

メディア学大系

12

CG 数理の基礎

柿本 正憲

著



コロナ社

メディア学大系 編集委員会

監修

〈第1期〉

相川 清明 (元東京工科大学, 工学博士)

飯田 仁 (元東京工科大学, 博士 (工学))

〈第2期〉

相川 清明 (元東京工科大学, 工学博士)

近藤 邦雄 (東京工科大学, 工学博士)

〈第3期〉

大淵 康成 (東京工科大学, 博士 (情報理工学))

柿本 正憲 (東京工科大学, 博士 (情報理工学))

編集委員

稲葉 竹俊 (東京工科大学)

榎本 美香 (東京工科大学, 博士 (学術))

太田 高志 (東京工科大学, 博士 (工学))

大山 昌彦 (東京工科大学)

菊池 司 (東京工科大学, 博士 (工学))

榊 俊吾 (東京工科大学, 博士 (社会情報学))

佐々木 和郎 (東京工科大学)

進藤 美希 (東京工科大学, 博士 (経営管理))

寺澤 卓也 (東京工科大学, 博士 (工学))

藤澤 公也 (東京工科大学, 博士 (政策・メディア))

松永 信介 (東京工科大学, 博士 (理学))

三上 浩司 (東京工科大学, 博士 (政策・メディア))

「メディア学大系」刊行に寄せて

ラテン語の“メディア（中間・仲立ち）”という言葉は、16世紀後期の社会で使われ始め、20世紀前期には人間のコミュニケーションを助ける新聞・雑誌・ラジオ・テレビが代表する“マスメディア”を意味するようになった。また、20世紀後期の情報通信技術の著しい発展によってメディアは社会変革の原動力に不可欠な存在までに押し上げられた。著名なメディア論者マーシャル・マクルーハンは彼の著書『メディア論—人間の拡張の諸相』（栗原・河本訳、みすず書房、1987年）のなかで、“メディアは人間の外部環境のすべてで、人間拡張の技術であり、われわれのすみからすみまで変えてしまう。人類の歴史はメディアの交替の歴史ともいえ、メディアの作用に関する知識なしには、社会と文化の変動を理解することはできない”と示唆している。

このように未来社会におけるメディアの発展とその重要な役割は多くの学者が指摘するところであるが、大学教育の対象としての「メディア学」の体系化は進んでいない。東京工科大学は理工系の大学であるが、その特色を活かしてメディア学的一端を学部レベルで教育・研究する学部を創設することを検討し、1999年4月世に先駆けて「メディア学部」を開設した。ここでいう、メディアとは「人間の意思や感情の創出・表現・認識・知覚・理解・記憶・伝達・利用といった人間の知的コミュニケーションの基本的な機能を支援し、助長する媒体あるいは手段」と広義にとらえている。このような多様かつ進化する高度な学術対象を取り扱うためには、従来の個別学問だけで対応することは困難で、諸学問横断的なアプローチが必須と考え、学部内に専門的な科目群（コア）を設けた。その一つ目はメディアの高度な機能と未来のメディアを開拓するための工学的な領域「メディア技術コア」、二つ目は意思・感情の豊かな表現力と秘められた発想力の発掘を目指す芸術学的な領域「メディア表現コ

ii 「メディア学大系」刊行に寄せて

ア」, 三つ目は新しい社会メディアシステムの開発ならびに健全で快適な社会の創造に寄与する人文社会学的な領域「メディア環境コア」である。

「文・理・芸」融合のメディア学部は創立から13年の間, メディア学の体系化に試行錯誤の連続であったが, その経験を通して, メディア学は21世紀の学術・産業・社会・生活のあらゆる面に計り知れない大きなインパクトを与え, 学問分野でも重要な位置を占めることを知った。また, メディアに関する学術的な基礎を確立する見通しもつき, 歴年の願いであった「メディア学大系」の教科書シリーズ全10巻を刊行することになった。

2016年, メディア学の普及と進歩は目覚ましく, 「メディア学大系」もさらに増強が必要になった。この度, 視聴覚情報の新たな取り扱いの進歩に対応するため, さらに5巻を刊行することにした。

