、点を格納するための四分木データ構造を実装し、表示せよ。

という通常課題の解答例である。ちなみに、このときのエクストラ課題は、

ポリゴンを八分木構造により格納し、ある点群との距離を計算するプログラムを書け。

である。

#### CGシステム開発論 シラバス(全13回)

- 第1回 総論 CGシステムの開発に必要な数学的知識、技術についての導入を行う。データ構造、アルゴリズム、グラフ理論、デジタル幾何学および計算幾何学とCGへの結びつきや、それぞれの項目の基本概念について解説する。
- 第2回 線形構造 線形リスト、スタックと待ち行列について学び、文字列処理を行う。
- 第3回 木構造 木構造について学ぶ。二分木や四分木による空間分割法について解説する。
- 第4回 ソーティング ソーティングについて学ぶ。選択法(ヒープソート)、挿入法(シェルソート)、交換法(クイックソート)、またその応用について解説する。
- 第5回 データ探索 データ探索について学ぶ。二分探索

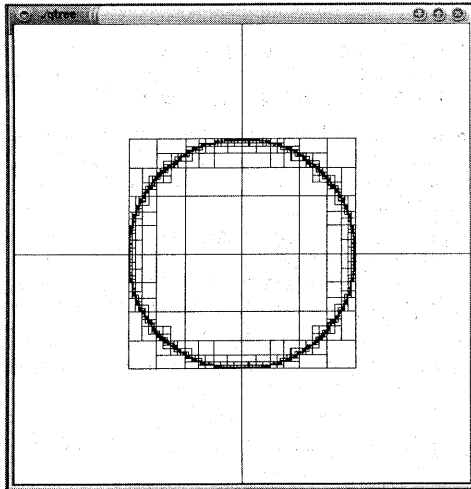


図 1: 四分木データ構造の実装

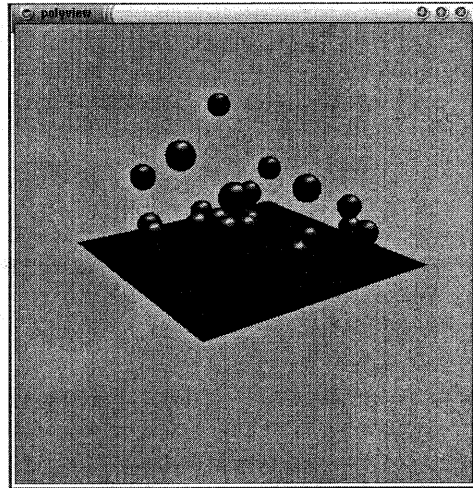


図 2: ボールの衝突アニメーション

法, ハッシュ法, B 木など。

第 6 回 グラフ理論 グラフ理論の基礎について学ぶ。その構造と彩色, 極値問題, 数え上げ, マッチング問題など。

第 7 回 ポリゴンの隣接データ表現 グラフ理論の実装の例として, ポリゴンのデータ構造の生成と探索の実装を行う。

第 8 回 計算幾何学 (1) 計算幾何学の基本的手法とデータ構造, 重なりと凸包, 幾何的探索問題について学ぶ。

第 9 回 計算幾何学 (2) 多角形問題, 幾何的最適化問題, Voronoi 図と Delaunay 網について学ぶ。

第 10 回 デジタル幾何学 (1) ラスタグラフィックス処理の基本について学ぶ。線や円のスキャン変換など。

第 11 回 デジタル幾何学 (2) ラスタグラフィックス処理の続き。塗り潰し, クリッピング, アンチエイリアシング, など。

第 12 回 空間幾何学 (1) 空間幾何について学ぶ。ベクトル空間, アフィン空間, 内積と距離, マトリックスについて学ぶ。

第 13 回 空間幾何学 (2) 線形変換とアフィン変換, 固有値と固有ベクトルについて学ぶ。

いう目的で行っているのに対し, 本実習は, プログラミングを通じて, CG のアルゴリズムの設計, 実装のための学習をその目的とする。より高度な内容であり, グラフィックスプログラミングを既に履修していることを前提としている。

内容は主に画像処理, 2D 描画, 3D 描画である。3D 描画は, 一つは OpenGL によるリアルタイム・インタラクティブ CG の基本的な実装方法の学習と, それを利用したモデリング・アニメーションプログラムの作成, もう一つはレイトレーシングの実装の二つからなる。レイトレーシングは, [2] のソースコードの学習と, 高速化のための拡張を行っている。

以下に CG プログラミングのシラバスを示す。また図 2 には, 課題の一つである, ボールの衝突アニメーションの実装例を示す。この図の例のように, プログラミングそのものよりもむしろ, CG アルゴリズムの原理の理解と設計に重点が置かれているのが特徴である。

