

# 繰り返し推定の数理から工学的応用へ

池田 思朗

## 1 研究の目的

近年、様々なデータがデジタル化されて蓄積されており、記憶媒体としてのハードディスクも高速で安価になっている。そして多量のデータを処理する計算機も十分高速になっている。10年前までは想像もできなかったような複雑な計算処理を、多量のデータに対し行うことができる。その結果、今までは実現ができなかった統計的処理が可能となった。

このことは、音声認識や画像認識などの認識機械を実現するためには重要である。音声や画像などが持つ個々の特徴を人間が発見し、ソフトウェアとしてプログラミングしハードウェアとして実現するのは効率が悪く、正確でない。データから認識を可能とする特徴を自動的に発見し、認識機械としてのアルゴリズムを構成することが求められている。これは機械の設計に対してコストダウンに繋がる。

このような統計的手法による特徴の抽出は、古くから統計学において研究されてきた。しかし、統計的推論やアルゴリズムなどの理論的な研究に基づき提案された手法の中には、工学的な実現が可能でありながらも実際の応用の場では用いられていないものが多い。

通常、理論的に美しい内容には、問題設定やデータに対してある種の仮定が存在する。しかし多くの現実の問題では、理想的な仮定は成り立たない。また、理論的な結果は応用を目指す工学者にとって理解が容易でないこともある。この状況は理論的な研究、そして応用を目指す研究にとっても不幸である。理論から応用への道筋を正しくつけることが必要である。

さきがけ研究に於いては、理論的な研究を行い、それを専門としながら現実の応用にも踏み込み、工学的に実現可能な手法を具体的に提案することを目指してきた。理論的な研究からは次の時代の研究の種となる理論を導き、そして工学的な応用を目指した研究では、具体的な問題に対して理論を適用した。それぞれの研究成果については次節にまとめる。

## 2 研究成果

### 2.1 繰り返し推定の数理的研究

本さきがけ研究は2つの柱から成る。ひとつは理論的な研究であり、繰り返し推定法の数理的研究としてまとめることができる。統計的推定法には繰り返しアルゴリズムがしばしば用いられる。本研究で特に対象としてものは、EM アルゴリズム、ターボ符号、独立成分解析 (ICA)、などの繰り返し推定法である。

EM アルゴリズムは実現が容易で、収束も保障されている繰り返し推定法である [1]。しかしその収束は一般に遅いことが知られている。本研究では再帰的に EM アルゴリズムを用いることで、簡単に EM アル

ゴリズムを加速できることを示した [2, 3]. また, EM アルゴリズムと類似した Wake-Sleep アルゴリズムという学習法が提案されていたが, 収束性については理論的には明らかではなかった. このアルゴリズムに対して, 情報幾何学を用いることで, 一般的には収束しないことを示した [4, 5].