2017年に至り, メディアの高度化に伴い, それを支える基礎学問の充実が必要になった。そこで, 数学, 物理, アルゴリズム, データ解析の分野において, メディア学全体の基礎となる教科書4巻を刊行することにした。メディア学に直結した視点で執筆し, 理解しやすいように心がけている。また, 発展を続けるメディア分野に対応するため, さらに「メディア学大系」を充実させることを計画している。

この「メディア学大系」の教科書シリーズは, 特にメディア技術・メディア芸術・メディア環境に興味をもつ学生には基礎的な教科書になり, メディアエキスパートを志す諸氏には本格的なメディア学への橋渡しの役割を果たすと確信している。この教科書シリーズを通して「メディア学」という新しい学問の台頭を感じとっていただければ幸いである。

2020年1月

東京工科大学
メディア学部 初代学部長
前学長

相磯秀夫

「メディア学大系」の使い方

メディア学は、工学・社会科学・芸術などの幅広い分野を包摂する学問である。これらの分野を、情報技術を用いた人から人への情報伝達という観点で横断的に捉えることで、メディア学という学問の独自性が生まれる。「メディア学大系」では、こうしたメディア学の視座を保ちつつ、各分野の特徴に応じた分冊を提供している。

第1巻『改訂メディア学入門』では、技術・表現・環境という言葉で表されるメディアの特徴から、メディア学の全体像を概観し、さらなる学びへの道筋を示している。

第2巻『CGとゲームの技術』、第3巻『コンテンツクリエイション』は、ゲームやアニメ、CGなどのコンテンツの創作分野に関連した内容となっている。

第4巻『マルチモーダルインタラクション』、第5巻『人とコンピュータの関わり』は、インタラクティブな情報伝達の仕組みを扱う分野である。

第6巻『教育メディア』、第7巻『コミュニティメディア』は、社会におけるメディアの役割と、その活用方法について解説している。

第8巻『ICTビジネス』、第9巻『ミュージックメディア』は、産業におけるメディア活用に着目し、経済的な視点も加えたメディア論である。

第10巻『メディアICT(改訂版)』は、ここまでに紹介した各分野を扱う際に必要となるICT技術を整理し、情報科学とネットワークに関する基本的なリテラシーを身に付けるための内容を網羅している。

第2期の第11巻～第15巻は、メディア学で扱う情報伝達手段の中でも、視聴覚に関わるものに重点を置き、さらに具体的な内容に踏み込んで書かれている。

第11巻『CGによるシミュレーションと可視化』、第12巻『CG数理の基礎』

では、視覚メディアとしてのコンピュータグラフィックスについて、より詳しく学ぶことができる。

第13巻『音声音響インタフェース実践』は、聴覚メディアとしての音の処理技術について、応用にまで踏み込んだ内容となっている。

第14巻『クリエイターのための映像表現技法』、第15巻『視聴覚メディア』では、視覚と聴覚とを統合的に扱いながら、効果的な情報伝達についての解説を行う。

第3期の第16巻～第19巻は、メディア学を学ぶうえでの道具となる学問について、必要十分な内容をまとめている。

第16巻『メディアのための数学』、第17巻『メディアのための物理』は、文系の学生でもこれだけは知っておいて欲しいという内容を整理したものである。

第18巻『メディアのためのアルゴリズム』、第19巻『メディアのためのデータ解析』では、情報工学の基本的な内容を、メディア学での活用という観点で解説する。

各巻の構成内容は、大学における講義2単位に相当する学習を想定して書かれている。各章の内容を身に付けた後には、演習問題を通じて学修成果を確認し、参考文献を活用してさらに高度な内容の学習へと進んでもらいたい。

メディア学の分野は日進月歩で、毎日のように新しい技術が話題となっている。しかし、それらの技術が長年の学問的蓄積のうえに成立しているということも忘れてはいけない。「メディア学大系」では、そうした蓄積を丁寧に描きながら、最新の成果も取り込んでいくことを目指している。そのため、各分野の基礎的内容についての教育経験を持ち、なおかつ最新の技術動向についても把握している第一線の執筆者を選び、執筆をお願いした。本シリーズが、メディア学を志す人たちにとっての学びの出発点となることを期待するものである。