#### CG プログラミングシラバス (全 13 回)

第 1 回 環境構築・プログラミング復習 ノート PC への環境構築と C 言語プログラムのおさらいをする。

第 2 回 画像表示 画像を表示するための基本プログラムを作成する。入出力処理についても行う。

第 3 回 基本画像処理 グレースケール変換やコントラスト変換, 減色処理など, 基本的な画像処理プログラムを作成する。

第 4 回 フィルタリング処理 エッジ抽出等のフィルタリング処理, 画像のモーフィングのプログラムを作成する。

第 5 回 イベント処理 マウス・キーボードによるイベント処理をプログラム実装する。

## 5 CG 系専門科目

CG 系の専門科目は, 実習形式の CG プログラミングと, 講義形式のリアルタイム CG 技術論の二つに分かれる。以下にそれぞれの授業について説明する。

### 5.1 CG プログラミング

グラフィックスプログラミングが, プログラミングの基礎とコンテンツ作成のプロセスの学習の導入, と

- 第6回 2D 表示 二次元の線や多角形の描画を行う。応用として、自己相似図形の描画を行う。
- 第7回 基本 3D 表示 平面や球、円錐などの簡単なオブジェクトの表示プログラムを作成する。また、平行・透視投影、オブジェクトの回転・移動方法について学ぶ。色立体を作成する。
- 第8回 3D 制御 カメラ制御、ライトや色、材質の付加方法について学ぶ。
- 第9回 ポリゴン表示 ポリゴンの線画、フラットシェーディングプログラムを作成する。ポリゴンデータ構築に色や材質情報を追加、表示する。
- 第10回 テクスチャマッピング テクスチャマッピングプログラムを作成する。テクスチャ座標の計算方法について学ぶ。
- 第11回 アニメーション オブジェクトを移動・変形するためのアニメーションプログラムを作成する。
- 第12回 レイトレーシング(1) レイトレーシングの基本プログラムを作成する。
- 第13回 レイトレーシング(2) レイトレーシングの基本プログラムに、陰などの効果を付加する。また高速化を行う。

## 5.2 リアルタイム CG 技術論

リアルタイム CG 技術論は、CG をリアルタイムで処理するために必要な理論および技術について、講義形式で概説している。これまでの CG の基本的な理論の概説に始まり、LOD やカリングなどのレンダリング制御技術、さらに画像を利用した表示技術など、特にレンダリングやアニメーションを中心に最新の理論や技術について広く浅く学ぶことを主眼としている。本講義では、SIGGRAPH の Paper Session のビデオや、リアルタイム CG デモ等を流したり、演習問題として CG 検定の問題を授業中に解かせ、解説するなど、講義だけの画一的な授業にならないよう努めている。以下にシラバスを示す。

### リアルタイム CG 技術論 シラバス (全 13 回)

- 第1回 導入 講義内容の説明等。色について、色モデル。
- 第2回 幾何変換と投影変換 行列による回転・平行移動・拡大縮小などの座標変換、同次座標、投影法、カメラモデル。
- 第3回 レンダリング(1) 陰線・陰面消去アルゴリズム (Z バッファ法、スキャンライン法)、シェーディングモデル、光源。
- 第4回 レンダリング(2) 大域的シェーディング (レイトレーシング、ラジオシティ法、フォトンマップ) およびその高速化手法。
- 第5回 レンダリング(3) マッピング技術。テクスチャマッピング、テクスチャ座標の生成手法、バンプマッピング、法線マップ、環境マップ、3D テクスチャ、マルチテクスチャ、ライトマップ、シャドウマップ
- 第6回 レンダリング(4) 画像を利用したレンダリング技術。ボリュームレンダリング。画像のモーフィ

グ、イメージベースレンダリング。

- 第7回 モデリング 形状表現手法。代数表現、パラメトリック表現、ソリッドモデル、CSG、ポリウム、パーティクル、メタボール、フラクタル。
- 第8回 コンピュータアニメーション キーフレーム補間、FFD、モーフィング、物理法則アニメーション、人体アニメーション、モーションキャプチャー、IK、顔のアニメーション。
- 第9回 メッシュデータ表現と処理技術(1) メッシュデータ表現とレンダリング。レンジデータからのメッシュ生成・再構築、レンダリングアーキテクチャー、レンダリングのためのメッシュ表現、ストリップ・ファン表現、頂点キャッシュ。
- 第10回 メッシュデータ表現と処理技術(2) 多重解像度表現とレンダリング その1. カリング、シーンの階層化、メッシュ簡略化、LOD。
- 第11回 メッシュデータ表現と処理技術(3) 多重解像度表現とレンダリング その2. プログレッシブメッシュと連続 LOD レンダリング。細分割接続性、再メッシュ化、細分割曲面。
- 第12回 3D データの圧縮、透かし、検索、Web3D 3D データ (メッシュ) の圧縮、透かし、検索、VRML、プログレッシブ転送、Web3D 技術と応用。
- 第13回 リアルタイムレンダリング デモ紹介 リアルタイムレンダリングのデモ紹介 (nVIDIA デモ、3D Mark 2001 など)、解説。ピクセルシェーダー、頂点プログラムなど。

