

ま え が き

本書は、計算機シミュレーションや計測装置から取得された大量の数値データを理解するために、自ら可視化ソフトを開発したいと希望する学生・技術者・研究者を対象にして執筆された。1章から5章までの理論編では、大学初年次の数学復習に相当する部分を含み、大学・大学院での理工系授業のテキストとしても適切と考える。6章以降のプログラミング編では、理論編で解説した技術のC++による具体的な実装方法を示し、GPUを利用した高速化技術から可視化システムの構築方法まで読者が実際に経験できるようサンプルコードとともに解説している。

ボリュームレンダリングが生まれたのは、いまから20年以上も前のことである。1988年、コンピュータグラフィックス研究の世界的権威の国際会議「SIGGRAPH」で、可視化技術であるボリュームレンダリングについての講演が3件も発表された。3次元グラフィックスにおいて画像を生成する処理の呼称「レンダリング」に空間を表す「ボリューム」が結合されたのである。当然のように多くの人の興味を喚起した。20年以上を経て、3次元空間で定義された数値データ（ボリュームデータ）を理解する上で欠かせない存在となったボリュームレンダリングについて、本書では、まず、その起源・背景について説明を行う。そこにはアメリカにおける特撮技術が重要な役割を果たすことが見てとれる。芸術が科学技術の進歩を促した一例だと考えると興味深い。

ボリュームレンダリングでは、重要なデータに対して不透明度を高めていく作業において、与えられたボリュームデータの特徴を抽出する処理は大変重要な役割を果たす。ボリュームデータは、格子と呼ばれる空間を分割した小立体ごとに定義される場合がほとんどである。極大点、渦中心、縮退点などといった特徴抽出は、この格子ごとに行うことが多い。本書では、読者が、それぞれ

の目的にかなったボリュームレンダリングソフトを開発できるように、この格子におけるデータ補間技術や格子内部における特徴抽出技術の説明について多くの紙面を割いた。

ボリュームレンダリングは、現在、拡張性の観点で大きな壁にぶつかっている。計算機や計測装置の進歩に伴い、ボリュームデータの規模が格段が大きくなっている。計算機シミュレーションでは、一つの計算機では処理困難な大規模なモデルを取り扱うときには、なんらかの形でモデル領域の分割を行い、並列計算技術を使って計算機処理を実現する。そもそも一つの計算機に格納できない規模のデータなので、その結果を可視化する際にも、並列計算が必要とされる。そのため、多くの並列ボリュームレンダリング手法が提案されているが、最終的に一つの絵として利用者に提示しなくてはならないため、どこかにパフォーマンス上のボトルネックが発生する。特に、ボリュームレンダリングでは、すべての格子を視点からの距離に応じてソートする処理が必要とされていたため、この処理が対話的表示の阻害要因として認識されてきた。領域分割が複雑な場合、ソート処理自身が不可能になる場合もある。

本書で扱う粒子ボリュームレンダリングは、ボリュームレンダリングをソート処理の呪縛^{じゅうばく}から解放する画期的な手法である。従来技術として半透明粒子を利用するスプラッティング法があるが、本手法では不透明粒子を利用する。本書では、ボリュームレンダリングに関するもともとの指導原理に立ち返って、不透明粒子を利用することの自然さを説明する。多くの読者が粒子ボリュームレンダリングのメリットを理解され、大規模数値データによって表現される複雑な現象解明に役立ててほしいと願う。この粒子ボリュームレンダリングは、複雑な3次元シーンの表現手段としての可能性を秘めている。面や線といった3次元シーンの構成要素を適切に粒子表現すれば、ボリューム・面・線によって表現されるシーンの統合的レンダリングが可能となる。読者のチャレンジを期待したい。

2010年8月

小山田 耕二, 坂本 尚久

目 次

1. 可視化概要

1.1 可視化について	1
1.2 ボリューム可視化	3
1.3 ボリューム可視化の幕開け	8
1.4 可視化研究コミュニティ	11
1.5 可視化の効能	13
1.6 粒子ボリュームレンダリングのすすめ	15

2. ボリュームデータ

2.1 数 値 デ ー タ	17
2.1.1 スカラデータ	17
2.1.2 ベクトルデータ	18
2.1.3 テンソルデータ	18
2.2 格 子 デ ー タ	18
2.3 変 換 処 理	20
2.3.1 ハッシュテーブル	21
2.3.2 隣接格子情報の作成	23
2.3.3 格子形状の四面体分割	24
2.3.4 格子中心データの節点データへの変換	27
2.4 四面体格子データ	28

