

日本音響学会 編
音響テクノロジーシリーズ 16

音のアレイ信号処理

— 音源の定位・追跡と分離 —

工学博士 浅野 太 著

コロナ社

音響テクノロジーシリーズ編集委員会

編集委員長

株式会社 ATR-Promotions

工学博士 正木 信夫

編集委員

産業技術総合研究所

学術博士 蘆原 郁

日本電信電話株式会社

博士（芸術工学）岡本 学

東京大学

博士（工学）坂本 慎一

東京情報大学

西村 明

日本大学

工学博士 伊藤 洋一

九州大学

博士（芸術工学）鍋木 時彦

熊本大学

博士（工学） 荻木 禎史

株式会社ニューズ環境設計

博士（工学） 福島 昭則

（五十音順）

（2009年11月現在）

発刊にあたって

「音響テクノロジーシリーズ」の第1巻「音のコミュニケーション工学—マルチメディア時代の音声・音響技術—」が初代東倉洋一編集委員長率いる第1期編集委員会から提案され、日本音響学会創立60周年記念出版として世に出て13年。その間に編集委員会は第2期吉川茂委員長に引き継がれ、本シリーズは13巻が刊行された。そして昨年、それに引き続く第3期の編集委員会が立ち上がった。

日本音響学会がコロナ社から発行している音響シリーズには「音響工学講座」、「音響入門シリーズ」、「音響テクノロジーシリーズ」があり、多くの読者を得てきた。さらに昨年には、音響学の多様性、現代性、面白さをサイエンティフィックな側面から伝えることを重視した「音響サイエンスシリーズ」が新設されることとなり、企画が進められている。このような構成の中で、この「音響テクノロジーシリーズ」は、従来の「音響技術に関するメソッドの体系化を分野横断的に行う」という方針を軸としつつ、「脳」「生命」「環境」などのキーワードで象徴される、一見音響とは距離があるように見えるが、実は大変関係の深い分野との連携も視野に入れたシリーズとして、さらなる発展を目指していきたい。ここではその枠組みのもとで、本シリーズが果たすべき役割、持つべき特徴、そしてあるべき将来像について考えてみたい。

まず、その果たすべき役割は「つねに新しい情報を提供できる」いわば「生き」がいい情報発信源となること。とにかく、世の中の変化が速い。まさにテクノロジーは日進月歩である。研究者・技術者はつねに的確な情報をとらえておかなければ、ニーズに応えるための適切な研究開発の機を逃すことになりかねない。そこで、本シリーズはつねに新しく有益な情報を提供する役割をきち

ii 発刊にあたって

んと果たしていきたい。そのためには時流にあった企画を立案できる編集委員会の体制が必要である。幸い第3期の委員は敏感なアンテナを持ち、しかもその分野を熟知したプロにお願いすることができた。

つぎに本シリーズの持つべき特徴は「読みやすく、理解を助ける工夫がある」いわば、「粋」な配慮があること。これまでも、企画段階から執筆者との間では綿密な打合せが行われ、読者への読みやすさのための配慮がなされてきた。そしてその工夫が高いレベルで実現されていることは、多くの読者の認めるところであろう。また、第10巻「音源の流体音響学」や第13巻「音楽と楽器の音響測定」にはCD-ROMが付録され、紙面からだけでは得ることができない情報提供を可能にした。これも理解を助ける工夫の一つである。今後インターネットを利用するなど、速報性にも配慮した情報提供手段との連携も積極的に進めていきたい。

さらに本シリーズのあるべき将来像は「読者からの意見が企画に反映できる」いわば、編集者・著者・読者の間の「息」の合った関係を構築すること。読者からいただくご意見は編集活動におおいに役立つ。そこには新たな出版企画に繋がる種もあるだろう。是非読者の皆様からのフィードバックを日本音響学会、コロナ社にお寄せいただきたい。

以上述べてきたように、本シリーズが今後も「生き」のいい情報を、「粋」な配慮の行き届いた方法で提供することにより、読者の皆さんとの「息」の合った関係を構築していくことができれば、編集を担当する者としてはこの上ない喜びである。そして、本シリーズが読者から愛され、「息」の長い継続的なものに育てていくことの一翼を担うことができれば幸いである。

最後に、本シリーズの刊行にあたり、企画と執筆に多大なご努力をいただいている編集委員と著者の方々、ならびに出版準備のさまざまな局面で種々のご尽力をいただいているコロナ社の皆様に深く感謝の意を表して、筆を置くことにする。