## 6 インフラとプログラミング環境

ここでは、慶應 SFC の CG の講義・実習に使われているインフラおよび環境について説明する。慶應 SFC では、大学入学時にノート PC を購入する学生の割合が非常に高いのと、ITC (インフォメーション・テクノロジー・センター) によるノート PC のレンタルも可能である。特に実習形式の授業では、課題を授業時間以外でもできるよう、ノート PC を積極的に利用するような環境を用意している。

### プログラミング環境

各講義・実習の第1回目の授業時間に、まず実習に必要なプログラミング環境の構築を行う。手軽かつ安価にプログラミングが行えることから、我々は cygwin [3] (Windows 上で UNIX のコマンドが実行できる環境) をベースにしている。例えば、グラフィックスプログラミングでは、cygwin に SGL (SFC Graphics Library) (モデリング教育の原稿を参照のこと) を含めたインストーラを用意している。cygwin は每学期新しいものに入れ替えているが、日々開発が進められていることから、バージョンによっては不安定なものもあるので、注意が必要である。また、受講者に

よってノート PC の OS がまちまちであり (Windows 98/Me/2000), インストール時には必ずといっていいほど何らかのトラブルが起こる。あらかじめ予測できない不具合に関しては, 講義中に個別に対応している。

#### プログラミング言語

プログラミング言語としては, C 言語を使用している。コンパイラは基本的には cygwin 付属の gcc を用いている (履修者によっては C++ で課題を提出する人もいる)。グラフィックスのプログラミング教育という観点から考えると, 利用できるサンプルソースが豊富で, 学生が理解するためのリソースが多いのがその理由である。ただ, 最近 Java でも Java3D, GL4Java などライブラリが増えつつあり, これらのライブラリを用いた教育を今後検討していく予定である。

#### グラフィックスライブラリ

グラフィックスライブラリは, OpenGL + GLUT を利用している。これらのライブラリは, 以前は別に用意する必要があったが, cygwin の最近のバージョンでは, 始めからライブラリが標準で付属している。グラフィックスプログラミングで利用している SGL は, GLUT にコマンドが似ており, 導入として SGL を学んだ学生が, 次の段階でこれらのライブラリを違和感なく利用することができる。

#### ネットワーク環境

キャンパス内の教室の半分以上は, 有線 LAN や液晶プロジェクタを完備しており, これらの機材を使うことが前提となっている。また, 2000 年 8 月より IEEE 802.11b 準拠の無線 LAN のアクセスポイントがキャンパス内 105 箇所に設置され, ほぼすべての教室でも利用可能となっている。このため, 講義の形態はネットワークに大きく依存した形になっている。

#### 講義・ホームページ

講義の題材や課題は, すべて教官が各自用意する講義のホームページにアップロードしている。講義は基本的に Powerpoint によるプレゼンテーションが中心だが, 学生は, 授業時間内外含めホームページにあるこれらの資料を見ながら授業・自習を進めることができる。また, 講義資料等を Web 上に置くことのできる WLS (Web Learning System) や課題提出を Web 上で行うためのレポートシステムなど, 大学でこれらのシステムを構築・サポートする動きも見られる。

#### 課題提出・質問

課題は, 現状では電子メールによる提出のみ受け付けている。また講義の質問も, 講義の時間外でも電子メールにより常時行うことができるようにしている。課題提出用, 質問用の ML (メーリングリスト) は大学のネットワーク管理部門 (CNS) により用意しており, 申請することで利用することができる。

#### TA・SA

各講義につき最大で TA (Teaching Assistant, 大学院生が担当) 1 人, SA (Student Assistant, 学部生が担当) 2 人までを授業の補助としてつけることができる (アルバイト代は大学から支給される)。主に, 講義ホームページの作成やプログラミングの補助, 受講者からの質問に対する返答, 課題の集計等を担当する。

## 7 おわりに

本稿では, 慶應 SFC における CG 教育について報告した。基礎科目では, CG の理論的背景となる数学や計算機科学をいかにして織り交ぜるか, そして専門科目では, いかにして CG/モデリング研究に興味を持たせるか, に重点をおいており, その一例としての科目の詳細を述べた。新カリキュラムの 1 年目とあって, 今後は講義の質を高めるための教材のより一層の充実を図りたいと考える所存である。

また, CG の講義・実習を行うためのインフラやプログラミング環境について述べた。質の高い講義・実習を行うためには, 特に教材やツール等の環境の整備が重要であることを痛感している次第である。幸いにして, 慶應 SFC は, インフラの面では抜群に良く, また教員数も多いことから, きめ細やかな学習ができるものと確信している。

#### 参考文献

- [1] 脇田玲, 千代倉弘明, 三浦憲二郎, 金井崇. 慶應 SFC におけるモデリング教育. 情報処理学会 第 106 回グラフィックスと CAD 研究会, February 2002.
- [2] 千葉則茂, 村岡一信 (編). C による CG レイトレーシング. サイエンス社, 1991.
- [3] Cygwin. <http://www.cygwin.com>.