2022年1月

柿本正憲
大淵康成

まえがき

本書は、コンピュータグラフィックス（CG）技術を学ぼうとする学部生を対象とした教科書である。世の中にあふれる膨大な映像のうちの多くはCGとして作られたものである。実写映像に見える映画作品でもかなりの部分がCGとの合成である場合が少なくない。本書はそのようなCGの原理を理解するための基礎固めとなる技術に焦点を当て、広い範囲をカバーしながらもトピックは絞り込み、それぞれをなるべく深く掘り下げて解説する。

技術系の読者、例えばプログラマーやシステムエンジニア志向の読者には常識として知っておいてほしいテーマを集めている。同時に、CGに何らかの関わりのある仕事を志す読者あるいはCG制作に興味のあるクリエイター志望の学生、さらにはすでに実務に従事する若手クリエイターにとっても長く活用できる教科書となることを目指した。

1章ではコンピュータ処理の流れに沿ったCG技術の全体像を示し、画像や色や図形という、CGにおいて重要な情報のデジタルデータによる表現や表記について説明する。

2章は図形をどのようにデジタル画像として表示するかがテーマである。古典物理学で言えば原子や分子に相当する構成単位である線分、三角形が画面上に展開される過程（アルゴリズム）を詳細に学ぶ。

3章は物体データとしての図形を思い通りに操作するための数学的な道具である座標変換（幾何学的変換）を説明する。図形の配置のみならず、3次元の物体データを2次元の画面に図形として投影する手段も座標変換である。加えて画像に対する幾何学的変換も解説する。

4章は3次元物体データすなわち形状モデルをCGで扱うためのデータ表現を説明する。曲線理論の入門編もこの章に含まれ、曲面についても少し触れる。そのほかいくつかの特徴ある物体表現法については概要を紹介する。

5章では、アニメーションやゲーム画面のような動きを伴うCGの表示技術にまつわる基本知識を述べる。そもそも画面が動いて見えるように制御する仕組みであるフレーム処理技術、および活用頻度の高い動き処理技術をやや詳しく説明し、各種アニメーション技法については概要説明にとどめる。

以上に示す通り、本書は高度なあるいは先進的なCGの手法や技法についてはあえて触れず、その前提となる必須技術の知識概念に重点を置いている。例えば、3次元CGにおける興味深い分野であるレンダリング技術（光源、照明、シェーディング、テクスチャマッピング、光線追跡、経路追跡など）は含まれない。また、CGの処理を実行するために不可欠な半導体チップであるGPUについて明示的な説明は行わないが、結果的に2章、3章および5章の前半はGPUの処理内容のうちの基本部分を深く解説していることになる。

本書の内容は、東京工科大学メディア学部の専門科目として2年次に実施される14回の講義内容をまとめたものである。技術志向の学生にとっても制作志向の学生にとっても、CG画像を描くコンピュータの中でなにが起きているかを知ることは、それまでの基礎的な講義や演習の学びに深みを与え、その後の高度な専門分野の学びの理解を促進する効果をもたらす。

本書で学んだ読者が優れたCG作品の制作に貢献したり、CG応用技術に基づく製品開発に貢献したりすることを通じ、多くの人々の生活の質の向上につながることを期待する。さらには将来、新しい表現や技術の研究開発によってCG技術自体の発展に寄与する本書読者が現れるとしたら、それは筆者の無上の喜びとするところである。

最後に、多くの有益なコメントをいただいたシリーズ監修の相川清明先生と近藤邦雄先生に感謝するとともに、長期にわたり辛抱強く筆者を激励し続けてくださったコロナ社の皆さんに厚く御礼を申し上げます。

2022年7月

柿本正憲

注) 本書の書籍詳細ページ (<https://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339027921/>) からプログラムコードなどの補足情報がダウンロードできます。

目 次

1 章 デジタル画像と図形の数学表現

1.1	コンピュータグラフィックス技術の全体像	2
1.1.1	CG は画像を生成する技術	2
1.1.2	三つの要素技術	3
1.1.3	本書のカバーする領域	5
1.2	デジタル画像の基礎	5
1.2.1	ディスプレイの色表現	5
1.2.2	画像の解像度と階調	7
1.2.3	数値データとしての画像	8
1.3	色 の 表 現	9
1.3.1	RGB 三原色と基本的な色	9
1.3.2	RGB 値の範囲	11
1.3.3	さまざまな表色系と色表現方法	12
1.4	図 形 の 表 現	14
1.4.1	頂点がすべての基本	14
1.4.2	デジタル画像における頂点の表現	15
1.4.3	線分の表現例	17
1.4.4	プログラムとデータとの関係	18
	演 習 問 題	19

2 章 基本図形の描画

2.1	線分描画アルゴリズムの概要	21
2.1.1	線分描画の実例	21
2.1.2	線分描画の妥当な前提条件	22
2.1.3	線分描画アルゴリズムの本質	23
2.2	ブレゼンハムのアルゴリズム	25
2.2.1	都合のよい座標系の設定	25
2.2.2	手順の明確化	26

2.2.3	手順の定式化	27
2.2.4	線分描画の実験	31
2.2.5	始点と終点の順番の影響	32
2.3	三角形の塗りつぶし (ラスタ化)	33
2.3.1	三角形の重要性	33
2.3.2	三角形ラスタ化アルゴリズムの要求仕様	34
2.3.3	各画素の塗りつぶし判定基準	36
2.3.4	三角形ラスタ化処理手順の概略	39
2.3.5	スムーズシェーディングにおける三角形ラスタ化処理	41
2.3.6	グラフィックスハードウェアにおけるラスタ化	44
2.4	アンチエイリアシング	46
2.4.1	アンチエイリアシングの目的と活用	47
2.4.2	輝度判定の方法	48
2.4.3	カバー率計算の方法	51
2.4.4	マルチサンプリング・アンチエイリアシング	53
	演習問題	54

3章 座標変換

3.1	座標変換の概要	57
3.1.1	座標変換の分類	57
3.1.2	なぜ座標変換が重要か	58
3.2	図形の幾何学的変換の実例	60
3.2.1	Processing プログラムにおける座標系	60
3.2.2	平行移動変換の例	61
3.2.3	拡大・縮小変換の例	62
3.2.4	回転変換の例	64
3.2.5	せん断変換の例	65
3.2.6	Processing における座標系の記憶と再利用	66
3.3	座標変換と行列	68
3.3.1	幾何学的変換の数式表現	68
3.3.2	1次変換の行列表現	72
3.3.3	1次変換行列の幾何学的な意味	73
3.3.4	アフィン変換の行列表現と同次座標	74
3.3.5	Processing における行列の扱い	76
3.4	デジタルカメラモデルと投影変換	81
3.4.1	ビューイングパイプライン	83

3.4.2	モデリング変換と視野変換の例	85
3.4.3	投影変換の概要	88
3.4.4	平行投影	89
3.4.5	透視投影	91
3.4.6	クリッピング	94
3.4.7	透視投影の変換行列	95
3.5	画像の幾何学的変換	96
3.5.1	画像の幾何学的変換の例	97
3.5.2	再標本化	99
3.5.3	フィルタリング処理	104
3.5.4	バイリニア補間処理の実際	105
3.5.5	補間方式の違いと使い分け	107
	演習問題	109

4章 形状モデル表現の基礎

4.1	形状モデルの表現法	111
4.1.1	形状モデルと形状モデリング	111
4.1.2	形状モデルのファイル形式	113
4.1.3	形状モデルの表現法	115
4.1.4	形状モデルのCG表示法	118
4.1.5	ソリッドモデルのCSG表現	120
4.1.6	CSG表現における同一平面の扱い	124
4.1.7	ソリッドモデルの境界表現	126
4.1.8	形状作成効率化のための表現	128
4.2	曲線と曲面	129
4.2.1	パラメトリック曲線	129
4.2.2	ベジエ曲線の概要	131
4.2.3	ベジエ曲線の幾何学的性質	132
4.2.4	ベジエ曲線の数学的表現	135
4.2.5	ベジエ曲線の分割	137
4.2.6	ベジエ曲線の拡張としてのBスプライン曲線	139
4.2.7	曲線から曲面への拡張	142
4.3	各種モデル形状表現	144
4.3.1	ポリゴン曲面	145
4.3.2	ボクセル表現	146
4.3.3	フラクタル	148

4.3.4	メタボール	150
4.3.5	点群データ	153
4.3.6	パーティクル	154
	演習問題	156

5章 CGアニメーション技術の基礎

5.1	フレーム処理の基本概念	158
5.1.1	CGアニメーション描画処理の基本原則	158
5.1.2	フレームレートとリフレッシュレート	158
5.1.3	ダブルバッファ	161
5.1.4	プリレンダリング映像の再生フレームレート	164
5.2	モーションブラー	166
5.3	キーフレーム法	169
5.3.1	キーフレーム法の簡単な実施例	170
5.3.2	インバースキネマティックス	171
5.3.3	動き情報の設定技法（リギング）	174
5.4	CGアニメーション各種技法の概観	175
5.4.1	モーションキャプチャ	176
5.4.2	形状変形	179
5.4.3	シミュレーション技術	181
	演習問題	184
	引用・参考文献	185
	演習問題解答	186
	索引	190

1 章

デジタル画像と 図形の数学表現

◆本章のテーマ

本章は画像と図形がどのように数値で表現されるかを説明する。本章ではまず入力と出力という観点から CG 技術体系の全体像を示し、画像と図形が中核となる情報・データであることを述べる。画像や図形がコンピュータ内部でどのように保持されているかを正しく知ることは CG を学ぶうえでの最重要事項の一つである。つぎに、画像の数値表現と基本概念について述べ、画像が画素によって構成され、さらに画素は三原色によって構成されることを示す。また、図形についても基本的な構成例を示す。

◆本章の構成（キーワード）

- 1.1 コンピュータグラフィックス技術の全体像
モデリング、レンダリング、アニメーション
- 1.2 デジタル画像の基礎
画素（ピクセル）、解像度、階調、スキャンライン
- 1.3 色の表現
三原色、表色系
- 1.4 図形の表現
座標、頂点、線分、多角形（ポリゴン）、形状モデル

◆本章を学ぶと以下の内容をマスターできます

- 👉 CG 技術のおおまかな体系はどんな要素技術で構成されるか
- 👉 コンピュータ内で画像がどのように数値で表現されているか
- 👉 コンピュータ内で色がどのように数値で表現されているか
- 👉 コンピュータ内で図形がどのように数値で表現されているか

1.1 コンピュータグラフィックス技術の全体像

コンピュータグラフィックス（computer graphics, CG）技術を理解するうえで、情報の「入力」「処理」「出力」という観点を持つことは重要である。本節ではそのような観点から CG 技術体系の全体像を示し、その中で本書がどの部分を扱いどの部分を扱わないかを明確にする。

1.1.1 CG は画像を生成する技術

コンピュータグラフィックスは、各種情報を入力として画像データを計算処理の出力結果として求める技術あるいは出力結果画像そのものを指す。

その計算のもととなるデータ、すなわち入力はいろいろな種類がある。例えばキャラクターの形のデータや背景となる景色の画像データである。ほかに、人の操作や動作を入力とする場合、センサからの情報を入力とする場合、建物や車体の変形の解析計算結果を入力とする場合などが考えられる。

これを図示したのが図 1.1 である。出力の画像は二つの場合が考えられる。一つは画面に表示するだけでデータとしては保持しない場合である。これの典型的な例はゲームの実行画面である。もう一つは画像データとして保存する場合で、典型的な例は映画やアニメ制作における CG である。

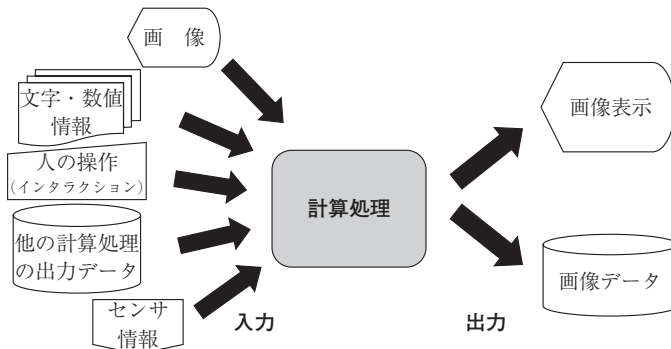


図 1.1 CG の入力情報と出力情報

前者の例は**リアルタイムCG** (real-time computer graphics) と呼ばれる。厳密には1/60秒以内に処理をして一つの画像として表示し繰り返し異なる画像を表示する場合にリアルタイムCGと呼ぶ。後者の例は、処理と同時に必ずしも表示しないことから**オフラインレンダリング** (off-line rendering), **プリレンダリング** (pre-rendering) あるいは**バッチレンダリング** (batch rendering) などと呼ばれる。

このように、CGは、各種入力情報をもとに計算処理によって画像を生成する技術である。入力情報が画像ではない状況で出力として画像が新たに作られることを強調したい場合、CGの計算処理あるいはレンダリングのことを**画像生成** (image generation) と呼ぶ場合もある。

1.1.2 三つの要素技術

ひとことで計算処理と言っても、その過程は複雑である。しかし、CGの計算処理を大雑把に分類すると三つの要素技術に分けることができる。それらは、**モデリング** (modeling), **アニメーション** (animation), **レンダリング** (rendering) である。図1.2は計算処理の流れを示す。本書では以降この計算処理を単にCG処理と呼ぶ場合もある。

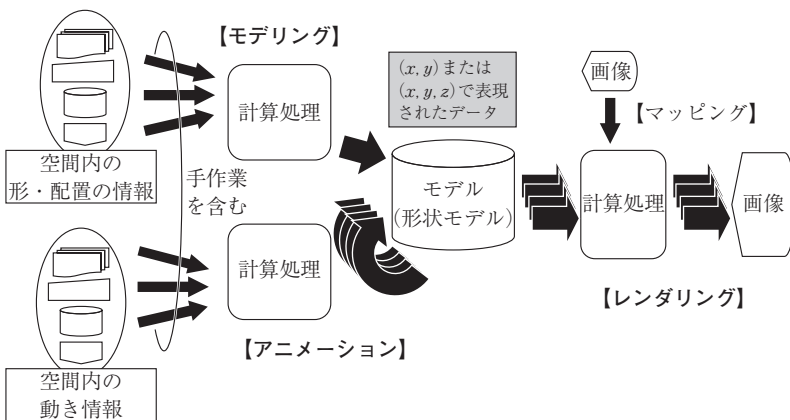


図 1.2 CG の計算処理の流れと要素技術

4 1. デジタル画像と図形の数学表現

この分類は、処理の種類としての要素技術の分類であるだけでなく、映像制作の過程の分類でもあり、CGの研究分野の分類でもある。CGを学ぶうえで、これら三つの要素技術を正しく理解しておくことが重要である。

CGに関する一つひとつの細かな技術や技法は、モデリング・レンダリング・アニメーションのうちのいずれかに属している場合がほとんどである。いま学ぼうとしている技術がどれに属しているかをつねに意識すると、より理解が進む。

モデリングは、CG処理の最初の段階である。入力となる各種情報から、表示すべき図形の表現としての**形状モデル**あるいは**幾何モデル** (geometric model) を出力する処理あるいはその作業過程がモデリングである。形状モデルはCG処理全体から見ると中間データと考えることができる。形状モデルはファイルとして保持される場合もあれば、実行中のプログラムが管理するメモリ上のデータとして保持される場合もある。

レンダリングは、形状モデルや照明設定情報やカメラ設定情報を入力として最終的な画像を出力する処理である。日本語で対応する用語は**描画**である。「レンダリング」には最終的に仕上がってユーザまたは鑑賞者に見せる品質の高い画像を出力するというニュアンスがある。一方で、本書ではごく単純な結果も含め画像を生成する方法を扱う場合が多い。そのため、「レンダリング」という言葉はあまり使用せず、「描画」という用語を一般的に使用する。

アニメーションは、動いている結果画像を出力するために必要となる処理である。形状モデルや、場合によっては照明やカメラがどのように動くかの設定・記述を生成するための技術である。実際の処理はモデリングやレンダリングの処理中に組み込まれる場合が多い。特殊な物体（パーティクル・髪・群集・流体）によって特有の動きを生成する高度な技法もアニメーションに分類される。

なお、画像データを主たる入力として別の画像データを出力する処理は**画像処理** (image processing) と呼ばれる。一般に画像処理はCGとは区別される。しかし実際にはCG処理の流れの一部として画像処理が使われたり、画像処理