2009年11月

音響テクノロジーシリーズ編集委員会
編集委員長 正木 信夫

まえがき

筆者が東北大学の学生として音のアレイ信号処理の研究を始めたのは、1980年代中ごろのことである。当時は、適応信号処理が盛んになりつつあるころであり、観測信号に対して統計的学習を行い、特性を自分自身で決める適応フィルタは、非常に新鮮であった。1980年代後半に入ると、適応信号処理を多チャンネルに拡張した適応ビームフォーマや、MUSIC法に代表される高分解能なアレイ信号処理が登場した。1990年代後半には、独立成分分析を用いたブライント音源分離という新たな枠組みが導入され、話題を呼んだ。

一方、信号処理理論を実装するためのデバイスも、著しい発展を遂げた。筆者が学生のころ、大型計算機センターのスーパーコンピュータを使って行っていたような計算が、ノートパソコンやDSP（デジタルシグナルプロセッサ）などの小規模な計算資源を用いて、リアルタイムで実現されるようになった。

このように、アレイ信号処理の理論と応用の研究は、この四半世紀の間に大きく発展した。一方で、研究は細分化され、これからアレイ信号処理の研究を始める方の中には、過去の膨大な研究のどこから手を付けてよいか、迷う方もいるのではないと思われる。また、本題の研究に入る前に多くの基礎知識を必要とし、理論と応用の乖離かいりに悩まされることもあるだろう。

本書では、音響工学やデジタル信号処理を一通り学んだ読者が、音のアレイ信号処理の研究を始めるにあたり、短時間でこれまでの研究を概観できるよう、基礎理論とその応用例をコンパクトにまとめるよう心掛けたつもりである。アレイ信号処理に関しては、さまざまな立場から、優れた専門書が過去に多数出版されている。これらの名著や論文に読み進み、より専門的な知識を獲得する上で、本書がその足掛かりとなれば、幸いである。

本書は、8章から構成される。このうち、前半の1~3章は、本題のアレイ信号処理に入るための準備の章である。1章では音波を複数センサで観測する場合の物理的環境とそのモデルについて述べる。2章および3章では、最尤法、MMSE法、ウィナーフィルタ、適応アルゴリズムなど、アレイ信号処理の理論的背景となるさまざまな推定法や最適化の手法について述べる。

4~8章では、アレイ信号処理の主要な方法について述べる。この部分の具体的な構成は1.1節に示してある。アレイ信号処理には、じつに多くの方法があり、主要な方法という用語弊があるかもしれないが、言い換えれば、著者が興味を持ち、実際のフィールドにおいて多少なりとも経験を積んだ方法である。この中には、例えば、高次統計量を用いる方法(5.4節)やEMアルゴリズムを用いる方法(6章)など、最近のアレイ信号処理の研究では必ずしも多用されていない方法も含まれている。これらの手法をあえて述べたのは、幅広い基礎知識を持ち、問題をさまざまな視点から見るのが、新しいアイデアを創出する上できわめて重要であると考えからである。

巻末には、本書を読む上で必要最低限となる線形代数や確率・統計の基礎知識を付した。式の導出などを追う上で、参考になれば幸いである。

最後に、本書を執筆する機会を与えていただいた日本音響学会音響テクノロジーシリーズ編集委員会の正木信夫委員長、担当編集委員の岡本学氏をはじめ委員会の方々、本書の草稿を入念に読んでいただき多数の有益な助言をいただいた産業技術総合研究所 麻生英樹氏、NTTコミュニケーション科学基礎研究所 澤田宏氏、北海道大学 田中章氏、東京大学 小野順貴氏に深謝する。また、2年半の執筆期間中、休日の執筆を受け入れ、支えてくれた家族に感謝する。

2010年12月

浅野 太

目 次

	1.	アレイ信号処理の基礎	
1.1	アレイ信号処理とは	1	
1.2	音の伝搬とそのモデル	2	
1.2.1	座 標 系	2	
1.2.2	伝搬波とアレイ・マニフォールド・ベクトル	3	
1.2.3	平 面 波	5	
1.2.4	球 面 波	9	
1.3	音響空間とそのモデル	10	
1.3.1	音 響 空 間	10	
1.3.2	観測信号のモデル	13	
1.3.3	空間相関行列とそのモデル	15	
1.4	音響信号の観測と処理	18	
1.4.1	観測値のサンプリング	18	
1.4.2	音響信号のフィルタリング	19	
1.4.3	アレイ・マニフォールド・ベクトルの生成と測定	21	
1.4.4	周波数領域の処理の概要	25	
引用・参考文献		26	

