

コンピュータ グラフィックス技術の 基礎と応用

博士(工学) 牧野 光則【著】

コロナ社

ま え が き

本書は、著者がおよそ 30 年にわたり本務先や非常勤講師として担当している、コンピュータグラフィックス（CG）および応用システムに関する講義内容をまとめたものである。

著者が研究として CG に触れたのは、自身の卒業研究テーマとした 1980 年代後半のことである。そして、応用システムの代表格であるバーチャルリアリティ（VR）に触れたのは 2003 年、勤務先に CAVE 型システムを導入し、その直後にイリノイ大学シカゴ校に訪問研究員として 1 年間滞在して CAVE を生み出した Electronic Visualization Laboratory に通った際のことである。

学生時代から数えれば約 40 年。この間にモバイルコミュニケーションやインターネットの爆発的普及を基盤として、CG や VR は社会にとって当たり前の存在となった。最近では生成 AI による画像やプログラムコードなどの自動作成も、CG や VR に応用され、ますます社会を変えようとしている。そのような時代変化の中で、CG や VR に関する講義内容を時代に合わせて徐々に変化させてきた。

しかし、おもに追加・変更してきたのは応用に関する部分であり、20 世紀に先人が成した基礎技術についてはいまも中核として位置付けている。CG を作る基本は何か、VR で人に現実感を与える基本は何かを知らなければ、各種ツールや生成 AI を用いて得られる結果の是非を判断できないからである。このため、自然科学系で CG や VR を学ぶ者には基本こそ修得してほしいと考えている。

以上を踏まえ、本書を通じて、読者には CG の基礎と応用に関して以下を達

成してほしいと考えている。

- CG 画像・映像生成技術の基本を修得し、実際に作成するための基礎を身に付ける。
- CG 技術が利用されている VR・AR・MR などの臨場感・没入感提示システム、可視化技術などの概要と特徴を理解する。

本書は、自然科学系の大学初年次から大学院修士課程における、CG・VR 技術の初学者を想定している。したがって、主として高校で学ぶ数学・物理・情報に関する知識を前提としているが、大学課程での知識も一部用いている。解説に当たって基礎技術を軸とし、平易な表現を心掛けるとともに、数式表現は最小限とした。一方、具体的な数式表現や実用水準のアルゴリズム、また、著しく進展している応用システムについては、あえて言及しないか簡潔な説明にとどめている。より詳細な内容および最新動向については、読者自身による調査・把握をお願いしたい。

一人の教員がこれほどの長期間、かつ、複数の大学・大学院で同一科目を担当できたことは、内容の継続的改善はもちろんのこと、本書執筆の動機と励みになった。このような機会をいただいた関係大学・大学院の方々、ならびに講義履修を通じて質問・指摘を寄せてくれた学生諸君、そして執筆を粘り強く支えてくれたコロナ社の方々に、心より感謝申し上げます。

CG や VR の基盤に触れた本書の読者から次世代の CG や VR を生み出す人が出てくることを強く願う。

最後に、著者の学究活動をつねに理解し、支えてくれている家族に深謝する。

2026 年 7 月

牧野 光則

目 次

1. CG 概 観

1.1 CG と は.....	1
1.2 CG はなぜ使われるのか.....	3
1.3 デジタルとアナログ, アナログのデジタル化.....	4
1.4 CG の誕生前後からこれまで.....	7

2. 座標系, ディスプレイ技術

2.1 座 標 と は.....	10
2.2 光 と 色.....	13
2.3 ディスプレイ技術の進展.....	18

3. 反射モデル, 物体表面へのマッピング

3.1 身近で見られる光の反射現象, 陰と影の違い.....	25
3.2 拡散反射モデル.....	27
3.3 鏡面反射および関連モデル.....	29
3.4 光源のモデル化.....	31
3.5 スムースシェーディング, マッピング.....	35

