

はしがき

本書は、12年前の秋に出版を予定し、お蔵入り寸前となっていた「デジタル動画像処理」を復活させ、現代の科学技術の視点でコメントを付加した内容となっています。理論的・技術的内容は、12年の歳月を経て多少陳腐な面もあるものの、当時の学問と技術の普及への各著者の情熱は伝わるのではないかと期待しています。

AI (*Artificial Intelligence* : 人工知能) の技術が各分野を席卷しようとしている現代において、多くの注目を引く著書とは言えないまでも、動画像処理の新たな可能性について、また脳の視覚情報処理の視点からも、次世代の技術者の参考になる内容を含んでいると信じています。新たな技術開発のヒントの一つになることを願って、復活版を世に送ります。

20世紀に生まれた科学技術の中で、今なお新たな輝きを放ち続けている研究分野の一つに、コンピュータ・サイエンス (計算機科学) あるいは情報化技術 (IT) をあげる事が出来る。前世紀最大の発明ともされる計算機の能力は、1950年代までに完成していた量子力学の応用としての電子工学 (エレクトロニクス) の誕生と共に、飛躍的な発達を遂げてきた。世界初の計算機とも言われる真空管式の ENIAC (1946年) は、サイズ 1m × 3m × 30m で 30t を越え、150KW を消費するにもかかわらず、5KIPS (1秒間に5,000個の命令を実行) 程度の演算能力にすぎなかった。最新のモバイル式ノートパソコンは、1Kg に満たない重量と 40W 程度の消費電力で、1000MIPS (1秒間に1,000,000,000命令) 以上の計算能力と 50Gbyte (50,000,000,000byte : 1byte=8bit, 1bit は情報量の単位) 以上の記憶装置を有している。まさに驚異的と言える。最近では、ウェアラブル (Wearable) コンピュータはもちろん、そのためのファッション・デザインまでも提案されるに至っている。この背景には、シリコン半導体をベースとする大規模集積回路技術 (LSI) に代表されるマイクロ・エレクトロニクス技術の驚異的な進歩が有り、メモリや CPU (中央演算装置) など計算機の主役達を進化させて来た。また、その進化は留まるところを知らず、新たな量子コンピュータの実現に向けてナノテクノロジーは着実な一歩を刻み始めている。

一方、計算機の能力の飛躍的な進歩と共に、科学技術研究のスタイルも大きく変容している。最も基本的なサイエンスである物理学においては、理論物理学と実験物理学が両輪としてその進歩を支えてきた。しかし、研究者一人一人がかつてのスーパーコンピュータの性能を自由に駆使できる現代においては、計算機による数値解析あるいは数値実験が重要な位置を占めるようになってきている。特に、1970年代以降に出現した新しい数理物理理論である、カオス、フラクタル、複雑系、さらにはファジイ、ニューラルネットワークそ

してウェブレットなどは、コンピュータ抜きでは生まれえない学問領域である。また、こうしたサイエンスの各分野での新たな知見がフィードバックし、人工生命を始めとする20世紀の情報科学を育てて来た。21世紀はコンピュータ・サイエンスをベースに、脳や心の理解、生命の理解、そして宇宙や素粒子の理解がさらに深まる事が期待される。

従来、専用のハードウェアと特殊な開発環境を必要とした動画像処理も、パソコンレベルで手軽に活用できるようになっている。しかし、科学計測のための動画像処理となると、市販のシステムでは満足できないことが多い。連続画像の標本化における厳密な等時性、画像データの非圧縮性、さらには計測したい画像窓領域や計測時間の自由な設定等が要求されるからである。ただ単に眺めて楽しむことが目的では無く、連続する画像データから運動する物体の速度ベクトルや3次元形状を定量的に計測したいからである。

本書では、大学や企業の研究室レベルでの活用を念頭に、動画像処理の基礎理論を紹介するとともに、科学計測に必要な高精度の計測と解析を可能にするアルゴリズムの実例を紹介する。前身の「パソコンによる動画像処理（1993年出版）」から25年を経たこの「デジタル動画像処理：理論と実践」では、装いを新たに