	2.	推定法の基礎	
---	-----------	---------------	---

2.1	パラメータ推定法の概要	28
2.1.1	非ベイズ推定法	29

2.1.2	ベイズ推定法	30
2.2	観測系と推定器のモデル	33
2.2.1	線形観測モデル	33
2.2.2	線形推定器	34
2.3	最小二乗平均誤差法 (MMSE 法)	34
2.3.1	MMSE 法の導出	34
2.3.2	\mathbf{x} および \mathbf{z} が結合ガウス分布の場合	37
2.4	線形 MMSE 法	40
2.4.1	線形 MMSE 法の導出	41
2.4.2	直交性と不偏性	42
2.5	最大事後確率法 (MAP 法)	44
2.6	最尤法 (ML 法)	44
2.7	最小二乘法 (LS 法)	45
2.7.1	LS 法の導出	45
2.7.2	ML法との関係	46
	引用・参考文献	47

3. 適応フィルタ

3.1	ウィナーフィルタ	48
3.1.1	ウィナーフィルタの構造	49
3.1.2	ウィナーフィルタの導出	51
3.1.3	周波数領域でのウィナーフィルタ	52
3.2	最小二乘法 (LS 法)	54
3.3	最急降下法	55
3.4	ニュートン法	57
3.5	最小二乗平均法 (LMS 法)	58
3.6	アフィン射影法 (APA 法)	60
3.6.1	APA法の導出	60

3.6.2 APA 法の幾何学的解釈	61
3.7 再帰最小二乗法 (RLS 法)	63
3.8 適応アルゴリズムの関係	66
引用・参考文献	68

4. ビームフォーマ

4.1 ビームフォーマの一般型	70
4.2 遅延和法 (DS 法)	71
4.2.1 時間領域	71
4.2.2 周波数領域	72
4.2.3 DS ビームフォーマの応答	73
4.3 空間ウィナーフィルタ (SWF)	79
4.4 最尤法 (ML 法)	82
4.4.1 ML ビームフォーマの導出	82
4.4.2 ML ビームフォーマの応答	84
4.5 最小分散法 (MV 法)	86
4.5.1 最小分散法の導出	86
4.5.2 MV ビームフォーマの応答	87
4.5.3 複数拘束条件への拡張	88
4.6 一般化サイドローブキャンセラ (GSC)	90
4.6.1 GSC の導出	90
4.6.2 ブロッキング行列	92
4.6.3 空間ウィナーフィルタを用いた表現	94
4.6.4 適応アルゴリズムを用いた応用例	95
4.7 一般化固有値分解を用いる方法	97
4.7.1 空間ウィナーフィルタの導出	98
4.7.2 一般化固有値分解による最適フィルタの導出	99
4.7.3 周波数領域のウィナーフィルタとの比較	101
4.8 ビームフォーマによる空間スペクトルの推定	103

4.8.1	空間スペクトル	103
4.8.2	最小分散法と部分空間法の関係	104
4.8.3	応 用 例	104
引用・参考文献		105

5. 部分空間法

5.1	部分空間法の基本原理	107
5.1.1	固有空間への変換	107
5.1.2	部分空間の直交性—雑音がない場合	109
5.1.3	部分空間の直交性—雑音が白色の場合	111
5.1.4	部分空間の直交性—雑音が有色の場合	113
5.2	MUSIC 法	115
5.2.1	MUSIC 法	115
5.2.2	root-MUSIC法	116
5.2.3	最小ノルム法	118
5.2.4	応 用 例	119
5.3	ESPRIT 法	125
5.3.1	サブアレイ間位相差	125
5.3.2	最小二乗法による解法	127
5.3.3	総合最小二乗法による解法	128
5.4	高次統計量を用いる方法	129
5.4.1	空間キュムラント行列を用いる方法	129
5.4.2	応 用 例	132
5.5	広帯域信号への拡張	134
5.5.1	空間スペクトルの平均	135
5.5.2	コヒーレントサブスペース法	136
5.6	音源数の推定	138
5.6.1	AIC/MDL を用いる方法	138
5.6.2	閾値を用いる方法	140
5.6.3	固有値のパターンを識別する方法	140