の部分的な技法として CG 処理が利用されたりする場合もある。特に前者は実用的な CG 処理では非常によく行われる。

1.1.3 本書のカバーする領域

本書では、前項で示した要素技術それぞれについて、基礎的な部分について述べる。2章（基本図形の描画）ではレンダリングの最も基礎的な処理である線分や三角形の塗りつぶしを学ぶ。3章（座標変換）はレンダリングとモデリングの両方で必須の処理である数学的な変換について述べる。4章（形状モデル表現の基礎）はモデリングのための数値的・数学的な図形表現方法を紹介する。5章（CG アニメーション技術の基礎）では、アニメーションで必ず用いられる基本処理を論じるほか、おもな要素技術の概要を紹介する。

一方で、本書で扱わない CG 技術も多い。3次元 CG (3DCG) については、ごく基礎的なデジタルカメラモデルの話題（3章）と、形状モデルの話題（4章）で取り上げるにとどめている。そのため、関連する照明（ライティング）技術、テクスチャマッピング、隠面消去、レイトレーシング、ボリウムレンダリングはカバーしない。アニメーションに関しても、個別物体特有の技法の詳細は本書の範囲外としている。

1.2 デジタル画像の基礎

本節では CG の出力データである画像が数値としてどのように表現されるかを学ぶ。また、デジタル画像どのようなデータ構造となっているかを具体的に解説する。

1.2.1 ディスプレイの色表現

普段見ているディスプレイはどのように色を発しているのだろうか。実際に **図 1.3(a)** のような赤・緑・青の3色の小さなテスト図形を白い背景上に置いた画像で実験した。

索引

【あ】	
アスペクト比	92
アニメーション	3
アンチエイリアシング	46

【い】	
インターレース	164
インバースキネマティックス	171
隠面消去	45

【う】	
ウィンドウ座標系	85
運動方程式	181

【え】	
エネルギー関数	173
エネルギー最小化法	173

【お】	
オフラインレンダリング	3, 164

【か】	
解像度	7
階調	8
回転	64
界面	183
画角	92
拡大・縮小	62
拡張子	114
画素	6
画像処理	4
画像生成	3
カバー率	49
加法混色	12
カメラ座標系	84

カラーモデル	13
関節	170
関節角	170

【き】	
幾何学的変換	57
幾何モデル	4
キネマティックス	171
キーフレーム	169
キーフレーム法	169
基本立体	121
鏡映	70
局所性	134, 141
曲面	15
曲面パッチ	143
筋肉モデル	181

【く】	
クリッピング	94
クリッピング座標系	94
群集シミュレーション	155

【け】	
形状モデリング	111
形状モデル	4, 111
現在の座標系	61
原点	58
減法混色	13

【こ】	
格子法	183
剛体	182
後方クリッピング面	91
コッホ曲線	148
コンスタントシェーディング	41
混相流	183
コンピュータグラフィックス	2

【さ】	
再帰性反射材	176
最近隣内挿法	104
最小二乗法	174
最適化	173
彩度	13
再標本化	100
差集合	121
座標	58
座標系	58
座標軸	58
サーフェスモデル	115
サブピクセル	6
三角形	15
三角形セットアップ	42
三原色	6
色の一	13
光の一	12

【し】	
シェーダー	46
視界	89
色相	13
自己相似性	148
質点	181
ジャギー	46
視野変換	83
自由形状変形	179
集合演算	121
ジュリア集合	150
ジョイント	170
仕様	35
人工知能	175
深度バッファ法	45

【す】	
錐体	89
スイープ表現	128
スキニング	181
スキャン	9

スキャンライン 9
 スケルトン法 170
 スタック 80
 スタックリング 163
 スーパーサンプリング法 52
 スムーズシェーディング 41
 スワップバッファ 161

【せ】

正規化デバイス座標系 85
 制御多面体 143
 制御点 132
 種集合 121
 接続情報 125
 せん断 66
 線分 14
 前方クリッピング面 91

【そ】

双1次補間 104
 走査 9
 双3次ベジエ曲面 142
 双3次補間 104
 増分法 42
 塑性体 182
 ソリッドモデル 115, 117

【た】

ダブルバッファ 161
 弾性体 182
 弾塑性体 182
 断面表示 119

【ち】

中間色 10
 中点変位法 148
 頂点 14
 直交座標系 58

【て】

テアリング 160
 定式化 27
 デジタルアーカイブ 153
 デジタルカメラモデル 82

テキストファイル 114
 テクスチャ画像 45
 テクスチャマッピング法 45
 テセレーション 131
 データ構造 114
 デバイス座標系 85
 デブスバッファ法 45
 点群データ 153

