

# CG 教育のための知識の体系化

宮崎 大輔<sup>\*1</sup> 結城 修<sup>\*2</sup> 床井 浩平<sup>\*3</sup> 吉田 典正<sup>\*4</sup> 金森 由博<sup>\*5</sup>

\*1 広島市立大学 〒731-3194 広島県広島市安佐南区大塚東 3-4-1

\*2 キヤノン株式会社 〒146-8501 東京都大田区下丸子 3-30-2

\*3 和歌山大学 〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷 930

\*4 日本大学 〒102-8275 東京都千代田区九段南 4-8-24

\*5 筑波大学 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: miyazaki@hiroshima-cu.ac.jp, yuuki\_osamu@yahoo.co.jp,  
tokoi@wakayama-u.ac.jp, norimasa@acm.org, kanamori@cs.tsukuba.ac.jp

あらまし この数十年で CG の技術は大きく発展した。多岐に渡る技術が開発され、技術の進歩に追従するのも難しくなってきた。そのため、これまでの CG 技術を網羅的に体系化し、知識と技術を整理する必要がある。そのようにまとめられた知識をもとに教育をし、次代の CG 技術者を育てることが、CG 技術のさらなる発展に必要不可欠である。本稿では、CG の知識を集積し、分かりやすく解説した文章を作成した我々の取り組みを紹介する。なお、その文書は書籍として発行し、多くの人が CG 教育に活用できるようにする。

キーワード CG, 教育, 教科書, 体系化

## Knowledge Systematization for CG Education

Daisuke MIYAZAKI<sup>\*1</sup> Osamu YUUKI<sup>\*2</sup> Kohe TOKOI<sup>\*3</sup>  
Norimasa YOSHIDA<sup>\*4</sup> and Yoshihiro KANAMORI<sup>\*5</sup>

\*1 Hiroshima City University, 3-4-1 Otsukahigashi Asaminami-ku Hiroshima 731-3194

\*2 Canon Inc., 3-30-2 Shimomaruko Ota-ku Tokyo 146-8501

\*3 Wakayama University, 930 Sakaedani Wakayama 640-8510

\*4 Nihon University, 4-8-24 Kudanminami Chiyoda-ku Tokyo 102-8275

\*5 University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai Tsukuba-shi Ibaraki 305-8577

E-mail: miyazaki@hiroshima-cu.ac.jp, yuuki\_osamu@yahoo.co.jp,  
tokoi@wakayama-u.ac.jp, norimasa@acm.org, kanamori@cs.tsukuba.ac.jp

**Abstract** In the last few decades, CG technology has evolved significantly. A wide variety of technologies have been developed, and it is becoming difficult to keep up with technological advances. Therefore, it is necessary to systematize existing CG technology comprehensively and to organize knowledge and technology. Educating the next generation of CG engineers using our collected knowledge is important for further development of CG technology. In this report, we introduce how we have collected CG knowledge and how we have gathered them as a document. The document will be published as a book so that many people can use it for CG education.

**Keyword** CG, Education, Textbook, Systematization

### 1. はじめに

本稿では、2020年4月下旬頃の発行を予定している、コンピュータグラフィックスの教科書を解説する。当該書籍は、オーム社から発行される「コンピュータグラフィックスの基礎」というものである。

2003年12月、情報処理学会 IT Text シリーズの1つとして「コンピュータグラフィックス」[1]がオーム社より発売された。刊行から16年経ち、CG分野を取巻く環境は大きく変化した。そのため、内容の大幅な刷

新を余儀なくされた。時代を経ても変わらず必要な基礎知識はもちろん、近年の技術にも言及し、時代に即したCGの教科書に改訂した。

2016年8月、執筆陣が一同に会する打ち合わせがおこなわれた。情報処理学会教科書編集委員（当時）の坂下を除けば、当時と現在の執筆陣で共通する者は、宮崎と吉田と結城のみである。他に4~5人の執筆者候補がいたが、後日、執筆に加わることを断られた。そのため、新たに執筆を担当する人を探す必要性がで