4. レイトレーシング法

4.1 点描・透視投影を実現する仕組み	45
4.2 レイトレーシング法の原理	47
4.3 レイトレーシング法の特徴	53
4.4 レイトレーシング法の交点計算・交差判定依存性	54
4.5 交点計算・交差判定の例	59
4.6 レイトレーシング法の課題	62

5. 高速レンダリング——Z バッファ法——

5.1 リアルタイム CG に求める要件と簡便な隠面消去法	65
5.2 Z バッファ法	68

6. 形状モデリング

6.1 形状モデリングに求められる要件	82
6.2 ポリゴンモデル	84
6.3 CSG モデル	89
6.4 パラメトリック曲面	98
6.5 代表的な自由形状曲面モデル	103
6.6 自由形状曲面とレンダリングとの相性	110
6.7 境界表現, スイープ, ボクセル	111

7. 大域照明を考慮したレンダリング

—— ラジオシティ法, フォトンマッピング ——

7.1 間接光の影響が強く現れる情景の表現	117
7.2 ラジオシティ法	120

7.3 漸進的ラジオシティ法	130
7.4 フォトンマッピング	137
7.5 「リアル」なCGとは	139

8. ボリュームレンダリング

8.1 ボリュームレンダリングとは	142
8.2 断面表示, 等値面表示	145
8.3 直接的ボリュームレンダリングへの導入	151
8.4 ボリュームレンダリングの全体的特徴	156

9. クロスリアリティ

9.1 クロスリアリティとは	158
9.2 バーチャルリアリティ	164
9.3 VRを取り巻く社会状況	176
9.4 拡張現実	178
9.5 複合現実	182
9.6 XRの将来展望と課題	183

10. 可 視 化

10.1 ビジュアライゼーション (可視化) とは	186
10.2 可視化システム	189
10.3 コンピュータ以前の可視化	191
10.4 主要な可視化分野・技法・ツール	194
10.5 可視化の課題と将来	201

引用・参考文献	205
---------	-----

索引	209
----	-----

1

CG 概観

本章では2章以降で展開する各論への導入として、まずCGの定義および情報伝達手段としての絵の意義に触れる。続いてCGを構成する技術要素であるモデリングとレンダリング、それらを支える学問分野、そしてCG技術の発展史について概説する。CG技術は現在も急速に進化し続けており、その最新動向全ての網羅や将来の俯瞰は難しい。そこで、本章を契機として、CG技術の動向に関心を持ち、その活用分野や、CGの発展がもたらす可能性について自ら考察することを期待する。

1.1 CG と は

CGとはcomputer-generated graphics、つまり、広義にはコンピュータが作成する絵や図、およびそれらを生成する技術全般を指す。しかし、これを広義に解釈すれば、日常的に目にするほとんどの図・表、例えば実験データを整理したグラフなども、コンピュータを使って作成していればCGに該当するが、これらをCGと呼ぶことは通常ない。すなわち、CGという用語はより狭い意味で用いられている。多くの場合、コンピュータを用いて絵（画像）を描画する技術・技法、およびその成果物を指している。技術・技法と成果物（コンテンツ）のどちらなのかを明確にしたい場合、前者はCG技術・CG技法、後者はCG画像と用語を補うことが多い。

コンピュータを用いて絵や図を描く考え方には、二つに大別される。一つは、紙と筆で絵を描くのと同様に、コンピュータを道具として用いる考え方である。この場合、紙をディスプレイに、筆をマウス、ペン型デバイスや指など

に置き換えるように、必要に応じて道具を変えていると捉えられる。使用者にとっては同じ使い勝手の方が楽なので、紙上に絵筆で描くのと同様の操作感を実現するようにプログラムやインタフェースが設計・実装される。ただし、コンピュータが有する記憶や計算の能力を活用して、描画内容の保存、拡大・縮小、複製などが、紙と絵筆を用いる場合に比べて容易に行える。ただし、このアプローチはCGというよりもイラストと称することが多いだろう。