5.6.4 応 用 例	141
引用・参考文献	145

6. EM アルゴリズムを用いた音源定位

6.1 EM アルゴリズムの基礎	147
6.1.1 不完全データと完全データ	147
6.1.2 EM アルゴリズムの概要	148
6.2 観測信号のモデルと完全データ	149
6.3 尤 度	151
6.3.1 観測値に対する尤度	151
6.3.2 完全データに対する尤度	152
6.3.3 サンプル相関行列の期待値	153
6.4 EM アルゴリズムを用いた音源定位	156
6.4.1 反復の導入	156
6.4.2 E-ステップ	157
6.4.3 M-ステップ	157
6.4.4 空間信号処理的な解釈	159
6.4.5 応 用 例	161
引用・参考文献	163

7. 音 源 追 跡

7.1 音源追跡の方法の概要とモデル	165
7.1.1 音源追跡の方法の概要	165
7.1.2 移動音源に対する基本的な考え方	166
7.1.3 一般的な動的システムのモデル	167
7.1.4 線形モデル	167
7.1.5 確率密度関数形式と非線形モデル	168
7.1.6 音源追跡のための確率・統計的枠組み	169

7.2	カルマンフィルタ	171
7.2.1	カルマンフィルタにおける制約	171
7.2.2	静的システムから動的システムへの拡張	172
7.2.3	カルマンフィルタの導出	174
7.2.4	推定値の解釈	177
7.2.5	カルマンフィルタを用いた音源追跡	177
7.2.6	応 用 例	179
7.3	unscented カルマンフィルタ	183
7.3.1	unscented 変換	183
7.3.2	unscented カルマンフィルタの導出	187
7.4	パーティクルフィルタ	188
7.4.1	パーティクルフィルタの概要	189
7.4.2	モンテカルロ法	189
7.4.3	重点サンプリング	190
7.4.4	逐次重点サンプリング	191
7.4.5	提 案 分 布	194
7.4.6	リサンプリング	194
7.4.7	パーティクルフィルタ・アルゴリズム	196
7.4.8	パーティクルフィルタを用いた音源追跡	199
7.4.9	応 用 例	201
	引用・参考文献	203

 **8.** ブラインド音源分離 

8.1	問題の定式化	205
8.2	主成分分析と白色化	206
8.2.1	主成分分析	206
8.2.2	白 色 化	208
8.2.3	分離行列と白色化行列の関係	212
8.3	KL 情報量に基づく方法	214
8.3.1	KL 情 報 量	214

8.3.2	学 習 則	215
8.3.3	スコア関数	217
8.3.4	最尤法による導出	220
8.4	エントロピー最小化に基づく方法 (FastICA)	221
8.4.1	エントロピー最小化	221
8.4.2	中心極限定理とネグエントロピー	222
8.4.3	学 習 則	223
8.4.4	複数成分の分離への拡張	225
8.4.5	関数 $G(y_i)$ の選択	226
8.5	空間相関行列の同時対角化による方法 (SOBI)	227
8.5.1	分離行列の導出	227
8.5.2	空間相関行列の同時対角化	229
8.6	音響における問題	231
8.6.1	交換の不定性	231
8.6.2	振幅の不定性	233
8.6.3	反 射・残 響	234
8.6.4	周波数領域の ICA の概要	235
8.6.5	応用例—基本的な性能	236
8.6.6	応用例—実環境での性能	241
	引用・参考文献	244

付 録

A.	線形代数の基礎知識	
A.1	ベクトル・行列演算	246
A.1.1	基本的な定義と性質	246
A.1.2	射 影	250
A.1.3	固有値分解	252
A.1.4	特異値分解	254
A.2	微 分	255
A.2.1	実数ベクトル・行列についての偏微分	255
A.2.2	複素ベクトルについての偏微分	256

A.2.3	ヘシアン行列	257
A.3	最適化問題	258
A.3.1	拘束なし最適化	258
A.3.2	拘束付き最適化	259
A.4	その他の有用な事項	261
A.4.1	テイラー級数展開	261
A.4.2	ディラックのデルタ関数	261
	引用・参考文献	262
B.	確率・統計の基礎	
B.1	確率分布	263
B.1.1	基本的な定義と性質	263
B.1.2	ガウス分布	264
B.2	統計量	266
B.2.1	期待値	266
B.2.2	平均値と共分散行列	267
B.2.3	高次統計量	268
B.2.4	多変数の高次統計量	268
B.3	確率過程	269
B.3.1	定常過程	269
B.3.2	マルコフ過程	269
B.4	情報理論	270
B.4.1	エントロピー	270
B.4.2	KL情報量と相互情報量	270
	引用・参考文献	271
	索引	272

1 アレイ信号処理の基礎

本章では、複数センサから構成されるセンサアレイ (sensor array) を用いた音響信号の観測・分析・処理を行うにあたり、必要となる基礎的な事柄を述べる。1.2 節で述べる伝搬波のモデルと、1.3 節で述べる音響空間のモデルは、本書で扱う物理現象と、信号処理理論を結ぶ架け橋として重要である。また、1.4 節では、具体的な観測手法など、4 章以降で述べるさまざまな信号処理アルゴリズムを実装するための、実用的な事柄について述べておく。

1.1 アレイ信号処理とは

アレイ信号処理 (array signal processing) では、センサアレイを用いて何らかの信号を観測し、さまざまな推定や処理を行う。空間の異なる位置に複数のセンサを配置することで、センサ間に生じる信号の到達時間差や振幅差など、音源の空間的情報を入手することができる。これらの空間情報を利用して、音源の位置を推定する音源定位 (sound source localization)、移動する音源の軌跡を推定する音源追跡 (sound source tracking)、混ざり合って観測される複数の信号を分離する音源分離 (sound source separation) などを行うことが可能となる。本書では、これらの問題を、表 1.1 のような構成で考えていく。

アレイ信号処理の応用分野は、無線通信、レーダー・ソナー、地震源の推定、脳波の解析など多岐にわたる。本書では、観測信号として音を扱うが、信号処理の理論面では、上述のような、まったく異なる応用分野において開発された手法と共通する部分が非常に多い。実際、本書でとりあげる手法の多くは、他

表 1.1 本書におけるアレイ信号処理の分類

カテゴリー	章
音源定位	4.8 節, 5 章, 6 章
音源追跡	7 章
音源分離	4 章, 8 章

の応用分野で開発されたものである。一方、扱う物理現象は、応用分野により異なり、それぞれの応用分野において、信号処理に用いるモデルなどを対象となる物理現象に適応させていく必要がある。

本書では、各章に示した応用例で、音響信号に対するアレイ信号処理の効果をみていく。本書の応用例は、音声など可聴帯域の空気伝搬音を対象としており、センサとしてはマイクロホンを用いている。マイクロホンを用いたセンサアレイはマイクロホンアレイ (microphone array) と呼ばれる。同じ音でも、例えば、水中を伝搬する超音波に対しては、ハイドロホンや超音波振動子など、異なるセンサが用いられる。上述のように、対象となる物理現象やセンサが異なれば、アレイ信号処理の効果も変わってくるが、目安として参考にしていただきたい。

1.2 音の伝搬とそのモデル

1.2.1 座 標 系

本書で用いる座標系を図 1.1 に示す。本書では、直感的にわかりやすいよう、水平角 θ を y 軸方向 (正面) を 0° とした時計回りの角度で、仰角 ϕ を水平面 (x - y 平面) を 0° とし、上方を正とした角度で表す。この場合、直交座標系と極座標系の変換は、次式ようになる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \phi \sin \theta \\ r \cos \phi \cos \theta \\ r \sin \phi \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

一般に用いられている水平角 $\bar{\theta}$ は x 軸方向を 0° とした反時計回りの角度、仰角 $\bar{\phi}$ は z 軸方向を 0° とした角度である。本書で用いられる角度 (θ, ϕ) と、一

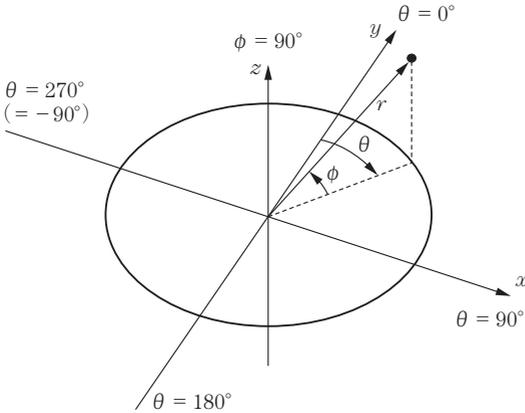


図 1.1 本書で用いる座標系

般に用いられる角度 $(\bar{\theta}, \bar{\phi})$ は、次式の関係にある。

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \bar{\theta}, \quad \phi = \frac{\pi}{2} - \bar{\phi} \tag{1.2}$$

1.2.2 伝搬波とアレイ・マニフォールド・ベクトル

図 1.2 に示すように、空間に M 個のセンサがあり、これらにより伝搬波 (propagating wave) を観測する場合を考える。伝搬の経路差により、各センサに到達する波には時間差が生じる。 m 番目のセンサにおける伝搬波の遅延時

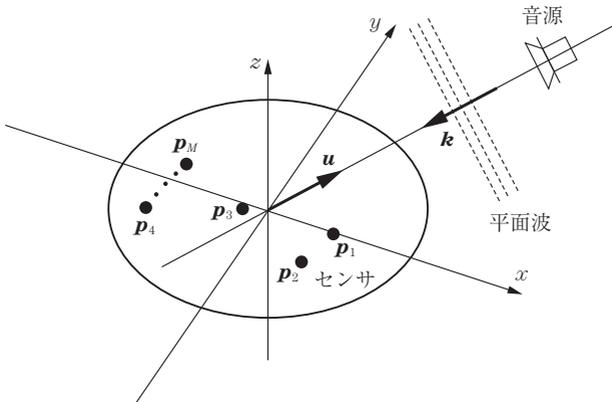


図 1.2 センサアレイに入射する伝搬波 (平面波)

間を τ_m と表すものとする、センサにおける観測信号は次式のようになる。

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} z_1(t) \\ \vdots \\ z_M(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(t - \tau_1) \\ \vdots \\ s(t - \tau_M) \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

ここで、 $z_m(t)$ は m 番目のセンサでの観測信号、 $s(t)$ は音源信号を表す。 t は時間を表す。観測信号 $\mathbf{z}(t)$ をフーリエ変換すると、次式に示す周波数領域での観測ベクトル (observation vector) が得られる。

$$\mathbf{z}(\omega) = \begin{bmatrix} Z_1(\omega) \\ \vdots \\ Z_M(\omega) \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

ここで

$$\begin{aligned} Z_m(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} z_m(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} s(t - \tau_m) e^{-j\omega t} dt \\ &= e^{-j\omega \tau_m} S(\omega) \end{aligned} \quad (1.5)$$

$S(\omega)$ は、次式で表される音源信号 $s(t)$ のフーリエ変換、すなわち音源の周波数スペクトルを表す。

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.6)$$

$\omega (= 2\pi f)$ は角周波数を、 f は周波数を、それぞれ表す。ここで、次式のベクトルを定義する。

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_M \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} e^{-j\omega \tau_1} \\ \vdots \\ e^{-j\omega \tau_M} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

式 (1.7) を用いて、式 (1.4) に示した観測ベクトルを書き直すと、次式のようになる。

$$\mathbf{z}(\omega) = \mathbf{a}S(\omega) \quad (1.8)$$

\mathbf{a} は、アレイ・マニフォールド・ベクトル (array manifold vector)¹⁾†¹ と呼ばれ、後述の音源定位や音源分離において、重要な役割を果たす^{†2}。式 (1.7) におけるアレイ・マニフォールド・ベクトルの要素 a_m は、 m 番目のセンサにおける伝搬波の位相差のみを表しているが、実際の音波の伝搬では、後述するように、距離減衰、障害物による遮蔽、センサのゲイン差などで、振幅差が生じる場合もある。これらを含めた形にアレイ・マニフォールド・ベクトルを一般化すると、アレイ・マニフォールド・ベクトルの要素は、音源から各センサまでの経路の伝達関数となる。

アレイ・マニフォールド・ベクトルは、つぎの 1.2.3 項および 1.2.4 項で述べるように、伝搬波が平面波とみなせる場合と、球面波として考えるべき場合とで異なる。音源がある程度遠方で、平面波とみなせる場合は、アレイ・マニフォールド・ベクトルは方向のみの関数となる。この場合、音源定位では、方向のみが推定可能となる。一方、音源がセンサアレイの近傍にあり、球面波として伝搬する場合、アレイ・マニフォールド・ベクトルは方向および距離の関数となり、音源定位により距離の推定も可能である。本書の例題では、簡単のため平面波の場合について述べるが、本書で述べる音源定位などの手法は、アレイ・マニフォールド・ベクトルを球面波に対するものに交換するだけで、距離推定や 2 次元/3 次元位置の推定に拡張することができる。

1.2.3 平面波

ここでは、本書で主として扱う平面波 (plane wave) について述べる。図 1.2 に示すように、 M 個のセンサにより平面波を観測するものとする。第 m 番目のセンサの位置は、次式の位置ベクトルで表される。

$$\mathbf{p}_m = [p_{m,x}, p_{m,y}, p_{m,z}]^T \quad (1.9)$$

^{†1} 肩付き番号は章末の引用・参考文献を示す。

^{†2} ベクトル \mathbf{a} は、ほかにも方向ベクトル (directional vector)²⁾、位置ベクトル (location vector)³⁾、ステアリングベクトル (steering vector)⁴⁾ などさまざまな呼び方がある。このうち、ステアリングベクトルは 4.2.2 項で登場し、本書では、アレイ・マニフォールド・ベクトルと区別して扱う。

音源方向を (θ_s, ϕ_s) で表すものとする、音源方向を表す単位ベクトルは、次式で与えられる（図 1.2 に示すように音源方向は平面波の進行方向とは逆であることに注意する）。

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \cos \phi_s \sin \theta_s \\ \cos \phi_s \cos \theta_s \\ \sin \phi_s \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

続いて、次式で示される、直交座標系での波動方程式を考える。

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} \quad (1.11)$$

ここで、 s は音圧を、 c は伝搬速度^{†1}を表す。式 (1.11) を満たす単一角周波数 ω の平面波は、次式のように表される⁵⁾。

$$\begin{aligned} s(\mathbf{p}, t) &= A \exp(j(\omega t - \mathbf{k}^T \mathbf{p})) \\ &= A \exp(j\omega t) \exp(-j\mathbf{k}^T \mathbf{p}) \end{aligned} \quad (1.12)$$

ここで、 $s(\mathbf{p}, t)$ は、任意の観測点 $\mathbf{p} = [p_x, p_y, p_z]^T$ において^{†2}、時刻 t に観測される信号波形である。 A は定数、 $A \exp(j\omega t)$ は信号源を表す。また、 $\exp(-j\mathbf{k}^T \mathbf{p})$ は観測点における位相差を表す。 $\mathbf{k} = [k_x, k_y, k_z]^T$ は波数ベクトル (wavenumber vector) と呼ばれ、次式で定義される¹⁾。

$$\mathbf{k} := -\frac{\omega}{c} \mathbf{u} = -\frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{u} \quad (1.13)$$

ここで、 λ は波長であり、角周波数 ω および周波数 f とつぎの関係がある。

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{c}{f} \quad (1.14)$$

式 (1.13) において、音源方向の単位ベクトル \mathbf{u} に負号がついていることからわかるように、波数ベクトルの方向は、平面波の進行方向を表している。また、その大きさ $|\mathbf{k}|$ [1/m] は、単位長さあたりに含まれる波の周期の数を表す。こ

^{†1} 空気伝搬の場合 $c \simeq 331.5 + 0.61T$ [m/s] である。 T は摂氏温度を表す。

^{†2} 位置ベクトル \mathbf{p} は、波動方程式 (1.11) との整合性を考えれば、 $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$ と書くべきであるが、他の記号との重複をさけるため、 $\mathbf{p} = [p_x, p_y, p_z]^T$ と表す。

索引

<p>【あ】</p> <p>アフィン射影 63</p> <p>アフィン射影法 (APA) 60</p> <p>アレイ・マニフォールド・ベクトル 5</p> <p>【い】</p> <p>一般化固有値分解 97, 113</p> <p>一般化サイドローブキャンセラ (GSC) 90</p> <p>インパルス応答 10</p> <p>【う】</p> <p>ウィナーフィルタ 48</p> <p>ウィナー・ホッフ方程式 52</p> <p>【え】</p> <p>エントロピー 214, 270</p> <p>遠方場 9</p> <p>【お】</p> <p>重み付き最小二乗法 46</p> <p>【か】</p> <p>開口 78</p> <p>過完備基底 205</p> <p>可視領域 75</p> <p>カーネル 141</p> <p>カルーネン・レーベ変換 (KLT) 108</p> <p>カルマンフィルタ 171</p> <p>完全データ 147</p> <p>観測行列 33</p> <p>観測ベクトル 4, 18</p> <p>観測方程式 167</p> <p>【き】</p> <p>ギブンス回転 230</p> <p>逆フーリエ変換 20</p>	<p>球面波 9</p> <p>教師あり学習 51, 140</p> <p>近傍場 9</p> <p>【く】</p> <p>空間ウィナーフィルタ 79</p> <p>空間折り返しひずみ 76</p> <p>空間キュムラント行列 129</p> <p>空間スペクトル 103</p> <p>空間相関行列 15</p> <p>【け】</p> <p>結合ガウス分布 38</p> <p>【こ】</p> <p>交換の不定性 232</p> <p>誤差特性曲面 56</p> <p>コヒーレントサブスペース法 136</p> <p>固有空間 101, 108</p> <p>混合行列 13</p> <p>【さ】</p> <p>最急降下法 56</p> <p>最小二乗法 29</p> <p>最小ノルム法 118</p> <p>最小分散 (MV) 法 86</p> <p>最尤 (ML) 法 29, 82</p> <p>雑音部分空間 110</p> <p>サポートベクターマシン (SVM) 140</p> <p>残響時間 12</p> <p>散布図 210</p> <p>サンプリング定理 77</p> <p>【し】</p> <p>死角 85, 116</p> <p>シグマポイント 183</p> <p>事後確率密度 30</p> <p>二乗平均誤差 (MSE) 34</p>	<p>事前確率密度 30</p> <p>自然勾配 216</p> <p>事前推定誤差 56</p> <p>重点サンプリング 190</p> <p>縮退 189</p> <p>主成分分析 (PCA) 204</p> <p>状態ベクトル 167</p> <p>信号部分空間 110</p> <p>振幅の不定性 233</p> <p>【す】</p> <p>スコア関数 217</p> <p>ステアリングベクトル 73</p> <p>ステップサイズパラメータ 56</p> <p>【せ】</p> <p>正規方程式 42, 43, 52</p> <p>正則化 59</p> <p>遷移確率密度 168</p> <p>線形推定器 34</p> <p>線形モデル 33</p> <p>センサアレイ 1</p> <p>【そ】</p> <p>総合最小二乗問題 128</p> <p>【た】</p> <p>対数尤度関数 44</p> <p>畳み込み 10</p> <p>多チャネルウィナーフィルタ 79</p> <p>短区間フーリエ変換 18</p> <p>【ち】</p> <p>遅延和 (DS) ビームフォーマ 71</p> <p>逐次重点サンプリング 189</p> <p>中心極限定理 222</p> <p>超平面 140</p> <p>直交性原理 43</p>
---	---	---

直交補空間	110, 249	波数ベクトル	6	【め】	
【て】		パーティクルフィルタ	165, 188	メインローブ	75
提案分布	190	【ひ】		【も】	
テイラー級数展開	261	微分拘束	90	モンテカルロ法	165, 188
伝搬波	3	ビームパターン	74	【や】	
【と】		ビームフォーマ	69	ヤコビ法	229
同時対角化	100, 229	【ふ】		【ゆ】	
独立成分分析 (ICA)	204	不偏性	42	尤度関数	29
【に】		ブライント信号源分離 (BSS)	204	尤度方程式	44
ニュートン法	57	プロセス方程式	167	【ら】	
【ね】		プロッキング行列	91	ラグランジュの未定乗数法	259
ネグントロピー	223	【へ】		【り】	
【の】		ベイズ推定法	29	リサンプリング	189
望みの応答	50	平面波	5	粒子	188
【は】		ヘシアン行列	57	【ほ】	
白色化	113, 208	【ほ】		忘却係数	46, 65
波数一周波数応答	73				

【A】		【I】		【P】	
AIC	138	ICA	204	PCA	204
APA	60	【K】		【R】	
【B】		KL 情報量	214	RLS 法	63
BSS	204	KLT	108	【S】	
【D】		【L】		SIR フィルタ	196
DS ビームフォーマ	71	LMS 法	58	SOBI	227
【E】		【M】		SVM	140
EM アルゴリズム	147	MAP 法	31	【U】	
ESPRIT 法	125	MDL	138	unscented カルマンフィルタ	
【F】		ML 法	29, 82	(UKF)	183
FastICA	221	MMSE 法	31	unscented 変換	183
FIR フィルタ	20	MSE	34	~~~~~	
【G】		MUSIC 法	115	【数字】	
GSC	90	MV 法	86	1 次マルコフモデル	167
		【N】			
		NLMS 法	58		

— 著者略歴 —

- 浅野 太 (あさの ふとし)
1986年 東北大学工学部電気工学科卒業
1991年 東北大学大学院工学研究科博士課程修了
(電気及通信工学専攻)
工学博士
1991年 東北大学電気通信研究所助手
1995年 電子技術総合研究所
(現 産業技術総合研究所)
現在に至る
- 1993年
～1994年 ペンシルベニア州立大学客員研究員
2006年～ ホンダ・リサーチ・インスティテュート・
ジャパン客員研究員

音のアレイ信号処理

— 音源の定位・追跡と分離 —

Array signal processing for acoustics

— Localization, tracking and separation of sound sources —

© (社) 日本音響学会 2011

2011年2月25日 初版第1刷発行

検印省略

編 者 社団法人 日本音響学会
東京都千代田区外神田2-18-20
ナカウラ第5ビル2階

発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也

印刷所 三美印刷株式会社

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 978-4-339-01116-6 (河村) (製本: 牧製本印刷)

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