たため、各方面に声かけをして執筆者を探した。2017年3月、床井と金森が執筆陣に加わることで、現在の執筆陣となった。2019年1月、金森が多忙により執筆を断念したため、金森が作成途中であった章は、宮崎が引き継いで担当することとなった。4年間の期間を経て、拙著がようやく日の目を見たのである。

拙著は、情報処理学会編集のIT Textシリーズの一巻である。拙著の執筆にかかる企画は情報処理学会教科書編集委員会で発案されたものである。拙著の企画の担当は元湘南工科大学の教授である坂下善彦氏である。

## 2. 内容紹介

旧版[1]と新版の違いとしては旧版の「第2章 OpenGLによるプログラミング」がある。旧版では、OpenGLを使ったサンプルプログラムが各所に掲載された作りになっている。そのため、ソースコードとその解説、OpenGLのインストール方法などにページ数を割かれ、肝心のCGの基礎知識の説明が不足していた。そこで、新版ではOpenGLによるソースコードは載せないこととした。レイトレーシング法など、OpenGLでの実装に向かないアルゴリズムもあることも理由の一つである。また、OpenGLを用いた学習ということであれば、OpenGLプログラミングに特化した書籍を利用したほうがいいことも理由である。もちろん、アルゴリズムの理解のため、ソースコードを載せることは有用であるため、擬似ソースコードを載せるということはおこなっている。

拙著の第1章・第11章を結城、第4章・第5章を吉田、第2章・第3章・第10章を床井、第6章・第7章・付録を宮崎、第8章・第9章を宮崎と金森が担当した。

### 2.1. コンピュータグラフィックスの概要(第1章)

この章では、グレースケール画像とカラー画像、画素やカラー画像の色表現について紹介している。ベクタスキャンやラスタスキャン、フレームレートについてもこの章で紹介している。

### 2.2. 座標変換(第2章)

2次元および3次元における、平行移動、拡大縮小、回転などについて説明している。同次座標やアフィン変換なども載っている。

この章では、オイラー変換からオイラー角を計算する方法も紹介している。オイラー変換  $M$  は次式で表される。

$$M = \begin{pmatrix} m_0 & m_4 & m_8 \\ m_1 & m_5 & m_9 \\ m_2 & m_6 & m_{10} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$m_0 = \sin h \sin p \sin r + \cos h \cos r$$

$$m_4 = \sin h \sin p \cos r - \cos h \sin r$$

$$m_6 = \cos h \sin p \cos r + \sin h \sin r$$

$$m_2 = \cos h \sin p \sin r - \sin h \cos r$$

$$m_1 = \cos p \sin r \quad m_5 = \cos p \cos r$$

$$m_8 = \sin h \cos p \quad m_{10} = \cos h \cos p \quad m_9 = -\sin p$$

ここで、回転行列  $M$  からオイラー角  $h, p, r$  を計算しよう。このとき、 $r$  は  $m_1$  と  $m_5$  の関係から、式(2)で計算できる。

$$r = \tan^{-1} m_1/m_5 \quad (2)$$

同様に、 $h$  は  $m_8$  と  $m_{10}$  の関係から、式(3)で計算できる。

$$h = \tan^{-1} m_8/m_{10} \quad (3)$$

また、 $p$  は  $m_9$  から計算する。

$$p = \sin^{-1}(-m_9) \quad (4)$$

### 2.3. 3次元図形処理(第3章)

この章では、直交投影や透視投影などの投影変換について解説している。図1は視錐台を説明する図である。デプスソート法やデプスバッファ法などの隠面消去アルゴリズムもこの章の担当である。

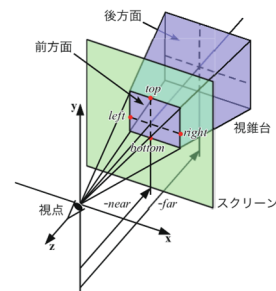


図1 視錐台

### 2.4. 3次元形状表現(第4章)

この章では、ワイヤフレームモデル、サーフェスモデル、ソリッドモデルの説明をおこなう。スイープや自由形状変形、ボクセルやメタボールなどについても説明する。ハーフエッジデータ構造については、そのデータ構造をオブジェクト指向言語で表現したものも掲載している(図2)。

```

class Solid {
    Face *pf;
    Edge *pe;
    Vertex *pv;
};
class Face {
    Solid *ps;
    Halfedge *ph;
    Vector4D planeCoeff;
};
class Edge {
    Halfedge *ph1;
    Halfedge *ph2;
};
class Halfedge {
    Edge *pe;
    Vertex *pv;
    Face *pf;
    Halfedge *phccwf;
    Halfedge *phcwf;
};
class Vertex {
    Halfedge *ph;
    Vector3D coordinates;
};