3. デ ー タ 処 理

3.1 デ ー タ 補 間	31
3.1.1 1 次 元 格 子	32

3.1.2	2次元格子 (三角形)	34
3.1.3	3次元格子 (四面体)	36
3.1.4	2次元格子 (四角形格子)	39
3.1.5	3次元格子 (六面体)	42
3.1.6	その他の格子	46
3.2.	格子における特徴探索	47
3.2.1	極点の探索	47
3.2.2	特異点の探索	50
3.2.3	縮退点の探索	54
3.3	格子探索技術	58

4. ボリュームレンダリング

4.1	雲画像生成技術	60
4.1.1	Blinn のモデル	60
4.1.2	Kajiya のモデル	62
4.2	ボリュームレンダリング理論	65
4.2.1	粒子発光モデル	66
4.2.2	不透明度定義を使った粒子密度推定	66
4.3	ボリュームレンダリングの実装	69
4.3.1	レイキャスティング法	70
4.3.2	スライスバイスライス法	72
4.3.3	格子投影法	73
4.3.4	事前積分法	75

5. 粒子ボリュームレンダリング

5.1	ソート処理からの決別	77
5.2	処理概要	80
5.3	粒子密度推定	82
5.3.1	不透明度を使った粒子生成	82
5.3.2	不透明度定義を使った粒子密度推定	83
5.4	粒子生成	84
5.4.1	一様サンプリング法	85
5.4.2	棄却サンプリング法	86

5.4.3	メトロポリスサンプリング法	86
5.5	区間ボリュームサンプリング法	88
5.5.1	四面体格子向けサンプリング法	88
5.5.2	事前粒子生成	89
5.5.3	粒子生成	91
5.6	粒子投影	93

6. 3次元グラフィックスの基礎

6.1	幾何データ	97
6.1.1	点データ	98
6.1.2	線分データ	99
6.1.3	面データ	102
6.2	座標系	104
6.2.1	オブジェクト座標系	104
6.2.2	世界座標系	104
6.2.3	カメラ座標系	105
6.2.4	ウィンドウ座標系	105
6.3	座標変換	105
6.3.1	モデリング変換	106
6.3.2	ビューイング変換	113
6.3.3	投影変換	115
6.3.4	モデルビュー行列と投影行列	117
6.4	陰影処理	118
6.4.1	照明モデル	118
6.4.2	シェーディング	122

7. 可視化プログラミングの基礎

7.1	可視化プログラミング	126
7.1.1	ボリュームデータの構造	127
7.1.2	可視化パイプライン	129
7.2	フィルタリング・マッピング処理の要素技術	131
7.2.1	データ補間	131
7.2.2	伝達関数の操作	142

7.3 レンダリング処理の要素技術	146
7.3.1 レンダリングパイプライン	147
7.3.2 シューダプログラミング	149
7.3.3 GPU 向けデータ構造	151
7.3.4 粒子ボリュームレンダリングへの適用	152

8. 粒子ボリュームレンダリングソフトウェア

8.1 可視化パイプラインの構成	153
8.2 粒子生成モジュールの実装	154
8.2.1 粒子数の推定	154
8.2.2 粒子の生成	156
8.2.3 区間ボリュームサンプリング法による粒子の生成	163
8.3 粒子投影モジュールの実装	165
8.3.1 粒子データの転送	166
8.3.2 粒子投影処理	168
8.3.3 アンサンプル平均化処理	176
8.3.4 詳細度の制御	177
8.3.5 レンダリング処理モジュールの実装	178
8.4 システムの構築	179

9. タイルド表示装置による高解像度表示技法

9.1 分散粒子ボリュームレンダリングシステム	184
9.1.1 分散レンダリング	186
9.1.2 システムの実装	190
9.1.3 適用事例	199
9.2 タイルド表示装置を用いた高解像度表示システム	203
9.2.1 SAGE	203
9.2.2 構築例	204

引用・参考文献	207
---------	-----

索引	210
----	-----

1. 可視化概要

本章では、まず、可視化について述べた上で、ボリューム可視化の概要について説明する。つぎにボリューム可視化という研究分野が創設されたきっかけについて紹介を行う。最後に、最近の可視化研究の動向について述べる。