【と】

投影座標系 85
 投影変換 57, 83
 投影面 88
 同期 163
 動作誇張 178
 同次座標 75
 透視投影 91
 等値面 151
 動力学シミュレーション 182
 凸包 134
 トポロジー 125
 トーンマッピング 12

【な】

内外判定 36, 94
 ナビエストークス方程式 182

【に】

ニアレストネイバー法 104
 二分木 123

【は】

媒介変数 129
 バイキュービック補間 104
 ハイダイナミックレンジ 11
 ハイトフィールド 128
 バイリニア補間 104
 パストレージング 34
 バッチレンダリング 3, 164
 パーティクル 154
 パーティクルシステム 181
 パラメータ 129
 パラメトリック曲線 129

【ひ】

ピクセル 6, 146
 ビデオメモリ 160
 ビューイングパイプライン 83
 ビューイング変換 83
 ビューフラスタム 91
 ビューポート変換 83
 ビューポリューム 89
 描画 4
 表色系 12
 標本化 100

【ふ】

ファイル形式 114
 フィルタリング処理 104
 フィールド 165
 物体モーションブラー 168
 フラクタル 148
 フラグメント 46
 フラスタム 89
 プリミティブ 121
 プリレンダリング 3, 164
 プレゼンハムのアルゴリズム 22
 フレーム 158
 フレームバッファ 160
 フレームレート 158
 プログレッシブ 165

【へ】

平滑化フィルタ 104
 平行移動 61
 平行投影 89
 ベジエ曲線 131
 変動減少性 133

【ほ】

ボクセル 146
 ポテンシャル 151
 ポリゴン 15, 117
 ポリゴン曲面 34
 ボーン 170

【ま】		モデリング変換	83	リフレッシュレート	159
マーカー	176	モデル	111	リメッシング	153
マルチサンプリング	53	【ゆ】		粒子法	183
マンセル表色系	13	有限要素法	182	流体シミュレーション	154, 182
マンデルブロー集合	149			【れ】	
【め】		【ら】		レイトレーシング	34
明 度	13	ラスタ化	34	レンダリング	3
メタボール	150			【わ】	
【も】		【り】		ワイヤーフレームモデル	115
モーションキャプチャ	176	リアルタイム CG	3	和集合	121
モーションプレー	166	リアルタイムレンダリング	164	ワールド座標系	84
モデリング	3, 111	リギング	174		
モデリング座標系	83	リニアワークフロー	12		

【アルファベット】		FFD	179	xy 色度図	13
AI	175	fps	158	z バッファ法	45
B スプライン曲線	140	HDR	11	【数字】	
CIE-L*a*b* 表色系	13	HSL	13	1 次変換	72
CIE-RGB 表色系	12	HSV	13	2-3 プルダウン	165
CIE-XYZ 表色系	13	LOD	145	2 次元アフィン変換	74
CSG 表現	121	MRI	146	3 次バーンスタイン基底関数	136
CT	146	MSAA	53		
DDA	24	NDC	85		
		OMB	168		

— 著者略歴 —

1982年 東京大学工学部電子工学科卒業
1982年 株式会社富士通研究所勤務
1989年 米国ブリガムヤング大学客員研究員（兼務）
～90年
1993年 株式会社グラフィカ勤務
1993年 株式会社ノバ・トーカイ勤務
1995年 日本シリコングラフィックス株式会社勤務
2005年 東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了（電子情報学専攻）
博士（情報理工学）
2011年 シリコンスタジオ株式会社勤務
2012年 東京工科大学教授
現在に至る

CG 数理の基礎

Basic Theories of Computer Graphics

© Masanori Kakimoto 2022

2022年9月22日 初版第1刷発行



検印省略

著者	かき 柿 本 まさ のり 憲
発行者	株式会社 コロナ社
代表者	牛来真也
印刷所	萩原印刷株式会社
製本所	有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10
発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)
ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-02792-1 C3355 Printed in Japan

(松岡)



<出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。