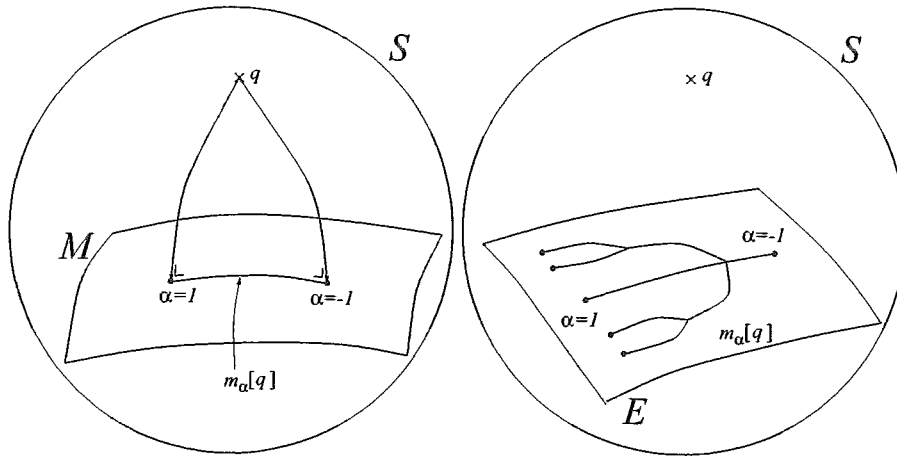


図 1: 平均場近似の情報幾何と  $\alpha$  接続による近似

このほかにも, 統計力学における平均場近似に対する新たな計算法を提案した (図 1)[6]. さらに現在の IT 技術の要素技術である誤り訂正符号として, 近年注目されているターボ符号と呼ばれる符号に対し情報幾何に基づく解析を行った (図 2) [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. この解析は, 限界に近いと呼ばれるターボ符号の誤り訂正能力をさらに向上させる可能性を示唆しているものである.

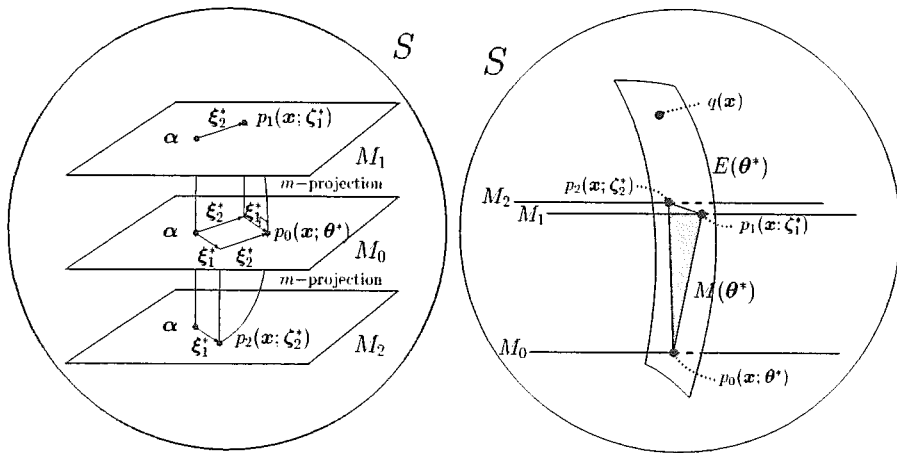


図 2: ターボ符号の情報幾何的な解釈

## 2.2 独立成分解析 (ICA:Independent Component Analysis)

もうひとつの研究の柱は、独立成分解析 (以下 ICA) の工学的応用である。ICA は 1980 年代の末に提案された、統計的多次元信号処理の新たな手法である。近年、音声分離や生体計測データの信号処理に対し、独立成分解析が有用であることが示され、盛んに研究が行なわれている。

さきがけ研究では、音声の実時間分離を可能とするアルゴリズムを開発し、音声認識に適用した。また、生体計測データ、特に脳磁計データへの適用を行なった。次節以下でそれぞれの成果について説明する。

### Cocktail Party 効果問題への応用

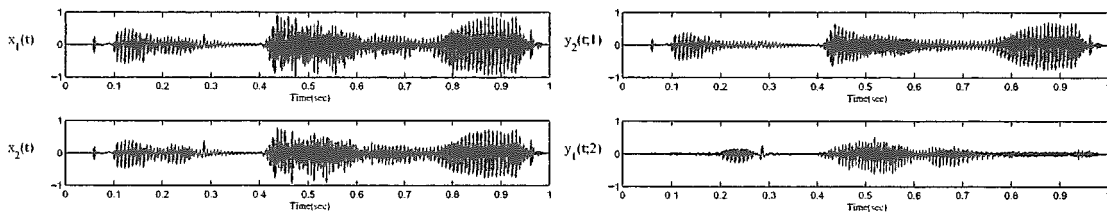


図 3: Cocktail Party 問題. 時間遅れと反射がある混合された音声信号を分離する。左は録音された信号右は分離された信号

ICA は、独立な信号源が混じりあって観測されたとき、元の信号の復元を目的とする。この問題は、Cocktail Party 効果、あるいは聖徳太子問題と呼ばれる人間の能力と対応されて取り上げられることが多い。すなわち、何人もの人が同時に話をしている中で、目的の一人の声のみを聞き分けられる能力である。

工学的にこの問題を表現し直すと、複数の人が話す状況、あるいは一人が雑踏の中で話している状況で、複数のマイクロフォンで音を録音し、その一人の音声のみを抽出、あるいは認識することと等しい。基本的な ICA の問題では、信号の時間遅れがないと仮定しており、このままでは複数のマイクで録音した音声に対しては用いられない。なぜなら複数のマイクで観測した場合には音の到達時間の差、あるいは壁からの音の反射などにより、時間遅れが含まれるからである。

さきがけ研究ではこの問題に対し、信号を時間周波数領域に展開し、時間遅れを位相のずれとして吸収させてしまい、複素領域での基本 ICA 問題に還元して解くアルゴリズムを提案した [14, 15, 16, 17]。

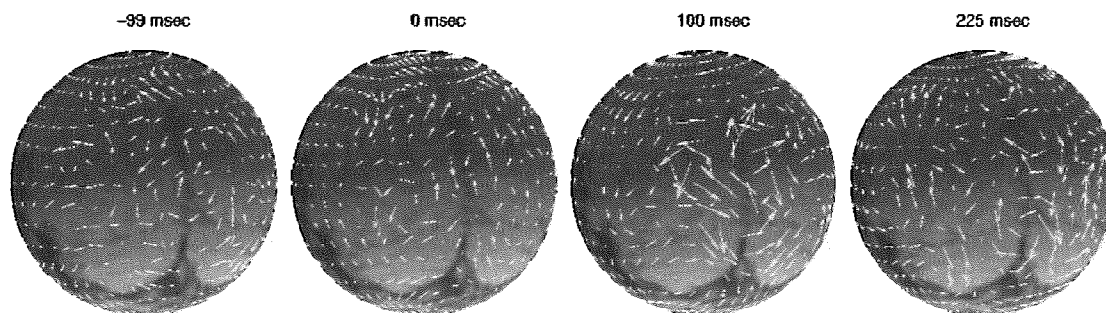
さきがけ研究ではこの理論的な研究をさらに 2 つの方向に発展をさせた。ひとつは実時間処理である。音声分離のアルゴリズムは、分離のためのフィルターの計算のため、非常に時間がかかることが多い。しかし提案している手法は計算量が少なく、DSP(Digital Signal Processor) などの専用の LSI を使えば十分実時間の処理で計算が可能である。本研究では、改善が必要ではあるが実時間で分離を可能とするシステムを構成した [18, 19, 20, 21]。改善策のひとつとしては、反射の抑制が挙げられる。マイクアレイを用い、既存の手法と組み合わせることで反射の抑制が可能である。この改善策についても論文を通じて発表を行なっている [22, 23, 24]。

一方、音声分離の重要な応用の 1 つは音声認識への応用である。通常の音声認識システムでは、単音の認識率では 90% を超えるが、雑音には弱い。認識率が 40% を下回ることも珍しくない。ICA を用いることで、この認識率を向上させることができれば、実用上大変に役立つことが予想できる。この方向でもいく

つかのグループと協力しながら研究を行ない、認識率にして 20 から 30%の改善を行っている。[25, 26, 21]

## 脳磁計データ解析

通常の処理によるデータ



提案する手法による解析結果

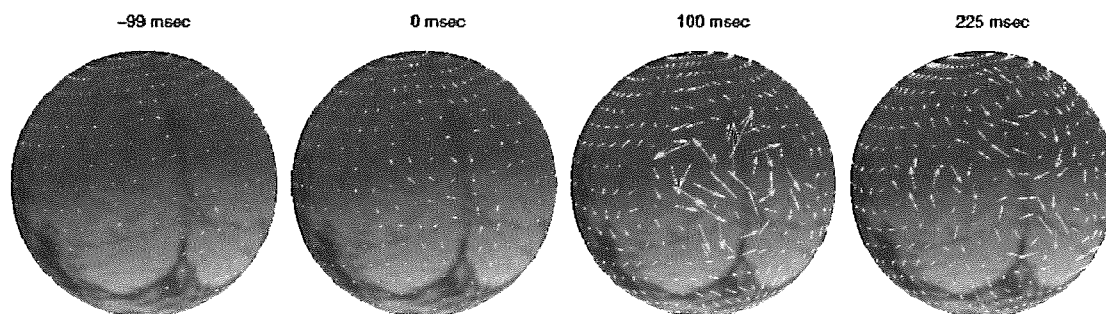


図 4: 独立成分解析による脳磁計データの解析

MEG (Magnetoencephalograph, 脳磁計) は、脳が発生する磁場を観測し、無侵襲で脳活動を捉える計測法である。MEG は、脳内の活動を高い時間、空間分解能で測定できるが、脳が発生する磁場は極めて微弱(地磁気の数億分の一程度)であるため、雑音除去が重要な問題となる。従来ではシールドルーム、別センサーによる外部磁場の測定(リファレンスチャンネル)、及び 100 回以上の加算平均を併用し、脳内活動の計測を行っている。

本研究では、この問題に対し ICA を用いることにより、地磁気の変化、電源ノイズ、センサー雑音等を除去する手法を提案している。脳内の活動と地磁気の変化、電源ノイズなどは独立であると考えられる。したがって ICA によって分離ができることが予想される。基本的な ICA の問題では、センサーノイズは扱わないが、本研究ではセンサーノイズを仮定し、この推定を行なうことでセンサーノイズの軽減を可能とした [27, 28, 29, 30, 31, 32]。

脳磁計の実験では、加算平均を行うため、同じ実験を何度も繰り返す必要があったが、この手法により、加算回数が減り、実験にかかるコスト、被験者のストレスを軽減することができる。本研究の手法については実際に脳計測実験に用いられ有効な結果を与えており [33, 34, 35, 36, 37, 38]、島津製作所と共同で特許の出願を行なっている [39]。

### 3 今後の展望

本研究では、理論的な研究とその応用という2つの面から研究を行ってきた。理論的な研究では、平均場近似の情報幾何やターボ符号の情報幾何といったこれからの技術の基礎となる研究を行なった。今後重要となるのは、これらの基礎的な研究を基に工学的な応用まで道筋をつけていくことである。

その中で、ターボ符号はデジタル情報通信の基礎となる技術である。1993年に提案され、シャノン限界にせまる誤り訂正能力を持ち、実用的な復号法を持つとされ、近い将来の実用化も決定している。繰り返しアルゴリズムを用いる復号法の性質については、数値実験を通じ、様々な角度から調べられているが、理論的には、収束性、安定性、そして復号誤差に至るまで、基本的な性質は未だに分っていない部分が多い。また、この繰り返しアルゴリズムが低密度パリティ検査符号と呼ばれる誤り訂正符号や、ベイジアンネットにおける確率伝播法、統計物理のベータ近似など、分野を超え、様々な手法と一致することが指摘されている。特にベイジアンネットは様々な確率分布を表現する能力を持つ手法で、人工知能の分野においても注目されている。

本研究では、情報幾何学を用いてこのアルゴリズムの性質を調べ、初歩的な結果を得ている。その結果、ターボ符号の復号結果にも誤差があり、必ずしもシャノン限界を達成できないことが分りつつある。復号誤差の解析は、現在世界的にも理論的に明らかにされておらず、この解析は世界にさきがける結果である。

今後は、この繰り返しアルゴリズムの収束性、漸近的な性質、安定性などをさらに理論的に解析する。復号誤差の解析には各手法を改善する可能性があることから、本研究の結果、各手法の改善法をアルゴリズムとして提案し、実用に役立てることが課題である。

ターボ符号の復号法が低密度パリティ検査符号、ベイジアンネットの誤差伝播法、統計物理のベータ近似と共通の数学的構造を持つことは知られているが、それぞれの手法には、独自の細かい問題がある。ターボ符号では、要素符号となる線型符号としてどのようなものを選ぶか、またベイジアンネットの場合、具体的なデータを扱う必要がある。さらに、低密度パリティ検査符号、統計物理では、大規模な数値実験を適宜行なう必要がある。今後は各テーマの専門家と交流を深め、科学的な意見交換の場を持つことで、個々の問題を解決していきたい。

一方、工学的な応用分野として提案してきたICAの個々の手法についても、これから発展の余地は十分にある。

ICAは、データに対し、独立性のみという極力少ない仮定を用いることが特徴の一つだが、その方向性には限界がある。これからはいかに事前知識を用いるかが重要である。そのためにはデータの性質に基づき数理的に扱い易い仮定を加えていくことが重要である。データに関して、正しい知識をいかに集め、定式化を行なうのが問題となる。

音声信号の分離に関しては、用いる状況を限定し、その状況を正確に記述することでさらなる発展が望めると考える。例えば、携帯電話などの限定された状況を考え、より高性能、高速なアルゴリズムを開発し、実験を通じて実証していくことが考えられる。

一方、生理データを扱った生体計測データの解析では、MEG, MRIなどの計測装置を用い、目的となる性質を知るために、実験を行なうことになる。実験の設計と解析手法を直接組み合わせ、アルゴリズムの特殊化、高性能化が必要となってくるだろう。実験の計画の段階から参加し、脳に関する生理学的知見と併せて独立成分解析を改善し、適用する研究を行なう必要がある。

## 成果リスト

### 繰り返し推定の数理的研究

- [1] 村田昇, 池田思朗. ニューラルネットと EM. 渡辺美智子, 山口和範 (編), EM アルゴリズムと不完全データの諸問題, 第 8 章, pp. 155-188. 多賀出版, February 2000.
- [2] 池田思朗. 再帰的学习による EM アルゴリズムの加速. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 12, pp. 2819-2827, December 1998.
- [3] Shiro Ikeda. Acceleration of the EM algorithm. *Systems and Computers in Japan*, Vol. 31, No. 2, pp. 10-18, February 2000.
- [4] Shiro Ikeda, Shun-ichi Amari, and Hiroyuki Nakahara. Convergence of the wake-sleep algorithm. In Michael S. Kearns, Sara A. Solla, and David A. Cohn, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 11, pp. 239-245. MIT Press, Cambridge, MA, 1999.
- [5] 池田思朗. EM アルゴリズムの関連話題 -wake-sleep アルゴリズムと再帰的 EM-. 1999 年 情報論的学习理論ワークショップ予稿集, pp. 187-194, ラフォーレ修善寺, August 1999.
- [6] Shun-ichi Amari, Shiro Ikeda, and Hidetoshi Shimokawa. Information geometry and mean field approximation: The  $\alpha$ -projection approach. In Manfred Opper and David Saad, editors, *Advanced Mean Field Methods - Theory and Practice*, pp. 241-257. MIT Press, April 2001.
- [7] 池田思朗, 田中利幸, 甘利俊一. ターボ符号と Gallager 符号の情報幾何. 電子情報通信学会技術研究報告, 第 IT2001-26 巻, pp. 7-12, 大阪電気通信大学, July 2001.
- [8] 池田思朗, 田中利幸, 甘利俊一. ターボ符号の情報幾何. 情報論的学习理論ワークショップ (IBIS2001) 予稿集, pp. 233-238, 国立情報学研究所, July 2001.
- [9] Shiro Ikeda, Toshiyuki Tanaka, and Shun-ichi Amari. Belief propagation and turbo code: Information geometrical view. to appear in 2001 International Conference on Neural Information Processing (ICONIP'2001), November 2001.
- [10] Shiro Ikeda, Toshiyuki Tanaka, and Shun-ichi Amari. Information geometrical framework for analyzing belief propagation decoder. to appear in Neural Information Processing Systems 2001 (NIPS'2001), December 2001.
- [11] Toshiyuki Tanaka, Shiro Ikeda, and Shun-ichi Amari. Information-geometrical significance of sparsity in Gallager code. to appear in Neural Information Processing Systems 2001 (NIPS'2001), December 2001.
- [12] 池田思朗, 田中利幸, 甘利俊一. ターボ符号の情報幾何. 電子情報通信学会論文誌 D-II 投稿中, August 2001.
- [13] Shiro Ikeda, Toshiyuki Tanaka, and Shun-ichi Amari. Information geometry of turbo codes and low-density parity-check codes. submitted to IEEE transaction on Information Theory, August 2001.

## 独立成分解析: Cocktail Party 効果問題への応用

- [14] Shiro Ikeda and Noboru Murata. A method of blind separation based on temporal structure of signals. In *Proceedings of 1998 International Conference on Neural Information Processing (ICONIP'98)*, Vol. 2, pp. 737-742, Kitakyushu, Japan, October 1998.
- [15] Shiro Ikeda and Noboru Murata. A method of ICA in time-frequency domain. In *Proceedings of International Workshop on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation (ICA'99)*, pp. 365-371, Aussios, France, January 1999.
- [16] 池田思朗. ICA の音響処理への応用. 日本音響学会 2000 年秋季研究発表会 講演論文集, pp. 435-438, 岩手県立大学, September 2000.
- [17] Noboru Murata, Shiro Ikeda, and Andreas Ziehe. An approach to blind source separation based on temporal structure of speech signals. *Neurocomputing*, Vol. 41, No. 1-4, pp. 1-24, August 2001.
- [18] 浅野太, 池田思朗. Blind source separation の実装に関する検討. 日本音響学会 1999 年秋季研究発表会 講演論文集, pp. 513-514, 島根大学, September 1999.
- [19] 浅野太, 池田思朗. TDD アルゴリズムを用いたブラインド信号分離の評価と DSP. 日本音響学会 2000 年秋季研究発表会 講演論文集, pp. 441-442, 岩手県立大学, September 2000.
- [20] 小川通朗, 浅野太, 池田思朗, 山田武志, 北脇信彦. 周波数領域でのブラインド信号処理アルゴリズムの比較. 日本音響学会 2000 年秋季研究発表会 講演論文集, pp. 439-440, 岩手県立大学, September 2000.
- [21] Futoshi Asano and Shiro Ikeda. Evaluation and real-time implementation of blind source separation system using time-delayed decorrelation. In *Proceedings of International Workshop on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation (ICA2000)*, pp. 411-415, Helsinki, Finland, June 2000.
- [22] Futoshi Asano, Shiro Ikeda, Michiaki Ogawa, Hideki Asoh, and Nobuhiko Kitawaki. Blind source separation in reflective sound fields. In *Proceedings of Workshop on Hands-Free Speech Communication 2001 (HSC2001)*, pp. 51-54, Kyoto, Japan, April 2001.
- [23] Futoshi Asano, Shiro Ikeda, Michiaki Ogawa, Hideki Asoh, and Nobuhiko Kitawaki. Blind source separation in reflective sound fields. In *Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2001 (ICASSP2001)*, Salt Lake City, U.S.A., May 2001. MULT-P2.1.
- [24] Futoshi Asano, Shiro Ikeda, Michiaki Ogawa, Hideki Asoh, and Nobuhiko Kitawaki. Combined approach of array processing and independent component analysis for blind separation of acoustic signals. submitted to *IEEE transactions on Audio & Speech Processing*, October 2000.
- [25] 奥乃博, 池田思朗. Blind source separation による 2 話者同時発話認識. 人工知能学会研究会資料, pp. 1-6, 東京青山 TEPIA ホール, November 1998. AI チャレンジ研究会 (第 1 回).

- [26] Hiroshi G. Okuno, Shiro Ikeda, and Tomohiro Nakatani. Combining independent component analysis and sound stream segregation. In *Proceedings of IJCAI-99 Workshop on Computational Auditory Scene Analysis*, pp. 92-98, Stockholm, Sweden, August 1999.