1.1 可視化について

可視化という言葉はさまざまところで聞かれるようになった。「経営情報の可視化」などというように企業活動におけるオープン化に関連して、可視化という言葉が使われている。大手企業による有価証券報告書への不実記載に端を発して低下した証券市場の信頼性を回復させるために、2006年金融庁が中心となって日本版SOX法を取りまとめた。この日本版SOX法を企業内で定着させるために、企業経営者はこぞって、業務や情報システムの「可視化」が重要とのメッセージを発信している。あとで、別の観点で取り上げる「見える化」という言葉が使われることも多い。また、最近では、^{みん}冤罪の悲劇をなくすために、取り調べ過程の全面的な録音・録画の義務付け、検察官手持ち証拠の全リストの開示などを内容とする法案、いわゆる「全面可視化法案」が参議院において可決されたことを受けて、お茶の間で可視化という言葉が広まってきた。

これらに対して、著者らは数値データの可視化という観点で可視化という言葉を使っている。この定義についてはあとで述べることにするが、数値データの可視化の歴史については、計算機のそれよりもずっと古い。1次元空間で定

2 1. 可視化概要

義された数値データ（例えば月別売り上げデータ）を、人手により折れ線グラフ、棒グラフで可視化することは長年にわたって行われてきている。また、2次元空間で定義された数値データを等高線により可視化することも、例えば地図や天気図の作成において、長年にわたって行われてきた。ここ20年くらいで発展してきた可視化技術は3次元空間で定義された数値データ（ボリュームデータ）を対象としており、一つの研究分野であるボリューム可視化を形成してきた。これは、先端技術の進歩と大きな関係がある。

近年における計算機や測定器の進歩により、3次元空間で定義される数値データ（ボリュームデータ）が比較的容易に得られるようになった。このボリュームデータをどのように可視化するのが一つの技術的課題となり、多くの研究がなされてきた。比較的単純なアプローチは、これまで培われた1次元・2次元可視化技術の適用であった。例えば、3次元空間中に適当な直線や平面を設定し、その上で数値データを折れ線グラフで可視化したり、切断面上で等高線を描画することであった。この方法では効率のよい可視化が期待できるものの、ボリュームデータについて断片的な情報しか得ることができない。

対象となるボリュームデータに対して十分な知識があるのであれば、数枚の切断面での可視化結果から全体を想像することができるが、複数切断面による可視化はそのような知識を持たない他者への情報伝達的手段としては不十分である。医療現場ではインフォームドコンセントの質的向上を目指して可視化が利用されるようになってきた。CTやMRI撮像装置で得られる医用画像から診断を行う場合、医師にとっては、診断には、ある切断面での可視化だけで十分であっても、その可視化結果だけを患者やその家族に提示してもどこがどのようなになっているのかを伝えるのが難しいのが現状である。このため、切断面画像を3次元空間でボリュームデータに再構成し、ボリューム可視化を行ったうえで説明する機会が多くなってきている。また、計算機や測定器を活用してこれまで扱ったことのないような物理現象や症状を扱う場合、切断面での可視化だけからの想像では重要な発見を逃す可能性が高くなってしまふことが予想される。したがって、ボリュームデータをできるだけあるがままの形で可視化す

ることが必要とされ、その技術分野としてボリューム可視化が重要とされている。

1.2 ボリューム可視化

本書では、ボリューム可視化を、ボリュームデータから目的に合った点・線分・面といった幾何データに変換し、それらをコンピュータグラフィックス技術により画像化する過程であると定義する(図 1.1 参照)。現在利用可能なコンピュータグラフィックス用ハードウェア(ビデオカード)では、点・線分・面といった幾何形状の実時間描画が可能であり、ボリュームデータから幾何データへの適切な変換が重要な役割を果たす。実時間描画についての厳密な定義はないが、おおむね1秒間に5回程度描画できること、すなわち1回の描画に0.2秒以下の計算時間を要することと考えられている。これを5フレーム毎秒(fps: frame per second)と呼ぶ。人間の視覚特性によれば、1秒間に30回以上の描画を行ってもその認識については変化がないことより、多くの場合、30fpsの描画性能で十分とされる。ビデオカードごとに実時間描画が可能な幾何形状のサイズ(たとえば、三角形の数)の上限が存在し、その上限に収