- 1) 空間フィルタ法を用いたブラウン運動の動画像処理による粒径計測手法の紹介
- 2) 空間的不均一や時間変化する照明の下での、オプティカルフロー検出理論
- 3) 動画像計測処理の生体計測への応用
- 4) 画素時系列フィルタリングによる動画像強調とその応用
- 5) コンピュータグラフィックス（CG）や映像デザインとの係わり
- 6) Windows OS、Linux OS、ISA & PCIバスによる連続画像入力システム

などの新しい知見を盛り込んでいる。いずれも、最近の我々の研究グループで開発してきたオリジナルな理論や、1993年に発足した「動画像計測処理研究会」で話題となってきた内容を中心に紹介している。すなわち、本書は動画像処理の基礎理論とその応用に焦点を絞り、画像処理が専門でない研究者にも利用可能なプログラム（WindowsやLinux版）を提供し実用性を持たせるとともに、先端の研究の現状を紹介することで、読者が動画像処理の問題点・可能性・発展性について理解を深められることを目的とする。

なお、本書の構成は、第1章でデジタル動画像データの処理に関する話題や、先端研究の背景を紹介するとともに、画像処理の基礎知識について概説する。2章では、動画像データに格子状のフィルタを重畳して、画像全体の平均速度や速度分布の情報を得る理論を紹介する。3章・4章は、動画像データから速度ベクトル場の情報を高精度で検出する手法（勾配法や相関法）を議論する。5章・6章は、動画像解析理論の応用として、生体情報の



お仕事中。

イラスト：Haruka Miike

計測例や最先端の研究への応用例について紹介する。附録（実践編）は、パソコンを用いた動画像の連続入力システムの構成例（附章 A）や、勾配法によるオプティカルフロー解析のプログラム例（附章 B）を紹介する。

著者を代表して 三池秀敏

デジタル動画画像処理

— 理論と実践 —

目次

はしがき	i
第1章 はじめに	1
1.1 序	1	
1.2 動画像処理の背景	3	
(1) コンピュータビジョン	4	
(2) 画像物理計測	5	
1.3 動画像処理の基礎	6	
(1) デジタル動画像の入力 (標本化、量子化)	6	
(2) デジタル画像処理の基礎	8	
第2章 空間フィルタ法による粒子速度・粒径解析	21
2.1 序	21	
(1) 空間フィルタ速度計測法の基本原理	21	
(2) 動画像処理による空間フィルタ速度計測法	23	
2.2 粒径解析	32	
2.2.1 動画像処理による空間フィルタ法を用いた粒径計測	33	
(1) 動的光散乱法	33	
(2) 動画像処理による空間フィルタ法を用いた粒径評価法	35	
(3) 動画像データの処理方法	38	
(4) システム例	38	
(5) 解析例	40	
2.2.2 静的光散乱法を画像処理に応用した粒径計測	43	
(1) 光散乱の逆散乱手法による粒径計測	43	
(2) 画像処理による逆散乱理論	45	
(3) シミュレーション画像解析例	49	
(4) 実画像の解析例 (粒径と粒子数評価)	51	
付録 2-1 フィルタ移動速度と波長の比	53	
付録 2-2 橋本式の導出と実際の計算法	54	
第3章 勾配法によるオプティカルフローの推定	57
3.1 はじめに	57	
3.2 勾配法の基礎	58	
(1) 勾配法の基礎式の導出	58	
(2) 大域的最適化手法	59	
(3) 局所的最適化手法	62	