```

図 2 ハーフエッジデータ構造

## 2.5. 自由曲線・自由曲面 (第 5 章)

この章では、ベジェ曲線や B-スプライン曲線などの自由曲線を説明したのち、自由曲面を説明する。

3 次 B-スプライン曲線の制御点  $P(1,2,3)$ ,  $P(2,3,4)$ ,  $P(3,4,5)$ ,  $P(4,5,6)$  から、3 次ベジェ曲線の制御点  $P(3,3,3)$ ,  $P(3,3,4)$ ,  $P(3,4,4)$ ,  $P(4,4,4)$  を計算する例も紹介する。例えば、 $P(3,3,4)$  は  $P(2,3,4)$  と  $P(3,4,5)$  により、以下の式で計算される。

$$P(3,3,4) = \frac{2}{3}P(2,3,4) + \frac{1}{3}P(3,4,5) \quad (5)$$

## 2.6. 質感付加 (第 6 章)

この章では、テクスチャマッピングや環境マッピングなどを紹介する。法線マッピングに使用する法線データは以下のように変換した画像をテクスチャデータとして使用することが多い。

$$R = 255 \frac{x+1}{2}, G = 255 \frac{y+1}{2}, B = 255 \frac{z+1}{2} \quad (6)$$

## 2.7. 反射モデル (第 7 章)

この章では、ランバート反射モデルやフォン反射モデルやウォード反射モデルなどを紹介している。表面

下散乱としてはダイポールモデルを紹介している (図 3)。

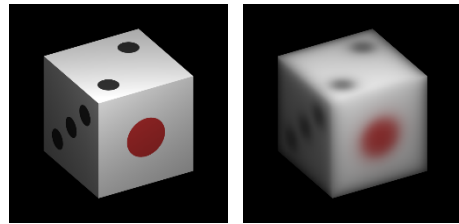


図 3 表面下散乱のレンダリング例

## 2.8. 照明計算 (第 8 章)

この章では、影付けのアルゴリズムとしてシャドウマッピング法とシャドウボリューム法を解説している。また、イメージベースドライティングにおいてライトプローブ画像の低周波成分を表現する手法として球面調和関数を紹介している。

図 4 は、ラジオンティ法の実装が正しいかどうかを確認する方法の一例を紹介している。なお、 $r$  はパッチ  $i$  上の点とパッチ  $j$  上の点の間の距離である。 $H$  は可視性を表す変数である。パッチ  $i$  上の点とパッチ  $j$  上の点を結んだ線分と、それぞれの法線とのなす角は、パッチ  $i$  に関しては  $\varphi_{dAi}$ 、パッチ  $j$  に関しては  $\varphi_{dAj}$  と表している。

(1)  $\cos \varphi_{dAi}$  のみを使って計算した画像を見て、光源方向と物体表面の法線が正対している点ほど明るく、光源方向と法線が斜めに傾くほど暗くなっているか確認する。

(2)  $\cos \varphi_{dAj}$  について、物体表面の点から見たとき、光源に正対する角度から見ると光源の面積は大きいので明るくなり、光源に対して斜めから見るような点においては、暗くなるという性質が表現されているかを確認する。

(3)  $1/r^2$  については、光源から離れれば離れるほど明るさが減少していく様子を確認する。

(4)  $H$  については、光が当たっていない点は影になっているかを確認する。

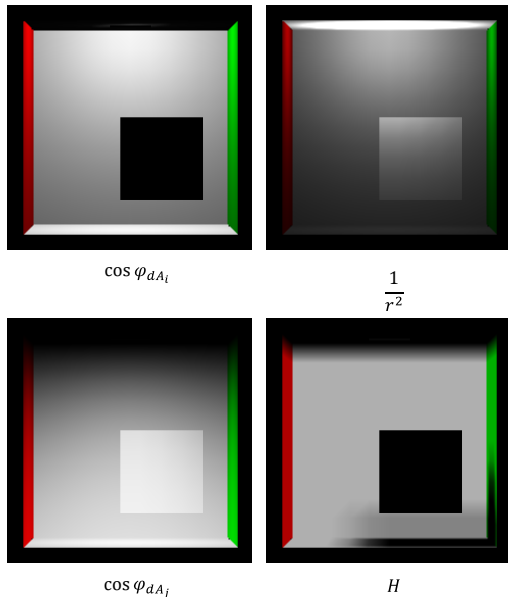


図4 ラジオシティ法の各要素の性質

## 2.9. レイトレーシング(第9章)

レイトレーシング法の理解に必要な、スネルの法則やフレネルの式などについて説明している。図5はパストレーシングのアルゴリズムを擬似コードで表したものである。

```

パストレース(レイ, 探索回数)
  if 探索回数が上限 then return 黒
  if レイが物体と当たらない then return 黒
  レイ ← 新たなレイをランダムに生成
  return 放射光 + 反射率 × パストレース(レイ, 探索回数+1)

レンダラー()
  for 画素
    画素の色 ← 黒
    for サンプル数
      画素の色 ← 画素の色
        + パストレース(その画素の方向を表すレイ, 0)
    画素の色 ← 画素の色 ÷ サンプル数
  
```

図5 パストレーシング

## 2.10. アニメーション(第10章)

キーフレームアニメーションやキャラクターアニメーションはこの章で紹介する。カメラアニメーションやモーフィングにも触れる。柔軟体のアニメーションとしては、ばねダンパモデル、糸のモデル、布のモデルなどを解説する。

以下のナビエ・ストークス方程式という運動方程式にもとづいて粒子の運動を求めることで流体のシミュレーションをおこなうことができることも述べる。

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{g} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{v}$ は流体の速度、 $\rho$ は流体の密度、 $p$ は流体の圧力、 $\nu$ は流体の動粘性係数、 $\mathbf{g}$ は外力の加速度である。

## 2.11. コンピュータグラフィックスの歴史と最新動向(第11章)

Sage Air Defence System やスケッチパッドなど、初期の技術から現代に至るまでの歴史を紹介している。1973年のフォン反射モデル、1974年のZバッファ法、1984年のラジオシティ法、1988年のポリウムレンダリング、1992年のOpenGL、1996年のフォトンマッピング、など、CGの発展した歴史をたどっていく。最終的に、近年のxR (AR, VR, MR)、そして最近話題のディープラーニングまで概観する。

## 3. おわりに

拙著と同様、CGの座学の授業で利用されている教科書としては旧版[1]のほか、藤代ら[2]、西田[3]、伊藤[4]、小堀ら[5]、佐藤[6]の書籍などがある。本稿では、これらの書籍との比較は割愛する。教科書は優劣をつけられるものではない。拙著がCG教育全体にとってプラスになることを願っている。

多くの著者により長い期間を費やして作成された本であるが、内容に未熟な点があることは著者ら自身がよく分かっている。拙著の内容に不備などを見つけた際は、ぜひ指摘していただけるとありがたい。

## 文献

- [1] 魏大名, 先田和弘, Roman Durikovic, 向井信彦, Carl Vilbrandt, "コンピュータグラフィックス (IT Text)," オーム社, 東京 (2003)
- [2] ---, "コンピュータグラフィックス [改訂新版]," 画像情報教育振興協会, 東京 (2016)
- [3] 西田友是, "コンピュータによる画像生成," 大学教育出版, 岡山 (1999)
- [4] 伊藤貴之, "CGとビジュアルコンピューティング入門 (Computer Science Library)," サイエンス社, 東京 (2006)
- [5] 小堀研一, 金谷孝之, 西尾孝治, 藤村真生, 手島裕詞, "演習で学ぶコンピュータグラフィックス基礎," 共立出版, 東京 (2011)
- [6] 佐藤淳, "コンピュータグラフィックス (情報工学レクチャーシリーズ)," 森北出版, 東京 (2017)