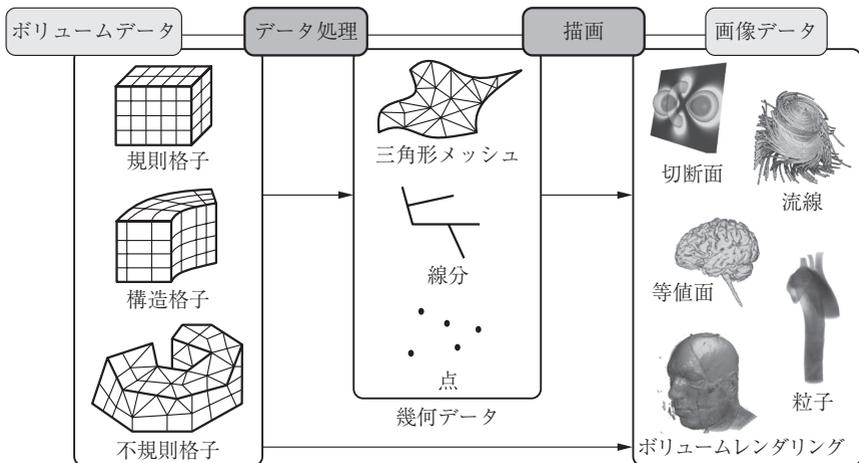


図 1.1 ボリューム可視化

まるような変換計算手法の開発は、可視化技術の重要な研究テーマになっている。ビデオカードの性能向上に伴い、一般にこの上限値が大きくなっていくものの、処理対象となる幾何形状のサイズがこれを上回るスケールで大きくなることが多く、この変換計算の高速化についての研究の必要性は高い。

ボリュームデータでは、格子分割された空間において格子点で離散的に数値データが定義されている場合が多く、本書ではボリュームデータとして、3次元格子で定義された数値データを取り上げることにする。その格子の形状やその配置の規則性に応じて、規則格子・構造格子・不規則格子と命名する。ボリュームデータは数値シミュレーション結果として出力される場合が多い。この場合の数値シミュレーションは、物理現象に関連のある偏微分方程式の数値解析を意味し、その解析結果がボリュームデータとなる。また、医療診断装置からもボリュームデータが生成される。人体の断層像が断層面を変化させながら撮像され、その結果としての断層像の集合をボリュームデータと呼ぶ。多くの場合、平行等間隔で撮像された断層像をその法線方向に積み重ねたものを指す。ボリュームデータでは、定義している数値データがスカラデータ・ベクトルデータ・テンソルデータの場合が考えられ、それぞれ、スカラボリューム・ベクトルボリューム・テンソルボリュームと定義する。

可視化技術は、ボリュームデータから幾何データへの変換後に画像化するものの以外に、ボリュームデータから直接画像データを計算するものがある。このような可視化手法として本書で対象とするボリュームレンダリングがある。ボリュームレンダリングはスカラボリュームデータを対象とした可視化技術で、各画素ごとに視点を通過する視線上で輝度値方程式の計算により画素値を決定する。この輝度値方程式では視線に沿ってスカラ場に関係する物理量を積分することになっており、多くの情報を盛り込んだ可視化画像の作成が可能となる。このボリュームレンダリングは、医用画像診断装置から出力される3次元画像から筋肉・骨・血管・腫瘍しゅように代表される病巣を可視化する効果的な手法として臨床現場で利用されている。また、流体シミュレーション結果において、流れによって運ばれる物理量の全体分布を理解する上で必要不可欠な可視化手

法として利用されている。応力シミュレーションにおいて、複雑な構造物における応力分布を把握し、構造上の弱点を設計上流工程で発見するための効果的な手法として位置づけられている。

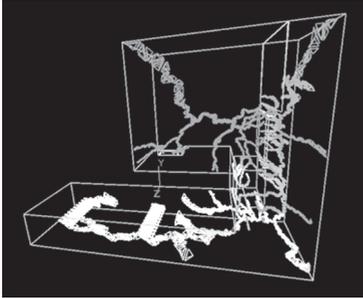
ボリュームレンダリング手法の理論的詳細は章を変えて説明するが、ボリュームレンダリングソフトの利用ということでそのユーザインタフェースについて簡単に述べる。ボリュームレンダリング処理に先立って、利用者は、可視化の対象となるスカラボリュームにおいて関心のあるスカラ値に対して重要度（あとで不透明度という技術用語で説明される）と色を割り当てる。輝度値方程式の計算では視線上でスカラボリュームをサンプリングしてスカラデータ値を補間計算し、その値を使って、先ほど割り当てた色と重要度を取得する。結果として、計算される輝度値では、利用者が重要と考えているスカラデータに割り当てられた色が大きな影響を与えることになる。さて、ボリュームレンダリング以外の可視化手法について簡単に触れておくことにする。これらの手法では、まず、ボリュームデータから幾何形状の変換を行う。代表的な手法として、等値面表示と流線表示手法についてその概要を説明する。