(4) エッジに基づく手法	63
(5) その他の手法と問題点	64
3. 3 一般化勾配法	66
(1) 研究の背景	66
(2) 場の理論に基づく基礎式の導出	67
(3) 推定手法	69
3. 4 動画像からの勾配法によるオプティカルフロー推定例	73
(1) 粒子によって可視化された流れ場を捉えた動画像	73
(2) 伝播する化学反応波の動画像	74
(3) 逆ボケ過程の動画像	75
3. 5 おわりに	77
第4章 相関法・マッチング法による速度計測	83
4. 1 テンプレートマッチング	83
4. 2 時系列相関法	85
(1) 基本の原理	85
(2) 時系列相関法の拡張	87
(3) 計算機シミュレーション画像および実画像による実験	90
4. 3 時間空間マッチング法	94
(1) 基本原理	94
(2) 空間分布の曲面近似	96
(3) 時間空間マッチング	97
(4) 速度場の連続性による拘束条件の導入	98
(5) 勾配法との比較	99
(6) 時間空間マッチングを用いたシミュレーション	100
第5章 生体情報計測への応用	105
5. 1 はじめに	105
(1) 生体情報計測の背景	105
(2) 動画像計測処理による生体情報計測	106
5. 2 動画像計測・解析法による生体計測	107
(1) 手首表面からの心拍数検出	107
(2) ベッドでの生体情報計測	110
5. 3 入浴中の水面ゆらぎ評価による心拍数・呼吸数検出	112
5. 4 足形による男女識別や個人識別	114
5. 5 おわりに	116

(1) まとめ	116
(2) 動画像による生体情報計測の今後の可能性	116
第6章 新しい展開	121
6.1 画素時系列フィルタリング	121
(1) 動画像の強調	121
(2) オプティカルフロー検出への応用	123
6.2 三次元立体形状計測 (レンジファインダ)	125
(1) 空間コード化法	125
(2) 位相シフト法	126
(3) 鏡面・光沢の強い表面の形状計測	129
6.3 CV と CG との接点 (バーチャルキャラクタを介したインタラクティブシステム)	131
6.4 認知科学と映像デザイン (知覚像を捉えるデジタル印象カメラ)	134
6.5 非線形科学の画像処理への応用	138
(1) 化学反応による画像処理	138
(2) 反応拡散モデルによる輪郭抽出・領域分割	139
附録 (実践編)	
附章 A パソコンによる連続画像入力システム	147
A.1 はじめに	147
A.2 アナログビデオ信号とデジタル画像	148
(1) 画像とビデオ信号	148
(2) ビデオ信号のデジタル化	151
(3) デジタル動画像	154
(4) カラー画像	154
コラム1: アナログビデオ信号の方式	150
コラム2: プログレッシブ (プログレス) スキャン CCD カメラ	154
A.3 画像入出力ボード	155
(1) 画像入出力ボードの概要	155
(2) 画像入出力ボードの制御	156
A.4 連続画像入力システム	158
(1) システム構成	158
(2) ビデオ信号と取り込み開始のタイミング	159
(3) 基本的な取り込み手順	161
(4) フレームメモリへの取り込みと主メモリへの転送タイミング	162
A.5 システムの機能と操作	163

(1) メインメニュー	163
(2) ボード設定	163
(3) 画像の取り込み	163
(4) 表示	164
(5) 保存と読み出し	165
(6) ボード制御	166
(7) 情報	166
A. 6 データファイルと初期化ファイル	166
(1) データファイルのフォーマット	166
(2) 初期化ファイル	172
A. 7 システムの性能および仕様	174
(1) データ転送速度	174
(2) システムの仕様	176
コラム 3: 私の開発環境	177
A. 8 Linux による動画像記録システム	177
(1) はじめに	177
(2) システム構成	178
(3) 画像取り込みのハードウェアタイミング	180
(4) PCI バス制御の概要	180
(5) メモリマッピング	182
(6) ファイルへの保存と画像表示	184
(7) 画像取り込みプログラム	184
(8) 画像データ処理プログラム	184
附章 B オプティカルフロー推定プログラム	189
B. 1 基礎式の微係数の計算	189
B. 2 Horn と Schunck の大域的最適化法	190
B. 3 Cornelius と Kanade の手法	191
B. 4 局所的最適化法	193
B. 5 照明条件を考慮した局所的最適化法	193
B. 6 ボケ過程を考慮した局所的最適化法	195
B. 7 積分形式を用いた手法	196
むすび (光陰矢の如し)	201