

目 次

1. シミュレーションと状態ベクトル	(樋口知之)	1
1.1 データ同化とは		1
1.1.1 シミュレーションとデータ解析の協調作業		1
1.1.2 データ同化の目的		2
1.2 シミュレーションと状態ベクトル		4
1.2.1 状態ベクトルの定義		4
1.2.2 “完璧”シミュレーションは実現可能か?		6
1.2.3 確率シミュレーションとシステムノイズ		8
1.3 数学的準備		8
1.3.1 条件付き確率と周辺化		8
1.3.2 ガウス分布とデルタ関数		9
1.3.3 期待値		10
1.3.4 尤度の分解		11
1.3.5 ベイズの定理		12
1.3.6 事後確率最大解		13
2. 状態空間モデル	(上野玄太)	16
2.1 シミュレーション		16
2.2 システムモデル		18
2.2.1 初期条件の不確実性		19
2.2.2 時間発展過程の不確実性		21
2.2.3 システムモデル		23
2.3 観測モデル		26
2.3.1 観測行列, 観測演算子		26

2.3.2	観測との比較から観測の取り込みへ	27
2.3.3	観測モデル, 観測ノイズ	29
2.4	状態空間モデル	30
3.	逐次計算式 (樋口知之)	31
3.1	状態空間モデルの一般化	31
3.1.1	非線形・非ガウス状態空間モデル	31
3.1.2	線形・ガウス状態空間モデル	31
3.1.3	一般状態空間モデル	32
3.1.4	データ同化の計算困難性	33
3.2	逐次ベイズフィルタ	34
3.2.1	3つの分布	34
3.2.2	予測とフィルタ	36
3.2.3	長期予測	37
3.2.4	シミュレーションの更新と観測のタイミング	38
3.3	平滑化アルゴリズム	39
3.3.1	固定区間平滑化	39
3.3.2	固定点平滑化	40
3.3.3	固定ラグ平滑化	41
3.4	パラメータの推定とモデルの評価	43
3.4.1	最尤法	43
3.4.2	拡大状態ベクトルによる最適化	44
4.	カルマンフィルタ (上野玄太)	47
4.1	一期先予測, フィルタ, 平滑化の一般的表現	47
4.2	線形・ガウス状態空間モデル	48
4.3	カルマンフィルタ	49
4.3.1	一期先予測	49
4.3.2	フィルタ	52
4.3.3	カルマンフィルタ	53
4.3.4	適用例	55

4.3.5	まとめ	57
4.4	平滑化	57
4.4.1	固定点平滑化	59
4.4.2	固定ラグ平滑化	66
4.4.3	固定区間平滑化	71
4.4.4	適用例	74
4.4.5	まとめ	76
4.5	線形最小分散推定, 直交射影, 線形最小分散フィルタ	76
5.	アンサンブルカルマンフィルタ (中村和幸)	78
5.1	拡張カルマンフィルタ	78
5.2	アンサンブル近似	79
5.3	アンサンブルカルマンフィルタの手続き	80
5.3.1	一期先予測	81
5.3.2	フィルタ	82
5.3.3	手続きのまとめ	83
5.4	アンサンブルカルマンフィルタの特性	83
5.4.1	一期先予測	84
5.4.2	フィルタ	85
5.5	アンサンブルカルマンフィルタの行列表現	88
5.6	アンサンブルカルマンスムーザ	91
5.6.1	平滑化アルゴリズム	91
5.6.2	導出	92
5.7	非線形観測システム	94
5.8	適用例	96
5.9	まとめ	100
6.	粒子フィルタ (中野慎也)	101
6.1	アルゴリズムの概要	101
6.2	粒子フィルタの導出	104
6.3	利点と問題点	106

6.4	粒子 smoother	108
6.5	実装のための留意点	110
6.5.1	重みの計算	110
6.5.2	リサンプリングの方法	111
6.6	適用例	112
6.7	まとめ	115
7.	融合粒子フィルタ (中野慎也)	116
7.1	アルゴリズムの概要	116
7.2	融合粒子フィルタの性質	119
7.3	重みの設定方法	120
7.4	融合粒子 smoother	121
7.5	適用例	122
7.6	双子実験	125
7.6.1	ローレンツ 63 モデル	125
7.6.2	模擬データの生成	126
7.6.3	同化実験	127
7.7	まとめ	131
8.	アンサンブルカルマンフィルタ応用：大気海洋結合モデル (上野玄太)	136
8.1	はじめに	136
8.2	シミュレーションモデルと観測データ	137
8.2.1	微分方程式とシミュレーションモデル	137
8.2.2	観測データ	141
8.3	逐次データ同化の手順	143
8.4	状態空間モデルの構成	143
8.4.1	状態ベクトルの設定	144
8.4.2	アンサンブルコードの作成	150
8.4.3	システムノイズの入れ方	150
8.4.4	観測行列の設定	151
8.5	ノイズの確率分布の設計	154

8.5.1	システムノイズの分散共分散行列	154
8.5.2	観測ノイズの分散共分散行列	155
8.6	一期先予測・フィルタ	156
8.7	平滑化	157
8.8	まとめ	160
9.	粒子フィルタ応用：津波データ同化 (中村和幸)	161
9.1	目的と背景	161
9.2	状態空間モデルの構成	164
9.2.1	津波シミュレーションモデル	164
9.2.2	システムモデルの構成	165
9.2.3	同化用データセットの作成	166
9.2.4	観測モデルの構成	168
9.2.5	データ同化による推定手続	169
9.3	双子実験	170
9.3.1	双子実験・人工地形	171
9.3.2	双子実験・日本海地形	173
9.4	潮位計データを用いた解析	175
9.5	まとめ	176
10.	融合粒子フィルタ応用：宇宙科学への適用例 (中野慎也)	178
10.1	宇宙科学におけるデータ同化	178
10.2	地球磁気圏荷電粒子分布モデル	180
10.3	システムモデル	183
10.3.1	入力パラメータ	183
10.3.2	状態変数	185
10.4	高エネルギー中性粒子観測データ	187
10.5	観測モデル	189
10.6	融合粒子フィルタによる推定	193
10.7	まとめ	196

11. 粒子スモージ応用：遺伝子発現調節モデルのデータ同化 ..(吉田 亮)	197
11.1 生体分子相互作用ネットワーク	197
11.2 モデリング	200
11.3 状態空間表現とパラメータ推定	205
11.4 粒子スモージの適用	207
11.5 概日周期の転写回路	209
11.6 その他の話題	212
11.6.1 並列粒子フィルタ	212
11.6.2 ネットワークの構造予測, リモデリング	213
11.7 ま と め	214
A. 付 録	215
A.1 多変量ガウス分布 (多変量正規分布)	215
A.2 行列の公式	217
A.3 カルマンフィルタの導出に用いる積分計算	218
A.4 ガウス分布の周辺分布	222
A.5 乱数生成	223
A.6 逐次重点サンプリング (SIS)	225
B. 表 記 法	228
B.1 本書で使う主な表記	228
B.2 他書との対応表	229
あ と が き	231
文 献	233
索 引	238