一般にCGと呼ばれるのは、アルゴリズムに基づいて用意されたデータを計算処理し、画像の色を決定する計算技術だろう。これがもう一つのアプローチである。実際、人間はデータ処理・色決定計算を踏まえて描いていない。しかし、コンピュータは繰り返し計算を得意とするため、精密な画像を短時間で作成できる。つまり、CGは人間と異なる方式で描く計算技術の一つの分野であり、その成果といえる。

CGは幅広い分野で学ぶ機会がある。その中でも、理工学系では、多くの人々がCGを有効活用できるようにするため、それを支える基盤技術である

- ① モデリング（現実世界をコンピュータで扱えるように抽象化する技術）
- ② レンダリング（コンピュータ内のデータを画像として出力する技術）
- ③ 画像表示技術

の三つの領域をおもに扱う。これらの関係の概要を図1.1に示す。

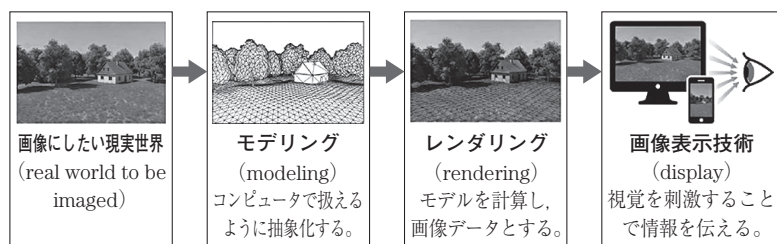


図1.1 現実の対象からモデリング・レンダリング・画像表示への流れ

1.2 CG はなぜ使われるのか

CG 使用の目的は、娯楽としての楽しみの提供、ニュース解説における情報伝達の補助、視聴者を引き付ける視覚的インパクトの創出など、多岐にわたる。これらの多様な目的の根底には、映像情報をよりわかりやすく、あるいは効果的に伝えたい意図があると考えられる。人類が情報を絵として表現し始めたのは、有史以前の洞窟壁画や石器・土器に刻まれた絵などに遡る。時代が進むと、地図のように、整理し、人間が理解しやすいよう情報を絵として表現するに至った。さらに、手描きの時代を経て印刷技術の普及後には、多くの情報を表す絵が複製・流通した。しかし、その時点でも活字化した文字以外の原画作成は人の手に委ねられていた。

人力に頼らず、人工的、機械的な手段で取得した情報の画像表現の代表例としては、1826 年に感光材料による撮影が実現したカメラ、1895 年に発見され、後に X 線写真へ発展した放射線、そして 1897 年に発明され、20 世紀の情報流通に大きく貢献したブラウン管（テレビ）が挙げられる。これらはいずれも 19 世紀に発明され、普及し始めた技術で、その場にある対象を何らかの方法で入力し、画像として記録・表示する技術であった。

一方、画像をデジタル情報、すなわち細分化された要素（pixel、ピクセル、画素）の集合として扱い、さまざまな処理を行うデジタル画像処理技術が本格化したのは、1960 年代以降とされている。例えば、X 線写真をデジタル化し、関心領域の強調や不要部分の抑制などの画像処理が行われていた。このような時期を経てコンピュータが作成する、または、処理・加工する映像情報の時代が到来している。絵は人類にとって直感的に理解しやすい情報表現手段であり、コンピュータの発展に伴い、コンピュータによる画像表現が発展したのは自然な流れである。

近年では、ゲームや映画など、動画として CG を目にする機会が多い。ところで、人類はいつから動画（アニメーション）の原理を知っていたのだろうか。

この点に関して、興味深い研究が2012年に発表された^{[1]†}。その研究によれば、人類は洞窟壁画作成にアニメーションの原理を応用していた可能性がある。洞窟壁画に描かれた動物の中には、足や尾が現実より多く描かれるなど、あり得ない特徴を持つものが見られる。洞窟内で松明を^{たいまつ}灯し、そのちらつく光の下でこれらの絵を見た場合にどのように見えるかをシミュレーションした研究があり、一種のアニメーションとして認識されていた可能性が指摘されている。

アニメーションは静止画を高速に切り替えることで人間が動きを知覚する**仮現運動**（apparent motion）を利用している。記録に残る最古のアニメーション作品としては、1892年10月28日に上映された『哀れなピエロ』が知られている。多くの人が初期アニメーションの代表例として見聞きしたであろう『蒸気船ウィリー』の1928年11月18日公開より四半世紀以上前のことである。本作を含む3作品（現存は2本のみとされている）は、2015年にユネスコ記憶遺産に登録された^[2]。一方、日本におけるアニメーション制作は、20世紀に入ってからとされる。現存する日本最古のアニメーションは1917年6月公開の『なまくら刀』である。本作は現在デジタル復元され、約4分の映像をインターネット上で視聴できる^[3]。なお、現存しないが、記録上、日本最古のアニメーション映画とされる作品は、なまくら刀より半年前の1917年1月に公開されていた。

1.3 デジタルとアナログ、アナログのデジタル化

手描きか、コンピュータが計算するかを問わず、絵はおもに色（とその明るさ）の組合せによって情報を表現する。手描きの場合、絵の具の配合によって連続的な色変化を表現できるため、アナログ情報として無限の情報量を持つと解釈できる。一方、CGはデジタルデータであるため、その情報量には原理的な上限が存在する。この意味でCG画像は手描きによる絵より情報量が少ない。

いずれにしても、絵は文字より情報量が豊富なので、文字ほどの前提知識は

† 肩付き数字は、巻末の引用・参考文献番号を示す。

不要である。一方で、鑑賞者に与える印象を通じて意味を伝える側面が強く、主観に左右されやすいので、伝達の正確性においては文字に劣る。この点で、文字の方が優位なため、これまでの歴史は文字によって現代に伝わったといえよう。一方、近年では誰もが容易に映像を撮影・記録できる時代となったため、膨大な量の映像や画像が記録として蓄積され続けている。ここから正確な情報を後世の人が抽出できれば、文字よりはるかに豊富な情報を入手できることだろう。

技術的な観点からは、コンピュータは基本的に、ディスプレイ上のピクセルの色を計算によって決定しているだけで、用途に応じて、その計算方法や表現手法が異なるに過ぎない。したがって、CG 技術の学習は、① 色情報をデジタルデータとしてどのように表現するか（データ構造）、② ディスプレイ上の各ピクセルの色をどのようなアルゴリズムで計算・決定するか、の2点に集約される。

現在、コンピュータは、赤 (red)・緑 (green)・青 (blue) の3色 (RGB) の光の強度 (輝度) の組合せによって、各ピクセルの色情報を表現・保持している。これらは光の三原色と呼ばれ、その混合比率を変えることでさまざまな色を表現できる。ただし、1個のピクセルが表現 (選択) できる色の数はそのピクセルに割り当てるメモリ量 (ビット数) で定まる。1ピクセル当り1ビットを用いると、 $2^1 = 2$ 通りの状態 (例: 光のオン/オフ) を表現できる。これは二値画像なので多様な色を表現できない。そこで、RGB 各色に1ビットずつ、合計3ビットを割り当てよう。この場合、各原色がオン/オフの2状態を持つため、 $2^3 = 8$ 色を表現できる。近年のコンピュータではメモリ容量が増加したため、RGB 各色に8ビット = 1バイトずつ、合計24ビットあるいはそれ以上を割り当てるのが一般的で、よくフルカラーと称されている。例えば24ビットの場合、 $2^{24} \approx 1677$ 万色を表現できる。さらに、近年では、4K や8K と呼ばれるディスプレイの高解像度化 (ピクセル数の増加) が進んでいる。同じ広さの画面で解像度が高くなると、より細かな間隔で色を変化させることができる。すなわち、大きなピクセル1個で1段階しか色を変化できない

索引

【あ】		環境マッピング	40, 41	シャドウマップ	78
アナグリフ		干渉	31	自由形状曲面	99
アニメーションの 12 の		間接光	118	集光現象	138
基本原則		桿体細胞	15	詳細度制御	86
アフィン変換		【き】		情報の可視化	198
【い】		幾何光学	14	【す】	
異方性反射		球面座標系	12	錐体細胞	15
イメージベースドライティング		境界表現	111	スワイプ	112
		鏡面反射	27	スワイプ表現	112
		極座標系	12	スネルの法則	52
色の三原色		【く】		スプライン曲面	107
陰関数曲面		空間分割法	57	スムーズシェーディング	36
インフォグラフィック		クラウド XR	184	【せ】	
【う】		グーローシェーディング	36	制御点	106
映り込み		クロスモーダル	167	正射影	38
運動視差		クーンズ曲面	104	漸進的ラジオシティ法	132
【え】		【け】		全反射	52
エイリアシング		減法混色	16	【そ】	
【お】		【こ】		掃引	112
奥行ソート法		光沢度	30	ソリッドテクスチャ	43
オブジェクトオーダレンダ		交点計算	54	存在領域法	56
リング		コースティックス	118	【た】	
【か】		コーネルボックス	120	大域照明	120
拡散反射		【さ】		ダモクレスの剣	159
拡張現実		再分割曲面	86	断面表示	144, 145
拡張人間学		【し】		【ち】	
陰		ジオメトリックデザイン	99	直接的ボリューム	
影		視差バリア	174	レンダリング	144, 151
影落ち		視線追跡法	48	直交座標系	11
仮現運動		質感	35	地理情報システム	196
可視化		時分割	168, 170	【て】	
加法混色		写実的	139	ディスプレイメント	
カラーブリーディング		シャドウマッピング	78	マッピング	43
環境光					

[A]		[B]		[C]	
A-Frame	75	B-スプライン曲面	107	CAD	116
AR	158, 178	BRDF	34	CAE	116
Artificial Reality	159	BSSRDF	34	CAGD	116
		BTDF	34	CAM	116

CAVE	171	LOD	86	shadow	26
CG アニメーション	8				
CIE xy 色度図	17	[M]		[U]	
CIE XYZ 表色系	17	MR	159, 182	ultimate display	159
CMY 表色系	16	[N]		[V]	
CRT	18				
CSG	89	NPR	139	VAST	195
[D]		[O]		ViSC	188
DataVis	194	OLED	22	VR	160
[F]		OpenGL	75	VR 酔い	184
				VRML	74
Focus and Context	199	[P]		[W]	
[G]		PDP	20	WebGL	75
		pixel	3	WebVR	75
GPU	9	[R]		[Z]	
[I]					
		RGB 表色系	15	Z バッファ法	68
InfoVis	194	[S]			
[L]					
		SciVis	194		
LCD	19	shade	26		

— 著 者 略 歴 —

1987 年 早稲田大学理工学部電子通信学科卒業
1989 年 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了（電気工学専攻）
1991 年 早稲田大学助手
1992 年 早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了（電気工学専攻），博士（工学）
中央大学専任講師
1996 年 中央大学助教授
2003
～ 04 年 米国イリノイ大学シカゴ校 Visiting Scholar
2004 年 中央大学教授
現在に至る
2009
～ 13 年 中央大学理工学部長補佐

コンピュータグラフィックス技術の基礎と応用

Computer Graphics Technology and Its Applications

© Mitsunori Makino 2026

2026 年 9 月 3 日 初版第 1 刷発行



検印省略

著 者	まきのり 牧 野 光 則
発 行 者	株式会社 コロナ社
代 表 者	牛 来 真 也
印 刷 所	壮 光 舎 印 刷 株 式 会 社
製 本 所	株式会社 グリー ン

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 978-4-339-02958-1 C3055 Printed in Japan

(大井)



＜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。