ボリュームレンダリング以外のスカラボリュームデータに対する可視化手法として等値面表示技術がある。等値面とは、スカラボリューム中である決められたスカラ値を持つ点の集合として定義され、一般に曲面となる。等値面を表示するには、ボリュームデータを構成する格子ごとに等値面を抽出し、その抽出処理をすべての格子で行う。格子の数が多くなってくると、等値面と交差する格子の数は、格子総数に比べて、十分小さくなるが、格子と等値面の有無判定をすべての格子に対して行っていると表示時間の増大につながる。このため、等値面と交差している格子だけを処理の対象とする手法の重要性が理解できる。いくつか手法が提案されているが、そのうちの一つを紹介する。

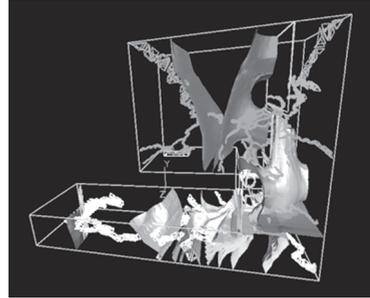
いま等値面と交差する格子が一つ見つかっていると仮定すると、等値面と格子面との交差を計算し、交差のない格子面と隣接する格子は処理の対象からはずすようにすれば、等値面表示の高速化が期待できる。この場合、最初に等値面と交差する格子をどのように特定するかが重要な技術となる。スカラボ

6 1. 可視化概要

リウムからスカラ勾配が0となる特異点を生成しておき、それらを勾配ベクトル場に沿って接続した特異点グラフを使って、このシード格子の特定を容易にする手法の提案を行っている。図 1.2 で、図 (a) は数値流体力学計算によって解析されたクリーンルーム内気流の圧力スカラデータにおいて計算された特異点グラフを、図 (b) は生成された等値面を表す。



(a) 特異点グラフ



(b) 生成された等値面

図 1.2 特異点グラフを使った等値面生成

流線は、接線がその点におけるベクトルデータと平行となるような曲線であり、適当な開始点よりベクトルデータを積分することにより求められる。流線表示がよく適用されるのはベクトルボリュームである。等値面同様、格子単位で流線を計算し、脱出点を持つ格子面を通して隣接する格子で出口を進入点とみなして流線を計算する。これを繰り返して、ボリュームデータの境界かまたは速度0となる点、すなわち特異点に到達した段階で計算を終了する。流線を使った可視化では開始点の選択が重要である。適切な開始点を選択しないと、例えば、渦を探したい場合には、多くの試行錯誤を繰り返すこととなる。

渦を可視化する場合であれば、まず、ベクトルボリュームにおいて、ベクトルデータが0となる特異点を探索し、つぎにその特異点の分類を行い、渦中心と分類された特異点付近に開始点を配置して流線を描画することにより効果的に渦を可視化することができる。特異点の探索ではゼロベクトルとなる点を計算し、また、特異点の分類では、特異点まわりでベクトル場を線形近似し、そ

索引

	【あ】					
アキユムレーションバッファ		局所的照明モデル	118	ジンバルロック		111
	149	極 点	47	【す】		
アンサンプル平均	94	【く】		数値データ		17
【い】		区間ボリューム		スカラデータ		17
1次元格子	32	サンプリング法	88	スケーリング行列		106
一様サンプリング法	85	【こ】		ステンシルバッファ		149
陰影処理	118	格 子	18	スライスバイスライス法		73
インタフェース関数	97	格子探索法	58	【せ】		
【う】		格子中心データ	27	世界座標系		104
ウィンドウ座標系	104	格子投影法	74	節 点		17, 19
【お】		構造格子	19	全体座標		32
オブジェクト座標系	104	固有値	48	線分データ		99
【か】		固有値分解	48	【た】		
回転行列	108	固有ベクトル	48	体積座標		36
拡散テンソル画像	7	【さ】		タイルド表示装置		14, 203
拡散反射	119	座標変換ヤコビ行列	41	【ち】		
可視化バイブライン	129	サブピクセル	82	頂点シェーダ		149
カメラ座標系	104	三角形格子	34	頂点バッファオブジェクト		152
カラーバッファ	148	3次元テクスチャ	76	超流線		54
環境光	118	三重縮退	55	【て】		
【き】		3重線形補間	151	テイラー展開		41
幾何データ	97	散乱方程式	63	テクスチャ		151
棄却サンプリング法	86	【し】		データ値の補間		31
規則格子	18	シェーディング	118	データフロー型プログラ		
輝度値	61	シェーディング処理	66	ミングモデル		127
輝度値方程式	66	四角形格子	39	デプスバッファ		148
鏡面反射	120	四元数	112	テンソルデータ		18
局所座標	32	事前積分法	75	伝達関数		66, 142
		四面体格子	36	点データ		98
		四面体格子データ	28			
		四面体分割	24			