#### 独立成分解析:脳磁計データ解析

- [27] 池田思朗. 独立成分解析の信号処理への応用. 計測自動制御学会「計測と制御」, Vol. 38, No. 7, pp. 461-467, July 1999.
- [28] 池田思朗. 独立成分解析とは(第10回)-ノイズと独立成分解析-. Computer Toray 3月号, pp. 60-65, February 2000. サイエンス社.
- [29] Shiro Ikeda. ICA on noisy data: A factor analysis approach. In Mark Girolami, editor, *Advances in Independent Component Analysis*, chapter 11, pp. 201-215. Springer-Verlag London Ltd., June 2000.
- [30] Shiro Ikeda. Factor analysis preprocessing for ICA. In *Proceedings of International Workshop on Independent Component Analysis and Blind Signal Separation (ICA2000)*, pp. 327-332, Helsinki, Finland, June 2000.
- [31] Shiro Ikeda and Keisuke Toyama. ICA for noisy neurobiological data. In *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks 2000 (IJCNN2000)*, Como, Italy, July 2000.
- [32] Shiro Ikeda and Keisuke Toyama. Independent component analysis for noisy data MEG data analysis. *Neural Networks*, Vol. 13, No. 10, pp. 1063-1074, December 2000.
- [33] 梶原茂樹, 吉川健治, 外山敬介, 村田昇, 池田思朗, 甘利俊一, 大谷芳夫, 江島義道, 吉田佳一. 独立成分解析 (independent component analysis) 法による脳磁図信号の分離と解析. 第22回日本神経科学大会プログラム抄録集, p. 163, 大阪 ATC ホール, July 1999.
- [34] Shigeki Kajihara, Kenji Yoshikawa, Noboru Murata, Shiro Ikeda, Masashi Tanigawa, Yoshio Ohtani, Yoshimichi Ejima, and Keisuke Toyama. Application of independent component analysis (ICA) to magnetoencephalography. In *29th Annual meeting. Society for Neuroscience Abstracts*, Vol. 25, Part 2, p. 1930, Miami, U.S.A., October 1999.
- [35] 梶原茂樹, 外山敬介, 池田思朗, 村田昇, 甘利俊一, 大谷芳夫, 江島義道, 吉田佳一. 独立成分分析のてんかん脳磁図への適用. 第15回日本生体磁気学会, 第13(1)巻, pp. 144-145, つくば工業技術院, May 2000.
- [36] Shigeki Kajihara, Keisuke Toyama, Shiro Ikeda, Noboru Murata, Tatsuya Kobayashi, Yoshihisa Kida, and Yoshikazu Yoshida. Separation of MEG signal by independent component analysis. In *Proceedings of Biomag2000*, Helsinki, Finland, August 2000.



[37] 谷川昌司, 吉川健治, 外山敬介, 江島義道, 池田思朗, 梶原茂樹. 主観的輪郭認知とヒト視覚系皮質の脳磁図反応. 第 23 回日本神経科学大会第 10 回神経回路学会大会合同大会プログラム抄録集, p. 296, パシフィコ横浜, September 2000.

[38] Masashi Tanigawa, Kenji Yoshikawa, Keisuke Toyama, Yoshio Ohtani, Yoshimichi Ejima, Shiro Ikeda, and Shigeki Kajihara. Motion adaptation depresses perception of contour from motion and magnetoencephalographic (MEG) responses in V2/3 and V5. In *30th Annual meeting. Society for Neuroscience Abstracts*, Vol. 26, Part 1, p. 670, New Orleans, U.S.A., November 2000.

### 特許

[39] 池田思朗, 梶原茂樹, 外山敬介. 生体信号計測装置. 特願 平 11-304132 号, October 1999.

### 受賞

- [14] は 1999 年 日本神経回路学会研究賞を受賞.
- [32] は 2001 年 日本神経回路学会論文賞を受賞.