【と】	フレームバッファ		面データ	102
投影行列	オブジェクト	152	【も】	
投影変換	プログラマブルシェーダ	149	モジュール	130
等高線			モデリング変換	105
透視投影	分散 PBVR システム	186	モデルビュー行列	117
等値面	【へ】		【や】	
特異点	平均粒子数	62	ヤコビ行列	38
特異点グラフ	平行移動行列	107	【ら】	
【に】	平行投影	115	ランバートシェーディング	122
二重縮退	ベクトル勾配テンソル	51	【り】	
2重線形補間	ベクトルデータ	18	リピートレベル	166
ニュートン・ラブソン法	ハッセ行列	48	粒子発光モデル	65
【は】	【ほ】		粒子反射モデル	63
ハッシュテーブル	ポアソン分布	61	粒子ボリウムレンダリング	80
【ひ】	ポイントベース		粒子密度	62
ピクセル	レンダリング手法	79	流線	6
ビューイング変換	補間関数	32	隣接格子情報	23
ビューイング変換行列	補間関数設定法	46	【れ】	
描画要素	ボリウム可視化	3	レイキャスティング法	70
【ふ】	ボリウムデータ	2, 17, 97	レンダリング	130
フィルタリング	ボリウムレンダリング	60	レンダリングパイプライン	147
フォンシェーディング	【ま】		【ろ】	
不規則格子	マーチングキューブ法	11	六面体格子	43
不透明度	マッピング	130		
部分ボリウムデータ	【め】			
フラグメント	メトロポリス			
フラグメントシェーダ	サンプリング法	82, 86		
	面積座標	34		

【A】	【B】	【D】
ambient light	back-to-front アルゴリズム	diffuse reflection
API		119
application program interface	bilinear interpolation	【E】
97	151	early ray termination
	【C】	72
	camera coordinate system	【F】
	104	FBO
		152

fragment shader	149	LOD 制御	177	Scalable Adaptive Graphics Environment	203
front-to-back アルゴリズム	72			specular reflection	120
		【O】			
【H】		object coordinate system	104	【T】	
HAVS	78	orthogonal projection	115	TDW	203
				tiled-display wall	203
【I】		【P】		trilinear interpolation	151
IDW 法	27	particle-based volume rendering	80	【V】	
inverse-distance weight 法	27	PBVR	80	VBO	152
		PC クラスタシステム	186	vertex shader	149
【L】		perspective projection	115	【W】	
Lambertian shading	122	Phong shading	123	window coordinate system	104
LIC	11			world coordinate system	104
line integral convolution	11	【S】			
local illumination model	118	SAGE	203		

— 著者略歴 —

小山田 耕二 (こやまだ こうじ)
1983年 京都大学工学部電気工学科卒業
1985年 京都大学大学院工学研究科博士
前期課程修了 (電気工学専攻)
1985年 日本アイ・ビー・エム株式会社
勤務
1994年 博士 (工学) (京都大学)
1998年 岩手県立大学助教授
2001年 京都大学助教授
2003年 京都大学教授
現在に至る

坂本 尚久 (さかもと なおひさ)
1998年 龍谷大学理工学部電子情報学科
卒業
2000年 龍谷大学大学院理工学研究科
博士前期課程修了
(電子情報学専攻)
2006年 京都大学大学院工学研究科博士
後期課程修了 (電気工学専攻)
博士 (工学)
2008年 京都大学特定助教
現在に至る

粒子ボリュームレンダリング

— 理論とプログラミング —

Particle-Based Volume Rendering — Theory and Programming —

© Kohji Koyamada, Naohisa Sakamoto 2010

2010年10月15日 初版第1刷発行

検印省略

著者 小山田 耕二
坂本 尚久
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

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 <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-02449-4

(新宅) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします