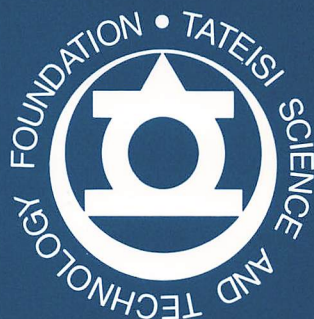


立石科学技術振興財団

助成研究成果集

【第4号】

平成7年(1995)



人間と機械の調和を促進する助成研究成果集

第 4 号

平成 7 年度 9 月 (1995)

財団法人 立石科学技術振興財団

Tateisi Science and Technology Foundation

設 立 趣 意 書

今日、日本の科学技術の進歩・発展は著しいものがありますが、エレクトロニクス及び情報工学の分野における技術革新も、いまでは社会的・経済的にきわめて大きな影響を及ぼしています。たとえば、工場では各種工程のオートメーション化が進むとともに、オートメーション機器をコンピュータや通信機器とつなぎ、工場全体を統合的に動かすシステムの実現へと向かっています。

一方、オフィスでは、ワークステーションやパソコンなどのOA機器の普及が目覚ましく、また通信技術を利用することにより、データベースへのアクセスや情報交換も盛んになりつつあります。さらに、家庭においても、いわゆるホームオートメーション機器が浸透しはじめています。

このように、人間が働き生活する環境に、エレクトロニクス技術に支えられた各種機器がどんどん入ってきており、しかもその技術は年々高度化・システム化してきています。しかしながら、その技術革新のスピードが速いだけに、技術革新がそれら機器やシステムを使う主体である人間に及ぼす影響が十分考慮されない傾向があります。このため、本当に使いやすい機器・システムの開発が大きな課題になっています。

一方、今後の技術の飛躍的な発展のためには、人間の素晴らしい知識能力を規範にしたファジィなどの人工知能技術を確立し、使いやすい機器・システムの提供はもちろん、人間がより楽しく創造的な活動をするのに広く役立たせることが期待されます。

このような情勢に鑑み、オムロン株式会社、立石一真及び立石孝雄の拠出資金により「立石科学技術振興財団」を設立し、エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進する研究及び国際交流に対し助成をおこない、技術革新を人間にとって真に最適なものとするに寄与せんとするものであります。

助 成 研 究 成 果 集

目 次

1. 設立趣意書	
2. 理事長挨拶	2
3. 財団関係者寄稿（朝倉利光 評議員 北海道大学電子科学研究所長）	3
4. 第6回（平成7年度）助成課題一覧	4
(1) 研究助成（21件）	4
(2) 国際交流助成（10件）	5
5. 助成研究成果の掲載抄録一覧	6
6. 助成研究成果の抄録	8
7. 索 引（掲載号）	126
8. 財団の概要	134
役員・評議員名簿（五十音順）	135
9. 平成8年度助成課題候補募集案内	136
10. 編集後記	137

ごあいさつ

オムロン(株)の創業者でありました故立石一真が卒寿を迎えましたのを機に、人間と機械の調和を促進することを趣意として、ご賛同いただいた多くの方々のご尽力とご協力により、平成2年3月6日に財団法人立石科学技術振興財団を設立いたしました。本年5月には、第6回目の助成金贈呈式をとり行なうことができました。また昨年助成研究成果集の第3号を発行したのに続き、ここに第4号を発行することができますことは誠に悦ば



しく、財団関係者の皆様をはじめ、多くの皆様の日頃のご支援に深く感謝申し上げます。次第でございます。

本成果集の発行は、助成研究の成果普及活動のひとつとして行うもので、助成対象となった研究課題の成果を、財団設立の趣意に添って、方向を同じくする研究者、研究機関と共有することを目的とすると共に、研究者の相互交流の一助となることを願って発行するものです。これからも毎年継続的に発行できるよう願っています。第4号の発行にあたり、ご寄稿頂きました研究者の皆様をはじめ、ご協力いただいた方々に厚く御礼申し上げます。

限りない情報化と科学技術の進歩の中で、豊かで健全な社会を創造するためには、科学技術と人間の調和の向上を求める努力も忘れてはならないことと考えています。本財団が、人間重視の視点にたって科学技術の健全な発展と最適化社会の創造のために、いささかでも寄与できますことを心から願っております。

今後の本財団の活動に対し、引き続き皆様のご支援ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。ご挨拶とさせていただきます。

理事長 立石 孝雄

寄稿：情報革命と人間

現在“情報”という言葉は至る所に氾濫している。日本でこの言葉が日常的に使われ始めたのは1980年代であるが、アメリカでは既に情報技術を指向した研究所が1950年代に始まっていた。

私は1950年代後半アメリカに滞在し、大学院在学中に関係し、修了後就職したのが民間会社の情報技術研究所で、日本人として最も古くから情報に関わってきた一人ではないかと思っており、かつ情報について長く考えさせられてきた。情報時代、情報技術など情報と名のつくところに往々にしてコンピュータがでてくる。情報即ちコンピュータと錯覚しそうである。しかしなぜ現代は情報なのかを深刻に問うと、その答は簡単ではない。



人間は原始時代から二つの発明をきっかけに文明社会に移行した。一つは火というエネルギーを使うことの発明であり、もう一つは情報伝達や保存の文字の発明である。前者からエネルギー関連の科学や利用技術が発展し、近代の科学技術が生まれた。その結果、人間の肉体労働がエネルギー利用の機械に置き換えられてきた。一方、もう一つの発明である文字には、今まで科学技術のメスがほとんど入ったことがなかった。エネルギー利用の機械化は格段の進歩をとげたが、言葉や文字などの情報の機械化は遅れた。しかし、現代社会は大量の情報を生み出し、かつ情報の取得・処理・伝達・適用のすべての機械化を要求している。

機械化は、人類が文明社会に移行するにあたって発明したエネルギーと情報の機械化があって初めて完成する。即ち現代科学技術の本質は、情報の機械化を求める“情報革命”にある。近代までの科学技術は、すべて人間のためにあった。しかし、情報革命は、ロボットに見られるように、人間の存在自体を問題にしはじめ、真に人間と科学技術のあり方が問われつつある。

本財団の目的は「エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和の促進のための助成」にあり、まさに情報革命における人間と機械化のあり方を真摯に追求しようとするもので、これは現代の科学技術が問われている問題でもある。

評議員 朝 倉 利 光
(北海道大学電子科学研究所長)

第6回（平成7年度）研究助成課題一覧

[研究助成]

(五十音順)

研究代表者氏名・所属機関・職名	研究課題名又は派遣先研究集会 / 機関名
青 山 尚 之 静岡大学工学部精密工学科・助教授	高真空用超小型自走機械群の開発と微細機能電子デバイス製作への応用
赤 澤 堅 造 神戸大学工学部情報知能工学科・教授	ヒトの手の運動制御機能を取り入れた筋電義手の開発
荒 木 勉 徳島大学工学部機械工学科・教授	細胞の生理反応を利用したマイクロセンサーの開発と局所環境モニタリングへの応用
石 田 好 輝 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科・助教授	免疫型外乱除去システムの研究
伊 藤 英 則 名古屋工業大学工学部 知能情報システム学科・教授	マルチメディア情報の並列処理とその知能化プログラムに関する研究
尾 崎 俊 治 広島大学工学部・教授	身障者にやさしい情報処理作業環境に関する調査・研究
碓 崎 賢 一 九州工業大学情報工学部・助教授	仮想現実システムのためのオブジェクト指向プロダクションシステム
金 子 俊 一 東京農工大学工学部電子情報工学科・助教授	人間-ロボット協調作業のための画像認識に基づくハンドリングインタフェースの研究
金 子 真 広島大学工学部第二類計数管理工学講座・教授	生体信号を利用した学習型ヒューマン・ロボット・インターフェースに関する研究
金 西 計 英 四国大学短期大学部児童教育科・講師	自己説明を用いた知的学習環境の構築に関する研究
桑 原 秀 行 勸応用科学研究所第1研究室・室長	生体内環境における材料表面と生体との反応に伴う電気信号の検出に関する研究
佐 藤 一 雄 名古屋大学大学院工学研究科 マイクロシステム工学専攻・教授	集積化機械システムの研究
篠 原 寛 明 岡山大学工学部生体機能応用工学科・助教授	アレルギー関連免疫細胞の情報変換機能の電気化学刺激制御に関する研究
田 中 一 男 金沢大学工学部機械システム工学科・助教授	多重連結型移動ロボットのための知的進化制御システムの構築-障害物回避とジャックナイフ現象の回避-
中 川 聖 一 豊橋技術科学大学情報工学系・教授	音声入力を核としたマルチモーダルなマン・マシンインタフェース
中 辻 隆 北海道大学工学部・助教授	人工知能モデルを用いた交通制御システムの高度化に関する研究
中 村 哲 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科・助教授	多次元音響処理による音声認識の高度化に関する基礎研究

研究代表者氏名・所属機関・職名	研究課題名又は派遣先研究集会 / 機関名
西 尾 章治郎 大阪大学工学部情報システム工学科・教授	移動体計算環境におけるデータベースシステム構築に関する研究
平 井 慎 一 大阪大学工学部・助手	柔らかい物体のマニピュレーションにおける技能移植に関する研究
宮 里 義 彦 文部省統計数理研究所文部教官・助教授	次数構造に依存しない非線形ロバスト適応制御とその知能化に関する研究
和 田 仁 東北大学工学部機械電子工学科・教授	蝸牛内に存在する外有毛細胞の音刺激に対する挙動解析

研究助成総額 4,973 万円

[国際交流助成]

(五十音順)

研究代表者氏名・所属機関・職名	研究課題名又は派遣先研究集会 / 機関名
大 山 英 典 熊本電波工業高等専門学校電子工学科・助教授	3rd European conference radiations and their effects on devices and systems. RADECS '95. スポンサー：French Atomic Energy Commission
神 隆 北海道大学電子科学研究所 電子機能素子部門・助手	3rd International Culixarene Conference
木 村 晋 二 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科・助教授	Carnegie Mellon 大学ならびに 32nd Design Automation Conference (ACM SIGDA. IEEE Circuits & System Society)
小 玉 博 志 科学技術庁無機材質研究所 未知物質検索センター・総合研究官	(1) 第4回イオン交換国際会議 (ION-EX '95) (2) 連合王国・レディング大学 (U.K. University of Reading)
玉 置 久 京都大学工学部電気工学第二学科・助手	7th IFAC/IFORS/IMACS Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications
辻 義 之 名古屋大学大学院工学研究科・助手	The 2nd Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference & ASME/EALA 6th International Conference on Laser Anemometer
董 剛 大阪大学基礎工学部システム工学科・大学院生	Sixth International Fuzzy Systems Association World Congress (IFSA '95) スポンサー：International Fuzzy Systems Association (IFSA)
中 本 高 道 東京工業大学工学部電気電子工学科・助教授	Transducer's '95 (8th International Symposium on Solid-state Sensors and Actuators)
船 引 浩 平 科学技術庁航空宇宙技術研究所 制御部人間工学研究室・研究員	AIAA Flight Simulation Technologies Conference (米国航空宇宙学会・飛行シミュレーション技術会議)
福 田 敏 男 名古屋大学大学院工学研究科・教授	1995 IEEE ロボティクス・オートメーション国際会議に Dr. Tzyh-Jong TARN を招聘

国際交流助成総額 449 万円
平成7年度助成総額 5,422 万円

助成研究成果の掲載抄録一覧 (年度順五十音順)

- ◆ 調音結合処理のための文脈効果モデルに関する研究 (931001) 8
A study on contextual effect models dealing with co-articulation
赤 木 正 人 北陸先端科学技術大学院大学 情報科学研究科・助教授
- ◆ 自然な掴み動作を入力とする3次元インタフェースに関する研究 (931004) 14
A study on 3-D Natural Interactive Interface by Handling Motion
井 上 和 夫 立命館大学 理工学部・教授
- ◆ 三次元オプティカルフローの高速処理に関する研究 (931008) 18
High Speed Analysis of a 3-D Optical Flow Problem
近 江 和 生 大阪産業大学 工学部情報システム工学科・助教授
- ◆ 人工神経による昆虫の行動の解明と制御 (931010) 24
Analysis and Control of Insect Behavior Using Artificial Neural Networks
下 山 勲 東京大学 工学部機械情報工学科・助教授
- ◆ 電池駆動が可能な圧電式回転モータ / 直線モータの体系的研究 (931012) 30
Systematic Studies of Ultrasonic Rotary Motors and
Linear Motors Piezoelectrically Driven with Dry-Cell Battery
富 川 義 朗 山形大学 工学部電子情報工学科・教授
- ◆ ロバスト制御理論に基づく伝達関数に着目した人間指向のマン・マシン制御系設計法 (931015) ... 34
Operator-Oriented Design of Manual Control Systems Based on Robust Control Theory
松 尾 芳 樹 東京工業大学 工学部・助教授
- ◆ ニューラルネットワークを用いたインテリジェントチューニングPID制御系の設計 (931019) 38
A Design of Intelligent Tuning PID Control Systems Using Neural Networks
山 本 透 岡山県立大学 情報工学部・助教授
(元大阪大学基礎工学部 助手)
- ◆ 非線形応答の高次元情報を活用した化学センシング (931020) 44
Chemical Sensing Utilising Higher Order Information Deduced from Nonlinear Response
吉 川 研 一 名古屋大学 大学院 人間情報学研究科・教授
- ◆ 立体仮想臓器を用いた人工現実感を伴う解剖シミュレータの開発 (931021) 50
Development of Simulator for Anatomy with Attendance to
The Reality Using Stereoscopic Virtual Internal Organs
若 松 秀 俊 東京医科歯科大学 医学部保健衛生学科・教授
- ◆ 人間と協調しやすい移動ロボットの開発 (941002) 54
Development of mobile robots that can cooperate with humans
新 井 民 夫 東京大学 工学系研究科・教授
- ◆ 重度身体障害者介助システムに用いる非接触注視点検出法の研究 (941004) 60
A Study on a Non-Contact Eye-Gaze Detection Method Used on
Support Systems for Handicapped Persons
海老澤 嘉 伸 静岡大学工学部・助教授
- ◆ フリーハンド図面の自動認識に関する研究 (941006) 64
Study on Automatic Recognition Method of Freehand Drawings
加 藤 博 一 大阪大学 基礎工学部システム工学科・助手

◆ 設計候補創出による概念設計支援 (941007)	68
A Method of Creating Candidates for Computer Aided Conceptual Design	
川 上 浩 司 岡山大学 工学部・助手	
◆ 1 Bit phase-only synthesis を利用した対称点・対称軸の高速検出法 (941010)	76
Symmetrical point and axis determination method using 1 Bit phase-only synthesis	
近 藤 浩 九州工業大学 工学部・助教授	
◆ 新しいサブバンド方式による超高精細画像情報圧縮の研究 (941011)	80
Studies on New Subband Schemes for Data Compression of Super High-Definition Images	
谷 本 正 幸 名古屋大学 工学部・教授	
◆ 体内時計ホルモン用センサーの開発と応用 (941012)	84
Development and Application of the Sensor Electrode for the Time-Keeping Hormone	
田 畑 満 生 西東京科学大学 理工学部バイオサイエンス学科・教授	
◆ 香りの与える心理的影響の評価システムに関する研究 (941013)	88
The Study of the Evaluation System of the Emotion Evoked by the Odor	
辻 本 浩 章 大阪大学 基礎工学部・講師	
◆ 高温超伝導体による高感度磁束センサー (941014)	94
High Sensitive Magnetic Sensors using High Critical Temperature Superconductor	
中 根 英 章 室蘭工業大学 電気電子工学科・助教授	
◆ 液晶における電気伝導メカニズムの解明 (941016)	98
Electric Conduction Mechanism in Liquid Crystals	
間 多 均 帝京大学 理工学部・助教授	
◆ 音声認識における聴感特性に基づく隠れマルコフモデルの 耐雑音性の改善に関する研究 (941018)	104
A Robust Hidden Markov Model for Noisy Speech Recognition by Incorporating Auditory Characteristics	
松 本 弘 信州大学 工学部電気電子工学科・教授	
◆ ヴァーチャル・リアリティ (仮想現実感) の医療への応用のための基礎研究 (941019)	110
An Application of Virtual Reality to Medical Care	
山 口 隆 美 東海大学 開発工学部医用生体工学科・教授	
◆ 計算機の援用によるファジィ範疇法の測定精度と使いやすさの改善 (941021)	118
Improvement on Accuracy and Usability of the Method of Fuzzy Categories Using Computers	
吉 川 歩 京都工芸繊維大学 工芸学部電子情報工学科・助手	

調音結合処理のための文脈効果モデルに関する研究

A study on contextual effect models dealing with co-articulation

931001

研究代表者

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 助教授

赤 木 正 人

〔研究の目的〕

人間は音声を知覚する場合、音声信号から巧みに特徴を抽出し、利用している。しかし、この過程を機械に行わせようとすると、様々な問題が生じる。例えば、連続音声の生成過程において、前後の音韻から影響が及ぼされる調音結合がその一つである。

連続音声の中では、ある音韻を発話する際その音韻の調音の目標まで達しないうちに次の音韻の発話に移る。従って、実現された音響的特徴は、単独で発話されたときの音韻固有の音響的特徴に達していない（怠け音）。また、連続的に変化するために特徴が完全でない部分が生じる（渡り音）。機械はこのような音韻が不完全な部分を誤認識してしまう。しかしながら、人間には不完全な音響的特徴から目標値の推定を行なうという知覚機構が存在すると言われている。従って、この機構のモデル化ができ、これを認識装置に組み込むことができれば認識率の向上が期待出来る。そこで、補正機構の一つと考えられている文脈効果のモデル化を考える。

現在までに、連続音韻中において、目的音韻（母音）と、それに近隣する刺激音との音響的・音韻的関係が、また目的音韻の前後に接続されるスペクトル遷移が文脈効果に重要

な影響を及ぼしているという結果が得られている。更に、その定量的影響量も実験的に測定され、文脈効果モデルも幾つか発表されている。しかし、これらの研究は、主に目的母音と、隣接した音韻の一つの物理量との関係に注目したものであり、幾つか存在する物理量各々の影響量の大きさ、またそれらが一連の流れとなった場合の影響はよく分かっていない。

本研究では、上記の状況を考慮して、文脈効果モデル構築のための基礎データを得るため、連続音韻が、定常刺激音、渡り音の2種類の物理量と目的母音の組み合わせで構成されているとして、2つの物理量の影響量の違い、また刺激が一連の流れとなった場合の影響量を調べる。また、かつて筆者が提案した“スペクトルピークの相互作用を基にした文脈効果モデル”の音声認識の前処理方式としての高度化をはかるため、最小分類誤り学習理論を用いた文脈効果モデルの学習方式について検討を行う。

〔研究の内容、成果〕

1. 文脈効果の測定

連続音韻が、定常刺激音、渡り音の2種類の物理量と目的母音の組み合わせで構成され

ているとして、本研究では、“目的母音を知覚する場合に生じる文脈効果に関連する物理量とは、近隣する定常音か渡り音か、それとも両方か”という問いを解くために、合成音を用いた心理物理実験から、2つの物理量の影響量の違い、また刺激が一連の流れとなった場合の影響量を調べた。

心理物理実験の刺激音は、連続音声の物理的特徴から、以下のように分解再構成したものを考えた。図1に概念図を示す。

- (1)目的母音のみ（単独発話された母音：Ref）
- (2)渡り音+目的母音+渡り音（ Λ ）
- (3)通常刺激音+無音区間+目的母音+無音区間+定常刺激音（ Π ）
- (4)定常刺激音+渡り音+目的母音+渡り音

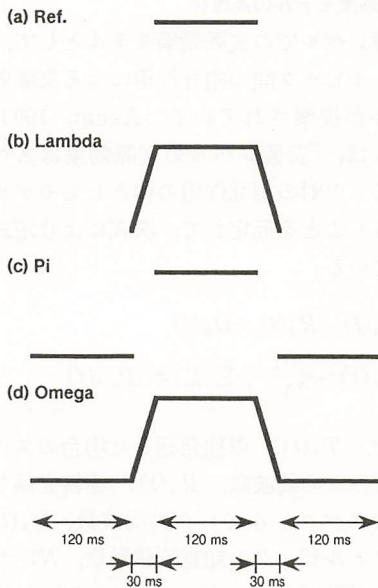


図1 刺激音のF1の変化の概念図、(a)目的母音のみ（Ref）、(b)渡り音+目的母音+渡り音（ Λ ）、(c)定常刺激音+無音区間+目的母音+無音区間+定常刺激音（ Π ）、(d)定常刺激音+渡り音+目的母音+渡り音+定常刺激音（ Ω ）。

+定常刺激音（ Ω ）

実験では、目的母音は日本語母音の /u/-/e/-/a/ 上を連続的に動くものとし（表1参照）、/u/ から /e/、また、/e/ から /a/ へ知覚が変化するF1の周波数が近隣の音を付加した場合にどのように変化するかを測定した。また、上記の各々の場合において、定常刺激音および渡り音が音韻として知覚出来る場合（定常刺激音と渡り音を5ホルマント音とし、F1のみを図1のように変動してF2～F5は目的母音と同じにした合成音）と出来ない場合（定常刺激音と渡り音を単ホルマント音としてホルマントを図1のように変動した音）を用意することで、音韻性の有無による影響量の違いを検討した。

結果を図2に示す。図2は、刺激Refによる知覚変化時点からの各刺激タイプ別の変

表1 目的母音のホルマント周波数とバンド幅。F1のみを変化させ、日本語 /u/-/e/-/a/ 系列を合成している。

Stimulus Number	Formant	Center Frequency Bark[12]	Hz	Band Width Hz
0		2.93	301	
1		3.13	322	
2		3.33	343	
3		3.53	365	
4		3.73	387	
5		3.93	409	
6		4.13	431	
7		4.33	454	
8		4.53	477	
9	F 1	4.73	500	50
10		4.93	523	
11		5.13	546	
12		5.33	569	
13		5.53	593	
14		5.73	618	
15		5.93	643	
16		6.13	668	
17		6.33	693	
18		6.53	719	
19		6.73	745	
	F 2	11.20	1500	150
	F 3	14.50	2500	250
	F 4	16.50	3500	350
	F 5	17.90	4500	450

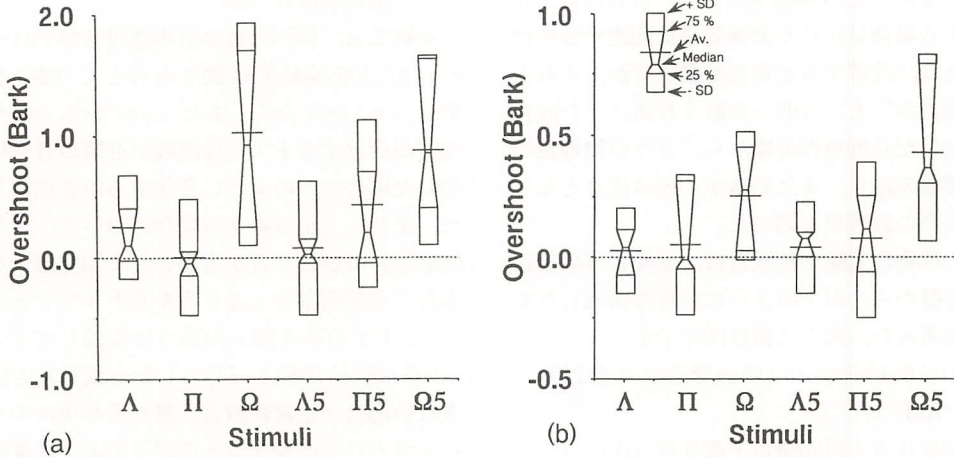


図2 近隣の刺激音による音韻境界の変化, (a)/u/-/e 境界, (b)/e/-/a/ 境界。

化量を Bark で示してある。この結果から、以下のようなことが考察される。

- (1) Ω 型の近隣刺激音による目的母音の知覚の変動は、刺激音が単ホルマント、5ホルマント音にかかわらず文脈効果（特に対比効果：近隣の音からより離れる方向に目的母音の知覚が変化する）を示す。一方、 Λ 型と Π 型の刺激音では何人かの被験者について同化効果（近隣の音に近づく方向に目的母音の知覚が変化する）も見られた。すべての刺激における対比効果の強さは、5ホルマントの場合 $\Omega > \Pi > \Lambda > \text{Ref}$ であった。これより、定常刺激音のみ、あるいは渡り音のみでは文脈効果は大きく現れず、これら一連の流れが音韻の自然性を作りだし、文脈効果に大きな影響を与える、と考えられる。
- (2) Π 型の刺激音については、単ホルマントより5ホルマントの近隣刺激音の方が対比効果の強さが大である。これは、前後の刺激音がより母音に近いことが対比効果を大きくする、すなわち、前後の母音からの音韻的相互作用による文脈効果の存在が示

唆される結果である。

2. 文脈効果モデルの高度化

音響レベルでの文脈効果モデルとして、スペクトルピーク間の相互作用による文脈効果モデルが提案されている [Akagi, 1993]。モデルは、「音響レベルの文脈効果はスペクトルピーク対の相互作用の和としてモデル化できる」ことを仮定して、次式により定式化されている。

$$\begin{cases} T_p(t) = R_p(t) + D_p(t) \\ D_p(t) = \frac{1}{2N+1} \sum_i \sum_f g(\Delta t, \Delta f) \end{cases}$$

ここで、 $T_p(t)$ ：単独発話した場合のスペクトルピークの周波数、 $R_p(t)$ ：連続発話した場合のスペクトルピークの周波数、 $D_p(t)$ ：スペクトルピークの知覚的移動量、 N ：サンプリング数である。また、 $g(\Delta t, \Delta f)$ は相互作用関数と呼ばれ、時間 Δt 、周波数 Δf 離れたスペクトルピークから受ける知覚的影響量を規定している。そして、その値はモデルの定式化において極めて重要である。

相互作用関数は、現在までに、心理物理実験による推定、および $R_p(t)$ を $T_p(t)$ にできるだけ近付けるという規範の下での一逆行列による推定により得られているが、これらの関数が調音結合のある音声の認識に有効である保証はない。そこで、本研究では、相互作用関数をスペクトルピーク間の相互作用だけではなくスペクトル全体に拡張し、次に示すように最小分類誤り学習の理論を用いて、認識誤りが最小となるように決定する。

第1段階として、学習時の計算量の軽減および過学習の防止のために、相互作用関数を簡単な形式で近似する。これまでの研究から、スペクトルピークによる文脈効果は、

- ・時間差 Δt が小さいスペクトルピークからは同化効果を受け、時間差が大きいスペクトルピークからは対比効果を受ける
- ・時間差が非常に小さい或は非常に大きいスペクトルピークから受ける文脈効果は小さいと考えられる。これらのことを踏まえ、相互作用関数を

$$g(\Delta t, \Delta f) = A e^{B|\Delta f|} \sin(C\Delta f) \\ \times |\Delta t|^D e^{-0.019|\Delta t|} \cos(0.031\Delta t)$$

ただし、 $|\Delta t| > 3\pi/2F$ および $|\Delta f| > \pi/C$ では $g(\Delta t, \Delta f) = 0$ 、という形式で近似する。

第2段階として、単独発話データとして ATR の単音節データ (SY) 中の母音、また連続発話データとして ATR の連続音声データ (SC1) 中の母音部分を FFT ケプストラム平滑化対数スペクトルに変換したもの (周波数軸は ERB-Rate) を学習用データとして用いる。そして、連続発話データの母音中心のスペクトルをモデルにより変形し、変形後のスペクトルと単独発話の母音のスペクトルとのユークリッド距離を識別関数として、

補正後のスペクトルを識別する。次に、最小分類誤り基準に従い、式の係数 A から F の値を学習することにより、識別誤り率が最小になるような相互作用関数を求める。

結果を次式および図3に示す。

$$g(\Delta t, \Delta f) = 4.28 e^{0.03|\Delta f|} \sin(0.30\Delta f) \\ \times |\Delta t|^{0.50} e^{-0.019|\Delta t|} \cos(0.031\Delta t)$$

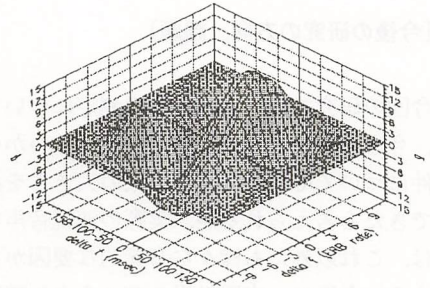


図3 相互作用関数の学習結果

相互作用関数の学習結果は、周波数の差が5 ERB Rate のスペクトルピークから受ける影響が最も大きい、また時間差が50 msec 以内では同化効果、50 ~ 150 msec では対比効果が優勢であることを示している。これらは、心理実験から得られた結果 [Akagi, 1993] とほぼ一致する。

モデルによるスペクトル変形の効果を確かめるために、モデルにより変形を加えた連続音声の中の母音中心 (最もなまけが大きいと思われる部分) のスペクトルと、変形を加えていないスペクトルの識別率の違いを調べた。使用したデータは、学習時と同じ SC1 (母音 834 個) および非学習データの SC2 (母音 555 個)、SC3 (母音 946 個) である。結果を表2に示す。

この結果から、モデルを適用してスペクトルを変形することにより、学習データのみならず非学習データでも識別率が向上すること

表2 文脈効果モデル適用による母音識別率の変化

使用データ	sc 1	sc 2	sc 3	全体
スペクトル変形前	74.6	73.4	77.0	75.0
スペクトル変形後	80.0	77.5	80.0	79.7

がわかる。このことは、求められた文脈効果モデルを認識の前処理として用いることが有効であることを示している。

[今後の研究の方向、課題]

今回の研究では、文脈効果の測定については、今まで加味されていなかったいくつかの条件についてその時の文脈効果の大きさを測定できたと考えられるが、実際の連続音声の中では、これ以外にも様々な音響的な要因が存在する。今後は、文脈効果モデルをより精度の高いものにするために、定常音のホルマント周波数および継続長を変化させた場合の文脈効果、定常音と母音のF2・F3との相互作用などを調べ、音韻的相互作用を考慮した文脈効果の定式化を行う必要がある。また、マスキングの影響も考慮する必要がある。

一方、文脈効果モデルについては、今回の研究では、最もなまげが大きいと思われる母音の中心の補正がある程度可能となったと考えられる。しかし、子音部分の処理、また、

本モデルを音声認識の前処理として持ちいる場合の認識方式との整合性などを今後調べる必要がある。このためには、モデルを前処理装置として用いた大規模な音声認識実験を行わなければならない。

[成果の発表、論文]

- 1) 中川, 赤木 (1994-03): “母音知覚における文脈効果の測定とそのモデリング”, 電子情報通信学会研究技術報告, SP 93-151
- 2) 中川, 赤木 (1994-03): “文脈効果の測定とそのモデリング”, 平成6年度春季日本音響学会研究発表会, 2-4-20
- 3) Akagi, M., van Wieringen, A. and Pols, L. C. W. (1994). “Perception of central vowel with pre- and post-anchors”, Proc. Int. Conf. Spoken Lang. Process. 94, 503-506.
- 4) 米沢, 赤木 (1995): “最小分類誤り学習による文脈効果モデルの高度化”, 平成7年秋季音響学会講演論文, 3-9-8
- 5) 米沢, 赤木 (1995): “最小分類誤り学習による文脈効果モデルの定式化”, 電子情報通信学会技術報告, SP 94-114

(その他参考文献)

- 1) Akagi, M. (1993). “Modeling of contextual effects based on spectral peak interaction”, J. of Acoust. Society of America, 93, 2, 1076-1086.

自然な握み動作を入力とする 3次元インタフェースに関する研究

A study on 3-D Natural Interactive Interface by Handling Motion

931004

研究代表者	立命館大学工学部 教授	井 上 和 夫
共同研究者	立命館大学工学部 助教授	亀 井 且 有
	長崎総合科学大学 助教授	辺 見 一 男

[研究の目的]

計算機への入力装置、特にCRTディスプレイ上でのポインティング操作のためのインタフェースとして通常用いられるマウスあるいはデジタイザは、基本的には2次元平面でのポインティングデバイスである。このため、これらによる3次元CAD、3次元空間のポインティング操作には限界がある。

本研究は、操作者の自然な手の握み動作を3次元空間内で行い、この動作をCCDカメラでとらえ非接触な入力が可能となる3次元インタフェースの実現を目指したものである。操作者は手袋のような特別なものは装着しない。このようなインタフェースは自然な動作であるので使用方法に習熟する必要がなく容易に操作でき、また、手の把握状態をコンピュータグラフィックスで画面上に表示することにより操作者に臨場感を与え、仮想現実への応用も可能である。

[研究の内容、成果]

1. システムの構成

本インタフェースのシステム構成を図1に示す。

操作者の自然な握み動作をCCDカメラのもとで行い、これをパーソナルコンピュータに取り込み、画像処理によりCRTディスプレイに手の動作を表現し、CRTディスプレイ上に表示されている物体を把握移動させる。操作者の手には手袋、マーカなどの特別なものは総着しない。CCDカメラによる画像取り込み用のフレームメモリは分解能256×250ピクセルで、白黒256階調を有する。ま

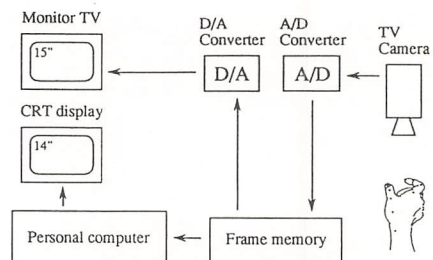


図1 実験システムの構成

た、操作可能な実空間での3次元領域は図2のように底面が 36×28 cm、上面が 15×12 cm、高さ35 cmの角錐台である。

操作者はCRTディスプレイに表示された操作者自身の手の動きを視覚によりフィードバックしつつ、ディスプレイに表示されている仮想物体を把握移動させることができる。

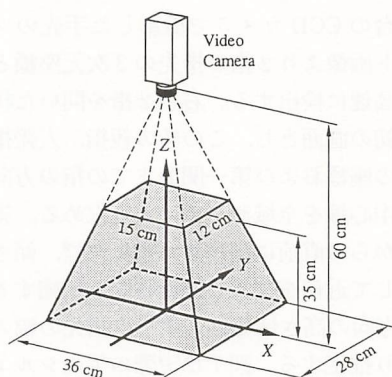


図2 操作領域と座標系

2. 2指の動作モデル

掴み動作を行う2指の動作を認識するためには、手のシルエット画像をCCDカメラで入力すればよいが、指の形全体を認識しようとすれば画像処理時間の関係でパーソナルコンピュータでは実時間での処理は困難となる。一方、自然な掴み動作においては、親指と人差指の第一関節の位置、指先の傾きは指全体の形と関連が深く、第一関節の位置、傾きを側定することにより、指の各関節の位置・形を推定することができる。そこで、親指と人差指の第一関節の位置、方向より2指の動作モデルを重回帰分析により作成した。動作の測定は図3に示すように2指の指先、関節および手首関節など9箇所の特徴点に円形マーカーを装着し、その重心座標を連続的に追跡す

ることにより行う。

2指の各関節の角度、長さを図4のように定める。2指の手先位置、傾斜より手先間隔、角度は式(1)(2)で、他の関節の座標は式(3)(4)で求められる。ここで関節間の長さは既知とする。表1は、式(3)の係数を700フレームの計測結果を用いて重回帰分析により求めた値である。図5は実際の2指の動作を、図6は動作モデルによるシミュレーション結果である。

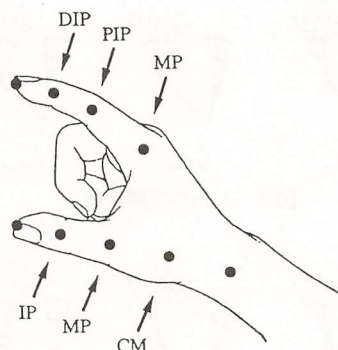


図3 特徴点の位置

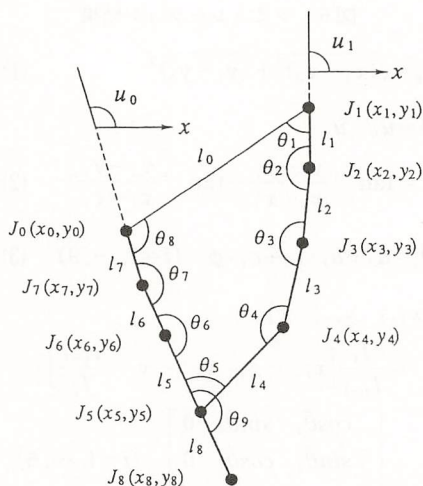


図4 マーカーによる手先の表現

表1 重回帰分析法による近似結果

i	a_i	b_i	c_i
1	-58.0	1.54	-2.21
2	186.2	-0.19	0.30
3	210.5	-0.56	0.95
4	96.8	0.54	-0.22
5	54.8	0.08	-0.02
6	163.1	0.14	-0.05
7	172.9	0.05	-0.03
8	238.2	-1.56	1.21
9	167.2	0.08	-0.02

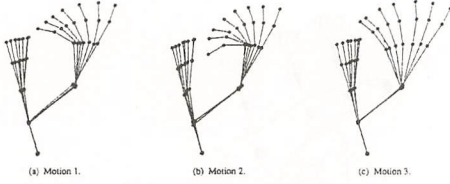


図5 2指の実際の動き

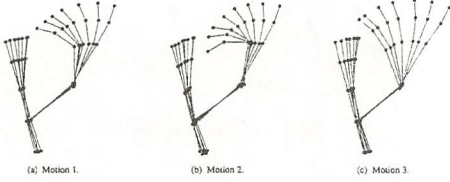


図6 シミュレーション結果

$$l_0 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \phi &= u_0 - u_1 \\ &= \tan^{-1} \frac{y_0 - y_7}{x_0 - x_7} - \tan^{-1} \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\hat{\theta}_i = a_i + b_i \cdot l_0 + c_i \cdot \phi \quad (i=1, \dots, 9) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &[x_{i+1} \ y_{i+1} \ 1] \\ &= \frac{l_i}{l_{i-1}} \begin{bmatrix} x_{i-1} - x_i & y_{i-1} - y_i & \frac{l_{i-1}}{l_i} \end{bmatrix} \\ &\begin{bmatrix} \cos \hat{\theta}_i & \sin \hat{\theta}_i & 0 \\ -\sin \hat{\theta}_i & \cos \hat{\theta}_i & 0 \\ x_i & y_i & 1 \end{bmatrix} \quad (i=1, \dots, 6) \end{aligned}$$

$$[x_8 \ y_8 \ 1]$$

$$\begin{aligned} &= \frac{l_8}{l_5} \begin{bmatrix} x_6 - x_5 & y_6 - y_5 & \frac{l_5}{l_8} \end{bmatrix} \\ &\begin{bmatrix} \cos \hat{\theta}_9 & \sin \hat{\theta}_9 & 0 \\ -\sin \hat{\theta}_9 & \cos \hat{\theta}_9 & 0 \\ x_5 & y_5 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

3. シルエット画像からの2指動作の認識

1台のCCDカメラで撮影した手先のシルエット画像より2指の指先の3次元座標と傾きを高速に検出する。右手2指を開いた状態を最初の画面とし、この時の親指、人差指の先端の座標および第一関節までの指の方向、指の中心線を全域サーチにより求める。第二画面からは直前に測定した指先座標、傾きを利用して近傍を探索し探索時間を短縮する。Z軸方向の高さ情報は人差指の指先の幅の変化より推定する。図7は実際の手のシルエットに、モデルにより求めた2指の関節位置を重ねたものであり、平面内で行う2指のさまざまな動きに対してモデルが実際の手に良く一致していることが判る。

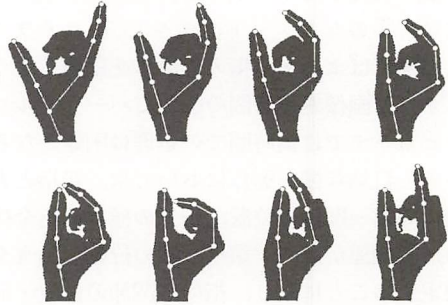


図7 シルエット画像より2指動作の認識結果の例

4. 握み動作を入力とする3次元インタフェース
操作者が3次元CADを使用する時のように、ディスプレイ上に表示された3次元物体

を指示・移動させるのに本システムは有効に利用できる。すなわち、計算機内に3次元空間を仮想し、この空間に置かれた物体を、操作者が手に何等の装置も装着せずに実空間で操作する感覚で把握・移動出来る環境を構築した。

図8はCRTディスプレイ上に3次元表示した物体（6角柱）、作業平面および操作者の手先をサーフェースモデルで表現した実験結果の一例である。操作者は実空間内の操作領域で手を動かし、CRTディスプレイを見ながら仮想空間内の物体を把握移動させることができる。

以上のように本システムは手先に手袋やマーカ等を装着することなしに素手で仮想3次元物体を操作することができる。また、手先

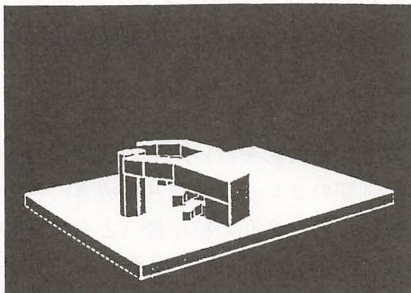
の動きはリアルタイムでCRTディスプレイ上に写しだされ、操作者は実空間で物体を操作していると同じ感覚で仮想空間の物体を操作することができる。

[今後の研究の方向、課題]

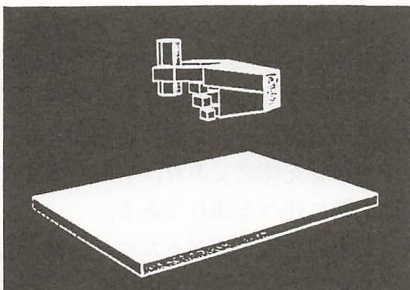
今回構築した3次元空間を操作するインタフェースでは、2指の屈伸動作および手先の回転運動はカメラの光軸と垂直な面内での動きに限定しているため入力可能な自由度は4である。これを3次元空間での物体のあらゆる運動操作に必要な6自由度の動きすべてを入力可能なシステムを構築したい。また、手の握み動作だけでなく、腕、さらに人間の身体運動を入力できるインタフェースを構築したい。

[成果の発表、論文等]

- 1) 李 亜兵, 辺見一男, 森隆知, 井上和夫: 2指の動作モデルの構築, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J77-D-II, No. 51 pp. 1031-1034 (1994)
- 2) b Y. Lee, K. Hemmi, K. Kamei and K. Inoue: Hand Motion Recognition Through the Use of Single-Camera marker Tracking. Proceeding of 1994 Japan-U. S. A. Symposium of Flexible Automation, pp. 927-930 (1994)
- 3) 李 亜兵, 辺見一男, 亀井且有, 井上和夫: シルエット画像を用いた手先動作のリアルタイム認識とヒューマンインタフェースへの応用, 第10回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp. 217-224 (1994)
- 4) 佐藤邦男, 李 亜兵, 亀井且有, 井上和夫: 非接触3次元ポインティングデバイスにおける指標表示と追従動作特性の解析, 1994年度日本人間工学会関西支部大会講演論文集, pp. 129-132 (1994)



(a) Grasping the object.



(b) Moving and rotating the object.

図8 画面表示の一例

三次元オプティカルフローの高速処理に関する研究

High Speed Analysis of a 3-D Optical Flow Problem

931008

研究代表者

大阪産業大学工学部
情報システム工学科 助教授

近江 和生

[研究の目的]

本研究は、二次元オプティカルフローの解析手法を発展させて、三次元のオプティカルフロー解析を行うための、簡便かつ実用的な画像情報システム開発を目標として、その基本的な展開を試みることを目的としている。

オプティカルフローの基本的命題は、不特定多数の人や物の動きをTVカメラ等で捉え、それらの移動の模様を時系列的に追跡することであるが、従来より主として提唱される手法は、二次元的に撮影した映像に基づく解析法であり、現実には三次元的である人や物の動きを的確に捉えることは困難であった。そこで本研究では、水中に混入した微小粒子の三次元運動をモデルとして、三次元のオプティカルフローで最も重要な、ステレオ撮影像における各粒子の対応付け、および時間連続画面における各粒子の移動追跡について、前者は主として撮影手法の鋭意工夫により、また後者は画像相関を用いた高速アルゴリズムの開発により、それぞれ有効な解決法を確立して、実用的な画像情報システムの開発に貢献しようとするものである。

[研究手法およびその結果]

前述の通り、本研究では水中の微小粒子の三次元運動を実験モデルとして、オプティカルフローの問題を検討する。粒子運動の発生装置として小型の回流式水槽（試験部断面は $200 \times 300 \text{ mm}^2$ の矩形）を用い、混入粒子としては粒径 1.2 mm の芳香剤粒子を使用した。

粒子像の撮影では、2台のCCDカメラによるステレオ撮影を行い、その映像信号をパソコン制御のフレームメモリに導き、各カメラについて各々2面の粒子像（ともに同時刻かつ $1/30$ 秒の時刻差で撮影）を、デジタル画像として蓄積した。

それに続くオプティカルフローの計算では、画像データをワークステーションに転送して一連の処理を行った。ここでの主要な処理は、ステレオ撮影像（同時刻）における各粒子の三次元座標の評価、次いで2時刻間における各粒子の移動先探索であり、それらの手法の詳細は次節に述べる通りである。

処理結果の精度を調べるため、当初の実験では流動状態の粒子像を使用せず、実験水槽内部に16個のビーズ球を適当な間隔で保持し、各ビーズ球を既知の変位量で移動させて撮影した2面2組のステレオ画像を、検定用

の画像データとして使用した。この予備実験の結果は非常に良好であった。

ステレオ撮影による三次元粒子座標の決定

ステレオ撮影法による対象物の三次元計測は、写真用カメラ等を用いてかなり古くから行われているが、ここで最も問題となるのは2台のカメラに関する幾何諸量の評価である。カメラの設置角度（ヨー・ピッチ・ロールの3角度）やレンズの焦点距離、レンズの中心間距離等を正確に測定して、有意の座標変換係数を得る作業は、かなりの手間を要する。そこで本研究では、植村ら¹⁾の手法に基づき、2台のカメラの設置方法に若干の制約を課すことによって、比較的簡便・高速に変換係数を得ることを試みた。

2台のカメラを、それぞれの視線が規準点Oで交差し、かつ両視線が同一面内にあるように配置する。ここで、各カメラを固定した回転テーブルの水平回転角を読みとり、視線の挟み角 β_0 を計算しておく。次いで、各カメラのレンズについて、鏡体長さの伸縮や焦点距離等を精密に測定し、基準点からレンズ中心までの距離($\overline{OL}$ と $\overline{OR}$)を得る。これらの値から幾何学的に $\overline{LR}$ 、 β_l 、 β_r の大きさが算出される (Fig. 1 参照)。

次に測定対象の粒子 P_k を想定して、カメ

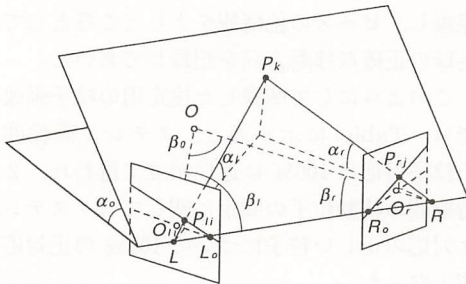


Fig. 1 カメラと対象粒子との幾何学的関係

ラの投影面におけるエピポーラ線の傾きを計算する。たとえば左カメラの画面上の粒子像 P_{lk} に関する視線 LP_k は、右カメラの画面上では直線 R_oP_{rk} に対応する（エピポーラ線、以下では EP 線と略記する）。右画面上でこの EP 線に近接している粒子像が P_{rk} だけであれば、 P_{lk} と P_{rk} が対応していると判定する。この線の近傍に複数の粒子像がある場合には、逆にそれらの候補粒子の視線に対応する左画面上の EP 線を求め、同じ画面上の粒子像 P_{li} との距離を考慮して最終的な対応粒子を選び出す。上記のカメラ設置方法では、 EP 線の傾き $\tan \alpha_{lr}$ が次式で与えられる。

$$\tan \alpha_{lr} = \frac{\cos \beta_r}{\sin \beta_{li}} \cdot \tan \alpha_l \quad (1)$$

ここで β_{li} は視線 LP_{li} の規準面 OLR への投影線が直線 LR となす角度、 α_l は同じ規準面 OLR に対する視線 LP_{li} の仰角である。

最終的に対応関係にあると判定された粒子の三次元座標は、次のように決定される。すなわち L を座標原点、直線 LR を x 軸、規準面 OLR と垂直に y 軸を取ると、粒子 P_k の三次元座標 (x_k, y_k, z_k) は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x_k &= \frac{\overline{LR} \cdot \tan \beta_{ri}}{\tan \beta_{li} + \tan \beta_{rj}}, \\ y_k &= z_k \cdot \tan \beta_{li}, \quad z_k = x_k \cdot \tan \alpha_o \end{aligned} \quad (2)$$

ただし α_o は基準面 OLR と視線面 P_kLR との挟角である。

画像相関法による粒子移動方向の評価

今回の計測法では、三次元空間における粒子の座標分布が、微小な時間差によって2組求められている。この2組の粒子座標の分布から、各粒子の三次元移動方向を決定するのが本節の目的である。この手法の前提条件は、

「2組のデータの時間差は、粒子分布の大局的パターンに十分な類似性が保存される程度に短いこと」である。

ここで、第1時刻における参照粒子*i*が第2時刻のどの粒子に対応するかを決める手順は、文献2)に基づいて次の通りである。

- ① 時刻*t*および*t+Δt*における粒子位置と粒径の計測結果より、両時刻での粒子分布を、三次元の二値画像データで表現する。
- ② 時刻*t*における第1空間の参照粒子*i*を中心位置として、時刻*t+Δt*の第2空間内に辺長*L*の立方体探査領域を設定し、その領域内にあるすべての粒子(*n*個)を、対応候補の粒子*j_m* (*m*=1, 2, …*n*)とする。
- ③ 第1空間の粒子*i*と第2空間の粒子*j_m*を中心として、それぞれ辺長が*R*の立方体の相関領域を置き (*R*<*L*)、2つの領域間の粒子分布の類似度を a) 重なり合う粒子のペア数 *N*, b) 三次元相互相関係数の2種の評価値によって判定する。重なり粒子のペア数 *N* は、相互の相関領域内で2粒子の中心間距離が半径和以下である粒子ペアの総数であり、三次元の相互相関係数 *c_{ij}* は、いわゆる正規化のための諸係数を省略して、次式のように定義する。

$$c_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^N (1 - \frac{2}{3} \overline{S_k} + \frac{1}{2} \overline{S_k}^3)}{\sqrt{M_i M_j}} \quad (3)$$

ここで *M_i*, *M_j* はそれぞれ第1空間、第2空間の相関領域における粒子の総数、添字 *k* は上記の重なり粒子ペアに付した番号、 $\overline{S_k}$ は重なりペアにおける粒子中心間距離を半径和で除したものである。

- ④ ③の評価を第2空間の対応候補粒子すべ

てについて行い、基本的には重なりペア数 *N* が最大となる組み合わせを、2時刻間での粒子の正対応と判定する。重なりペア数が最大となる組み合わせが2つ以上ある場合は、相互相関係数 *c_{ij}* を最大とする組み合わせを正対応とする。一方、重なりペア数がある場合は、当該の参照粒子*i*に関して、第2空間での対応粒子はないものと判定する。

粒子移動の計測結果

現在までの計測結果として、前述した静止状態のビーズ球の画像2面による予備実験と、水流中に混入された移動状態の芳香剤粒子に関する三次元追跡の結果を報告する。

ビーズ球による予備実験では、16個の色付きビーズ球を、透明アクリルの細い角棒の先に取り付け、アクリル棒の終端を油粘土の塊により水槽底面で保持した。先端のビーズ球は生け花状に分歧し、その三次元位置はかなりランダムに分散した。当初の静止状態で第1時刻に相当する粒子像をステレオ撮影し、続けて油粘土の保持材に微弱な塑性変形を加え、各ビーズ球に微小な変位が生じた時点で、第2時刻に相当する粒子像を、再度ステレオ撮影した。各ビーズの変位の模様は、第3のモニター用カメラ(カラー画像用)を通して録画し、ビーズの色情報をよりどころとして、各球の正確な移動方向を記録しておいた。

このようにして準備した検定用の粒子画像では、Table1に示す通り、ステレオ画像間の粒子対応は100%に近い精度で行われ、2時刻間の移動粒子の同定に関しては、ステレオ対応の正しい粒子について100%の正対応率となった。

一方、水流中に混入された移動粒子に対す

Table 1 検定用粒子画像による計測結果

	第1時刻	第2時刻
粒子の総数	16	16
ステレオ像の正対応数	15	16
EP線近傍の対応候補数	平均 1.5	平均 1.3

2時刻間の粒子正対応率	15/16
探索領域中の平均粒子数	4.2
相関領域中の平均粒子数	2.8
正対応時の重なり粒子数	平均 1.8 pair
正対応時の相互相関係数	平均 0.31

る計測結果に関しては、先の例のように粒子の追跡結果を検証する厳密解は存在しないが、流体力学的な考察によれば、ここでの結果もおおむね満足すべきものと考えられる。

Fig. 2 の計測結果は、回流水槽の観測流路部分に球状の突起を置いて三次元的な流れを発生させ、その背後での混入粒子の運動状態を、2時刻間の移動量ベクトルの形で表したものである。計測時における CCD カメラの認識粒子数は、左右とも 110 程度であるが、最終的に 2 画面・2 時刻間で同定を行い得た粒子数は 51 であった。

流路上に半球状の突起をおくと、背後の水流が馬蹄形に巻き込むことが知られており、Fig. 2 の移動量ベクトルも、そのような特

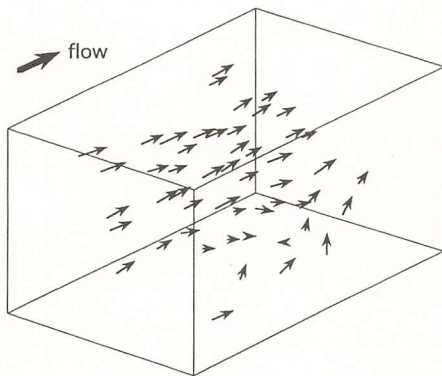


Fig. 2 水中の移動粒子に対する計測結果

質を比較的良好に表していると考えられる。

[参考文献]

- 1) 植村ほか 4 名, 可視化情報 12-Suppl. 1 (1992), pp. 103-106.
- 2) 山本ほか 3 名, 日本機械学会論文集 B 編 57-543 (1991), pp. 3832-3836.

[今後の研究の方向・課題]

本研究では三次元オプティカルフロー解析を目的とする、実用的な画像情報システムについて、基本的な処理方法の検討と処理結果の簡単な評価を行った。今回のシステムでは、実験モデルである粒子の総数や計測移動量の大きさに制限があり、千個オーダーの粒子数や高速度の粒子運動については、画像の入力部分におけるハードの大幅な性能向上が必要である。ただし現状では、通常の NTSC 規格外の映像機器は非常に高価格であり、それに対応する計算機側インタフェースも高価である。今後はハイビジョン等の高性能ビデオ規格が一般化されると思われるので、それを目標にシステムの性能向上を実現させたい。

現状のシステムでの計測精度に関しては、基本的に各モデル粒子の移動最尤値を求める手法である以上、100% 精度の実現は不可能である。とはいえ、計測の精度を向上させるため、今回の処理では考慮しなかった各粒子の識別情報（粒子の色・形・輝度等）を利用する方法が考えられる。このうち粒子の形・輝度に関しては、ステレオ撮影での制約上、有効な粒子識別情報として利用しにくいので、今後は粒子の色情報を活用して、異画面間での粒子同定の精度を高める予定である。ただし色情報を正確に抽出するためには、現状での

NTSC 規格のビデオ機器に話を限定しても、カメラ（3-CCD）やフレームメモリ装置（動画像メモリ）等の性能向上が必要である。

したがって今後の研究方向としては、機器更新のための予算確保に努力しつつ、今回のシステムで考慮できなかった他のハード構成や他の解析アルゴリズム等を合わせて検討し、

より現実的かつ実用的な解析システムの開発を目指したいと考える。

〔成果の発表等〕

- 1) 近江, 日本機械学会関西支部第245回講演会 (1995-11), 講演予定。

人工神経による昆虫の行動の解明と制御

Analysis and Control of Insect Behavior Using Artificial Neural Networks

931010

研究者代表 東京大学工学部機械情報工学科 助教授 下山 勲
共同研究者 筑波大学生物科学系 講師 神崎 亮平

〔研究の目的〕

昆虫は、サンプルとして入手しやすく、かつ中枢神経系を構成する神経細胞数が少なく、個体間でその同定が可能である。本研究ではカイコガをモデルシステムとして用い、行動発現の神経メカニズムを解明し、さらに人工神経での制御可能性を確かめることを目的とした。

雄のカイコガは雌のフェロモン源の方向にジグザグに進み雌に到達する。このメカニズムを生物学、特に神経行動学の立場から解析した。この結果、カイコガの触角がフェロモンに対して選択的に高感度で反応すること、カイコガは定型的、反射的に行動するといわれているが神経系の記憶メカニズムもフェロモンに対する定位行動に重要な役割を果たしていることがわかった。

次に、自然のカイコガのもつ定位行動を人工的に再現できないかシミュレーションを行った。神経系の情報処理によってカイコガは定位行動するが、コンピュータ上のニューラルネットワークを用いたシミュレーションでこの情報処理機構を再現した。カイコガの場合、情報の記憶メカニズムが有効であったので、シミュレーションではフィードバック

をもつリカレントネットワークを用いた。ネットワークのパラメータは遺伝アルゴリズムを用いて決めた。

最後に、カイコガの触角をフェロモンセンサとして用いたロボットに、フェロモンに対する定位行動をさせられるか実験した。この実験を通して、本研究の方針が妥当であり、将来性のあるものである感触を得た。

〔研究の内容、成果〕

1. カイコガの定位行動の解析

雄カイコガ (*Bombyx mori*) は、同種の雌が放出する性フェロモンの匂いをたよりに交尾のパートナーの探索を行う。このとき雄は「婚礼ダンス」と言われる特徴的なはばたきを伴ったジグザグ歩行を示す。これは雄の中枢神経系にプログラム化された定型的な行動で、いわゆる「本能行動」である。

カイコガの触角にある嗅細胞で受容されたフェロモン情報は脳内で統合処理され、胸部運動系を制御することによってこの行動が発現する。脳内のフェロモン情報経路では、電子回路で記憶素子として機能する「フリップ・フロップ」と類似の特性をもつ神経応答パターンが形成される。この特徴的な神経情

報が脳から、胸部運動系に伝達され、カイコガのフェロモン源探索行動が制御されると考えられる。

最近, Murlis らは空気をイオン化して電荷を持たせ、その分布を測定することによって、プルーム（匂い物質が存在する空間）内における匂いの分布状態を調べた。その結果、風の中ではフェロモンの匂いは単純な拡散による連続的な濃度勾配をもって分布しているのではなく、小さい多数の断続的な塊（フィラメント）となって浮遊することが明らかになった。したがって、飛翔や歩行によってフェロモン源に定位する昆虫はフェロモンを定常的に感知するのではなく、矩形的で断続的な刺激として受け取ることになる。この事実は、時事刻々変化する刺激頻度が定位行動を制御する上できわめて重要な要因になることを示唆する。

ここでは風洞装置を用いて、さまざまな頻度のフェロモン刺激に対する雄カイコガの定位行動を定量的に解析し、定型的な匂い源探索行動のアルゴリズムの解明を行った。

風洞装置内を一定の速度（50 cm/s）で流れる気流内に、ソレノイドバルブの切り替えによって作った矩形的なフェロモン刺激を流入した。刺激頻度は、0.2–3.0 Hz の間で変化させた。また、定常的な刺激も行った。刺激幅は 100 msec に固定した。

フェロモン刺激には、(E,Z)-10, 12-hexadecadienol（主成分のボンピコール）、または雌フェロモン腺からの粗抽出液（1 頭分を 100 μ l の n-ヘキサンで 15 分間抽出したもの）を用いた。

雄カイコガのフェロモン源への定位行動をビデオカメラで撮影、記録した。フレーム（1/30 秒）ごとにカイコガの頭部と尾部の位置をコンピューターに入力し、その平面で

の座標を求めた。さまざまな刺激頻度に対する歩行軌跡や体軸の角度変化からカイコガの定位行動の解析を行った。

フェロモン刺激を定常的に、または 3 Hz 以上で与えると、雄はほぼ直線的にフェロモン源に定位した。一方、0.5 Hz 以下では風上に対してジグザグ歩行を示した。刺激頻度によって歩行パターンに顕著な変化がみられた（図 1）。同様な結果が飛翔によって雌に定位する雄ガ（例：タバコスズメガ）でも確認されている。

歩行や飛翔によって匂い源に定位する昆虫は、一般に匂いのフィラメントが高頻度で存在する空間ほどより風上（匂い源）に対して直線的に定位し、その頻度が低くなるに従って、より複雑なジグザグ定位パターンを示すのである。

カイコガのこのジグザグ歩行パターンの特性を調べるために無風状態で片側の触角のみにフェロモン刺激（幅 0.1 秒）を一回だけ与えたときの歩行軌跡を調べた（図 2）。カイコガは刺激を受容するとまず刺激を受けた方向に 0.2–0.5 秒間直進歩行（サージ）した後、

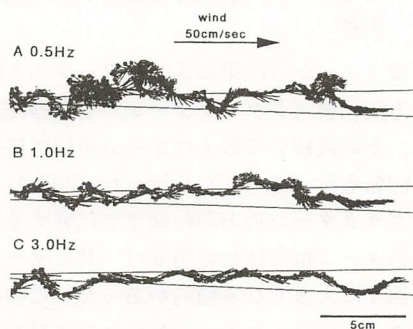


図 1 フェロモンの刺激の頻度変化（0.5–3.0 Hz）によって生じるカイコガの歩行の軌跡。カイコガの頭部（白丸）と体軸（棒）の位置を 0.1 秒ごとに示した。発煙によってフェロモンプルームの範囲を調べ、実線で示した。

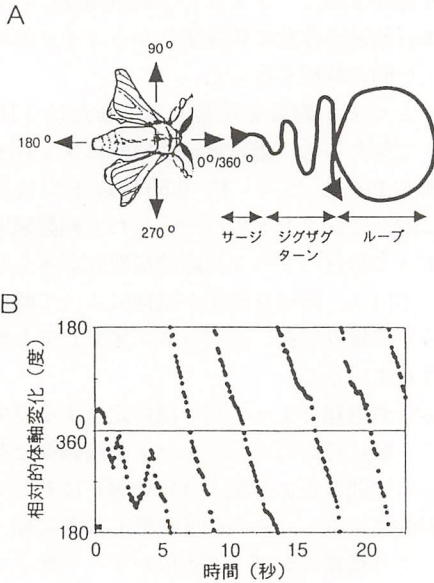


図2 プログラム化された雄カイコガのジグザグ歩行パターン。(A)カイコガの定位歩行は、サージ、ジグザグパターン、ループから構成され、刺激毎にこのパターンが初めから正確に繰り返される。(B)フェロモン刺激を触角に0.1秒間一度だけ与えたときに生じた雄ガの体軸角度の時間変化。体軸変化は(A)のように反時計まわりに角度が増加するようにプロットした。プロット左下隅の太い実線はフェロモン刺激。

小さなターンから次第に大きなターンへと数回の方向転換（ジグザグターン）を数秒間行ない、その後続いて数十秒から分単位で持続する回転歩行（ループ）を行った（図2）。

ジグザグターンの方向転換までに要する時間と各ターン毎の体軸の角度は、共にターン毎に徐々に大きくなる傾向があった。この行動パターンはフェロモン刺激のたびに最初から正確に繰り返される特徴を持っていた。また、左右の複眼を完全に塗りつぶした個体や、一方の触角を基部から完全に切除した個体でも同様な結果が得られた。したがって、この

一連の行動はフェロモンによって解発されるプログラム化された定型的行動パターンであり、そのプログラムはフェロモン刺激毎に「リセット」され、再スタートされると考えられる。

刺激頻度が0.5 Hz以下ではカイコガは、図1 Aのようなジグザグ歩行パターンを発現したのに対して、3 Hz以上ではほぼ直線的に匂い源に定位する歩行パターンを示した（図1 C）。これはフェロモンの刺激頻度の増加に伴ないリセットの頻度も増加した結果、サージと比較的小さい左右へのジグザグターンのみが繰り返り生じたことによって、見かけ上ほぼ直線的な歩行パターンになったものと考えられる。

飛翔によって雌に定位するガ類でもフェロモンの刺激頻度の変化に対して同様な傾向のジグザグ飛翔パターンを示すことから、これらの昆虫もカイコガと同様なジグザグプログラムとそのリセット機構を備えていると考えられる。

また、同様なジグザグ行動は、フェロモンばかりではなく、餌場や雌が寄主植物を探索するときなどにも見られることから、多くのガ類の匂い源探索の基本的な共通した戦略であると考えられる。

2. 遺伝的アルゴリズムによるカイコガの定位行動の獲得のシミュレーション

定位行動を行う上で最低限必要な情報は、触角が感じるフェロモンの有無と、フェロモンが流れてくる方向、つまり風向きである。（実際のガは、他に視覚情報なども統合しているとされている。）そこで、図3のようなりカレントネットワークを構成し、左右の触角が感じるフェロモンと風向きに対する体軸の角度という情報をコード化して入力

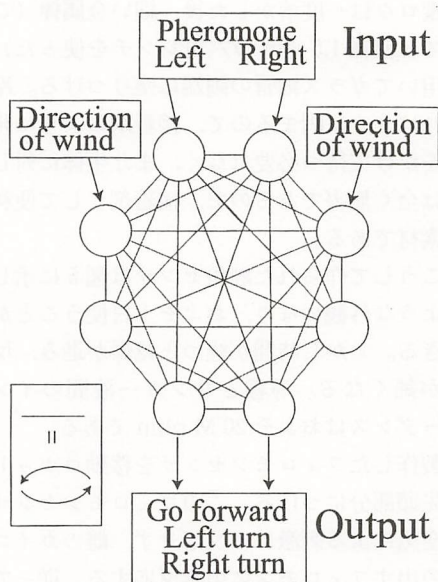


図3 シミュレーションに用いたリカレントネットワーク

ニューロンに与えた。そして、ネットワークの出力ニューロンの値から次のステップでのエージェントの移動方向（左折、右折、前進）を決定した。これを繰り返して、シミュレーション空間の中を自由に動き回ることができる。すべてのニューロンは互いに結合が許され、結合の重みを変えることでエージェントの振る舞いも変化する。

シミュレーション空間としては図4のようなフェロモン場を考える。台形の領域はフェロモンの確率分布になっており、領域内では一定濃度のフェロモンが一定の確率で左右それぞれの触角に感じられる。実際のフェロモン流は均一な濃度勾配をもたず、フェロモンの存在している部分と存在していない部分が混ざり合っている。そのため、2本の触角で感じるフェロモンの濃度を比較して濃い方へ向かうとい

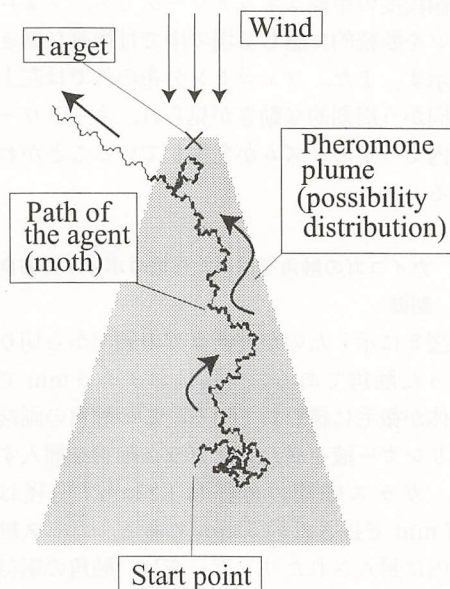


図4 遺伝的アルゴリズムにより獲得した定位行動

ような行動パターンでは到達は困難である。

このシミュレーション空間の中でリカレントネットワークを持ったエージェントを動かし、風上にいる目標（雌）へなるべく到達するように学習させた。具体的には、ニューロン同士の結合値の集合を遺伝的アルゴリズム（GA）の遺伝子、目標への接近距離をGAの適応度に設定し、この距離をなるべく小さくするように交叉や突然変異といった遺伝的操作を行ってニューロン同士の結合の重みを学習させた。なお、1つのエージェントの適応度を評価するときは異なる5点からスタートさせて成績の平均をそのエージェントの適応度とした。これは、初期位置に依存せずにフェロモンをたどって目標へ近づく行動を学習するようにするためである。

遺伝的アルゴリズムで学習させた結果、フェロモンに反応して風上を目指す行動パターンが得られた（図4参照）。ニューロン

8 個程度の単純なネットワークでも、フェロモンを断続的に感じる場の中では複雑な動きを示す。また、フェロモン分布の外では左上へ向かう周期的な動きが見られ、ネットワーク内で一定のリズムが発生していることがわかる。

3. カイコガの触角を用いた移動ロボットの方向制御

図 5 に示したのがカイコガの頭部から切り取った触角である。全長はおよそ 5 mm で全体が微毛に覆われている。この触角の両端にリンガー液を満たしたガラス細管を挿入する。ガラス細管の外径は 1.2 mm, 内径は 0.7 mm で長さは約 5 mm である。ガラス細管内に封入されたリンガー液は、触角の電気信号を伝える電解液として、また触角を生きた状態で使うので、乾燥して触角がダメになってしまうのを防ぐために用いられている。ガラス細管の反対側からは直径 50 μ m の導線が挿入されている。この導線が触角の神経電流を拾ってアンプへと伝える。ガラス細管の両端は蜜蝋を使って封印した。

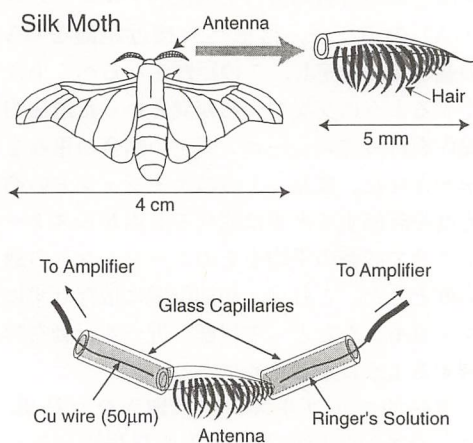


図 5 カイコガの触角を用いたフェロモンセンサ

蜜ロウは一度溶かした後、細い金属棒（ここでは直径 1.5 mm の六角レンチを使った）を用いてガラス細管の両端に塗りつける。冷えればすぐに固まるので、接着剤のように時間をかけて待つ必要はなく、また生体に対しては全く無害であるので、接着剤として便利な素材である。

こうして作られた触角センサは図 5 に示したような外観になり、およそ 1 日使うことができる。しかし時間が経つと乾燥が進み、反応が鈍くなる。導線とリンガー液間のインピーダンスはおよそ 20 M ohm である。

製作したフェロモンセンサを移動ロボットの先端部分につける。このフェロモンセンサは空気による刺激には反応せず、雌のカイコガの出すフェロモンにのみ反応する。従って、このロボットは雄のカイコガのようにフェロモンをトレースして動くことが可能であると思われる。

実験は、フェロモンを湿したティッシュを入れた注射器を使って、フェロモンをロボットの前で噴霧して行った。今回 ROM に焼いたプログラムは、

- 右のセンサでフェロモンを感じたら、左のモータを動かして右方向に進む。
 - 左のセンサでフェロモンを感じたら、右のモータを動かして左方向に進む。
 - 何も感じないときは動かない。
- というものである。

その結果、空気による刺激ではロボットは動かず、フェロモン刺激によってロボットを任意の方向に誘導することが可能であった。ただし、センサの感度が十分でなかったためか、センサのかなり近くでフェロモンを噴霧しないと反応せず、雄のカイコガがフェロモンに対して示すほどの感受性は見られなかった。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では, 当初, 神経情報を収集・処理できる素子を内蔵したマイクロシステム (人工神経) を昆虫の体内に埋め込むことを計画した。これに関して, 研究予定年限内では成果をあげることができなかったため, 今後の課題として素子の開発を行う。また, 昆虫の行動を, 人工神経系で再現できる可能性がいたので, さらに具体的な実験例を増やしていきたい。

[研究の発表, 論文等]

- 1) R. Kanzaki, A. Ikeda and T. Shibuya (1994) Morphological and physiological properties of pheromone-triggered flip-flopping descending interneurons of the male silkworm moth, *Bombyx mori*. *J. Comp. Physiol. A* 175: 1-14
- 2) 神崎亮平・三嶋竜弥・有吉隆浩 (1994) 昆虫の匂い源探索行動の制御メカニズム. 日本味と匂学会誌 1 (3): 432-435
- 3) R. Kanzaki (1994) Olfactory processing pathways of the insect brain. Lateral accessory lobe system in the protocerebrum produces olfactory flip-flopping signals in *Bombyx mori*. *Olfaction and Taste* 11: 831-834
- 4) 神崎亮平 (1993) フェロモン源への雄蛾の定位行動. 植物防疫: 47 (11): 19-24
- 5) 神崎亮平 (1994) 昆虫の本能行動を制御するしくみ. 化学と生物 32 (11): 726-734
- 6) 神崎亮平 (1994) 昆虫: フェロモンによる行動検定. 生体の科学 45 (5): 584-5857.
- 7) 神崎亮平 (1994) 昆虫の脳神経系における匂い情報処理と行動発現機構の研究. 日本味と匂学会誌 1 (3): 142-145
- 8) 神崎亮平 (1995) 昆虫の匂い源探索行動のしくみ—脳における匂い情報処理と行動発現—. 生物物理 (In Press)
- 9) 神崎亮平 (1995) 昆虫の匂い源探索行動. 遺伝 49 (7): 62-67
- 10) E. Arbas, M. Willis and R. Kanzaki (1993) Organization of goal-oriented locomotion: pheromone-modulated flight behavior of moths. In "Biological Neural Networks in Invertebrate Neuroethology and Robotics" (Eds. Ranall D. Beer, Roy E. Ritzmann, Thomas McKenna) pp.159-198. Academic Press Inc.
- 11) R. Kanzaki and A. Ikeda (1994) Morphology and physiology of pheromone-triggered flip-flop descending interneurons of the male silkworm moth, *Bombyx mori*. *Olfaction and Taste* 11: 851.
- 12) 神崎亮平・渋谷達明 (1995) 定位行動を制御する脳神経情報. 「昆虫の脳を探る」富永佳也編: 196-217 共立出版
- 13) Yoshihiko Kuwana, Naomitsu Watanabe, Isao Shimoyama, Hirofumi Miura (1994) Behavior Control of Insects by Artificial Electrical Stimulation, Distributed Autonomous Robotics Systems, Springer-Verlag: 291-302
- 14) 桑名芳彦・下山勲・三浦宏文 (1995) 昆虫の触角を用いた移動ロボットの方向制御. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 講演予稿集: 564-567
- 15) 竹内昌治・石原淳也・下山勲・三浦宏文 (1995) ハイブリッド昆虫ロボット. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 講演予稿集: 576-579
- 16) 佐山雄史・小川逸作・下山勲・三浦宏文 (1995) リカレントネットワークを用いた昆虫行動のシミュレーション. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 講演予稿集: 580-583

電池駆動が可能な圧電式回転モータ/ 直線モータの体系的研究

Systematic Studies of Ultrasonic Rotary Motors and Linear
Motors Piezoelectrically Driven with Dry-Cell Battery

931012

研究代表者 山形大学工学部電子情報工学科 教授 富川 義朗

〔研究の目的〕

近年メカトロニクスの時代を迎え、必要(角)変位を高速度に正確に制御する要求が多い。本研究はこのような要求に対して乾電池駆動が可能な小型な圧電式回転/直線モータ(アクチュエータ)の体系的研究を行い、その応用の進展はかるものである。すなわち、マイクロメカニズムに至る現実的電子機械デバイスの研究にある。

具体的には、

- (1) 磁気に関係しない腕時計用モータ
- (2) 光ディスクの読取りヘッド移動・直線モータ、を主対象とし、小型化の限界や、高速・精密制御方式、測定法など体系的な研究を行うものである。

〔研究の内容、成果〕

体系的な研究内容(成果)を表1に示す。すなわち、超音波モータの構成法などは同表1.に示すように体系化されたとみなされる。但し、その特性については今後ともブラッシュ・アップの努力は必要となる。2.の応用はその現在の具体的なものをまとめたもの

で、上記したように対象にあわせ検討されなければならない。3.の駆動と制御も重要事項として取り上げた。(1)~(5)に述べた項目は実験室では、ほぼ完成されている。2.と合わせ実際に活用される事が望まれる。4.については、(1), (2)をのぞき、未だ不十分なものとして残った。特に(4), (5)は重要項目であるので、今後の課題としたい。5.も体系的考察は行われたとは言いが、表記タイトルの比較的軽ロードのモータにおいては問題とならない事が確かめられた。

次に具体的成果として腕時計用モータを取りあげ“自励振・ステッピング動作の非軸対称((2, 1))モード円平板超音波モータ”を本報告の4項目に示す。すなわち、特長としては、

- 1) 基本的に薄型構成が実現されている。
- 2) 電池駆動が実現できる自励振回路が検討された。特に、モータの動作点がステータの反共振点となるように高インピーダンス型の自励振回路とした。
- 3) ステッピング動作するロータの積算誤差が打消される構造的工夫を行った。
- 4) 同相(単相)駆動モータとして動作し全体的にシンプルな構成となっている。

超音波モータの体系的研究

(目的) ① 今迄の研究の反省：1. 2. に重点をおいてきた
 ② 今後の課題：4. 5. への意識展開
 ③ Idea 発露のための整理

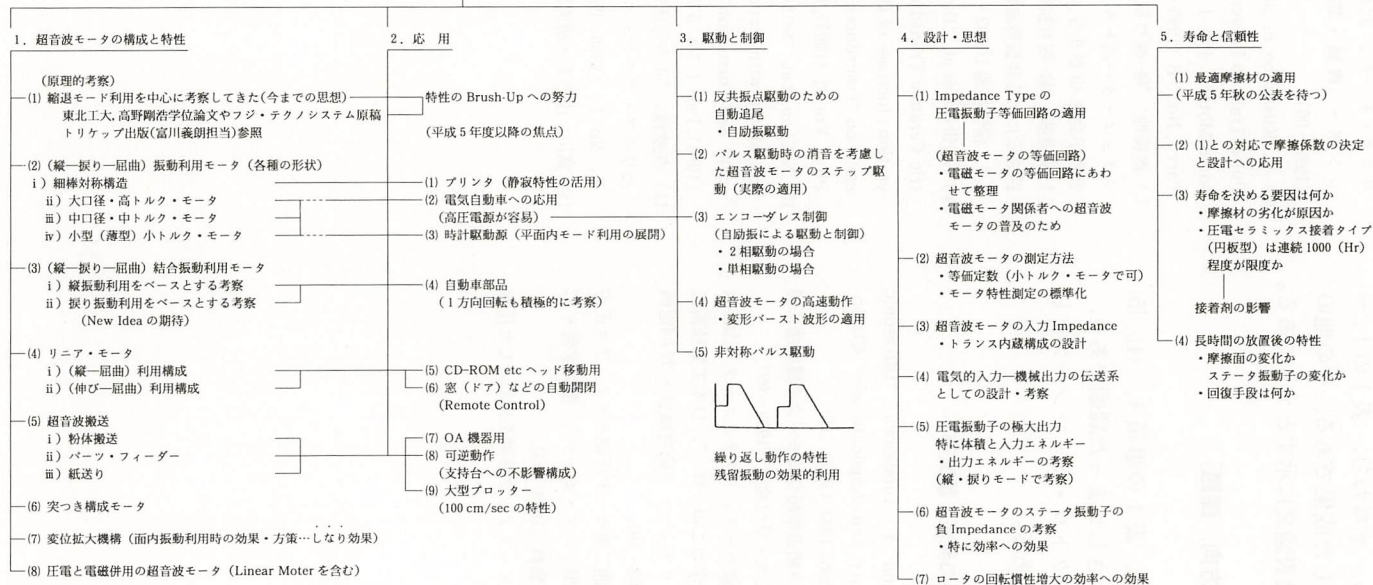


表1 超音波モータの体系的研究一覧

事があげられる。すなわち、表1の1.～3.の互いに関連した成果である。その他の具体的成果は、発表論文に示すとうりである。

[今後の研究の方向、課題]

上述したように、表1の事項4.-(4), (5)ならびに(6), (7)がさしこまれた課題であり、中長期的にはエレクトロ・ミリマシーンとしての展開・応用にある。

[成果の発表、論文等]

- 1) S. Ueha and Y. Tomikawa: "Ultrasonic Motors —Theory and Applications—" Clarendon Press. Oxford 1993 (1993-12).
- 2) 高野: "モード縮退型超音波モータの構成法に関する研究", 東工大・学位論文 (1993-09).
- 3) 富川: "超音波モータ / アクチュエータ—山形大学 / 東北工業大学のこの一年—", 日本工業技術振興協会, 固体アクチュエータ研究部会・37回定例部会・資料 (1993-10).
- 4) 矢吹他: "屈曲二重モード圧電セラミックス正方形板を用いた薄型リニア・モータ", 電気学会・22回EMシンボ・資料 (1993-05).
- 5) 富川他: "光ビクアップ移動を目的とした圧電

- リニア・モータ", 5回電磁力関連のダイナミックシンボ・(機械・電気・AEM学会) No. 222 (1993-06).
- 6) C. Kusakabe et al.: "Waveform of Driving Pulse Train to Prevent Metallic Sound of Ultrasonic Motors", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 32 (1993) Part 1, No. 5 B (1993-05).
- 7) 青柳他: "縦-振り振動利用の超音波モータ / アクチュエータ—高トルク構成の実験的検討—, 日本音響学会誌 49 巻 9 号 (1993-09).
- 8) 島貫他: "縦-振り振動利用超音波モータの伝送線路表示による共振周波数及び変位のシュミレーション", 信学技報 US 93-1 (1993-05).
- 9) S. Hirose et al.: "Dielectric Loss in a Piezoelectric Ceramic Transducer under High-Power Operation; Increase of Dielectric Loss and its Influence on Transducer Efficiency", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 32 (1993), Part 1, No. 5 B (1993-05).
- 10) X. Chen et al.: "Self-Oscillated Ultrasonic Stepping Motor with Function of Angular Displacement Self-Correction", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 33 (1994), Part 1, No. 5 B (1993-05).
- 11) 矢吹他: "正方形圧電セラミックス振動子を用いたリニア・アクチュエータ", 日本 AEM 学会 Vol. 3, No. 1, (1995-03).
- 12) 富川: 山形大・研究論文集 (1994-12).

ロバスト制御理論に基づく伝達関数に着目した 人間指向のマン・マシン制御系設計法

Operator-Oriented Design of Manual Control Systems Based on Robust Control Theory

931015

研究者代表

東京工業大学工学部 助教授

松 尾 芳 樹

共同研究者

東京工業大学工学部 助 手

稲 葉 毅

〔研究の目的〕

かつて「自動制御」の全盛期には人間が行っている制御機能を可能な限り自動化することが目標とされていた。しかし、そのような自動化には操作者である人間の立場の視点が欠けており、かえって作業の単純化による労働意欲の減退や誤操作による事故などの懸念があった。そのため、近年では人間と機械の係わりを人間側から見直した「人間指向の自動化」が提唱されている。本研究では人間が操作することの意義が重要であるマン・マシン制御系をとりあげ、操作者にとって制御しやすくかつ操縦し甲斐のあるシステムの設計法の新方式を提案し、実験により有効性を検証する。

〔研究の内容、成果〕

1. 対象とする手動制御系の構成とこれまでに報告されている結果

本研究では Fig. 1 に示すような手動制御系を取り扱う。操作者は自ら発生する内部目

標値に対して操作対象の出力を追従させるように補償特性 $H_c(s)$ と追従特性 $H_p(s)$ からなる制御動作を行うと考えられている。

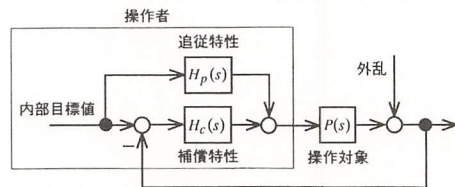


Fig. 1 手動制御系のブロック線図

古典制御理論に基づく過去の研究で報告されている補償特性に関する主な結果は：

a) 操作対象に次式のモデルの範囲内で適応的に変化する、

$$H_c(s) = K \frac{T_L s + 1}{T_I s + 1} e^{-\tau s}$$

b) 補償特性の適応的变化は Fig. 1 の手動制御系の開ループ伝達関数がクロスオーバー周波数 ω_c 付近で次式（クロスオーバーモデル）のように近似できる、

$$H_c(j\omega)P(j\omega) \approx \frac{\omega_c e^{-j\omega\tau}}{j\omega}, \omega \approx \omega_c$$

の2点である

また、追従特性に関しては次のような仮説が提案されているに過ぎない：

c) 操作対象の逆モデルを形成するよう適応的に変化する。

これらの結果は補償特性に関しては安定性に関連するクロスオーバー周波数帯域付近における性質だけであり、また、追従特性に関する性質はその適用範囲が明確でない。そのような理由により手動制御系の設計に利用するためのモデルとしては不十分である。そのため、これらの結果を利用した手動制御系の設計の研究はほとんど見られない。さらに、本研究の目的でもある「操作しやすさ」といった観点からの考察も見られない。本研究ではこれら古典的な結果を操作性を考慮した手動制御系の設計に利用できるように拡張することを考える。

2. 操作特性の測定と解析

2.1 操作特性測定系の構成

Fig. 2 に操作者の制御特性を測定するための実験系を示す。操作者の内部目標値を観測することはできないため Fig. 1 の制御特性を直接測定することはできない。本研究ではその制御特性が、未来の値を含む軌跡として表示した外部目標値への追従制御特性と等価であると考えて後者の測定を行う。

操作対象とランダム外乱信号および目標値信号はコンピュータによって実現され、操作者はCRT ディスプレイに表示される目標値に操作対象の出力値を一致させるように回転型の入力装置を用いて追従制御動作する。ここで、操作対象として安定な一次と二次の伝達関数約 40 種類を用いて測定を行った。

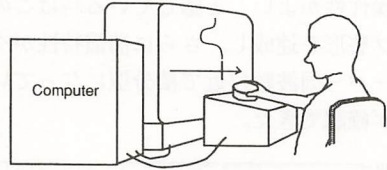


Fig. 2 制御特性測定系の構成

2.2 補償特性に関する新たな知見

まず操作者の補償特性 $H_c(s)$ に注目する。Fig. 3 は操作対象を様々に変えた時の開ループ特性 $H_c(s)P(s)$ 伝達特性である。このとき補償特性は操作対象に応じて積分型から微分型まで適応的に変化している。Fig. 3 から、開ループ特性が前記 b) のクロスオーバーモデルを形成していることが確認できる。

さらに操作者の補償特性が微分型のとき (Fig. 3 細線) 以外の開ループ特性はクロスオーバー周波数付近だけでなくそれよりも低い周波数帯域においてもほぼ一定の特性となっていることが確認できる。すなわち、手動制御系において操作者は開ループ特性をクロスオーバー周波数付近から低域にかけて次式で表わされるような伝達特性に整形しようとする性質があることがわかる。この式を開ループモデルと呼び、開ループモデルを形成しようとする性質を操作者の開ループ整形特性と呼ぶことにする。

$$H_c(j\omega)P(j\omega) \approx \frac{T\omega_c e^{-\tau s}}{Ts+1}, \omega \leq \omega_c$$

この開ループ整形特性にはクロスオーバーモデルに欠けていた低周波帯域での性質が表されている。一般に低周波帯域は制御系の性能の指標である感度特性にとって重要である。このことから、開ループ整形特性は手動制御系の設計に有用な性質である。また、操作者

が「操作性がよい」と感じている時はこの開ループ整形を達成し、さらに補償特性がクロスオーバー周波数付近で積分型になっていることが確認できた。

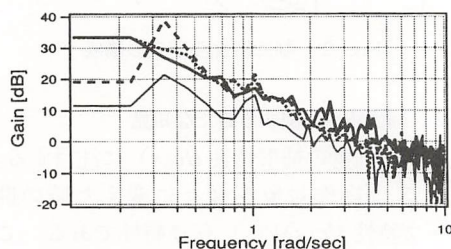


Fig. 3 開ループ特性 $H_c(s)P(s)$

2.3 追従特性と操作性に関する考察

次に操作者の追従特性 $H_p(s)$ について調べる。過去の研究では追従特性は操作対象の逆モデルを形成するといわれている。そこで様々な操作対象を操作したときの操作者の追従特性を解析した。その結果、約 2 rad/s 以下の帯域において比例特性を持つ操作対象に対してはその帯域で追従特性が操作対象の逆特性を形成し、「操作性がよい」と感じることが分かった。このときの手動制御系の性能を調べることで操作性との関連を考察する。

手動制御系の性能は、目標値から偏差までの伝達特性である追従制御特性 $G_p(s)$ と外乱から偏差までの伝達特性である補償制御特性 $G_c(s)$ で評価でき、それぞれゲインが低く抑えられているほど性能が優れているといえる。

前述の開ループ整形を達成でき、さらに追従特性が操作対象の逆特性を形成するような操作しやすいと感じた操作対象について手動制御系の性能を示したものが Fig. 4 である。

制御系の性能に関して重要な低域に注目すると $G_p(s)$ の方が $G_c(s)$ より低く抑えられ

ている。 $G_c(s)$ と $G_p(s)$ のボード線図上での差は追従特性 $H_p(s)$ の寄与分である。すなわち、追従特性の効果が性能に現われることが操作性の高さの一つの指標になることが分かった。

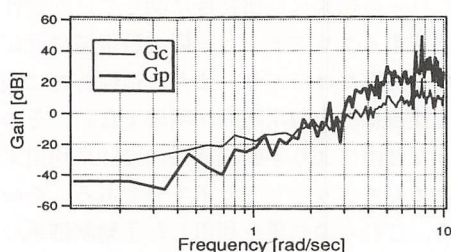


Fig. 4 制御特性

3. 補償器の設計

以上の解析結果を用いると制御系の性能と操作性の両方を考慮した手動制御系の設計が可能となる。Fig. 5 に示すように、操作対象と操作者の間に動的補償器 $C_1(s)$ と $C_2(s)$ を挿入した手動制御系を考える。ここで LPF は操作者に不必要に高周波数の信号を提示しないためのローパスフィルタである。

補償器の設計は 2 段階に分けて行う。まず、操作者を含まない Fig. 5 (a) に示される閉ループ部分が十分な外乱除去特性を持つように補償器 $C_2(s)$ を設計する。これは代表的なロバスト制御系設計理論である H_∞ 制御理論における混合感度問題に帰着し解くことができる。

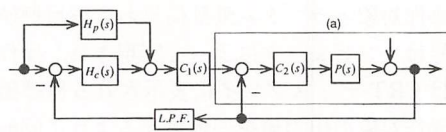
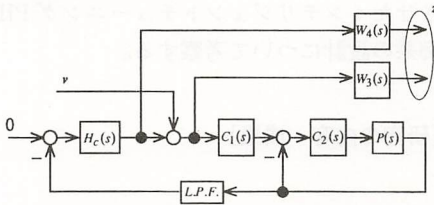


Fig. 5 手動制御系のブロック線図

次に Fig. 6 のような拡大制御系を考え H_∞ 制御理論の周波数特性整形能力と前述の

解析結果を利用して以下のように補償器 $C_1(s)$ を設計する。まず、操作者の補償特性のモデルとして操作者が最も操作性がよいと感じたときの積分特性を代入する。さらに、操作者を含む開ループ特性を前述の開ループモデルに整形するように周波数重み関数 $W_3(s)$, $W_4(s)$ を設定する。このような設定で H_∞ 制御問題を解くことにより得られた補償器 $C_1(s)$ により、操作対象は操作者にとって約 5 rad/s 以下の周波数帯域において比例要素のように感じられる。よって、前述のように追従特性にとっても操作対象の逆モデルが形成されやすく操作しやすい制御系となることが期待できる。

Fig. 6 $C_1(s)$ 設計のための拡大制御系

4. 実験結果

提案した制御系設計法を補償器なしでは操作が困難であった二次遅れ系の対象について適用した場合の結果を示す。Fig. 7 に操作者の補償特性と設計時のモデルを示す。補償器を用いることによりモデルに近い特性が実

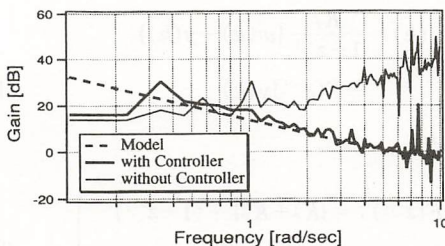


Fig. 7 補償特性

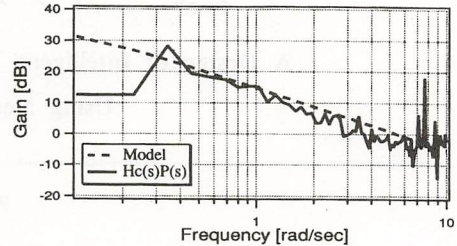


Fig. 8 開ループ特性

際に表われている。また、Fig. 8 から開ループ整形が達成されていることも確認できる。さらに、この時追従制御特性も大きく改善され、実際に非常に操作性のよい手動制御系が実現できたことを確認した。

[今後の研究の方向, 課題]

今後は、本研究の成果を視覚以外の情報を操作者が得られる場合の手動制御系の設計に拡張していく。その一つの例として力覚を付加したロボットの遠隔操縦などバイラテラル制御系を取り上げ検討中である。

[成果の発表, 論文等]

- 1) 小川敦司, 矢島実, 稲葉毅, 松尾芳樹: “人間の開ループ整形特性に基づく手動制御特性補償器の設計”, 計測自動制御学会第 33 回学術講演会予稿集, 201/202 (1994).
- 2) Takeshi INABA, Yoshiki MATSUO: “Loop-Shaping Characteristics of a Human Operator in a Compensatory Manual Control System”, Preprints of the 6th IFAC Symposium on Analysis, Design And Evaluation Of Man-Machine Systems, 755/759 (1995).
- 3) 作野慎一, 稲葉毅, 松尾芳樹: “手動制御系における人間の追従制御特性の解析と操作性を考慮した補償器設計法”, 計測自動制御学会第 34 回学術講演会予稿集, 745/746 (1995).

ニューラルネットワークを用いたインテリジェント チューニング PID 制御系の設計

A Design of Intelligent Tuning PID Control Systems Using Neural Networks

931019

研究代表者

岡山県立大学情報工学部 助教授
(元大阪大学基礎工学部 助手)

山 本 透

[研究の目的]

近年、ニューラルネットワーク (NN) 技術は、パターン認識問題をはじめとして、幅広い分野において適用されている。制御の分野においても、非線形系に対する学習制御を中心に、数多くの適用結果が報告されている。しかしながら、そのほとんどはニューラルネットワークにより、制御入力を直接計算する方式をとっており、結果としてできあがったニューラルネットワークそのものの物理的意味が不明確であるという問題点を有している。一方、ニューラルネットワークの出力に PID ゲインを用いたチューニング型ニューラルネットワークの報告がなされている。この手法は、PID ゲインを出力に用いていることから、前者のような制御入力生成型に比べ、制御系の物理的な意味が明確になるという利点を有している。しかしながら、PID ゲインの調整には比較的長期に渡る学習が必要とされ、オンライン調整には不向きな構造となっている。そこで、本研究においては、PID ゲインのオンライン調整に主眼をおき、著者らがこれまでに提案したセルフチューニング

PID 制御法とニューラルネットワークとを融合させたインテリジェントチューニング PID 制御系の設計について考察する。

[研究の内容・成果]

1. 制御系の概要

ここで構成するセルフチューニング PID 制御系は、PID 制御器（ここでは、速度型 PID 制御器を用いる。あるいは I-PD 制御器とも言う。）を原型として、従来のセルフチューニング制御法にニューラルネットワークをハイブリッド化することにより、PID ゲインを適応的に調整するものである。

ここで、PID 制御則は次式で与えられる。

$$u(k) = \frac{K_I}{1-z^{-1}} \{w(k) - y(k)\} - F(z^{-1})y(k) \quad (1)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} F(z^{-1}) &:= \{K_P^S + K_P^N\} + (1-z^{-1}) \\ &\quad \cdot \{K_D^S + K_D^N\} \\ K_I &:= K_I^S + K_I^N \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

である。ここで、下付き添字の P , I , D は、それぞれ比例、積分、微分ゲインを表しており、また、上付きの S と N は、セルフチューニング (ST) 部とニューラルネットワーク (NN) 部からの出力であることを示している。つまり、ST 部と NN 部から出力されるそれぞれの PID ゲインの和により制御が行われる。

2. システムの記述

まず、対象とするシステムが次式により与えられるものとする。

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-1}B(z^{-1})u(k) + g(u, y) + \xi(k) \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで、 $u(k)$, $y(k)$ は制御入力および出力を表しており、 $g(u, y)$ は、線形 2 次系でモデル化することができない部分 (以後、これを非 2 次線形部とよぶ。) を意味している。また、 $\xi(k)$ は、平均値零、分散 σ^2 のガウス性白色雑音である。この (3) 式に対し、以下の仮定が成立するものとする。

【仮定】

[A. 1] (4) 式における m は既知である。

[A. 2] パラメータ a_i および b_i は未知である。

[A. 3] システムのむだ時間を d とするとき、 d は未知であるが、次式を満足する。

$$0 \leq d \leq m \quad (5)$$

[A. 4] $A(z^{-1})$ は安定 (Hurwitz) 多項式である。

[A. 5] 非 2 次線形部 $g(u, y)$ は有界。つまり、次式を満足する M が存在する。

$$\|g(u, y)\| \leq M < \infty \quad (6)$$

[A. 6] 目標値 $w(k)$ は、ステップ関数で与えられる。

3. セルフチューニング部

(1) 式の PID 制御則の内、ST 部が担当する次式の PID 制御則を考える。

$$u_s(k) = \frac{K_I^s}{1 - z^{-1}} \{w(k) - y(k)\} - F_s(z^{-1})y(k) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} F_s(z^{-1}) &:= K_I^s + (1 - z^{-1})K_D^s \\ &= f_0^s + f_1^s z^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

(7) 式および (8) 式における PID ゲインを、文献¹⁵⁾で考察したように極配置制御則との関連から逐次調整することを考える。これについて以下に簡単に説明する。

まず、(7) 式を次式のように書き換える。

$$L_s(z^{-1})y(k) + (1 - z^{-1})u_s(k) - L_s(1)w(k) = 0 \quad (9)$$

$$L_s(z^{-1}) := K_I^s + (1 - z^{-1})F_s(z^{-1}) \quad (10)$$

ここで、(10) 式の $L_s(z^{-1})$ を次式により計算する。

$$L_s(z^{-1}) = \gamma \cdot A(z^{-1})/\nu \quad (11)$$

$$\nu := H(1) \quad (12)$$

ただし、 $H(1)$ は次式による $H(z^{-1})$ の定常ゲインである。

$$H(z^{-1}) := \frac{T(z^{-1}) - z^{-1}\gamma \cdot B(z^{-1})}{1 - z^{-1}} \quad (13)$$

また、 $T(z^{-1})$ は、後述するが特性多項式を示しており、 γ はステップ状の目標値に対して定常偏差が生じないように次式で調整される。

$$\gamma := T(1)/B(1) \quad (14)$$

$L_S(z^{-1})$ が計算されれば、(8) 式および (10) 式より各 PID ゲインを計算することができる。なお、(11) 式と (13) 式に含まれる $A(z^{-1})$ と $B(z^{-1})$ は、以下の不感帯を有する逐次最小 2 乗法を用いて推定する。

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{\Gamma(k-1)\phi(k-1)}{1 + \phi^T(k-1)\Gamma(k-1)\phi(k-1)}\eta(k) \quad (15)$$

$$\Gamma(k) = \Gamma(k-1) - \frac{\Gamma(k-1)\phi(k-1)\phi^T(k-1)\Gamma(k-1)}{1 + \phi^T(k-1)\Gamma(k-1)\phi(k-1)} \quad (16)$$

$$\varepsilon(k) = y(k) - \hat{\theta}^T(k-1)\phi(k-1) \quad (17)$$

$$\eta(k) = \begin{cases} \varepsilon(k) > \delta \rightarrow \eta(k) = \varepsilon(k) - \delta \\ |\varepsilon(k)| \leq \delta \rightarrow \eta(k) = 0 \\ \varepsilon(k) < -\delta \rightarrow \eta(k) = \varepsilon(k) + \delta \end{cases} \quad (18)$$

$$\hat{\theta}(k) = [\hat{a}_1(k), \hat{a}_2(k), \hat{b}_0(k), \hat{b}_1(k), \dots, \hat{b}_m(k)]^T \quad (19)$$

$$\phi(k-1) = [-y(k-1), -y(k-2), u(k-1), \dots, u(k-m-1)]^T \quad (20)$$

4. ニューラルネットワーク部

ここで用いるニューラルネットワークは、3 層の階層型とし、入力層には過去における p 個の出力信号 ($y(k-1), \dots, y(k-p)$)、 q 個の入力信号 ($u(k-1), \dots, u(k-q)$) および $w(k)$ の信号が入力されるように、 $p+q+1$ 個のユニットを設ける。また、中間層ユ

ニットは r 個、出力層ユニットは 3 個とし、この出力層からの出力が、それぞれ PID ゲイン K_P^N 、 K_I^N および K_D^N となるように設計する。

まず、(1) 式を次式のように書き換える。

$$L(z^{-1})y(k) + (1-z^{-1})u(k) - K_I \cdot w(k) = 0 \quad (21)$$

ただし、 $L(z^{-1})$ は次式による。

$$L(z^{-1}) := K_I + (1-z^{-1})F(z^{-1}) \quad (22)$$

次に、新しい信号 $\phi(k+1)$ を次式として定義する。

$$\phi(k+1) := L(z^{-1})y(k) + (1-z^{-1})u(k) \quad (23)$$

ここで考察する NN による学習は、教師なし学習に属する。そこで、次式で定義される誤差信号 $\varepsilon(k)$ を導入する。

$$\varepsilon(k) := y_m(k) - \phi(k) \quad (24)$$

ここで、 $y_m(k)$ は次式として与えられる。

$$y_m(k) = \frac{K_I \cdot T(z^{-1})}{T(1)} y(k) \quad (25)$$

$$T(z^{-1}) := 1 + t_1 z^{-1} + t_2 z^{-2} \quad (26)$$

$$T(1) := 1 + t_1 + t_2 \quad (27)$$

いま、 $\varepsilon(k) \rightarrow 0$ 、すなわち $\phi(k) \rightarrow y_m(k)$ が実現されるとき、(21) 式、(23) 式および (25) 式から、次式の関係を得ることができる。

$$y(k) = \frac{z^{-1}T(1)}{T(z^{-1})} w(k) \quad (28)$$

すなわち、特性多項式を $T(z^{-1})$ とするモデル追従制御系を実現することができる。

次に、各ユニット間の結合係数の更新アル

ゴリズムについて考察する。まず、以下のよう
に変数を定義する。

I_i : 入力層第 i ユニットの出力 ($i=1, \dots, p+q+1$)

H_j : 中間層第 j ユニットの出力 ($j=1, \dots, r$)

O_l : 出力層第 l ユニットの出力 ($l=1, 2, 3$)

$V_{i,j}$: 入力層第 i ユニットと中間層第 j ユニットの結合係数

$W_{j,l}$: 中間層第 j ユニットと出力層第 l ユニットの結合係数

h_j : 中間層第 j ユニットの閾値

o_l : 出力層第 l ユニットの閾値

なお、 O_1 が比例ゲイン K_P 、 O_2 が積分ゲイン K_I 、 O_3 が微分ゲイン K_D に、それぞれ対応する。ここで、中間層ユニットと出力層ユニットではシグモイド関数が適用される。すなわち、上述の変数を用いると、 H_j と O_k は次式として書ける。

$$H_j = f\left(\sum_{i=1}^{p+q+1} V_{i,j} \cdot I_i + h_j\right) \quad (29)$$

$$O_l = f\left(\sum_{j=1}^r W_{j,l} \cdot H_j + o_l\right) \quad (30)$$

ここで、 $f(\cdot)$ はシグモイド関数で、次式で与えられる。

$$f(x) := \frac{1}{1+e^{-a \cdot x}} - \frac{1}{2} \quad (a > 0) \quad (31)$$

さらに、誤差規範を次式として定義する。

$$E(k) := \frac{1}{2} \varepsilon^2(k) \quad (32)$$

このとき、バックプロパゲーション法に基づいて、 $E(k)$ を最小化する結合係数の更新則を導くと、以下のようになる。

[$W_{j,l}$ の更新則]

$$W_{j,l} = W_{j,l} + \alpha \cdot a \{y_m(k) - \phi(k)\} \cdot \left(\frac{1}{2} + O_k\right) \left(\frac{1}{2} - O_k\right) H_j \quad (33)$$

[$V_{i,j}$ の更新則]

$$V_{i,j} = V_{i,j} + \beta \cdot a \{y_m(k) - \phi(k)\} \cdot \left[\sum_{l=1}^3 x_l \cdot W_{j,l}\right] \left(\frac{1}{2} + H_j\right) \left(\frac{1}{2} - H_j\right) I_i \quad (34)$$

ただし、 α および β は任意の定数である。さらに、(33) 式と (34) 式における x_l は次式による。

$$\frac{\partial \phi(k)}{\partial O_l} := x_l = \begin{cases} l=1 & y(k-1) - y(k-2) \\ l=2 & y(k-1) \\ l=3 & y(k-1) - 2y(k-2) + y(k-3) \end{cases} \quad (35)$$

ここで、PID ゲインのチューニング機構の概要を、図 1 に示す。

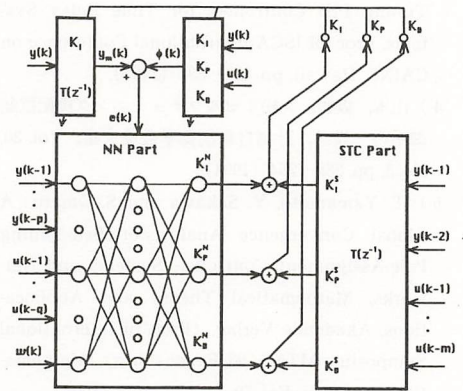


図 1 PID ゲイン調節部の概要図

以上により、NN 部では ST 部の計算結果が考慮された上で PID ゲインを計算することができる。紙面の都合上、数値計算結果については文献¹⁴⁾を参照されたい。

[今後の研究の方向・課題]

数値計算により本手法の有効性が検証されており、今後は実システムへの応用について考察を重ねる予定である。また、ニューラルネットワークの構造についても、自己組織化が可能となる制御アルゴリズムについて言及する。

最後に、本研究を遂行するにあたり、岡山県立大学 兼田雅弘先生ならびに福山大学 渡辺栄治先生には有益な助言を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

[成果の発表・論文等]

- 1) T. Yamamoto, Z. H. Luo, Y. Sakawa and S. Omatu: Self-Tuning Pole-Assignment Controller with Long Range Prediction, Automatic Control, Pergamon Press, (Proc. of 12th Triennial World Congress of the IFAC, Sydney), pp. 383-388 (1993).
- 2) T. Yamamoto, Y. Sakawa and S. Omatu: Self-Tuning PID Controllers for Time Delay Systems, Proc. of ISCA International Conference on CAINE, Hawaii, pp. 332-337 (1993).
- 4) 山本, 坂和, 大松: セルフチューニング極配置制御系の一設計, 計測自動制御学会論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 285-294 (1994).
- 5) T. Yamamoto, Y. Sakawa and S. Omatu: A Global Convergence Analysis for Self-Tuning Pole-Assignment Controller, Systems and Networks, Mathematical Theory and Applications, Akademie Verlag, (Proc. of International Symposium MTNS '93, Regensburg), Mathematical Research, Vol. 79, pp. 569-572 (1994).
- 6) T. Yamamoto, S. Omatu and M. Kaneda: A Design Method of Self-Tuning PID Controllers, Proc. of American Control Conference, Baltimore, pp. 3263-3267 (1994).
- 7) T. Yamamoto, S. Omatu and M. Kaneda: A Simplified Stochastic Self-Tuning Controllers, Proc. of Asian Control Conference, Tokyo, pp. 294-294 (1994).
- 8) 山本, 廣田, 長迫, 藤井: セルフチューニング PID 制御系の設計とポリスチレン重合反応器への応用, システム制御情報学会論文誌, Vol. 7, No. 11, pp. 448-460 (1994).
- 9) 山本, 渡辺, 田中, 兼田: インテリジェントチューニング PID 制御系設計の一設計, 第 3 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, pp. 52-53 (1994).
- 10) T. Yamamoto, Y. Inouye and M. Kaneda: A Simple Pole-Assignment Scheme for Designing Multivariable Self-Tuning Controllers, Proc. of 5th IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, Budapest, pp. 455-460 (1995).
- 11) T. Yamamoto, M. Kaneda and S. Omatu: A Stochastic Multivariable Self-Tuning Controller Based on CGT Approach, Proc. of American Control Conference, Seattle, pp. 2054-2058 (1995).
- 12) 山本, 兼田, 沖: ニューラルネットワークを併用したセルフチューニング PID 制御系の一設計, 第 34 回計測自動制御学会学術講演会予稿集 (1995).
- 13) T. Oki, T. Yamamoto and M. Kaneda: A Comparison of Self-Tuning Control Schemes in Applications, Proc. of 34th SICE Annual Conference, Sapporo (1995) to appear.
- 14) T. Yamamoto, M. Kaneda, T. Oki, E. Watanabe and K. Tanaka: Intelligent Tuning PID Controllers, Proc. of IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vancouver (1995) to appear.
- 15) T. Yamamoto, M. Kaneda and K. Tanaka: A Simple Explicit Self-Tuning Controller Based on Pole-Assignment Scheme and Its Applications, Proc. of IEEE International Conference on IECON, Orlando (1995) to appear.

非線形応答の高次元情報を活用した化学センシング

Chemical Sensing Utilising Higher Order Information Deduced from Nonlinear Response

931020

研究者代表 名古屋大学大学院人間情報学研究科 教授 吉川 研一

【研究の目的】

我々は従来から『味覚・嗅覚では、受容器での化学情報が神経インパルスの情報に非線形変換』されている事実を直視し、『非線形の時系列情報を活用することこそが、本当の意味でのインテリジェント型センサーを実現する道である』といった主張をしてきた。これらの主張に基づき、我々の研究グループでは、具体的に人工脂質膜や半導体ガスセンサー等を用いて、時系列情報からどんな化学物質に関する情報が得られるかの解明にあたってきた。本研究では、生物の感覚機能の基礎的なモデルをかたちづくると共に、緻密な測定手段となり得る実用的なインテリジェント型のセンサー開発にも力をいれてきた。そもそも生体の味覚・嗅覚には多様な化学物質を同時に識別・認知するといった素晴らしい能力がある。これに対して、これまで実用化された化学センサーは、その殆どが個々の化学物質が示す1次元的な直流電位、ないしは電流を利用したいわゆる直流型といえる。その基本原理は、応答の「線形性」であり、個々の化学物質に対する優れた選択性を持つセンサーの実現が目的であった。これに対し本研究では、生体での味覚・嗅覚情報処理は

本来非線形で動的なものという立場で現象を捉え、生体の味覚・嗅覚機能に迫ることを目指してきた。

【研究の内容、成果】

生物の感覚器のシステムとしての機能において、非線形な時系列情報が本質的に重要になってくる。本研究ではこれら非線形な時系列情報にはどのような情報成分が含まれ、またどのような処理が可能であるか、理論、実験の両方向から様々な研究を行ってきた。以下にその中でも大きく発展した二つの研究について具体的な成果を報告する。

動的非線形応答を応用した半導体ガスセンサー

実験装置の概要を図1に示す。ファンクション・ジェネレータで得られるサイン波をセンサーに加え、温度を変化させた。それによるセンサーの電気抵抗の変動をデジタル・マルチメータを経由してパーソナル・コンピュータに取り込み、解析した。また、ファンクション・ジェネレータでえられた波形も同時に取り込んだ。

センサーには、 SnO_2 半導体ガスセンサーを使用した。また、ガラス容器は水浴させ、

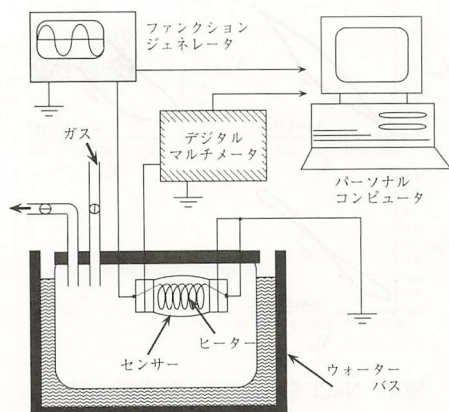


図1 ガスセンサー装置図

25.0 ± 0.5℃ に保った。測定はすべて波形がほぼ定常的となるところで行った。ヒーターの電圧は2-5 V (90℃ から 150℃ 位の温度範囲に対応) で変化させ、0.04 Hz の周波数で実験を行った。現在のところ、この条件がガスの分析に最適であると考えている。

・結果の解析

アレニウス・タイプのアクティベーションモデルによると、抵抗値の温度依存性は以下のように書ける。

$$R(T) = R_0 \exp\left[\frac{eV_s}{kT}\right]$$

ここでバリアポテンシャル V_s は、各々の分子の吸着量とその反応過程に強く支配されていると考え、可燃性ガスに接しているときの V_s が以下のように温度によって展開できると仮定する。

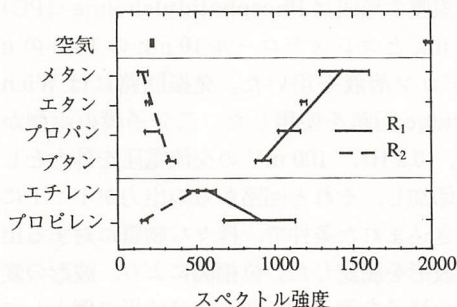
$$V_s(T) = C_1 T + C'_1 \left[\frac{dT}{dt}\right] + C_2 T^2 + C'_2 T \left[\frac{dT}{dt}\right] + C''_2 \left[\frac{dT}{dt}\right]^2 + \dots$$

すると、温度をサイン波的に変えていったときの、抵抗値の時間依存性は次のようになる。

$$R(t) \cong R_0 \exp[R_1 \sin(\omega t + \Phi_1) + R_2 \cos(2\omega t + \Phi_2)]$$

ここに現れた R_i のような成分は各々のガス固有の係数である。また実際にこれらの値を得るために、抵抗値の時間変化の波形 $R(t)$ に対数変換を施した後、FFT によってパワースペクトルを求めたパラメータを2に示す。

飽和炭化水素において R_1 パラメータが分子量に強く依存していることと、エチレンで R_1 の値に比べて R_2 の値が異様に大きいことがわかる。ここで我々は、メタンなどの軽い分子は脱着速度に温度変化の影響を受けやすく R_1 パラメータの値が大きくなり、一方エチレンなどの反応しやすい分子は R_2 パラメータが大きくなると考えた。

図2 アルカン、アルケンガスにおける R_1 , R_2 パラメータのガス種依存性

リン脂質二分子膜を用いた味覚センサー

生体のセンシングシステムに近い化学センサーには非線形特性をより積極的に利用し、また情報として抽出することが必要である。そこで「引き込み同調」という線形な系ではみられない非線形独自の性質を利用したセン

シングシステムを考案し、「膜の非線形特性」が生体の味覚のメカニズムにどう関わってくるかを調べた。実験ではリン脂質二分子膜（黒膜）で一部を置き換えた発振回路を交流によって強制振動する系を用いた（図3）。

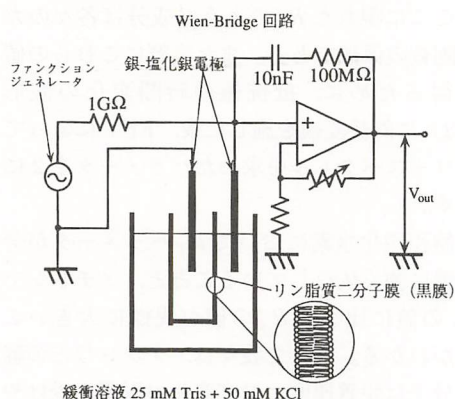


図3 「引き込み型センサ」実験装置図

・実験

黒膜の形成は Phosphatidylcholine (PC) 20 mg と コレステロール 10 mg の 1 ml の n-デカン溶液を用いた。発振回路には Wien Bridge 回路を使用した。二分子膜の両側から、0.2 Hz, 100 mV の交流電圧を外力として印加し、それと回路からの出力が 1 : 1 に引き込まれた条件で、様々な物質に対する出力波形を測定した。位相図により、波形の変化の様子を調べた。図4には結果の例として NaCl をそれぞれ、1 ml, 10 ml, 50 ml 加えた時の、位相図を示した。一般に濃度が高い場合には引き込んだ位相図の膨らみが増した。これは、入力に対する出力の位相が進むため、位相図の巻く方向（図4中の矢印）が逆転しているのもここに原因がある。加えたイオン種や、濃度の違いにより、得られる波形は異なっていた。すなわち、この実験系で化学種の識別が可能である。これらの波形

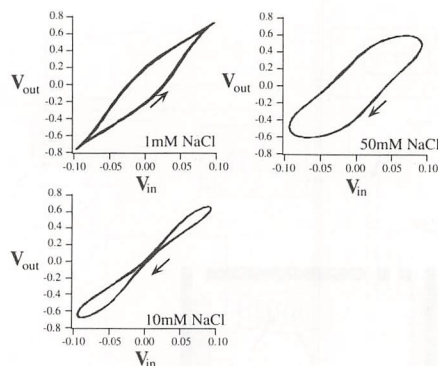


図4 NaClを加えた時の位相図の変化

の違いは、電流測定の時と同様な説明が可能であろう。つまり膜の抵抗・電気容量よりも、膜周辺の Gouy-Chapman の電気二重層が外部電場によって厚さを変えることに起因していると考えられる。

・シミュレーションによる理論的解析

別に行なった非線形インピーダンス測定から非線形な微分容量が求まった。これら結果をもとに、現象の理論的な解析を行うためシミュレーションにより実験の再現を試みた。今回は NaCl の場合について述べる。数値計算ではモデル回路に関する V_f , V_s の連立微分方程式を使った。各パラメータは実験に基づいて決めていき、微分容量が膜系の電気容量成分 C_s に近似できるとした。ここで、非線形な性質を持たせるため、 $C_s(V_s) = dQ/dV = C_0 + C_1 V_s + \frac{1}{2} C_2 V_s^2 + \frac{1}{3} C_3 V_s^3$ という電圧に依存する形で非線形項を導入した。微分方程式は以下ようになる。

$$\frac{dV_f}{dt} = \frac{1}{C_f R_f} \left(\frac{R_1}{R_2} V_s - V_f \right)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{1}{C_s(V_s)}$$

$$\times \left[\left(-\frac{1}{R_s} - \frac{1}{r} - \frac{R_1}{R_f R_2} \right) V_s - \frac{V_f}{R_f} + \frac{V_{in}}{r} \right]$$

それぞれの方程式から、図5のような実験を再現する波形を得た。なお、シミュレーションには以下の値を用いた。

a. $C_0 = 0.0037, C_1 = 0, C_2 = 0.009, C_3 = 0$

b. $C_0 = 0.0028, C_1 = 0, C_2 = 0.017, C_3 = 0$

c. $C_0 = 0.0019, C_1 = 0, C_2 = 0.019, C_3 = 0$

このように $C_s(V_s)$ の概形からも分かるが、NaCl の濃度が高濃度になるにつれ、微分容量の線形からのずれが大きくなる

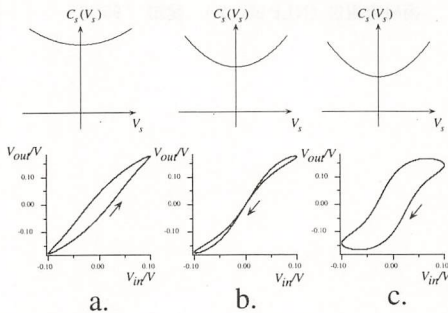


図5 シミュレーションの結果

【今後の研究の方向、課題】

今回の研究では生物における情報処理では、いかに必要な情報を周囲の複雑な環境から選びだし、認識するか、その解決策として『非線形的時系列情報を活用すること』が非常に重要であることを明らかにした。換言すれば、従来の研究では中枢での複雑な処理が物質の認識を担っているとされてきたのに対し、我々はむしろ受容の初期段階での情報処理が生物の感覚において、非常に重要なことを示したのである。本研究で得られた、これら化学情報受容についての知見は、生物工学、神経生理学、情報工学等の分野の枠を越えた大

きなテーマになっている。これら研究は、例えば、工業プラントなどでの特定のガスの探知やアルコールの醸造などの応用分野に即用的に用いることができ、実用化に耐えるセンシングシステムが実現できる可能性は極めて高い。現在のところ味覚・嗅覚類似機能をもつセンサーはまだ無く、本研究の成果は、多方面の学問分野への重要な貢献をなしており、かつ今後の発展の可能性も非常に大きいもののみならず、感覚に対する生理学的研究にも大きなインパクトを与えるものと期待できる。

成果の発表、論文等

・論文

- 1) 加藤陽, 吉川研一, “表面化学反応における秩序とカオス”, 可視化情報学会誌, 13, 154-159 (1993).
- 2) 加藤陽, 吉川研一, “Novel intelligent gas sensor based on the informational source of nonlinear response”, In Proceedings on 11 th international symposium on olfaction and taste (ISOT XI '93). Sapporo, Japan (1993).
- 3) 加藤陽, 中田聡, 吉川研一, “Novel method of chemical sensing based on nonlinear response. A model of olfactory reception”, In Proceedings on Fourth international symposium on micro machine and human science, (pp. 202-208). Nagoya, Japan (1993).
- 4) 加藤陽, 吉川研一, “Chemical sensing based on the informational source of nonlinear dynamics”, In Proceedings on International joint conference on neural networks (IJCNN'93), 1 (pp. 1019-1022). Nagoya, Japan (1993).
- 5) 加藤陽, 中田聡, 米津保雄, 吉川研一, “Nonlinear dynamics in semiconductor exposed to gas species. chemical sensing and chaos”, In Proceedings on the seventh TOYOTA conference-Towards the harnessing of chaos, Mikkabi Shizuoka, Japan. (1994).

・口頭発表等

- 1) 加藤陽, 中田聡, 赤壁澄子, 吉川研一, “非線形ダイナミクスを活用した化学センシング”, 第7回生体・生理工学シンポジウム, 豊橋, '92. 11.
- 2) 加藤陽, 吉川研一, “非線形応答を利用した化学センシング”, 電子情報通信学会 (非線形問題研究会), 京都, '93. 1.
- 3) 加藤陽, 中田聡, 吉川研一, “Novel method of chemical sensing based on nonlinear response. A model of olfactory reception”, Fourth international symposium on micro machine and human science, Nagoya, November, 1993.
- 4) 松浦弘智, 中田聡, 吉川研一 “協同的非線形発振現象を利用した脂質二分子膜での化学センシング”, 日本化学会第67春季年会, '94. 3.
- 5) 松浦弘智, 中田聡, 吉川研一 “人工平面リン脂質二分子膜の協同的非線形発振現象を用いた化学種の判別”, 日本膜学会第16年会, 東京, '94. 5.
- 6) 加藤陽, 木虎真紀, 吉川研一, “動的な非線形情報を利用した新しい化学センシング—人工嗅覚系の開発—”, 第11回センシングフォーラム, 東京, '94. 7.
- 7) 松浦弘智, 中田聡, 吉川研一 “人工平面リン脂質二分子膜の協同的非線形発振現象による化学種の判別”, 第6回自律分散シンポジウム, 名古屋, '95. 1.
- 8) 加藤陽, 中田聡, 吉川研一, “半導体ガスセンサー上の化学反応と非線形ダイナミクス”, 電子情報通信学会 (非線形問題研究会), 愛知, '95. 3.
- 9) 松浦弘智, 中田聡, 吉川研一, “非線形二分子膜振動回路によるセンシング”, 電気情報通信学会技術研究報告 (NLP 95-2), 愛知, '95. 3.

立体仮想臓器を用いた人工現実感を 伴う解剖シミュレータの開発

Development of Simulator for Anatomy with Attendance to The Reality Using Stereoscopic Virtual Internal Organs

931021

研究者代表 東京医科歯科大学医学部保健衛生学科 教授 若松 秀俊

〔研究の目的〕

立体視した三次元画像を切断するときに抵抗感を与えることにより、あたかも実物を切断してるような感覚を人工的に実現できる装置を開発する。また、これを臓器の立体画像の切断感の実現に応用し、解剖や手術のための医学教育支援システム開発の基礎とする。

〔研究の内容、成果〕

1. 研究の背景

内臓模型を補助的に用いた解剖学の修得法は必ずしも十分な教育効果をもたらさない。それゆえ、コンピュータグラフィックスによる臓器の内部形状の自由な表示と操作による教育支援システムの研究を開始するに至った。ところで医用三次元画像に関しては、二次元空間のなかで擬似立体表示が行われてきた。しかしながら、これに三次元空間内で操作を施すことはできない。ここでは、立体視画像を立体切除する際に、切除デバイスを持つ指に操作の現実感を与えるような技術と高速に画像を合成する技術を融合して解剖シミュレータを構成する基礎とする。

2. 研究の方法

本研究では、①立体視画像を切除するとき、構成物質の違いや切除速度の違いに依存した抗力を与える装置を開発し、②あたかも実物を切断してるような感覚を人工的に実現して、③これを臓器の立体画像の切断感の実現に応用するための基礎システムを構築する。

3. 研究の成果

ここでは解剖学や外科手術などの医学教育効果を高める支援システムの開発を目指して、これに必要な技術の確立に主眼をおいた研究を行った。すなわち、三次元空間内で立体視可能な画像で与えた仮想物体を切断したときに、実物を切断しているような感覚と臨場感を人工的に実現し、同時に複雑な形状と内部の空間的位置関係の理解を深めるためのシステムの開発を行った。

本システムを実現するために、まず立体視に関する技術の完成度を高めるとともに、立体視切除時の微妙な抗力実現のための基礎的な研究を行った。

両眼視差による立体視については、画像の奥行と突出の割合などに関する理論的研究と画像の歪など実際の形状との差を極力縮める

ような研究を行い、一定の成果を得た。

また、三角形面素法で構成した三次元画像で与えた仮想臓器を立体視しながら滑らかな切り口を与える切除法を確立した。その原理を示すものが図1である。

つぎに、通常のマウスカーソルを立体視化して得られる三次元マウスを開発した。これは、三次元空間内を自由に移動可能であり、その技術を基礎として、種々の切削形状をもつ模擬解剖用具を画像合成した。これらの模擬解剖用具をアイコンとして登録し、自由に選択しながら、これらを用いて目的にあった種々の解剖が行えるようにした。この解剖用具の立体視も両眼視差によるものである。その原理を図2に示した。ただし、 V_L , V_R は左右両眼、 P は刀先、 P_L , P_R は左右眼に入る投影面上の P の画像である。

これらの用具を用いて任意の形状で切除する方法を確立した。この様子を図3に示す。

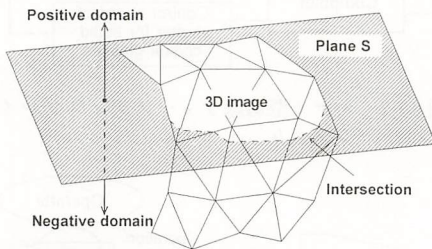


図1 平面による立体視画像の滑らかな切断

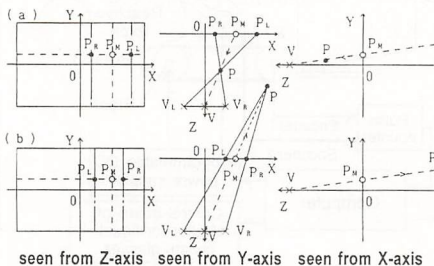


図2 立体視化したマウスカーソルの投影面および三次元空間での位置関係

また、切断抗力実現のために被切除物質の物性を図4に示すような密度、粘性、弾性、塑性で特徴づけ、三角形面素を単位としてそれらの値を与えた。

これとは別に、一樣な物性をもつ物体を実際の解剖用具により種々の速度で切断するときの抗力の発生機序を明らかにするために、抗力の測定装置を作製し、実測した。

次に、立体視画像を切断するためのナイフ型、ハサミ型、ノコギリ型の切除デバイスを製作した。切断点の座標の測定のためのエンコードと抗力を与えるための電磁ブレーキを各回転軸に取り付けた。これら電磁ブレーキは新たに開発した3方向瞬時励磁電源を用いて制御される。

これらをもとにして、三次元空間に表示された立体視画像を切除したときに、これを切除デバイスを介して指に抗力を与えることが可能な、図5に示すような三種類の装置を開発した。

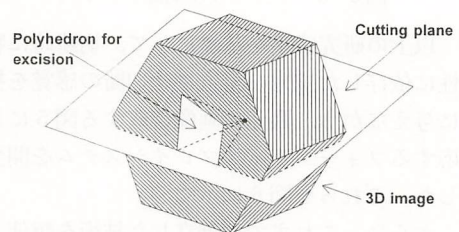


図3 仮想物体からの切除原理

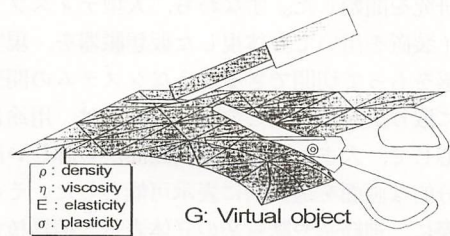


図4 三角形面素として与えられた被切除物質の物性

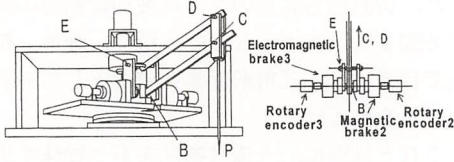


図 5-1 ナイフ型切除デバイス

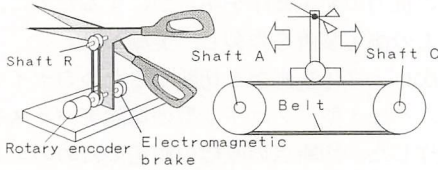


図 5-2 ハサミ型切除デバイス

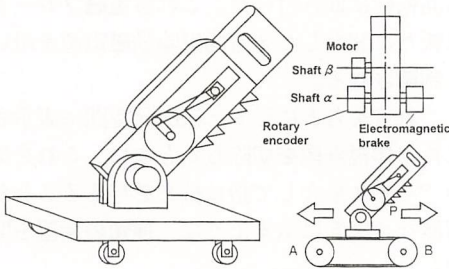


図 5-3 ノコギリ型切除デバイス

以上の研究成果を基礎にして、切断時に物性に依存した抗力を発生させ切断の感覚を指に与えながら、高速に画像合成する図 5 に対応するフォースディスプレイシステムを開発した。これらを図 6 に示す。

さらに、これまでに確立した技術を駆使して、解剖教育支援システムの実用化に関する研究を開始した。すなわち、大型ディスプレイ装置を用いて立体視した仮想臓器を、現実感をもって切開できるようなシステムの開発に取りかかった。このシステムでは、用途に応じて、大まかな立体解剖画面から詳しい部分的な画面を選択的に表示可能とした。その際に、神経系や脈管系の立体表示、神経核の色分けによる分類、目的臓器の三次元画像の内部からの構造観察と切除不可能な部分や生

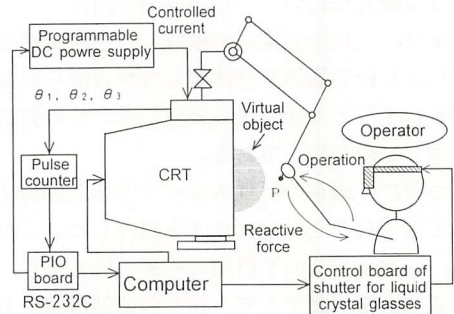


図 6-1 ナイフ型切除フォースディスプレイシステム

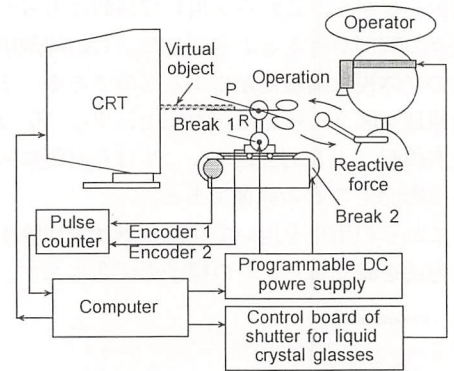


図 6-2 ハサミ型切除フォースディスプレイシステム

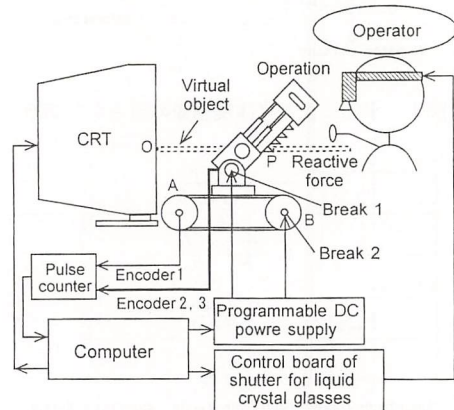


図 6-3 ノコギリ型切除フォースディスプレイシステム

命維持に不可欠な部分、例えば、神経や血管などへの侵襲禁止の警報を発するような、外科手術シミュレータとして必要な装置の開発も行っている。

[今後の研究の方向、課題]

本研究の目的は、立体視した画像からなる仮想臓器の臨場感を伴う切断を人工的に実現し、しかも複雑な形状と内部の空間的位置関係を明らかにすることであった。

このための基礎研究として、ナイフ型、ハサミ型、ノコギリ型切除デバイスを開発し、そのおのおのについてフォースディスプレイシステムを構築し、十分な切断感覚と臨場感を得ることができた。

本方法では切除デバイスの移動や画像の操作範囲に限界があるが、これらを組み合わせることにより臓器の解剖や外科手術などのシミュレータが原理的に可能になった。そこで、今後は一定空間内で位置関係が定まるようにホログラムを高速合成し、切除デバイスに抗力を同時に与えながら、もとの空間に画像の映写を可能にする研究を行う予定である。

この方法による仮想物体の構成と、切断抵抗感を伴った拘束感のないフォースディスプレイシステムの開発を行えば、組織間の位置関係が複雑な臓器について任意の切開表示による理解が可能な解剖・手術シミュレータが構成できよう。そしてそれは医学のみならず物理学・化学・工学教育などにおける、分解不可能な複雑形状物体の内部構造の視覚教育や、設計・開発ツール、立体アニメーションの構成などにも応用が可能になろう。また、

研究に付随して開発した座標検出および三次元人力装置や立体アイコンなどはコンピュータ利用に関して種々の応用が可能な技術となろう。

[成果の発表、論文など]

- 1) H. Wakamatsu, M. Kuwano and H. Suda: Realization of physiological eye movements by automatic selection of control laws using artificial neural network. Proc. 3rd Int. Conf. Artif. Neur. Net., 113-117 (1993).
- 2) 若松秀俊, 今井照泰: 抵抗感を伴う立体視画像切断システムの開発. 電気学会論文誌, 113-C, 8, 627-634 (1993).
- 3) 若松秀俊, 青柳慎介, 高原健爾: 鉗状器具による紙状仮想物体の切断感覚実現システムの試作. 第3回電気学会東京支部新潟支所講演会論文集, 149-150 (1993).
- 4) 若松秀俊, 桑野守晶, 須田治彦: ニューラルネットワークを用いた制御法則の自動選択による眼球運動模擬システム. 電気学会論文誌, 114-C, 10, 1024-1030 (1994).
- 5) 若松秀俊: 立体視画像の切断システム—三次元切除デバイスの開発と切断感覚の実現—. 画像ラボ, 5-8, 25-31 (1994).
- 6) 安名正和, 若松秀俊, 高原健爾: 立体視医用画像の切断システム—鋸状デバイスの開発と切断感覚の実現—. 電気学会研究会資料, MBE-94-5, 37-43 (1994).
- 7) 安名正和, 若松秀俊, 高原健爾: ハサミによる物体の切断感の定量化とフォースディスプレイ. 第34回日本エム・イー学会大会論文集, 463 (1995).
- 8) H. Wakamatsu, S. Aoyagi, K. Takahara and M. Yasuna: Force display system for realization of cutting-in feeling of virtual sheet object by scissors. Proc. IEEE Int. Conf. Robot. & Autom., 1, 950-955 (1995).

人間と協調しやすい移動ロボットの開発

Development of mobile robots that can cooperate with humans

941002

研究者代表	東京大学工学系研究科 教授	新井 民夫
共同研究者	東京大学工学系研究科 講師	太田 順

【研究の目的】

人間とロボットが共存する世界においては、人間の作業をロボットが積極的に補助するアクティブな協調が必要である。本研究では、その実現のために、人間にとって協調しやすいロボットの機構設計、制御系設計に関する指針を示すことを目的とする。大型対象物を搬送する作業を例にとり考察を行なう。

【研究の内容、成果】

1. 序 論

本研究では、移動ロボットは位置制御ベースで制御を実現するという前提の基での制御手法を提案する。ここでは、ある対象物を初期位置から目標位置に移動させる協調ハンドリング作業を考える。作業は物体の協調把持、協調搬送、協調位置決め3つのステップから構成されるが、2番目の協調搬送を研究対象とする。具体的には、人間と移動ロボットの協調搬送制御時に必要な機構、制御手法について考察する。ここでは、人間の代わりにそれと同等な性能を有するロボットを用いて2台の移動ロボットによる搬送制御を実機において実現する。なお、本論文の以下の解析

では、移動ロボットの車輪機構として、2駆動と1キャスト機構（2DW1C型）で、両輪へ速度入力をするタイプを想定する。

2. 設 計

一般的な多関節型マニピュレータと比較して、動特性が悪い、自分自身の絶対座標値を正確に測定しにくい、といった機構的特徴を有する移動ロボットに適した協調システムを構築する必要がある。

2.1 把持機構の設計

複数の移動ロボットが協調して作業を行う際、それらの移動ロボットと対象物とが強く拘束されていると、位置決め誤差によって対象物に過大な内力が発生する危険がある。本論文では、移動ロボットと対象物の間に機構的なコンプライアンスを設ける。これにより、過大な内力を防止する緩衝機能と、ロボットと対象物間の相対位置・姿勢を測定するセンシング機能の両者が共に実現されることとなる。ここで、機構的なコンプライアンスの自由度は、過大な内力の防止と対象物の振動抑制の両者を満たす3自由度が適切であることがわかっている。この自由度の与え方には様々な形態が考えられるが、本論では機構的な実

現のしやすさから、2つの回転機構と1つの直動機構から構成されるコンプライアンス機構を、移動ロボットの把持部に付加することとする。

2.2 協調制御手法の概念設計

複数のロボットの協調制御手法の一般的な形態としては、以下の2種類が考えられる。

- (a) リーダ/フォロワ型協調
- (b) 両者同等制御

(a)は、片方のロボット（リーダー）が位置決めを実現するために位置制御を、もう片方のロボット（フォロワ）が対象物に対する内力を制御するためにリーダーロボットに追従する方式である。(b)は、両者のロボットを目標位置と目標内力との両者が達成されるようにそれぞれのロボットを対等に制御する方法である。人間と移動ロボットによる協調制御系は、それぞれが自律的に動作することを想定しており、人間とロボット全体を一つの系とみなすことは、困難である。ここでは、(a)のリーダー/フォロワ型協調手法を採用する。前節の機構設計と併せて、本論文では、Fig. 1に示す機構を用いて、以下に定義する搬送作業を実行することを目標とする。

- (1)人間は、搬送対象物を堅く把持しており、搬送対象物と共に、あらかじめ設定された自分自身の目標軌道に沿って進行する。
- (2)ロボットは、前節で設計した機構的コンプライアンスを介して搬送対象物を把持している。このロボットは、搬送対象物との相対位置を機構的コンプライアンスを介して測定し、その機構が常にある一定の位置・姿勢に収束するように位置制御を行う。ロボットが収束すべき一定の位置・姿勢のことを「目標状態」と呼ぶ。上記の設計に従ってロボットを駆動することにより、搬

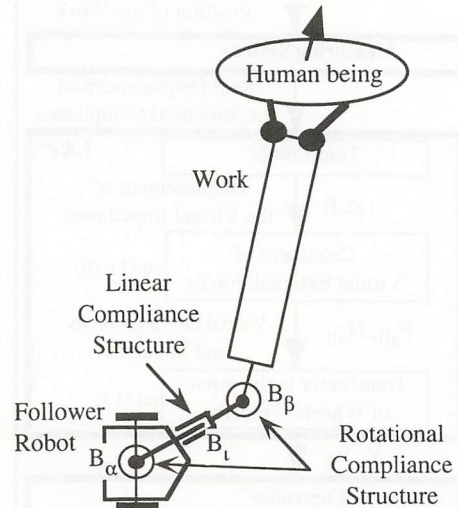


Fig. 1 Schematic view of control system

送作業を実現できる。

ロボットの制御系の設計方法を次章で述べる。

3. 詳細設計

搬送作業実現のための基本的な考え方として、ロボットは「搬送物との間に発生する位置・姿勢偏差を機構的コンプライアンスから測定し、それを0にする」制御系を組めば良い。これは、搬送対象物の位置が人間の移動により変化すると、ロボットは対象物との相対位置・姿勢をあらかじめ設定した目標位置・姿勢に保つことによって、搬送作業が実現されるという意味である。ロボットの制御ブロック線図をFig. 2に示す。本論で想定する移動ロボットは車輪機構を有するため、一般化座標 x に関して $G(x)\ddot{x}=0$ で表される非ホロノミックな拘束条件を持つ。このような系の制御では、平衡点へ漸近安定させるような滑らかな状態フィードバック則が存在しないことが知られている。すなわち、単純な

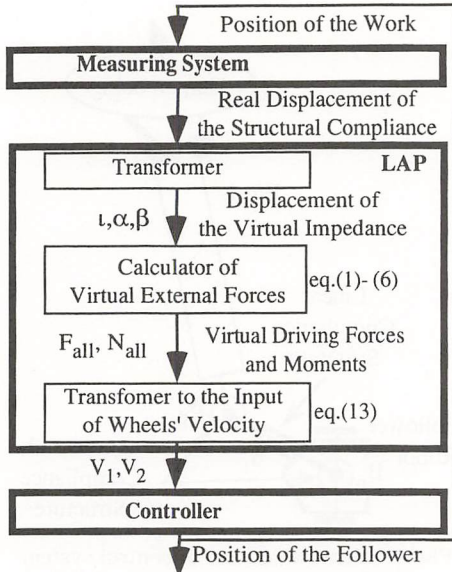


Fig. 2 Block diagram of the robot

状態フィードバック則では対応できない。本論では、ロボットの制御手法として、仮想インピーダンス法を用いることとする。3.1節で仮想インピーダンス法の概要を述べ、3.2節でロボットの制御則について述べる。

3.1 仮想インピーダンス法

仮想インピーダンス法とは、移動ロボットと障害物および目標位置との間に仮想的なバネ・ダンパを張り、目標位置との間に生じる仮想的な引力と他のロボットや障害物との間に生じる仮想的な斥力に従って移動ロボットの動作計画を行う方法である (Fig. 3)。ここで、Fig. 3 においては、移動ロボットを質点モデルとみなしているが、本論の制御に適用するために、車輪機構を考慮したモデルに拡張する。

3.2 ロボットの制御法

ここでは、まず、ロボット・搬送対象物間

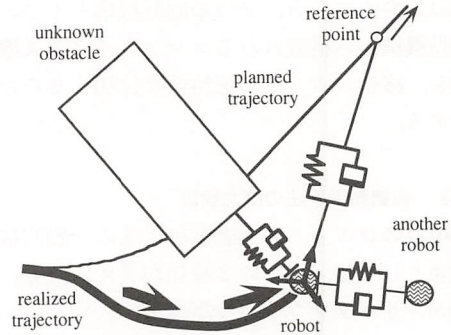


Fig. 3 Schematic view of virtual impedance method

の仮想インピーダンスを設計する。次に、仮想インピーダンスに基いたロボットの制御則を提案する。

ロボットと搬送対象物間の仮想インピーダンスモデルを Fig. 4 に示す。本論では、車輪機構に対応するため、ロボットを仮想質量 M 、仮想慣性モーメント J の剛体モデルに拡張し、車軸方向に働く仮想外力とつりあう仮想摩擦力 F_f が常に車輪と地面との間に働くものとする。また、ロボットへの制御入力である両輪の回転速度を V_1, V_2 とする。車輪軸方向に働く仮想摩擦力 F_f をロボット周りの仮想モーメント N_T に変換することとする。

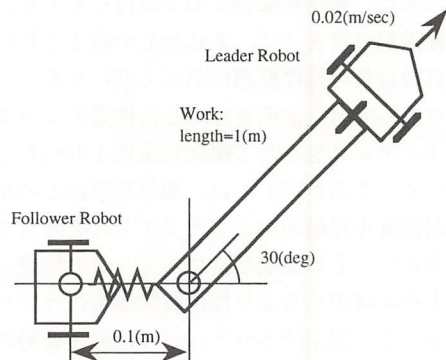


Fig. 4 Initial positions of robots and demanded motion

この処理により、移動ロボットの進行方向を仮想外力の方向に一致するように回転させ、ロボットが仮想外力の方向に動きやすくなる効果が得られると考えられる。最終的に、移動ロボットの運動方程式を式(1)のように表す。第1式がロボットの進行方向の仮想外力に関するもので、第2式が仮想モーメントに関するものである。

$$\begin{cases} M \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{all} \\ J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = M_{all} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{但し, } F_{all} &= F_t \cos \alpha + F_v \sin \alpha, \\ M_{all} &= N_\alpha + N_T \end{aligned}$$

これより、ロボットの制御系が設計でき、搬送作業が実現できる。

4. 実験

前章で示した制御戦略の有効性を証明するために、搬送制御実験を行う。前述したようにここでは、人間の代わりにロボット（以下リーダーロボットと呼ぶ）を用いる。リーダーロボットが直線走行した際の移動ロボット（以下フォロワロボットと呼ぶ）の追従性に関する前章の解析、提案した制御アルゴリズムの有効性の検証を行なう。リーダーロボットがFig. 4に示す初期姿勢から速度0.02 (m/sec)で直線運動を行う場合に、以下の2種類の戦略によるロボットの挙動をコンプライアンス機構の偏差によって比較する。

戦略A: フォロワロボットが提案した制御戦略を用いてリーダーロボットに追従する戦略

戦略B: フォロワロボットを全く制御せずにトレーラのようにリーダーロボットに牽引させる戦略

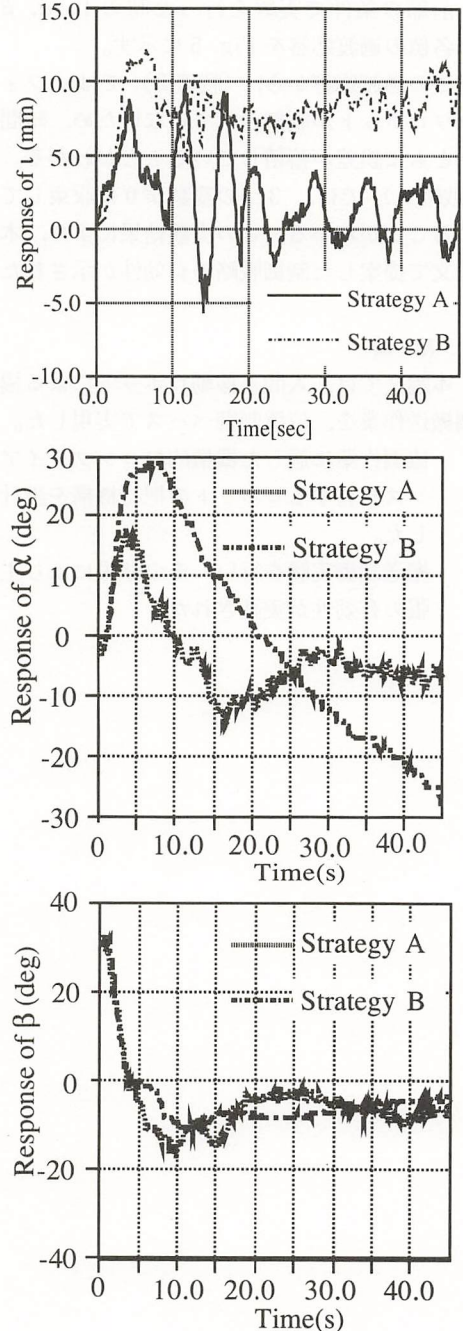


Fig. 5 Experimental results

前節の条件で実験を行った時の 1 , α , β の各値の過渡応答を Fig. 5 に示す。

この過渡応答から、(戦略 B) では、フォロワロボットが制御されていないため、時間とともに誤差が蓄積していることがわかる。(戦略 A) では、3つの変数が 0 に収束していることがわかる。この実験結果により、本論文で提案した制御戦略の有効性が示された。

5. 結 論

本論文では、人間と移動ロボットによる協調搬送作業を、位置制御ベースで実現した。

- 協調作業に適した機構的なコンプライアンスを有するロボットの把持機構を設計した。
- 搬送制御実験を行い、その結果により主張の有効性が実証された。

[今後の研究の方向, 課題]

今後の研究の方向としては、

- 搬送作業の繰り返しの中で作業をする人間の搬送ボタンを学習するアルゴリズムの開発
- 複数人と複数台ロボットの協調搬送作業の実現

等が考えられる。

[成果の発表, 論文等]

- 1) 太田順, 武衛康彦, 新井民夫, 大隅久, 陶山毅
一: 2 台の移動ロボットの協調による搬送制御, 日本ロボット学会投稿中。

重度身体障害者介助システムに用いる 非接触注視点検出法の研究

A Study on a Non-Contact Eye-Gaze Detection Method Used on Support Systems for Handicapped Persons

941004

研究者代表

静岡大学工学部 助教授

海老澤 嘉 伸

[研究の目的]

精神的活動は正常だが身体が不自由な重度身体障害者は多い。そのような患者でも眼球運動機能は残存していることが多いため、注視点を入力として駆動する介助システムの開発が望まれる。このような介助システムでは、モニター上に次々とメニューが現れ、それを患者が見ていくだけで、周辺介助機器が動作したり、意志伝達ができたりする。ところが、それにふさわしい注視点検出装置が存在せず、具現化が難しいのが現状である。本研究では、重度身体障害者介助システムにおいて使用に耐え得る注視点検出装置の研究、開発を行うのが目的である。

[研究の内容、成果]

1. はじめに

身障害者介助システムに使用するために、既に我々が考案した2光源と画像差分法による瞳孔抽出法に基づく非接触注視点検出法を実現するためのハードウェアが開発された。これは、近赤外線光源とビデオカメラを用いた方法が基本となっている。本報告では特に視

力矯正用の眼鏡を装着している場合にも注視点を可能とするためのシステムの構成とその有効性について述べる。

2. 方法

(1) 注視点検出の原理

小さな光源により近赤外線を眼に照射すると光源は角膜上で反射し、それをビデオカメラで撮影すると、小さく明るい領域として写る。これは、角膜反射光と呼ばれる。角膜反射光の位置は頭が動かない限り、視線方向によってあまり動かない。それに対し、瞳孔の位置は視線方向によって大きく変化するため、角膜反射光と瞳孔像の相対位置関係により、注視点を決定できる。

(2) 瞳孔検出

2光源と画像差分法を用いた瞳孔検出法では、1個の光源がカメラの光軸上に設定され(中心光源)、ビデオ信号の奇数フィールド時に点灯され、もう1個の光源が光軸から少しずれた位置に設定され(非中心光源)、偶数フィールド時に点灯される。光源から発する赤外光の一部は瞳孔を通過し、網膜で反射し、

再び瞳孔を通過して強い指向性をもって光源の方に戻る。そのため、中心光源が点灯したときには、赤外線がカメラの方に戻るため、瞳孔が虹彩などの周囲の部分より明るく写るのに対して、非中心光源が点灯したときには、カメラの方向に赤外線がほとんど戻らないため、瞳孔像は周囲よりむしろ暗く写る。これら時間的に隣り合う2枚のフィールドの画像を差分すると、周囲の部分（背景）が消え、瞳孔だけが浮き上がって見えるような差分画像が得られる。差分画像では背景がほとんど無いために一定の閾値で簡単に瞳孔が検出できる。

(3) 眼鏡装着時への対応

眼鏡を装着すると、眼鏡のレンズの表面で赤外線が反射し、それが高輝度で大きなスポットとして写る（図1a）。これは、差分画像においても比較的大きな領域として残るために瞳孔検出を妨げる。これを解決する方法を次に述べる。この眼鏡反射光は一般に角膜反射光よりずっと大きく、しかも瞳孔像より明るい。したがって、まず瞳孔部の輝度より高い閾値により、その閾値より高輝度の部分をレベル零に置き換える（高輝度除去）。この処理により、眼鏡反射光は縮小され、その後、瞳孔部検出のために2値化された画像

（図1b）においても眼鏡反射光部は比較的小さなものとなる（瞳孔部等がHレベル）。さらに、画像処理の一手法である膨張と収縮処理により瞳孔部が残されたままで眼鏡反射光部は除去される（図1c）。この後に重心が算出される。眼鏡反射光が完全に除去されない場合またはその他のノイズがある場合のために動的円窓が適用される。動的円窓の中心は重心（瞳孔中心に相当する）に合わせられる。この窓処理により、膨張・収縮によって完全に除去されなかった眼鏡反射光やノイズも予め除去できる。

角膜反射光を検出するために、もう一つの動的円窓が奇数または偶数フィールドに適用された。その大きさと位置は、角膜反射光が常に瞳孔の近傍に存在するため、瞳孔検出用の窓と同じとした。

(4) ハードウェア

全体のハードウェア構成を図2に示す。画像差分器はFIFOメモリを基本にしている。この装置では、アナログビデオ信号を256階調にA-D変換し、時間的に隣り合う奇数、偶数フィールドを差分し、差分画像が1/60秒毎に得られる。

重心検出器は、水平ライン1ラインにつき70回のサンプリングを行い、Hレベルの画

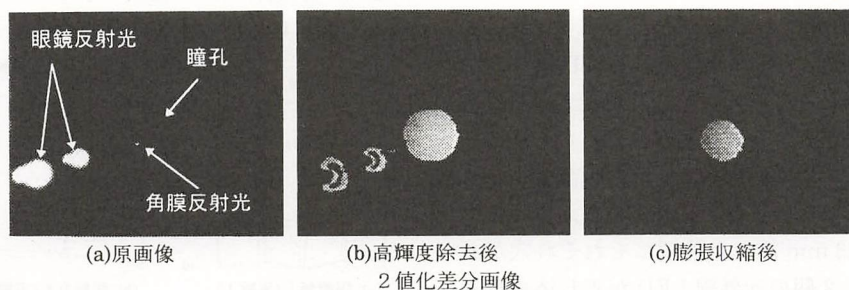


図1 瞳孔検出処理過程

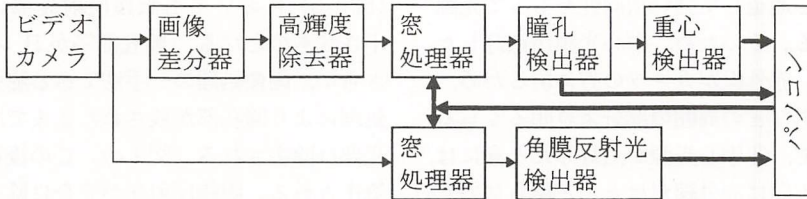


図2 ハードウェア構成

素の x, y 座標のそれぞれの合計と画素数が内蔵の CPU によって算出され、パソコンにおいて重心が算出された。

瞳孔検出器は、2 値化部、ノイズ減衰部（膨張・収縮処理）、端点検出部からなる。2 値化のための閾値は計算機により制御される。膨張と収縮処理のための構造要素の形状は正方形で、そのサイズは可変である。ノイズ減衰部の遅延は $1/30$ 秒で、分解能は各フィールドにつき $512\text{H} \times 256\text{V}$ である。端点検出部は、瞳孔像の左端と右端の x 座標および上端と下端の y 座標を出力し、その 4 端点の座標からパソコンにおいて瞳孔中心座標を算出した。

窓処理器は、CPU とビデオスイッチを用いている。窓の中心座標は実時間で変更することができる。

高輝度除去器は、アナログ比較器とビデオスイッチ等からなる。

(5) 実験方法

近赤外線に感度を持つ小型 CCD カメラが用いられた。ズームレンズ、可視光遮断フィルタなどがカメラに装着された。さらにズームレンズの最前面には、レンズ保護フィルタが装着された。このフィルタには、中心と中心から 23 mm 離れた位置にそれぞれ穴がつけられ、2 個の赤外線 LED が差し込まれ固定された。これら 2 個の LED は、画像差分

器から出力される奇数 / 偶数フィールド信号によって交互に点灯された。5 個 $\times$ 5 個の小さなドットを描いた白板を被験者の顔の前約 60 cm に提示した。被験者には各ドットを順に見ていってもらった。被験者の頭と顎は軽く固定し、右目を撮影した。目とカメラの距離は約 60 cm であった。角膜反射光は奇数フィールドから検出された。

眼鏡を装着しない実験 1 では、ノイズ減衰部と高輝度除去器は使用しなかった。瞳孔中心検出は端点検出器によった。眼鏡を装着した実験 2 での、ノイズ減衰部の膨張と収縮処理で用いられた構造要素の大きさはそれぞれ 6×4 、 13×9 であった。瞳孔中心検出は重心検出器によった。窓処理器は実験 1 と同様に用いた。

3. 結果と考察

図 3 (a)(b) はそれぞれ実験 1（眼鏡無し）と実験 2（眼鏡有り）の結果を示している。これらの図には、白板上に示された各ドットを

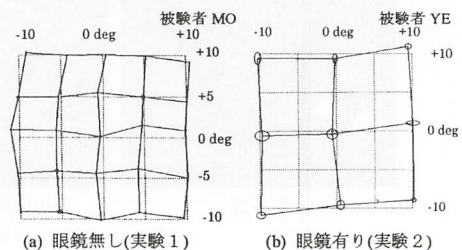


図3 注視点検出結果

被験者が注視したときに推定された注視点データの平均値が図中の実線の交点として、また標準偏差は楕円の長軸と短軸として表現してある。

眼鏡無しの結果(a)は各注視について非常に小さな標準偏差を示している。しかし、平均値はそれぞれの指示した目標から偏心している。このずれは、注視位置そのものがずれているか、または現時点では各装置がアナログビデオ信号で接続されているため、それによる信号の不安定性から生じた可能性が考えられる。眼鏡を装着した場合(b)には、原画像で眼鏡反射光がフレーム内に存在した場合も、瞳孔を検出する画像においては完全に取り除かれたが、歪みや不安定さが眼鏡無しの場合に比べて多く見られた。

[今後の研究の方向、課題]

本研究のように、角膜反射光と瞳孔の位置関係から、視線方向を算出する方法は、基本的には頭の動きを補正する必要がないとされている。しかしながら、メニュー画面を見ながら頭が動かすとカメラから見た視線方向は変化する。そのため、頭の動きは注視点検出には誤差の原因となる。よって、頭の動きを考慮したキャリブレーション法が必要である。

また、高い分解能を得るためには、目を大きく撮影する必要があるが、その場合には頭の動きによって、簡単に目の像がフレームから飛び出し、検出不可能となる。それを解決するためには、何らかの方法で頭の動きを追

尾し目の像を捕らえ続ける機構が必要になるものと考えられる。

[成果の発表、論文等]

- 1) 海老澤嘉伸, “ビデオ式非接触注視点検出法—眼鏡反射光の除去—”, 第33回日本ME学会大会論文集, pp.430 (1994)
- 2) 天野勝之, 磯田潤, 海老澤嘉伸, “2光源と画像差分法による実時間瞳孔検出”, 第33回計測自動制御学会学術講演会論文集, pp.587-589 (1994)
- 3) Y. Ebisawa: “Improved video-based eye-gaze detection method”, Conference Proceedings of 1994 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC/94), 2, pp.963-966, Hamamatsu, May 10-12 (1994)
- 4) Y. Ebisawa, M. Amano: “Examination of eye-gaze detection technique using two light sources and the image difference method”, Proceedings of the 33rd SICE Annual Conference (SICE '94), International Session, pp.985-990 (1994. 7)
- 5) Y. Ebisawa, “Unconstrained pupil detection technique using two light sources and the image difference method”, Proceedings of the Second International Conference on Visualization and Intelligent Design on Engineering and Architecture (VDEA 95), (1995. 6)
- 6) M. Ohtani, Y. Ebisawa, “Eye-gaze detection based on the pupil detection technique using two light sources and the image difference method”, Proceedings of the 17th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (1995. 10 発表予定)

フリーハンド図面の自動認識に関する研究

Study on Automatic Recognition Method of Freehand Drawings

941006

研究代表者 大阪大学基礎工学部システム工学科 助 手 加 藤 博 一

共同研究者 大阪大学基礎工学部システム工学科 教 授 井 口 征 士

〔研究の目的〕

人間の視覚の柔軟で高精度な認識能力を支えるものの1つとして、多くの知識やセンサ情報の中から有効と思われるものを状況に応じて主観的に取捨選択し利用している点がある。計算機上に同様の能力を実現するために、限定された環境、限定された対象に対して有効に機能するアルゴリズムを多数準備することが考えられるが、単に多数の認識アルゴリズムを集めただけでは、柔軟な認識処理は成立しない。多くの情報の中から如何に適切な情報を選択するのかという点への考察も必要である。本研究では、図面理解という課題において、その内部処理であるシンボル認識処理に対して柔軟に機能する認識アルゴリズムの提案を行った。

〔研究の内容、成果〕

1. 注意制御による注意仮説生成

人間の能動的な視覚情報処理機能の1つに「集中的注意」と呼ばれるものがある。これはある特徴や部分に意識を集中するという注意である。この注意の対象は色や形状といった属性に関しての受動的認識処理によって得

られる。集中的注意による認識処理では、意識下において注意の向く対象に対しての知識に基づく適切な認識戦略が採用される。この処理は、記号処理的な側面を多分に持つ、言わば高次のパターン認識処理といえる。

このような意識下で記号処理的に生成された認識戦略に基づきトップダウンに実行される高次の認識処理と無意識下で並列的にボトムアップに実行される低次の認識処理とを融合させた処理機構が、人間の持つ柔軟かつ優秀なパターン認識能力を支えていると思われる。

この人間の注意制御に基づく階層的なパターン認識機構を計算機上で模倣することを考えた。全体の概念図を図1に示す。図面理解システムとしては意味解析部も含めて1つの処理系となるが、本研究はパターン認識部に対して焦点を当てたものである。低次のパターン認識処理から高次のパターン認識処理へと情報の受け渡しをする注意に相当するものとして「注意仮説」という概念を導入する。注意仮説は次のような情報を持つ。

- 1) 注意を向ける対象の属性(種類情報)
- 2) 注意を向ける位置・大きさ(領域情報)

つまり「どこにどんなものがありそうなの

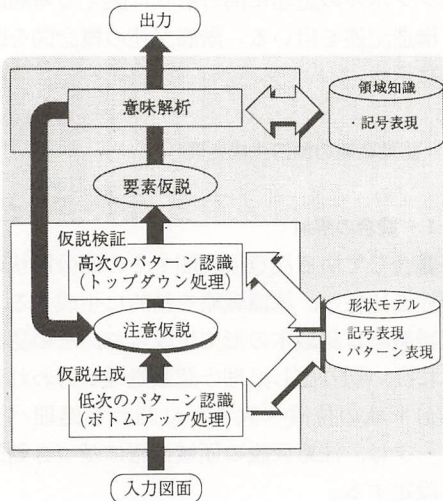


図1 注意制御に基づくパターン認識

か」という情報である。また補助的な情報として、

3) 注意を向けた理由（起因度情報）

を考える。「それらしいものが見えたから」という理由と「隣に～というものがあったから」という理由では意味合いが異なる。前者は画像にパターンとして表れている形状あるいはその他の属性から前向き推論により判断されたものであるが、後者はすでに存在する仮説や領域知識などに基づく知識処理から後ろ向き推論により判断されたものである。このように注意仮説は低次のパターン処理によってのみ生成されるものではない。図2において意味解析から下向きに延びている矢印がこの知識処理による後ろ向き推論に起因する注意仮説の生成を表している。

注意仮説生成の基本アルゴリズムとして、テンプレートマッチングを採用した。図面に描かれたシンボルの形状の変形に対応するために、テンプレートには低解像度のパターンを用い、また評価の閾値も低く設定した。ま

た、位置や大きさの変化に対応するため、入力画像を様々な解像度へと変換し、その解像度変換画像に対して固定した大きさのテンプレートを走査することで対処した。

2. 注意仮説に基づく認識戦略生成

注意仮説に基づいた高次の認識処理では、注意仮説の持つ領域情報とシンボルに関する知識を利用することができる。注意制御機構を用いずに図面全体を入力とし、すべてのシンボルを処理対象とするようなシンボル認識に比べて、処理領域や対象が限定されるため、対象に関する知識・情報を十分に活用でき、より柔軟なシンボル認識処理が可能となる。具体的には次の3点について検討した。

- 1) 認識処理・認識パラメータの最適化
- 2) 競合情報の積極的な利用
- 3) 仮説の起因度の利用

2.1 認識処理・認識パラメータの最適化

高精度な認識処理を行うには認識すべき個々のシンボルに関する特異な特徴を積極的に利用することが望ましい。注意仮説に基づいてシンボル認識を行う場合には、処理領域が注意仮説の示す領域に限定され、認識すべき対象も絞り込まれているため、認識すべきシンボルに関する特異な特徴を積極的に利用した認識処理が可能となる。また、認識処理に利用される特徴抽出アルゴリズムや特徴評価アルゴリズムの多くには、認識対象の種類や大きさによって調整すべきパラメータが存在する。例えば細線化画像を直線近似によりベクトル化する際の誤差評価パラメータなどである。このようなパラメータ設定を注意仮説の大きさ・種類情報を用いて処理中に動的に調整することが可能となる。

2.2 競合する注意仮説情報に基づく認識戦略

図面上の同じ領域上に異なるシンボルに対する複数の注意仮説が生成される場合、これらの注意仮説は互いに競合しているものとみなすことができる。正しく生成された注意仮説は高々1つであり、ときにはすべてが誤って生成された注意仮説である可能性もある。競合情報が判っているためその情報に応じて認識戦略を変えることで、認識精度の向上が期待できる。

2.3 形状起因度に基づく認識戦略

本研究で提案する注意仮説には、注意の向けられた理由を表す起因度情報が形状起因度、意味起因度という2つの値で表現されている。これら起因度の程度に応じて、その存在を裏付ける検証処理の質を変化させてもよいと考えた。例えば、意味起因度が低いほど形状を細部まで詳しく調べる必要があるが、意味起因度が高い場合、大まかな形状の簡単な検証だけでよいと考えた。この効果は、処理の効率化ばかりでなく、細かな形状の検証を省略することでノイズの影響をも無視することにもなりロバスト性の向上が期待できる。

以上のような認識処理体系を導入するため、

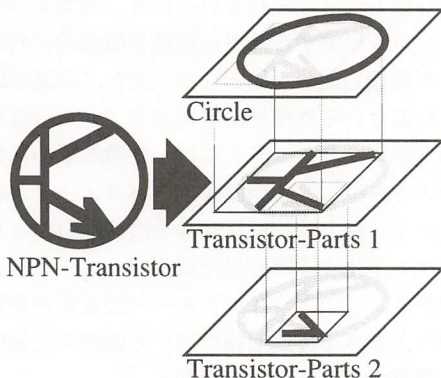


図2 シンボルの階層記述

各シンボルの記述に部分形状に関する階層的な構造記述を用いる。階層記述の概念図を図2に示す。

3. 認識戦略の動的生成処理

3.1 競合の解消

競合している注意仮説間でその部分形状の記述を比較し、認識戦略を動的に生成する。認識戦略は認識木で生成され、その認識木に従い切り出し処理と認識処理が行われる。部分形状の位置・大きさに関わる処理パラメータは、注意仮説の領域情報に基づき動的に設定する。

認識木の生成は次のような手順で行う。まず競合状態にある注意仮説の示すシンボルモデルの形状記述を比較し、形状記述の階層毎に部分形状の種類と位置の重複を調べる。種類と位置が一致する部分形状群を1つの形状グループとし、形状記述の各階層で形状グ

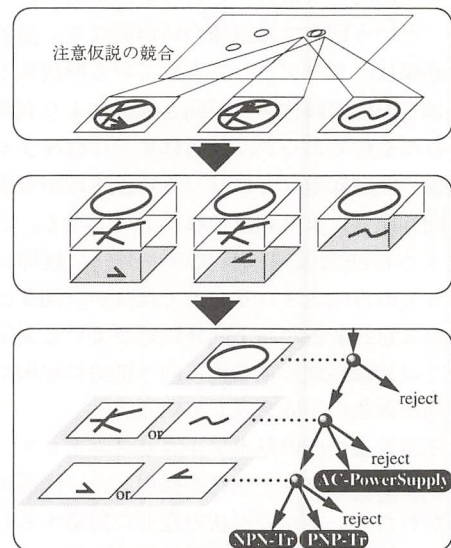


図3 認識木の生成

ループ同士の評価を行う認識処理をノードとする認識木を構築する。形状グループ内の仮説が1つになれば、それ以下の階層の解析は止める。トランジスタなど3つのシンボルが競合した場合の認識木の生成の様子を図3に示す。

3.2 起因度情報に応じた処理

比較的上位の階層で競合が解消されるような場合や、もともと競合を生じていない注意仮説に対して、その仮説を採用すべきか棄却すべきかを決定しなければならない。そこで、注意仮説の持つ2つの起因度情報に基づいて処理を行う。

2つの起因度から、その形状を認識するために必要とされる累計形状寄与率の最小値を算出する。検証済みの全部分形状の形状寄与率を加算した累計形状寄与率が累計形状寄与率の最小値以上になる階層まで、繰り返し評価を行う。

4. 実験

本手法のロバスト性を評価するために、図面としての質の異なる電気回路図面に対してシンボル認識の実験を行った。

ノイズのない図面やスパイク的なノイズの混入した図面に対しては、シンボル形状に多少変動が生じていても非常に安定して認識ができた。構造的な直線状のノイズなどに対しては、誤ったシンボル仮説が生成される場合が多かったが、意味解析処理による棄却が容易なものであった。かすれに対しては比較的影響を受けやすく、部分形状の切り出しミスが特にその原因となった。これは、意味解析処理との繰り返しの認識処理の中で、起因度情報

による認識処理の階層の深さを浅くする操作を行うことにより対処可能と思われる。

[今後の研究の方向, 課題]

人間の認識機構に基づいて、注意仮説を用いた階層的なシンボル認識手法を提案した。部分形状の切り出し処理に弾性モデルを用いることで、処理の汎用化ならびにモデル記述性の向上を図ることができた。前向き推論によるシンボル認識実験から、本手法が図面の質に対してロバスト性を持つことがわかった。

今回の実験では意味解析処理を用いていないが、後ろ向き推論による処理の流れにおいても提案する手法が有効であることを示すために、領域知識を用いた意味解析処理を組み込むことが今後の課題である。

また、認識戦略の生成の基礎となるシンボルの部分構造記述は、現在はモデル作成の段階で人手により与えているが、この部分構造記述の自動生成機構についても興味深い課題であり、今後検討したい。

[成果の発表, 論文等]

- 1) 北村聡, 加藤博一, 井口征士: 注意制御による図面理解, 画像の認識・理解シンポジウム講演論文集 II, 17-24 (1994)
- 2) 熊谷聡子, 加藤博一, 井口征士: 弾性モデルと論理記述を用いたシンボル認識, 電子情報通信学会総合大会, D-583 (1995)
- 3) 北村聡, 加藤博一, 井口征士: 初期仮説に基づく認識戦略の動的生成, 電子情報通信学会総合大会, D-589 (1995)
- 4) 北村聡, 加藤博一, 井口征士: 図面理解におけるシンボル認識戦略の動的生成, 情報処理学会論文誌, 投稿中

設計解候補創出による概念設計支援

A Method of Creating Candidates for Computer Aided Conceptual Design

941007

研究代表者	岡山大学工学部 助 手	川 上 浩 司
共同研究者	岡山大学工学部 教 授	小 西 忠 孝

【研究の目的】

設計の初期段階において、設計要求をみたす基本的な設計構想をまとめる「概念設計プロセス」は、設計者の創造性が特に要求されるプロセスであるため、計算機で自動化するのは極めて困難であり、近年は設計者を支援する良好な環境の構築が注目されている。

本研究は、計算機と人間の協調を指向した概念設計支援法を検討する。この手法では、設計者は、設計活動における様々な評価尺度のなかで重視する視点を計算機に与える。計算機は、過去の設計事例から得られる設計知識を、過去の事例には捉われない形で組合せて自動的に設計解候補を生成し、その中の「与えられた視点における優れた解」を、設計者が最終的な判断をする材料として提示する。

【研究の内容、成果】

1. 概念設計の計算機支援

事例の組換えに基づいた設計プロセスモデルを考えた場合、表層的な構造の変更では編集設計の域を出ず、また目的とする機能の達

成は保証されない。本研究では、「構造を規定する背景である機能構成の変更による設計解候補の生成」ならびに「機能構成から発現する構造に対する検証」のサイクルを概念設計プロセスと捉える。生成-検証サイクルには以下の問題がある。

問題 1. 解候補は、過去の事例から得られた断片的な設計知識の再構成によって生成する。これは統合（合成）型の問題であり、入力事例が多くなると、要求を満たす解が一意に定まらない上に、知識の組合わせ（解候補）数が爆発的に増加してしまい、全てを探索するのが事実上不可能になる。

問題 2. 設計の評価については、たとえば回路設計などのように、処理の内容を明確なアルゴリズムとして記述しやすい問題に対しては実用的な段階に至っている。しかし、機械設計などのように形式的な処理法の確立されていない問題に対しては、ほとんど実現されていない。

問題 1 に対しては、組合せ最適化手法の導入が有効であると考えられる。しかし、それらの多くは、数値処理可能な形での問題のモデル化と、連続な評価関数の存在を前提とする。これに対し、本研究で対象としている設

計物の分野では、連続関数の形で定式化できる評価尺度は狭く限られている。また、問題2については、定性推論を導入するなど、一般に複雑な情報処理が要求される。

本研究では、上記の問題点を解決または緩和するために、離散的最適化問題に好適であることが知られている遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を導入する。すなわち、このサイクルを「遺伝子の組換えによる次世代の生成」ならびに「遺伝子から発現する個体に対する自然環境による淘汰」をモデル化したアルゴリズムによって計算機上に実現する。

最終的な判断をする設計者に対して設計候補を提示させる形で計算機を利用するという立場から見ると、最適解を一つだけ提案するのではなく、「要求を満たすことのできる解の中で優れたもの」、すなわち満足解を複数個を生成するほうが望ましい。GAはこの要求も満たす。

2. 機能系統図による設計物モデルと設計解生成プロセスモデル

設計解候補を自動的に生成するために、まず、設計対象を計算機上に記述できる形でモデル化する。

本研究では、物理因果関係の連鎖を根拠とした物理設計物表現を採用する。物理因果関係には、その成立の構造的条件が付与されており、また、機能構成によってその連鎖が規定される。機能構成とは、Fig. 1に示すように、基本機能を頂点として、それを実現するための部分機能群が目的—手段の関係で整理されたツリー (木構造) で表されるものであり、いわゆる価値工学における機能系統図 (Functional Diagram: FD) と捉えることができる。

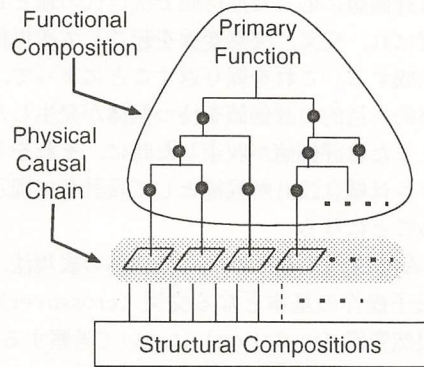


Fig. 1 Hierarchical model for designed objects

この設計物表現を用いると、設計解候補の生成は「目標とする機能を達成することのできる構造属性記述群の探索プロセス」として定式化することができる。これは、FDを目的機能から末端の構造属性表現に向かって組み立てていくことに相当する。

FD中の物理因果関係知識は連鎖しており、「設計物はどうのような物理量変換の連鎖で機能を実現しているか」を示している。この鎖を「物理因果連鎖」と呼び、設計物が目的とする機能を果たすことの根拠になる、深い知識の一つである。

また、FDは「一つの目的とそれに対する十分条件としての手段の連言」を単位とした部分木から構成される。これらは複数ある選択枝の一つでしかなく、この選択で得られたFDは、その木構造の根にある機能を達成するための解候補の一つを表しているに過ぎない。知識の選び方を変えれば、他のさまざまな解候補を生成することが可能である。

3. 設計解生成過程へのGAの導入

GAを設計解候補の生成に導入した場合、一つの世代に多数のFDが存在し、それ

らは評価値に応じた期待値で次世代の親として選ばれ、交叉、突然変異を起こして次世代を生成する。これを繰り返すことによって、最終的に目的の評価値を持つ個体が発生した時、または評価値が収束した時に、それをシステムは概念設計候補として設計者に提示することになる。

GAを導入するために、染色体の表現法、遺伝子操作の基本となる交叉(crossover)と突然変異(mutation)について考察する。

染色体は非常に簡単なデータ構造をしているにもかかわらず、個体の性質を規定する深層情報である。上述の設計物モデルにおいては、設計解の表層的な構造を規定する深層情報は、機能系統図の内、物理因果連鎖より上の機能構成を示す部分である。

(1) **染色体の表現法** 上述のFDは木構造をしており、これを標準的な交叉や突然変異を施すことのできる一次元の配列に変換するのは非常に困難である。そこで、木構造(機能系統図)をそのまま染色体として採用し、この木構造上で遺伝子操作を行なう。また、評価の対象となる表現型は、物理因果連鎖ならびに構造属性記述群とする。

(2) **染色体の交叉** 染色体とするFDは、木構造である。木構造などのグラフ構造へのGAの拡張は盛んに試みられており、その有効性も示されている。本研究で用いる交叉法は、それらとほぼ同じであり、部分木の取り替えによって行なう。この操作は、設計物の機能構成を変更することに相当する。「交叉可能な部分木の判断」ならびに「交叉後の変数の単一化」は、prologを用いて容易に実現することができる。

(3) **突然変異** 突然変異についても、ある一箇所をランダムな数値や文字で置き換えるという標準的な方法を用いると、高い確率で

致死遺伝子が発生する。そこで、全く初めからランダムに知識を組み合わせた木を生成することによって、突然変異を実現する。

4. 設計物の評価

FDの交叉に伴って、それから発現する物理因果連鎖(ならびに個々の物理因果関係の構造的制約条件の集合)が変更される。その結果としての構造物は、物理的に実現できることは物理因果連鎖によって保証されるが、組換える前よりも“良い”保証はない。

設計物の評価に関しては、主に定性推論の分野で研究されている。しかしこれらの手法は、一般に複雑な対象表現と複雑な処理が要求される。また、設計物の評価尺度は、「目的とする挙動をするか否か」だけではない。実際の設計活動には、コスト・信頼性・使用状態など、具体的状況に依存する諸々の要因が関連しており、これらの全ての尺度から評価することは非常に困難である。

本研究では、上述の階層型設計物モデルを用いた場合に比較的容易に評価を行なうことができる尺度として、「物理因果関係の追跡による評価」と「設計公理論に基づく評価」を提案する。GAの枠組を導入することによって、これらの評価プロセスはモジュール化することができるため、上記以外の側面に着目した評価尺度の導入が容易になる。全体の評価は、様々な尺度からの評価値を組み合わせることによって得られるが、このときの個々の評価尺度の重要度は、設計者自身が設計要求に照らし合わせながら、全体を見通して決定することになる。

4.1 物理因果関係の追跡による評価

物理因果連鎖は、注目している設計候補が、どのような物理量変換の連鎖によって目

的とする機能を実現するものであるかを記述したものである。そこで、物理因果連鎖を形成している個々の物理因果関係に注目し、そこに生じている物理量の矛盾や無駄を確認することで設計物を評価する。

(1) 矛盾 (contradiction) Fig. 2 に、水温測定システムの物理因果連鎖の一部を示す。この図の上段では、“p-c-r”という記号で示す3つの物理因果関係が連鎖を形成している。

この因果連鎖の前半では、低い水温から得られる熱で爆発を起こそうとしている。このような矛盾する連鎖に対してマイナス点を与える。

(2) 無駄 (vain) Fig. 2 の後半において、構造体2の爆発力が得られたとしても、構造体3が必要とする電氣的エネルギー量が少量で良い場合、爆発力を無駄にすることになる。このような連鎖に対してマイナス点を与える。

4.2 設計公理論に基づく評価

一般に良い設計をするために従うべき基本的な立場として、Suh らは二つの公理を提案した。その中の公理2は、設計物に含まれる情報は少ない方が良いことを述べている。これは、対象設計物が用いている物理因果関係や構造の数を最小化するほうがよいと解釈できる。以下に、この視点から評価を行なう

方法を述べる。

(1) 物理因果連鎖に適用した場合 本研究では、同じ機能を果たすならば、連鎖を形成している物理因果関係の数が少ないほど高得点を与える。

(2) 構造属性集合に適用した場合 一つの物理因果関係の成立に多くの構造属性が要求される場合、物理因果連鎖は短くても構造が複雑になる。このように、連鎖する物理因果関係の数は、その連鎖を実現するための構造の複雑さの評価尺度にはならない。そこで、公理2を構造属性に適用することによって、構造的に洗練された設計物に対する評価尺度を考えることができる。

公理2を構造に適用する場合、まず、物理的な「部品の数」の最小化が考えられるが、この方法は、製造コスト、フォールトトレランス性などを考えると一長一短があり、本質的な評価方法とはいえない。そこで、個々の部品に注目するのではなく、その構造物全体で要求される構造属性(集合)の数が少ないものを良いとする評価基準を用いる。構造属性集合は、物理因果連鎖を達成するのに必要な構造上の性質の集合であり、機能系統図の構造属性空間に属するものである。

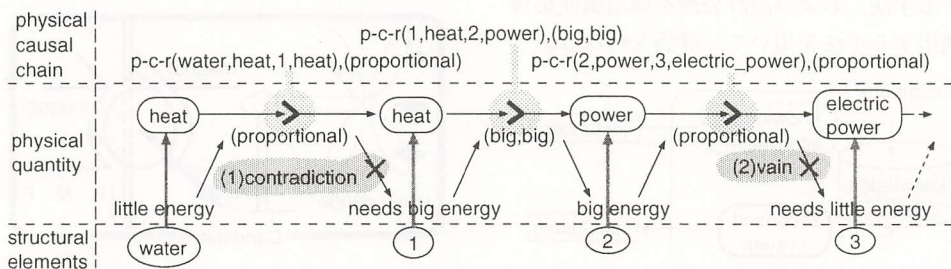


Fig. 2 Evaluation based on pursuing a physical causal chain

5. GA を応用したシステムの実現

5.1 試作システムの概要

上述のアルゴリズムをワークステーション上に実現し、実験を行なった。

Fig. 3 は、本研究の目指す概念設計支援システムの概要である。このシステムの前半部で実在する設計物からその設計に含まれる知識を知識ベースに取り込む。本稿で提案するシステムは、この知識ベースを用いて新規設計物を設計者に提示するための推論エンジンである。

試作システムは、1. 設計領域知識データベース、2. 機能系統図生成モジュール、3. 交叉モジュール、4. 評価モジュールからなる。本システムでは、上記1. を述語形式で記述し、2, 3, 4 を prolog を用いて作成した。GA のメインルーチンの部分はC言語で作成し、モジュール間の通信に UNIX プロセス間通信を用いている。

5.2 試作システムへの入力

まず、Fig. 4 の上段に示す4つの設計物から、EBL（説明に基づく学習）手法を応用した設計知識獲得システムを用いて知識を獲得し、知識ベースを構築する。次に、提案するシステムに「流速計を設計せよ」という入力を与える。ここでは、物理因果関係を追跡する手法、および設計公理を構造属性集合に適用する手法を用いて、評価を行なう。

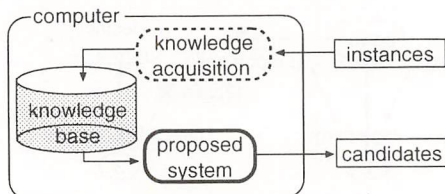


Fig. 3 Overview of proposed system

具体的に何点を与えるかはシステムを利用する設計者によって決定される。たとえば、“矛盾”を特に排除したければ、矛盾に対する（他の評価尺度に対する）相対的なマイナス点を高く設定すればよい。また、他の視点からの評価法を導入することもできる。

5.3 試作システムの実験結果と考察

本システムは複数の解候補を提示することを一つの特徴としており、出力される解候補はいずれも高得点を得たものである。ただし、それらは知識ベースを構築するために用いた設計物の再現事例が多く、既存の設計の優秀さを裏付ける結果となった。

入力事例には存在しない設計を行なった例を Fig. 4 下段に示す。左の設計物は、まず

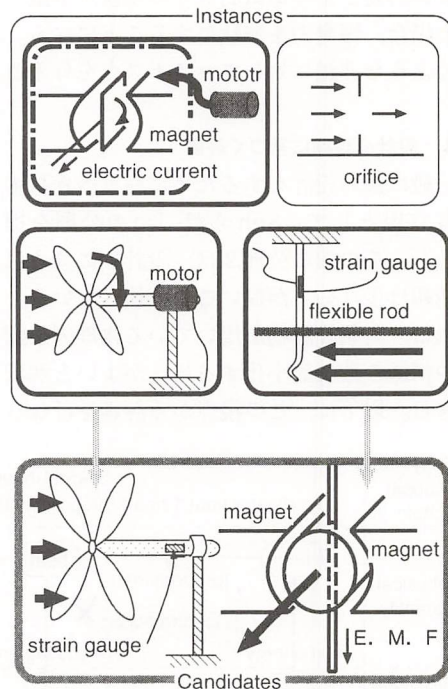


Fig. 4 Graphical image of instances and example outputs

風速計と同じような羽を持った構造で力を取り込み、その芯棒の一端を固定することで表面ひずみを発生させ、そのひずみをひずみゲージに伝達して電気抵抗変化を発生させる、という仕組みであり、入力事例とは異なる機能構成を提示している。

また、Fig. 4 右下に示す解は、モータの構造を展開して得られた知識を用いている。まず、流体の流れに対して垂直方向に磁界をかけ、この流体内に導線を入れる。導線は流体の動圧によって力を受けて運動すると、磁界中に存在するためにフレミングの法則に従って起電力 (E. M. F) を発生する。この起電力の電圧を測定することで流速を測ることが可能となる。これは、一般に知られている電磁流速計に類似の構造であるが、やはり入力事例の中には存在しない。

このように本手法では、表層的な構造の変更だけでは実現できない設計を、構造を規定する深層情報である設計物の機能構成を組み合わせることで実現している。

比較実験として、全ての知識の組合せを順番に試行するプロセスを実行させた。

Fig. 4 の上段に示す 4 つの設計物から得られる設計知識は、機能を展開するための知識が延べ 15 個、物理因果関係が延べ 38 個である。これらの知識を用いて生成される解は 43,473 個となる。これらを全て生成するのに要した時間は、44.2 SPFCint '92 のワークステーションで約 210 分であった。実用的なシステムにはさらに多くの知識を準備することが必至である。しかし、知識を増やすことによって、その組合せ、すなわち実行時間は爆発的に増大する。また、これらの解を全て評価し、その中から優秀なものを発見するのはさらに時間のかかるものと予想される。

これに対して、本研究で提案する方法では、

実行に費やした時間は 3 分 37 秒であった。このときに出力された複数個の設計解は、すべて相対的に見て得点が高く、入力事例として選んだ既存の設計の得点に近いものである。つまり、実験に用いた評価尺度の下で既存の設計物とほぼ同等に評価される新規な解が得られた。また、この方法で知識の数を増やしても、時間の増大は初期遺伝子プールの生成に関する部分がほとんどであり、その後のプロセスに対する影響は少ない。つまり、実行時間の増大を抑えることが期待できる。

また、本稿で行なった実験では、流速計を設計するのに流速計以外の設計（モータなど）から得た知識も用いて新規解を創出している。つまり、異なる領域の設計物から知識を得ることで全く別種の機能同士を組み合わせることができ、さらに多種多様の設計解を得ることができる。

[今後の研究の方向、課題]

提案手法は、「基本となる自然法則の無数にある組合せの中で、ある特定の成功する組合せを得る方法がすなわち概念設計である」という定義に従えば、概念設計の全般に渡って適用できる、汎用性のあるアルゴリズムであるといえる。しかし、さらに実用的なものとするには、あらゆる機能や法則の計算機上への表現、より多角的かつ本質的な評価尺度の導入が必要である。

また、物理因果連鎖の追跡による評価値が、特定の数パターンしか現れなかった。これは実験に用いた物理因果法則の記述が単純であり、得点のパターンが限られてくるためであると考えられ、今後の課題である。

【成果の発表、論文等】

- 1) 概念設計解候補創出のモデル：池本文典，川上浩司，小西忠孝，第32回計測自動制御学会学術講演会予稿集，pp.591-592 (1993).
- 2) GAに基づく概念設計解候補創出プロセスモデル：川上浩司他，計測自動制御学会第20回知能シ

ステムシンポジウム等合同シンポジウム予稿集，pp.245-246 (1994).

- 3) 概念設計における解候補創出プロセスモデル：池本文典，川上浩司，小西忠孝，計測自動制御学会論文集（投稿中）

1 Bit phase-only synthesis を利用した 対称点・対称軸の高速検出法

Symmetrical point and axis determination method
using 1Bit phase-only synthesis

941010

研究代表者

九州工業大学工学部 助教授

近 藤 浩

〔研究の目的〕

近年，高度に進んだロボット工法等ではより高速かつ正確に物体の対称点や対称軸を検出する必要が高まっている。本研究はフーリエ変換における phase-only synthesis において位相を 1 Bit に量子化したものから原点対称の線画が得られる性質を利用して，real time に対称点や対称軸を検出するアルゴリズムを確立することを目的とする。

〔研究の内容，成果〕

対称点検出

図 1 に対称点検出のフローチャートを示す。図 1 において画像の読み込みは CCD カメラを用いて対象を 256×256 画素のモノクローム（256 階調）として計算機にとり込む。この場合，基本は 256×256 画素であるが必要に応じて 512×512 または 1024×1024 も可能としている。取り込まれた画像を左上 4 分の 1 分割とするような 2 倍のサイズをもつ画像（図 2）を構成する。こうして取り込まれた画像は skip scanning により 1 行おきに 256 行目まで 1 次元フーリエ変換を行う。そ

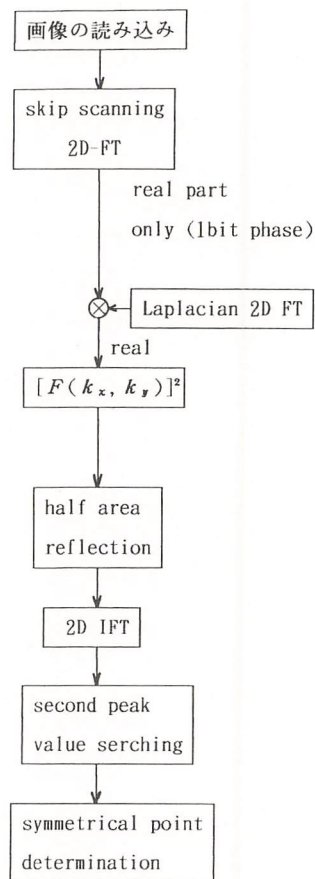


図 1 対称点決定法のフローチャート

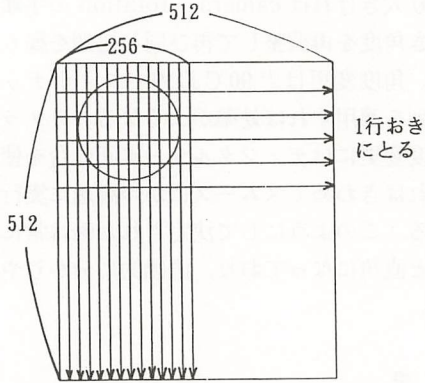


図2 Skip scanning 2D-FT

の結果を垂直方向に1列目から256列目まで1次元フーリエ変換を行い、2次元フーリエ変換を完了する。このskip scanningによりフーリエ変換に要する時間を半減できかつ検出精度は不変のままとできる。

次に、パターンマッチングの計算を簡単化するためラプラシアン処理を行い、画像のエッジ部からなる線画像を構成する。ラプラシアン処理はフーリエ領域の実部のみの掛け算でよく、ラプラシアンの2次元フーリエ変換も前以ってメモリーに蓄えておけば計算時間は短くてすむ。なお、フーリエ領域の掛け算は左半平面のみでよい。

パターンマッチングのための相関にはWiener-Khinchineの定理よりパワースペクトルの逆フーリエ変換を利用する。そのため上述の左半平面について2乗をとり、原点对称に折り返して右半平面を構成する。これら一連のフーリエ領域における処理はすべてreal partのみでよく、Imaginary partは捨て去られる。従ってフーリエ位相は+または-の符号のみ、すなわち1 Bit 位相となる。

構成された2乗平面の2次元逆フーリエ変換を行う。この処理も上半平面をまず変換し、原点对称に下半平面へ折り返す。その結果を

左平面だけ変換し、右半平面は再び折り返せば十分である。以上までの処理で原点对称画像の自己相関が得られているのでその第2ピーク値（第1ピークは原点）を探し、原点からの距離を求める。目的とする原画像の対称点座標はピーク値の位置座標より正確に決定される。

以上の一連の処理は数秒の間で行われ、リアルタイムで対称点の位置決定が可能である。

対称軸検出

図3に対称軸決定法のフローチャートを示

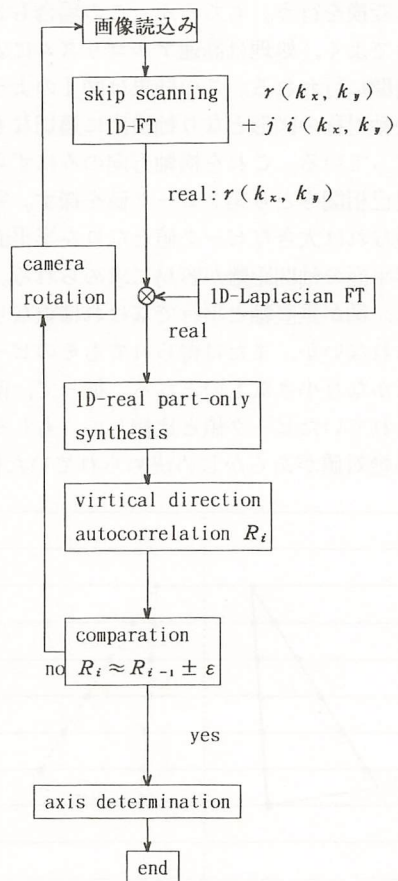


図3 対称軸決定法のフローチャート

す。画像読み込みは対称点検出の方法と同じである。ただし、skip scanning は対称点検出の場合と異なり 3 行おきにスキャンして横方向にのみ 1 次元フーリエ変換を行う。縦方向にはフーリエ変換を行わない。軸検出法では 1 次元フーリエ変換の 1 Bit phase-only synthesis の性質を使用するため、2 次元フーリエ変換の必要はない。線画を得るためのラプラシアン処理も 1 次元フーリエ変換でよく、あらかじめメモリにストアしておく。フーリエ領域では実部のみの積を求め、虚数部は捨て去る。次に、これらの 1 次元逆フーリエ変換を行う。もちろん、この場合も 3 行おきでよく、処理は高速アルゴリズムにより短時間に行われる。この結果は図 4 のような中央軸対称の図形となり軸検出に適切なものとなっている。これを横軸方向のみにずらした自己相関をとり第 2 ピーク値を探す。完全に重なれば大きなピーク値となり左半平面と右半平面の軸間距離が容易に求められる。しかし、軸が垂直軸と平行でなければ重なりは得られないか、または得られてもそのピーク値はかなり小さなものとなる。従って、前に得られていたピーク値と比較して、もしその差の絶対値があらかじめ決められていた値 ε

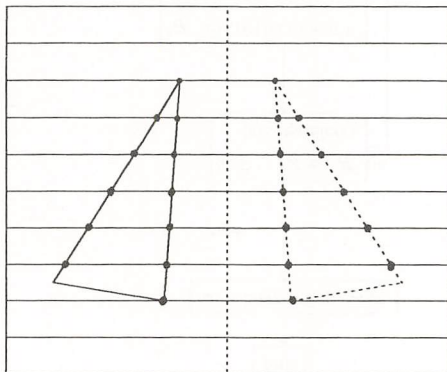


図 4 Skip scanning 1D-DFT

より大きければ camera rotation の手順にいき角度を再調整して再び同じ処理を繰り返す。角度変更は $\pm 90^\circ$ 以内でフィボナッチ数列を適用すれば効率がよくなる。カメラの角度変更にはデジタルサーボ回転台を使用すればきわめてスムーズにかつ高速に実行できる。このようにして決定された軸は常に横軸と直角になっており、直感的に分かりやすい。

成 果

本手法の特徴はフーリエ変換を使用した精度の高い位置決定が出来るにもかかわらず real time で実行可能であること、さらにコンピュータに取り込まれた画像が光の反射や散乱によりかなり歪んでいてもこうした劣化にほとんどの場合影響をされず、位置や対称軸を正確に決定できることである。

従来、画像のモーメントを利用した重心、主軸の決定法では特に劣化画像に対して不正確な結果となりがちで、この点が大きな欠点となっていた。本手法はこの欠点を大きく改善したものである。

図 5～図 7 は実際のボルトや対象物の写真で本手法の処理に使用した画像である。これらはすべて 2～3 秒で処理可能であった。図 5 は通常の六角ボルト、図 6 は円形のナット穴であるが、外部の文字（アルファベット）が邪魔して従来法では中心点の位置が大きくずれてしまった。図 7 は意図的に部分をかくし劣化させた画像で、本手法では劣化のない場合と全く同じ正確な位置決定が同じ時間でなされた。もちろん、この種の劣化を受けた画像に対しては従来法はまったく適用できない。なお、図 5 に対しては対称軸検出も行っており、5 秒程度の処理時間であった。

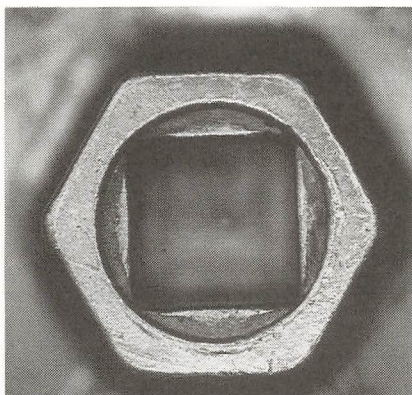


図5 六角ボルト (256 × 256 画素)

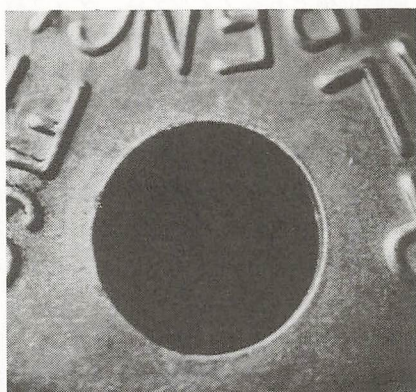


図6 ナット穴 (文字が検出の妨害となる)

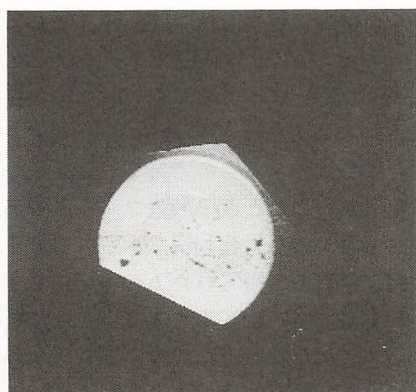


図7 ボルト形状 (大きな劣化を含む)

[今後の研究の方向, 課題]

処理時間の更なる短縮は未だその可能性が残されており, skip scanning における間引きの方法や real part Fourier synthesis 等, 考察の余地が残されている。本手法はこれらの間引きによって精度が劣化しないことも一つの特徴であり, 例えば 512×512 画素以上の画像を取込む必要がある場合は 4 行おき或いは 5 行おきの skip scanning も可能であろう。これらについては後日検討するつもりである。また, 主軸検出問題では繰返し法にフィボナッチ数列を用いるが, この方法では繰返し回数が平均 6 ~ 8 回と若干多い。繰返し回数的大幅な減少のため, 現在, 新しい手法を考察中である。この手法の基本的考え方は, 2つのライン (横軸) 上で中点を求め, その中点を連結して一次直線を得, その直線の傾きから次の回転角を決定しようとするものである。この方法によると平均繰返し回数は 3 ~ 4 回程度となり, (シンプルな形状の画像に対しては 2 回程度) また計算回数も大幅な削減が可能で理想的である。現在, 種々のパターン画像に対して検討中で, その実用性を詳細に吟味している。

画像の対称点・対称軸決定問題では精度及び処理時間が最も重要項目であり, ハードウェアの進歩とともにこうしたソフトウェアの開発も将来にわたって重要視され続けるであろう。

[成果の発表, 論文など]

- 1) S. Tutumi and H. Kondo: "New detection method for symmetrical point and axis using 1 bit phase", Proce. 9th Digital Signal Processing Symposium, pp. 217 - 222, 1994.
- 2) 堤修士, 近藤浩: "1 bit phase-Laplacian を利用した対称軸, 対称点の高速決定法", 電気関係学会九州支部連合大会, No. 1003, 1994.
- 3) H. Kondo, S. Tutumi and S. Mikuriya: "One Simple Approach for Radial Symmetrical Point Detection", IEICE Trans. on Information and systems, 1995 (投稿中).

新しいサブバンド方式による超高精細画像情報圧縮の研究

Studies on New Subband Schemes for Data Compression of Super High-Definition Images

941011

研究代表者

名古屋大学工学部 教授

谷 本 正 幸

【研究の目的】

超高精細画像通信の実現に不可欠な画像情報圧縮方式について研究した。現行テレビの圧縮方式として広く用いられている DCT (離散コサイン変換) 方式は、高圧縮において再生画像にブロック状の歪み (ブロック歪み) を発生する。このため超高精細圧縮画像においては、ブロック歪みを発生せず高圧縮が実現できる新しい情報圧縮方式が強く望まれている。本研究では、ブロック歪みを生じないサブバンド方式が超高精細画像の符号化方式として最適であると考え、その圧縮性能の最大限界及び実現方法を探究する。圧縮性能を表す符号化利得と分析・合成フィルタ特性の関係を検討し、符号化利得を最大とする新しいサブバンド方式を見出す。

【研究の内容、成果】

画像においては位相歪は大きな画質劣化をもたらす。このため、サブバンド画像符号化では分析・合成フィルタが線形位相であることが極めて重要である。一方、高い符号化利得を得るためには、各フィルタが直交フィルタであることが必要である。しかし、サブバ

ンドのチャンネル数 N が 2 の場合には、直交かつ線形位相であるフィルタは、タップ数 L が 2 よりも大きいとき有意なものは存在しないことが知られている。そこで、本研究では $N > 2$ の多チャンネルサブバンド方式に着目し、まず直交性と線形位相の二つの条件を満たすサブバンドフィルタの一般解を求めた。次に、この一般解をもとにして、従来よりも高い符号化利得を持つ新しいサブバンドフィルタを見出した。

本研究で得られた $L=N$, $L=2N$, $L=4N$ の解から、色々な相関係数 ρ について符号化利得を最大とする最適フィルタとそのときの符号化利得を求めた。 $L=2N$ の最適フィルタは高い利得を持つフィルタとして知られている LOT とほぼ同じフィルタとなることが確認された。図 1 は $N=4$ の時の DCT, LOT, $L=4N$ の最適フィルタの符号化利得を比較したものである。比較のため、 L を無限大としたときの最適フィルタである理想フィルタの符号化利得も示されている。この図よりここで得られた $L=4N$ のフィルタの符号化利得は DCT や LOT をしのぎ理想フィルタにかなり近づいていることがわかる。 $N=8, 16$ の時も $N=4$ と同様な結果が得られた。

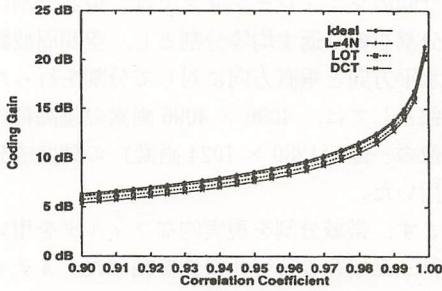


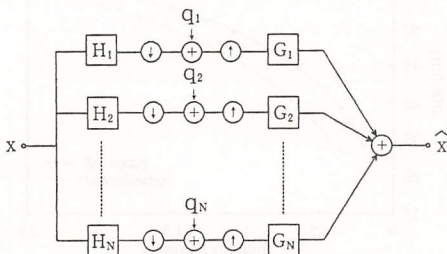
図1 直交線形位相最適フィルタの符号化利得

次にサブバンドフィルタに対する制約条件を取り除き、サブバンド方式の符号化利得の最大限界を探究した。図2に示す N 個のチャンネルを持つサブバンド方式において、 $H_1, H_2, \dots, H_N$ を分析フィルタ、 $G_1, G_2, \dots, G_N$ を合成フィルタとする。画像信号の振幅スペクトルを $X(\omega)$ とし、各チャンネルの信号の量子化雑音 q_j の電力スペクトルが白色であると仮定すると、符号化利得 G は

$$G = \frac{\pi}{N^2} \int_0^\pi |X(\omega)|^2 d\omega \cdot \prod_{j=1}^N \left\{ \int_0^\pi |H_j(\omega)|^2 |X(\omega)|^2 d\omega \cdot \int_0^\pi |G_j(\omega)|^2 d\omega \right\}^{\frac{1}{N}}$$

となる。

$X(\omega)$ が与えられたとき、上式の G を最大とする $H_j(\omega)$ と $G_j(\omega)$ を求めた。その結果、 $H_j(\omega)$ 、 $G_j(\omega)$ はいずれも $X(\omega)$ か

図2 N チャンネルサブバンド方式

ら定まるフィルタと理想帯域分割フィルタの縦続接続となることが示された。すなわち、

図3に示すように、分析側で $|X|^{-\frac{1}{2}}$ の特性を持つフィルタによって画像信号の高周波成分の強調（エンファシス）を行った後、理想フィルタ P_j による帯域分割を行い、合成側で各チャンネルにおいて符号器側と同じ帯域分割を行う理想フィルタ Q_j を通した後、エンファシスの逆特性を持つフィルタによってディエンファシスを行うとき、最大の符号化利得が実現できることが明らかになった。一般に画像信号は低域にそのエネルギーが片寄って分布しているため、 $|X|^{-\frac{1}{2}}$ は高域成分を強調することになる。

自己相関関数が負の指数分布で与えられる1次元の画像信号について、色々なサブバンドフィルタに対する符号化利得 G を計算した。まず、エンファシスを行わない場合の、符号化利得 G とチャンネル数 N の関係を求めた。フィルタとしては16次及び32次のQMF、SSKF（5及び3タップ）、理想フィルタ、DCTフィルタ、LOTフィルタを用いた。その結果、 $N > 2$ では理想フィルタが高い符号化利得を示すが、 $N = 2$ の場合には非直交のSSKFの方が符号化利得が高いこと、シャ断特性の急しゅんなQMFは理想フィルタとほぼ同じ特性を示すこと、DCTフィルタは直交フィルタであるにもかかわらず、シャ断特性が急しゅんでないため他のフィル

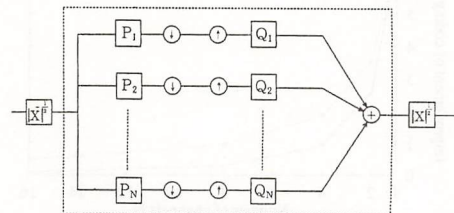


図3 最適サブバンド方式

タよりも G が低いこと等が明らかになった。

次に、エンファシスを行った場合の符号化利得を求めた。解析結果の通り、 P_j 、 Q_j が理想フィルタのとき G が最大となった。 P_j 、 Q_j として理想フィルタを用いる場合と QMF を用いる場合との差は非常に小さい。最適バンドフィルタを用いれば、エンファシスを行わない通常の DCT に比べて、 $N=8$ の場合でも符号化利得が 1.7 dB 向上する。

エンファシスによる符号化利得の改善効果を図 4 に示す。改善効果は N が小さい所で著しく、 N が大きくなると減少する。これは、帯域分割された各々のチャンネル内で信号の振幅スペクトルが一樣でないときに、エンファシスによる改善効果が生じるからである。DCT ではエンファシスによる符号化利得の改善効果が大きい。また、 $N=2$ のとき SSKF の符号化利得が高かったのは、これがエンファシスに似た特性を持つためである。

最適サブバンド方式は理想フィルタによる帯域分割を行うので、実際には実現が困難である。また、以上の検討では 1 次元画像信号モデルを用いて符号化の性能評価を行った。そこで、次に最適サブバンドフィルタを現実的なフィルタを用いて近似的に構成することを検討し、さらに実画像について符号化シミュレーションを行った。

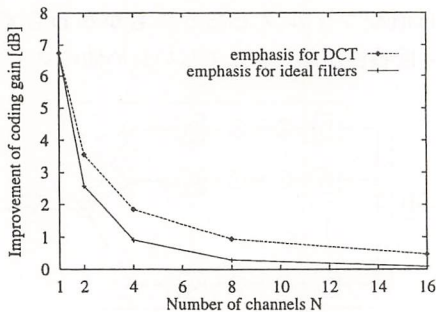


図 4 エンファシスによる符号化利得の改善効果

今回のシミュレーションでは、帯域分割は 2 分割を繰り返す均等分割とし、空間周波数の水平方向と垂直方向に対して分割を行った。画像としては、 4096×4096 画素の超高精細画像の一部 (1280×1024 画素) の輝度成分を用いた。

まず、帯域分割を現実的なフィルタを用いて行った場合の符号化特性を調べた。4 チャンネル (2×2) 分割時において、エンファシス後に、理想フィルタ及び QMF, CQF, ウェーブレットフィルタ (いずれも 16 タップ) によって帯域分割を行う場合の再生画像の SN 比とエントロピーの関係を求めた。その結果、エンファシスと QMF 等を組み合わせた構成でも最適サブバンド方式に非常に近い特性が得られることがわかった。

次にエンファシスの有無による符号化特性の違いを図 5 に示す。16 タップ QMF を用いた 16 チャンネル (4×4) 分割時において、エンファシスを用いる場合には、エンファシスのない場合に比べて 1 bit/pel 付近で SN 比が 4 dB 程度向上した。低レートでの再生画像の劣化の様子は両者で異なり、エンファシスのない場合にはエッジの周りの劣化が目立った。エンファシスがある場合には、平坦な部分に若干歪が目立ちやすい部分が見られたが、エッジ部分の再現性が格段に向上した。

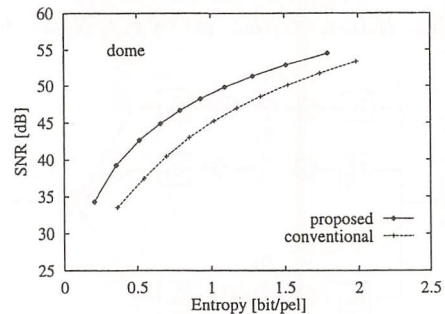


図 5 再生画像の SN 比とエントロピーの関係

最適サブバンド方式のエンファシスおよびディエンファシス特性は画像信号の振幅スペクトルによって決まるものであるが、画像信号の電カスペクトルが指数関数的な自己相関関数を持つ2次元可分性モデルに従うと仮定し、近似的にエンファシス特性を決定した場合についても、符号化シミュレーションを行った。その結果、モデルによって定めた近似的なエンファシス特性を用いた場合のSN比の改善度は、画像信号の振幅スペクトルに正しく整合するエンファシス特性を用いた場合より小さいが、エンファシスによるSN比の改善効果が十分認められた。

以上より、エンファシスを用いる最適サブバンド方式が、SN比の向上とエッジ部の再現性の改善に効果的であり、実現性も高い方式であることが示された。また、エンファシスによる符号化利得の改善効果は、画素間の相関が大きい画像ほど大きく、提案方式はハイビジョンや超高精細画像の情報圧縮に特に適している。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では超高精細静止画像の情報圧縮について検討した。今後、超高精細画像においても動画像の利用が必要となってくると考え

られる。そのため、本研究の成果を動画像の情報圧縮に適用することが次の課題である。また、本研究の成果はJPEG, MPEGなど国際標準化方式の高性能化にも利用できるもので、その実証研究も重要である。

[成果の発表、論文等]

- 1) 南, 木本, 谷本: “符号化利得の高い直交線形位相サブバンドフィルタ”, 電子情報通信学会秋季大会, D-166, p.172 (Sept. 1994).
- 2) 若槻, 木本, 谷本: “エンファシスによる変換符号化方式の性能改善”, 電気関係学会東海支部連合大会, 789, p.395 (Oct. 1994).
- 3) 南, 木本, 谷本: “直交・線形位相サブバンドフィルタ”, 画像符号化シンポジウム, 9-12, pp.187-188 (Oct. 1994).
- 4) 南, 木本, 谷本: “最大符号化利得をもつ直交線形位相サブバンドフィルタ”, 電子情報通信学会, 通信方式研究会, CS 94-134, pp. 51-57 (Oct. 1994).
- 5) M. Tanimoto, H. Minami, T. Kimoto: “Orthogonal and Linear-Phase Subband Filters”, International Workshop on HDTV (Oct. 1994).
- 6) M. Tanimoto, H. Minami, T. Kimoto: “Maximization of Coding Gain of Orthogonal and Linear-Phase Subband Filters”, International Symp. on Information Theory and Its Applications, Vol. 2, pp. 697-702 (Nov. 1994).

体内時計ホルモン用センサーの開発と応用

Development and Application of the Sensor Electrode for the Time-Keeping Hormone

941012

研究代表者	西東京科学大学理工学部 バイオサイエンス学科 教授	田 畑 満 生
共同研究者	東京大学農学部水産学科 教授	会 田 勝 美
	岡山大学工学部 生体機能応用工学科 助教授	篠 原 寛 明
	聖マリアンナ医科大学医学部 第一解剖学 助手	飯 郷 雅 之

[研究の目的]

人間を含むすべての生物は生物時計を有し、その時刻情報は生体機能の24時間のリズムを作っている。現在、生物時計の計測は時計の針の役割を果たすホルモンであるメラトニンの分泌動態などから間接的に推定されている。そこで生物リズムのリアルタイム解析を進めるために、生体において分泌されるメラトニンのリアルタイム連続計測が求められるようになってきた。さらに最近では、強制的に時差勤務を強いられる人々の健康管理や畜産動物の生殖、繁殖管理などへの応用からもメラトニンの分泌動態の簡便計測の実現が望まれるようになってきた。

一方、現在メラトニンの測定は、ラジオイムノアッセイ、高速液体クロマトグラフ-電気化学検出法、ガスクロマトグラフ-質量分析法などによって高感度に行える。しかしな

がら、これらの方法には特殊な設備や機器が必要であり、また抽出操作やカラム分離プロセスが必要であることから、連続測定や現場での測定に適しているとはいえないのが現状である。そこで本研究では生体リズムの研究者とセンサーシステムの設計者とが協力し、体内時計ホルモンであるメラトニンの分泌動態をリアルタイムで連続モニタリングできる新しいセンサーシステムを開発することと、さらにこのセンサーシステムを実験動物を用いた生体機能リズムの測定解析やヒトの生理機能リズムの簡便計測へ応用するために、生物リズム解析が望まれるモデル系についての基礎研究を行うことを目的とした。

[研究の内容、成果]

本研究では、以下に示すように体内時計ホルモンとしてのメラトニンの簡便計測を実現

し得るセンサーシステムの設計開発と、そのセンサーシステムを生物リズム解析へ応用するためのモデル系の特性解析の2面について研究を展開した。

1. メラトニンセンサーの設計と性能評価

1.1 メラトニン計測用修飾電極の設計、開発と特性評価

メラトニンをリアルタイムで連続して、またその場で簡便に計測できるようにするためには、まず試料中のメラトニンの分離プロセスを省略できるような計測法が望まれる。そこで本研究では、簡便で連続計測に適する電気化学分析法を用いることとした。さらに生体試料中のように電気化学反応し得る種々の生体アミンが共存する系で、分離操作を必要とせず、メラトニンを選択検出するために、メラトニンの疎水性に着目し、図1に模式的に示すように表面に疎水基を導入した電極をセンサー感応部として用いれば、妨害物質と

なる親水性のカテコールアミンなどが共存する試料中でも直接メラトニンを選択的に電気化学検出できるのではないかと発想した。このため金表面におけるアルカンチオールを自己集積化現象を利用して疎水性単分子膜修飾した金電極を作製し、メラトニン選択電極としての応用性を検討した。電気化学分析システムを用いて微分パルスボルタメトリー法により修飾電極によるメラトニンおよび妨害物質の電気化学酸化検出を試み、その選択検出特性を検討した。アルキル鎖の長さによ

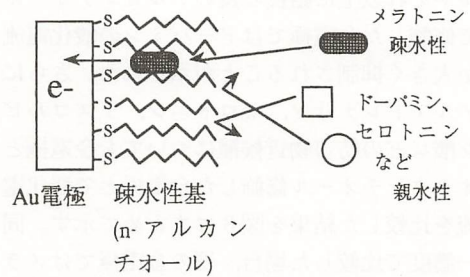


図1 アルカンチオール修飾金電極によるメラトニンセンシングの原理

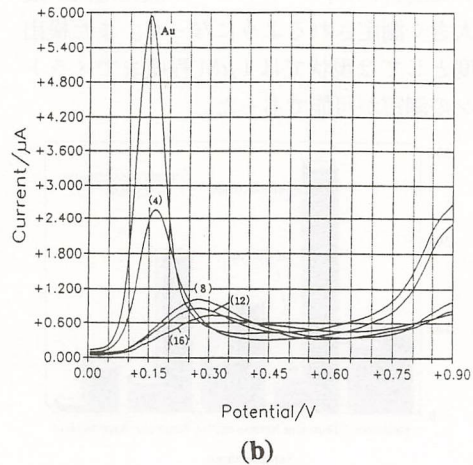
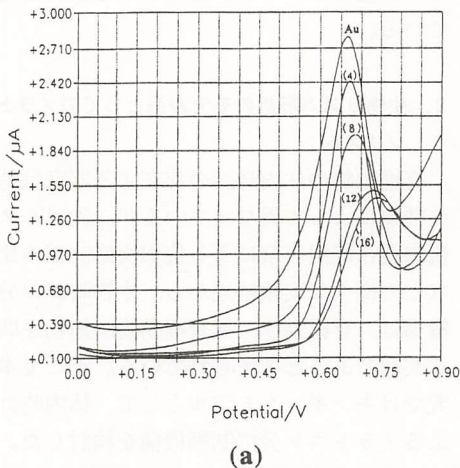


図2 裸の金電極 (Au) および種々の n -アルカンチオール ($C_mH_{2m+1}SH$, $m=4, 8, 12, 16$) で修飾した金電極を用いたメラトニンの微分パルスボルタモグラム (a) とドーパミンの微分パルスボルタモグラム (b)

て疎水性と分子の透過性を制御し、メラトニンに対する選択応答性の向上を計った。

この結果、図2(a)に示すようにブタンチオールやオクタンチオールで修飾した金電極では、裸の金電極に比較して電流はわずかに減少するもののメラトニンの明瞭な酸化電流が測定されることが示された。一方さらにアルキル鎖長が長くなるとメラトニンの酸化電流が大きく抑制された。また妨害物質の代表候補としてドーパミンの電気化学酸化を検討すると図2(b)に示すようにオクタンチオールやそれ以上に鎖長の長いアルカンチオールで修飾した金電極ではドーパミンの酸化電流が大きく抑制されることが示された。さらにノルアドレナリン、セロトニン、アスコルビン酸などの妨害物質候補についても金電極とオクタンチオール修飾した金電極とで酸化電流を比較した結果を図3にまとめて示す。同一濃度で比較した場合、裸の金電極ではメラトニンの酸化電流は妨害物質の酸化電流より小さかったが、オクタンチオール修飾電極を用いた場合には、メラトニンの酸化電流が最も大きく測定されるようになった。また検出感度としては現状では1 μM 程度までメラトニンの測定が可能であった。

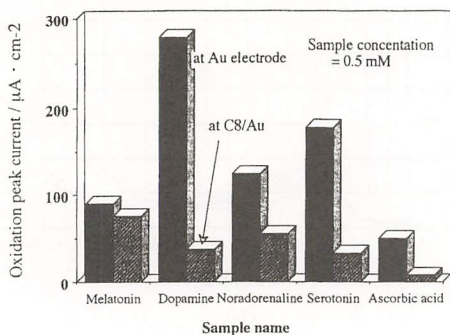


図3 裸の金電極とオクタンチオール修飾金電極によるメラトニンおよび妨害物質の電気化学酸化電流の比較

以上のようにC8程度の長さのアルカンチオールの単分子膜で表面修飾した電極は、多くのカテコールアミンやインドールアミンに比べてメラトニン選択性をもつセンサー電極として応用できる可能性が示された。ただし相対的なメラトニン選択性は高くなったものの妨害物質の酸化電流を実際に影響がないレベルに抑制するにはまだ不十分であり、さらに改良、工夫を続ける予定である。

1.2 メラトニンの迅速・簡便計測システムの開発

さらにメラトニンを迅速、簡便に高感度計測するための新しい測定システムとして、オクタンチオール修飾金電極をセットしたフロー型電解セルと無脈流送液ポンプ系とを組み合わせたフロー型のメラトニンモニタリングシステムの作製を試みた。その測定条件と検出特性を検討したが、フローセルの金電極部の表面修飾がうまくできなかったためか、本研究期間内にメラトニンの選択計測を達成するには至らなかった。現在さらに検討を続けている。

2. 生物リズム解析のモデル系としてのメラトニンリズム

脊椎動物の体内時計の存在する器官は動物の種類によって異なっているが、光パルス、蛋白質合成阻害剤による位相反応曲線の比較などの様々な実験結果から、生物時計の分子機構は、脊椎動物、無脊椎動物、植物を問わず共通であると考えられている。そこで本研究ではキンギョをモデルとして、体内時計によるメラトニン分泌制御機構を検討した。

明暗条件下 (LD 12:12, 明期6-18時) で飼育したキンギョを恒暗条件に移した後、3日間、血液、眼球を採取し、それぞれのメ

ラトニン含量をラジオイムノアッセイにより測定した結果を図4に示した。その結果、血中メラトニン濃度は3日間サーカディアンリズムを示した。キンギョにおける血中メラトニン濃度のリズムは松果体によって作り出されており、また松果体に体内時計が存在することも明らかにされている。本研究結果によりこれらの事実が改めて確認された。一方、眼球内メラトニン含量のサーカディアンリズムは3日目には消失した。この結果は、網膜に存在する体内時計は極めて減衰しやすい可能性を示唆している。

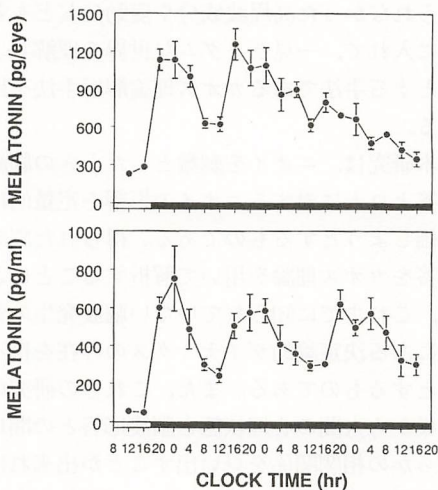


図4 キンギョの眼球と血漿のメラトニン含量のサーカディアンリズム

[今後の研究の方向, 課題]

メラトニンセンサーの開発においては、期待したように疎水性単分子膜修飾電極の有用性が明らかにできたものの、先に記したように妨害物質の影響を全くなくするには不十分であり、修飾分子の改良などによって選択性の一層の向上を図る必要を感じている。またフローシステム系での選択計測の実現と、生

体試料中のメラトニンを十分定量できるよう高感度化を図り、最終目的である生体試料中のメラトニンの分泌動態計測に適用できるように展開する予定である。この際にはキンギョの実験に用いた従来のラジオイムノアッセイ、あるいは高速液体クロマトグラフィー分析などによる測定結果との比較によりその新計測システムの有効性を明らかにしたいと考えている。さらにコンピューターを用いた連続データサンプリングと解析により計測結果の迅速評価を可能としていきたい。これらのことが可能となれば生理機能リズムの簡便計測への応用が可能となるのみならず、体内時計の制御機構の理解にも役立つものと期待される。

[成果の発表, 論文等]

- 1) 篠原寛明, 村田幸治, 田畑満生, 飯郷雅之, Electrochemical detection of melatonin, a time-keeping hormone, with alkanethiol-modified gold electrodes, *Denki Kagaku* 62, 1255 (1994).
- 2) 篠原寛明, 村田幸治, 田畑満生, 飯郷雅之, アルカンチオール修飾電極を用いる生物リズム指標ホルモンの選択的電気化学計測, 電気化学秋季大会(横浜)講演要旨集, p. 76 (1994).
- 3) 飯郷雅之, 田畑満生, 服部淳彦, 大谷-金子律子, 原正幸, 鈴木卓朗, 古川清, 会田勝美, 魚類眼球内メラトニン含量のサーカディアンリズム, 第5回日本比較生理生化学会大会, (1994. 6)
- 4) 飯郷雅之, Sanchez-Vazquez, F. J., 田畑満生, 服部淳彦, 大谷-金子律子, 原正幸, 鈴木卓朗, 会田勝美, キンギョをモデルとした魚類のサーカディアンリズム研究の現状, 第1回日本時間生物学会大会 (1994. 10).
- 5) 飯郷雅之, 田畑満生, 篠原寛明, 大谷-金子律子, 鈴木卓朗, ナマズ脳内メラトニン受容体の性状, 第18回日本神経科学大会 (1994. 12)
- 6) 篠原寛明, 鎌田能子, 穴戸昌彦, 田畑満生, 飯郷雅之, アルカンチオール修飾電極による生物リズムホルモン-メラトニン電気化学計測, 日本化学会第69春季年会(京都)講演予稿集I, p. 158 (1995).

香りの与える心理的影響の評価システムに関する研究

The Study of the Evaluation System of the Emotion Evoked by the Odor

941013

研究代表者

大阪大学基礎工学部 講師

辻 本 浩 章

〔研究の目的〕

従来、香りの評価は人の主観により行われ、定性的なものでしかなく、香りが人に与える影響を定量的に評価する研究は、まだ十分に行われていない。本研究は香り刺激による脳波の変化を解析し、香りが人間に与える影響を定量的に評価する方法を探り、その成果を基に人の精神状態を評価するシステムの開発を行なおうとするものである。

長い間、解明されてなかった人のニオイ情報処理の仕組みが、臭細胞における信号変換機構の分子生物学的及び生理学的解析の急速な進展に伴い、明らかになりつつある。また、人体でのニオイ処理の解析が進むにつれて、ニオイ情報処理の分野が注目され盛んに研究されはじめている。

嗅覚はその人の経験や記憶に深く関係した主観的なものであることが多いため、個人差の大きい分野でもある。実際、脳においても、ニオイ刺激は臭覚細胞の興奮パターンとして認識され、個々のニオイ分子が同定されていないわけではない。

これまで脳波の解析法として、 α 波や β 波等の変化を調べる周波数分析法が主として用いられてきた。しかし、この手法は、その脳波の主成分のみに注目しそれ以外の周波数成分を全く無視してしまうという問題点があっ

た。近年、人の神経活動の中にカオスの状態の存在を示唆する研究が報告され、注目を集めている。これは、これまでノイズとして省みられなかった高周波成分や変動分なども考慮に入れて、一見ランダムな世界を理解しようとする手法であるカオス理論解析手法を用いる。

本研究は、ニオイを刺激としたときの脳波応答より人に対するニオイの影響を定量的に評価しようとするものである。得られた脳波応答をカオス理論を用いて解析することにより、これまでに知られていない脳波発生の背後にある決定論的ダイナミクスの存在を探ろうとするものである。また、これらの研究の結果から人間の心理状態と脳波応答との間に何らかの相関関係を見出すことが出来れば、被験者の心理状態をモニタリングすることも可能となるであろう。

〔研究の内容、成果〕

カオスとは「比較的簡単な規則に支配された不規則振動」のことである。「少数自由度の非線形力学系が複雑なダイナミクスを示す」という意味で、時系列データ解析に大きな意味を持っている。これは、一見、ランダム（無秩序）である時系列データの背後に、少数自由度の決定論的要因の存在が考えられ、

その解析がカオス理論を用いることにより可能になるからである。

カオスには「軌道不安定性」・「長期予測不能性」・「自己相似性」の3つの特徴がある。今回は、脳波応答の解析手法として、相関次元法による次元解析と、リアプノフスペクトラム法による解析を行った。

実際の計測においては、アーチフェクト（ノイズ）の混入を少なくために電磁シールドルーム内で行った。国際式10-20法に基づき、F3、F4、C3、C4、P3、P4、Czの7点での脳波と温度センサを用いて呼吸曲線を分解能12 bit、サンプリング周波数500 Hzで計測した。脳波測定位置とサンプリングチャンネル番号との関係を図1に示す。

呼吸曲線から求めた吸入開始時刻より0.5秒間の計測データを用いて各呼吸ごとの解析値の変化を求めた。周波数分析法により α 波成分、 β 波成分の抽出、またカオス理論に基づく相関次元解析とリアプノフスペクトラムによる解析を行った。これらのカオス解析においては、計測データに対してターケンスの埋め込み定理により遅れ時間 τ を40 ms、埋め込み次元を5次元とし解析を行った。

被験者が心地よいと感じた3種類の香水（芳香）と不快と感じた1つの薬品臭を用いて計測を行った。あらかじめニオイを含ませ

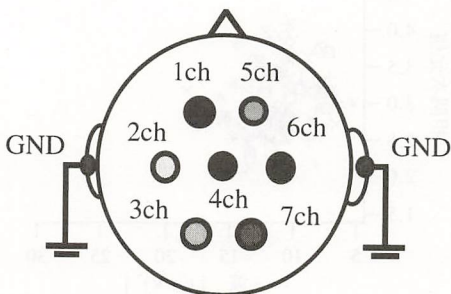


図1 脳波測定位置とチャンネル番号との関係

たガーゼを、被験者の鼻の下に保持することにより、連続的に刺激を与えた。また安静時における脳波応答を得るため無臭のガーゼを被験者の鼻の下に保持し、ニオイを嗅がせた時と同じように計測を行った。被験者は健康な成人男子である。

図2、3に無臭時（安静時）の1ch（F3）、7ch（P4）での脳波の解析結果を示す。呼吸回数をグラフの横軸とし、ニオイ刺激開始時を基準点とした。図4、5に被験者が「快適臭」と評価した香水の香りを約1、2分程度、連続して嗅ぎ続けた時の1ch（F3）、7ch（P4）での脳波の解析結果を示す。

α 波の大きさ、相関次元値ともに呼吸と共に大きく変動している様子が分かる。また無臭と快適臭では明らかな違いが見られた。

次に α 波の大きさを横軸に、相関次元値を縦軸とした2次元平面に時間変化を無視し、呼吸時の（ α 波の大きさ、相関次元値）を、

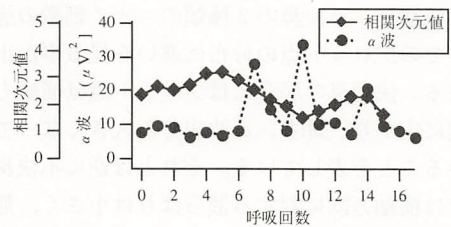


図2 無臭時の相関次元値と α 波の変動（1ch）

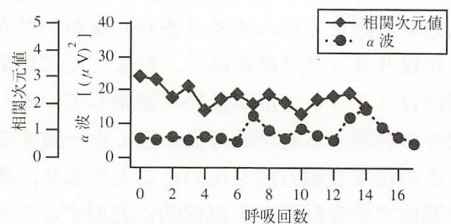


図3 無臭時の相関次元値と α 波の変動（7ch）

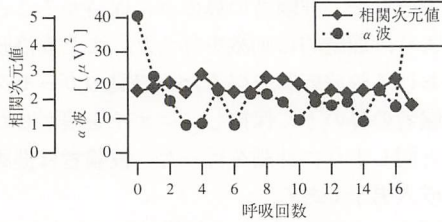


図4 連続刺激時の相関次元値と α 波の変動 (1ch) (快適臭の場合)

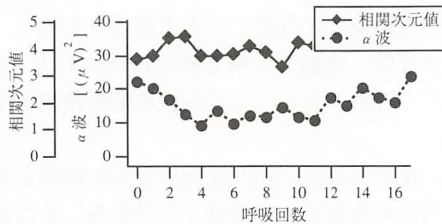


図5 連続刺激時の相関次元値と α 波の変動 (7ch) (快適臭の場合)

プロットしたものを図6から図10に示す。

連続刺激において、無臭の場合と比較すると快適臭、不快臭の2種類のニオイ刺激の違いでのプロット点の分布に違いを見る事が出来る。快適臭の場合にはプロット点は横軸方向に広がり、即ち、 α 波成分が大きくなっていることを表している。それとは逆に不快臭では横軸方向に対する散らばりは小さく、無臭の場合との差は少ない。またニオイ刺激により相関次元値が大きく変動している様子が分かる。特定のチャンネル(部位)での変動が大きい。好ましいニオイ(香り)をかいたときにはリラックス度が高く、好ましくない刺激にはリラックス度が低い(緊張している)。我々の経験する心理的評価と良く一致する。

このような表現方法を用いたことにより、測定部位での変動違いを視覚的に表現することが出来る。瞬き等のノイズ成分によると考え

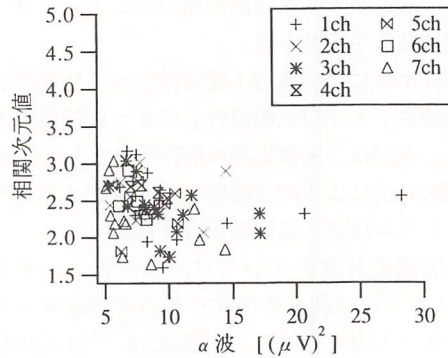


図6 無臭の場合の相関次元値と α 波

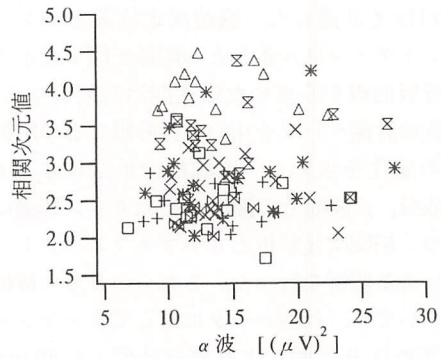


図7 快適臭の場合の相関次元値と α 波(連続)

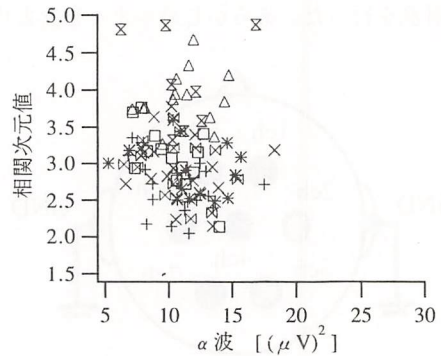
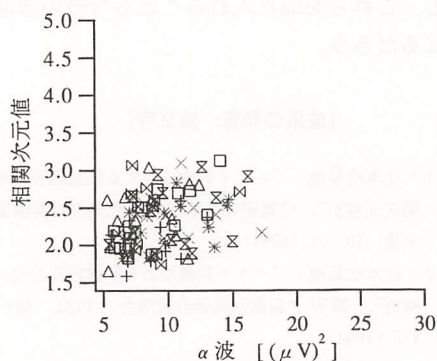
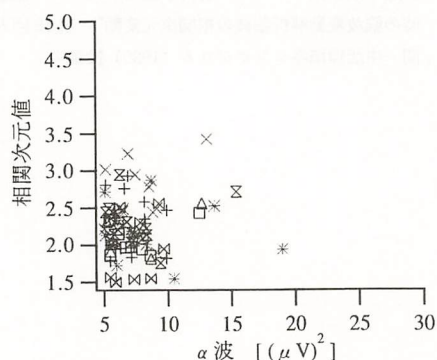


図8 不快臭の場合の相関次元値と α 波(連続)

図9 快適臭の場合の相関次元値と α 波（一呼吸）図10 不快臭の場合の相関次元値と α 波（一呼吸）

られる2, 3の突出データがあるが、ニオイ刺激の種類と解析結果および測定部位の変動に何らかの相関を見い出すことが出来る。

ニオイを吸引した時、後頭部（3, 7ch）での相関次元値が刺激を受ける前と比べ、大きくなっている点が多い。特に感覚野付近の7chでの変動が大きくなっていることに気づく。同時に中心付近（4ch）でも、刺激前と比べ、各点のばらつきが大きくなっている。これを具体的な精神活動に関連させて述べることはまだ出来ないが、後頭部はニオイ刺激を受けたとき、カオス状態が強まり、ま

た中心部では強いカオスから弱いカオスへ、また強いカオスへと揺らぎは始めていることになる。

一呼吸のみの刺激の時は、連続刺激の場合の変化に比べ各点の変動（変化）は少ない。これは短時間の刺激では、生理的な反応が最初に現れ、各人にとって好ましいとか好ましくないとかの判断はできるがそれが快適感や不快感へと進展しないのではないかと予測される。生理的なストレスと精神的なストレスとのずれの問題や慣れの問題も含み大変興味深い結果であると考えられる。リアプノフスペクトル解析での最大リアプノフ指数、リアプノフ次元、KSエントロピーにおいても前述の結果と同様な傾向を示した。

刺激による脳波変動が周波数成分の変化とは独立に変動していることが示された。カオス理論解析を用いることにより従来法では得る事の出来ない何らかの脳の活動要因の変動をとらえることが可能となるだろう。

同時に従来法との組み合わせにより、総合的な結果を得られると考えられる。

[今後の研究課題]

今回の研究における問題点についてまとめておく。

- 1 脳波計測やニオイを扱う際の問題
 - ・開眼安静状態と閉眼安静状態での違い
 - ・ニオイの濃度や量の定量的評価法
 - ・被験者に関わる問題
- 2 カオス理論を用いる際の問題点
 - ・計測データ数の評価（サンプリング周波数の高周波化）
 - ・データの質の評価（ノイズの低減）
 - ・カオス理論で求めた特徴量と、生理学的な値との関係

この研究での目標および課題は、様々な解析手法により求められた解析結果と実際の現象との関連づけである。今回は α 波の大きさと、カオス理論を用いた解析値との相関図を作った。また刺激回数（呼吸回数）により α 波の大きさや相関次元値の変化の様子が異なること示した。刺激回数をパラメータとした評価を行うことにより、生理的なストレスと精神的なストレスとのずれの評価や適応性の問題すなわち慣れを評価する事も可能ではないかと考えられ、大変興味深い結果を得られるであろうと考えられる。

また、カオス理論による解析法においても、次元のばらつきをも考慮に入れた大域スペクトラム法など、新しい解析手法が提案されて

いる、これらを取り入れることも今後の課題となるだろう。

[成果の発表、論文等]

- 1) 辻本浩章他：“ニオイ刺激に対する脳波応答の相関次元解析”，嗅覚研究会第1回研究発表会講演論文集，10-11（1994）
- 2) 辻本浩章他：“ニオイ刺激による脳波応答の次元解析”，第37回自動制御連合講演会，4023，469-470（1994）
- 3) 辻本浩章他：“香りを嗅いだときの脳波の相関次元変動”，平成7年電気学会全国大会講演論文集，649（1995）
- 4) 辻本浩章他：“カオス解析手法を用いたニオイ刺激時の脳波変動解析脳波の相関次元変動”，第19回人間—生活環境系シンポジウム（1995）投稿中

高温超伝導体による高感度磁束センサー

High Sensitive Magnetic Sensors using High Critical Temperature Superconductor

941014

研究代表者

室蘭工業大学電気電子工学科 助教授

中 根 英 章

〔研究の目的〕

超伝導体、特に酸化物超伝導体の応用についての検討は広く試みられているが、酸化物材料の機械的特性から大規模なものについては検討に時間を要している。最も実現性が高いのは高感度磁気センサーなどの様な電子デバイスやそれらの計測で用いられる磁気シールドである。特に超伝導量子干渉計 (SQUID) による磁気センサーは注目されているが、素子作製上の課題が多く、また、雑音などの影響を受け易いこともあって、実用的な磁気センサーとしては実現されていない。しかし、高感度磁気センサーは心臓や肺などからの微弱な磁界を検出することができ、スパイクタイヤの車粉による呼吸器疾患や鉄鋼労働者の肺疾患などの診断に有効と考えられている。

〔研究の内容、成果〕

酸化物超伝導体に磁場を印加すると、通常の金属超伝導体と同様に特定の磁場 (Hcl) 以上で内部に磁場が入り込み、超伝導体特有の完全反磁性状態が崩れてくる。この際、酸化物超伝導体の焼結物であると、Hcl より小さい磁場中で少しずつ磁束が入り始める。内

部に侵入した磁束は量子磁束 Φ_0 ($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb) 単位でトラップ磁束となる。この弱磁場中のトラップ磁束は外部磁場により移動することができる。これは、強磁性体材料における磁気スピンの向きが外部磁界により偏向するのと相似関係にあると言ってよい。酸化物超伝導体におけるこのような現象の特徴は強磁性体中の現象と異なり、極めて小さな外部磁場において発生することである。そのため従来のフラックゲート型磁束計よりも感度が上がることが期待される。また、高温超伝導体を用いることの利点に、液体窒素温度 (77 K) で超伝導状態になる点がある。これにより、安価で取り扱いが簡単な装置にすることができる。

本研究で用いる超伝導体は、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ の酸化物超伝導体である。これは通常の金属超伝導体と同様に特定の磁場 (Hcl) 以上で内部に磁場が入り込み、超伝導体特有の完全反磁性状態が崩れてくる。この際、酸化物超伝導体の焼結物であると、Hcl より小さい磁場中で少しずつ磁束が入り始める。内部に侵入した磁束は量子磁束 Φ_0 ($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb) 単位でトラップ磁束となる。この弱磁場中のトラップ磁束は外部磁場により移動することができる。

1. 動作の原理

この磁束計で実際に測定するのは、検出コイルに現れる第2次高調波である。この第2次高調波の発生原理は次のようなものである。磁心に1次コイルとその上に2次コイルを巻く (Fig. 1)。1次コイルは超伝導体に励振磁界を印加するものであり、2次コイルは超伝導体内部の磁束の変化を読み出すものである。1次コイルの励振磁界が2次コイルに直接結合するのを防ぐため、途中から逆向きにしている。外部磁界を印加しないときは、1次コイルの入力に対する2次コイルの出力は奇関数である。これに対し、外部磁界を印加したときには2次コイルの出力は偶関数成分が生じる。(Fig. 1) これが第2次高調波として現れる。この第2次高調波の変化が、外部磁界の変化を示し、磁束計としての機能をするようになる。

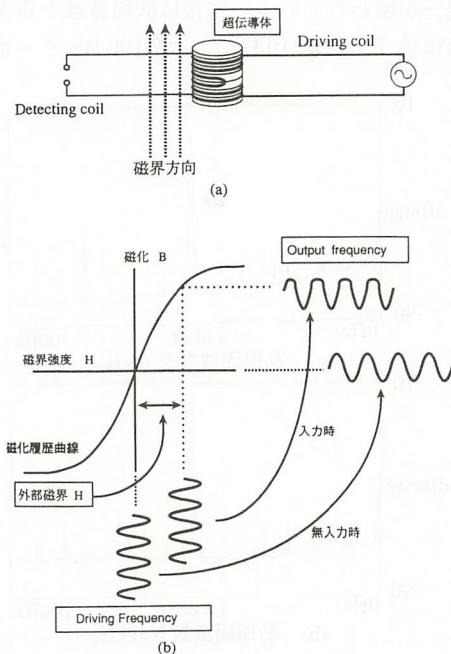
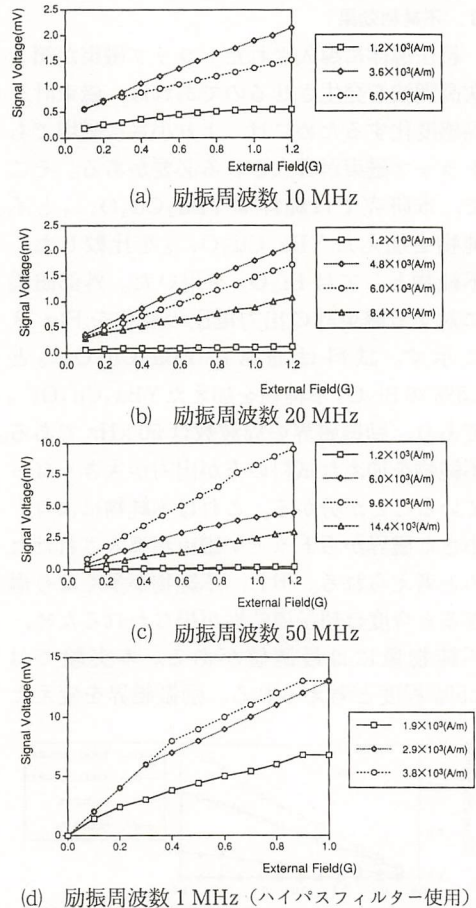


Fig. 1 磁束センサーの動作原理

2. 励振磁界特性

励振磁界の周波数は 10 kHz から 1 MHz まで変化させた。第2次高調波の検出にロックインアンプを用いたが、ロックインアンプの最高動作周波数が 100 kHz であるため、1 MHz の励振周波数の場合はハイパスフィルターを用いて第2次高調波を検出した。Fig. 2 に種々の励振周波数におけるセンサーの出力特性を示す。各周波数において入力磁界に比例した出力が得られていることがわかる。また、励振周波数が高いほど出力が



(d) 励振周波数 1 MHz (ハイパスフィルター使用)

Fig. 2 種々の励振周波数における入出力特性

大きい。出力電圧は励振振幅にも依存して大きくなるが、極端に大きな励振磁界に対しては飽和したり、さらには出力電圧が低下する。これは大きな励振磁界下では超伝導体内に導入されるトラップ磁束が支配的になり、超伝導性を弱めるためと考えられる。

励振周波数が高い程、また、励振磁界強度が大きい程、出力電圧が大きいのは磁束の変化速度が大きくなるため、検出コイルに発生する電圧が増加するものと考えられる。

3. 不純物効果

超伝導体に導入されたトラップ磁束が第2次高調波を発生させるのであれば、磁束計を高感度化するためには、より小さな磁場でもトラップ磁束が導入される必要がある。そこで、本研究では純粋な $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ と不純物を加えた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ を比較した。不純物としては Bi_2O_3 を用いた。外部磁場に対する磁束計の出力電圧の変化を Fig. 3 に示す。試料は通常の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ と 2.5% の Bi_2O_3 不純物を加えた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ であり、励振磁界の周波数は 50 kHz である。不純物を加えた試料の方が出力が大きくなっていることが分かる。これは不純物により、小さな磁界からトラップ磁束が導入されたためと考えられる。但し、不純物が多くなり過ぎると今度は超伝導特性が損なわれるため、不純物量には最適値がある。本実験では 2.5% 程度と考えられる。励振磁界を変えた

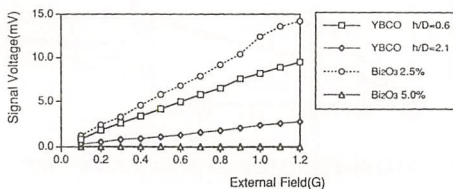


Fig. 3 不純物添加による入出特性の変化

ときの出力電圧の変化は外部磁界に比例しているが、励振磁界を大きくすると出力電圧が小さくなることが分かる。これは大きな励振磁界によって極端に多くのトラップ磁束が導入され、飽和状態になるためと考えられる。さらに、トラップ磁束を導入し易くするために薄膜のような超伝導体を用いることもできる。

4. 雑音特性

本研究における磁束センサーの雑音は主として、トラップ磁束のうち励振磁界に同期できないものによって生ずると考えられる。Fig. 4 に出力信号の周波数スペクトラムを示す。入力信号は 100 Hz でスペクトラムの中央に位置している。雑音成分の主なピークは電灯線の 50 Hz とその高調波及びそれらのビート周波数である。直流値には地磁気の成分が現われている。雑音は低周波域から次第に低下し、数 10 Hz から数 100 Hz で一定

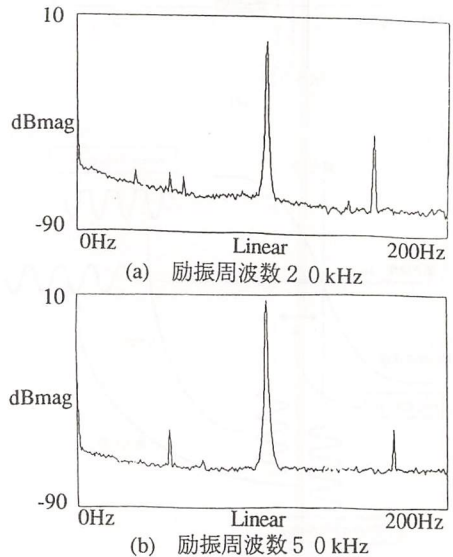


Fig. 4 出力信号の周波数スペクトラム

値になることがわかった。また、励振周波数が低い程、低下の傾向が著しいことがわかる。この一定値をフロア雑音とみなし、励振周波数による変化を示したのが Fig. 5 である。励振周波数とともに次第に増加することがわかる。さらに励振磁界の強度に対するフロア雑音の変化を Fig. 6 に示す。フロア雑音は励振磁界の強度に対して増加するが、飽和す

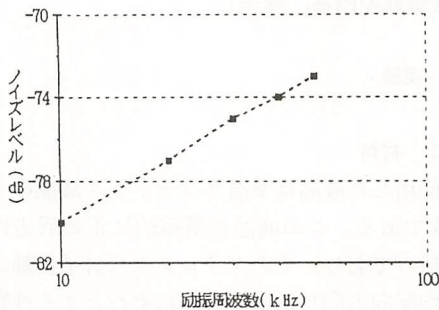


Fig. 5 励振周波数によるフロア雑音の変化
(励振磁界：363 A/m)

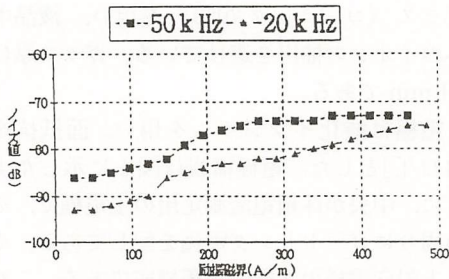


Fig. 6 励振磁界によるフロア雑音の変化

る傾向にあると考えられる。励振周波数と励振磁界の強度によるフロア雑音の増加はさきの出力信号の増加の場合と同様に磁束の変化速度が大きくなるためと考えられる。

[今後の研究の方向、課題]

本研究における磁束センサーの雑音特性の評価は高温超伝導体内部における磁束移動の物理的機構の解明につながるものである。また、本研究における磁束センサーの感度は従来の強磁性体によるフラックスゲート型センサーよりも良いが、超伝導量子干渉計 (SQUID) のような高感度には達していない。今後、センサーの雑音特性をさらに評価することにより高感度化への方向を探る必要がある。

[成果の発表、論文等]

- 1) H. Nakane: Superconducting Magnetic sensor (SQUID, QFP) and it's application, Technical Digest of Sensor Symposium, p.109 (1991).
- 2) 和田, 中根: 高温超伝導体による磁束計の基礎検討, 室蘭工業大学研究報告, 第42号, p. 1 (1992).
- 3) H. Nakane, H. Wada, H. Adachi: Magnetic Sensors using doped Oxide Super conductors., The 7th Intem. Conf. on Solid State Sensors and Actuators, D 12-04 (1993).
- 4) 和田, 中根, 安達: 超伝導磁気センサの不純物添加の効果, 第54回応用物理学会学術講演会 (1993).

液晶における電気伝導メカニズムの解明

Electric Conduction Mechanism in Liquid Crystals

941016

研究代表者

帝京大学理工学部 助教授

間 多 均

[研究の目的]

液晶ディスプレイの画質劣化にはいろいろの種類がある。その内の致命的劣化は、液晶中に存在する除去不能な不純物イオンが原因と言われている。いわゆるパターンの焼き付き現象であり、視覚的には残像現象として認識される。この現象は駆動電圧に直流成分を含んでいる場合は特に深刻である。STNなどの単純マトリクス駆動では、工夫することにより直流成分を除くことも可能である。しかし、高分解能である TFT を用いたアクティブマトリクス方式の液晶表示では、駆動回路の構成が災いし本質的に直流成分を除くことが出来ない。したがって、画質劣化を防ぐには不純物イオンを何らかの方法で制御しなければならない。しかし、イオンの振る舞いは複雑であり研究されておらず未解決のままである。目に優しい高画質化・高性能化への見通しが立たない状況にある。

本研究では、イオン制御の方法を確立するための基礎段階として、これらイオンの振る舞いを明かにすることを目的とする。そのため、その第一段階として液晶を流れる定常電流の測定を行ない、その伝導メカニズムを中心に研究を行なった。

[研究の内容、成果]

1. 実験

1.1 材料

使用した液晶は室温ネマティック液晶の 5CB である。この液晶は誘電的に正の異方性を持っており、そのダイレクタ（分子長軸の平均配向方向）を電界方向に平行とする性質がある。ただし、その閾値電圧は約 1.1 V 程度である。

液晶セルを構成するガラスは、脱アルカリガラス（コーニング 7059）を用い、液晶中へのイオンの抽出を避けている。ガラス厚は 1.1 mm である。

電極は酸化インジウムを用い、面抵抗を $34 \Omega/\square$ とした。電極構成は図 1 に示したように、中央が体積電流測定用の主電極で、その周りにガードリング電極を配してある。それと対向電極の 3 端子電極構成である。これは表面からの漏れ電流を測定しないための一般的な方法である。有効面積は約 $8.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ である。

液晶層の厚さを決定するスペーサは絶縁性の点から厚さ $12.5 \mu\text{m}$ のテフロンシートを利用した。

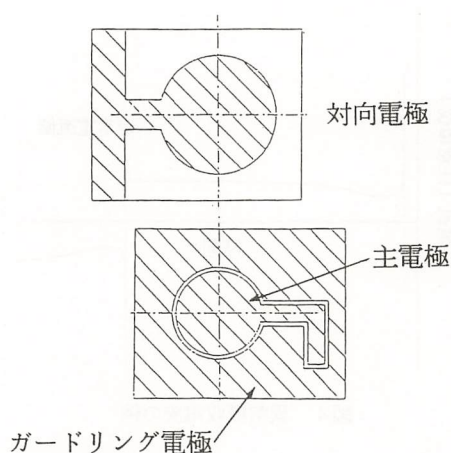


図1 実験で使用した電極構造



図2 典型的な吸収電流

1.2 配向方法

単一領域の液晶状態を得るため液晶をマクロに配向させなければならない。液晶を電極面に平行に配向させる方法として、通常の液晶デバイスで使用されている方法は、まずポリイミドを透明電極付きガラス基板に塗布する。そして、その表面を適当な布で一方方向にラビングするものである。この配向方法を用いた場合、ポリイミドを測定電流が流れ、液晶デバイスとしての特性を測定するには都合がよいが、液晶そのものの特性を知るには不都合である。

そこで、本実験では電極面を直接ラビングして液晶を配向する方法を採用した。電極面での液晶と電極の接触状態は全く不明であるが、取りあえず酸化インジウムとの直接接合に限定した電流測定とした。

1.3 測定方法

電流の測定は室温と40℃で行なった。室温で5CBは液晶状態であり、40℃では等方相の液体状態となる。低周波発振器で0.001

Hzの矩形波を試料に印加し、高速電流アンプ(Keithley 427)の出力を直接X-Yレコーダに記録した。定常電流値として、電圧印加500秒後の値を採用した。印加電圧は0.01Vから20Vまでとした。

この電圧範囲においては、本試料に光散乱などを生ずる流体力学的不安定性は生じなかった。

2. 結果

典型的な電流の過渡特性を図2に示す。通常の誘電体が示す過渡特性と同様、時間と共に電流は単調減少する。この特性における電圧印加後500秒での電流値が定常電流である。

実験で得られた電圧電流特性を図3に示す。測定結果は図3中のプロットで、白丸が室温、黒丸が40℃の場合である。両者ほとんど大きな差は認められない。低電圧側において、電流は印加電圧に比例している。印加電圧が1V以上で電流は電圧の3乗に比例する。図3中の直線がそれを表している。その途中ではわずかの範囲ではあるが電圧の2乗に比

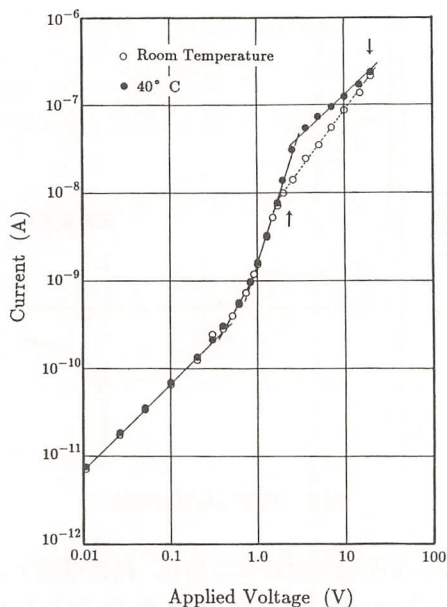


図3 電圧電流特性

例している領域が認められる。

印加電圧が 1.5 V 以上で温度による差が明瞭となる。室温においては、電流の電圧依存性が 1.4 乗となる。図 3 中の上向き矢印は、これ以上の電圧では異常吸収電流 (H. Mada, Jpn. J. Appl. Phys., 29, (1990) L-123) が流れることを示している。典型的な例を図 4 に示す。この場合の電流値は定常電流であると見なすことは出来ず、そのため破線で表してある。等方相における電流では印加電圧が 20 V のときのみ異常吸収電流が生じた。それを下向き矢印で示してある。

印加電圧が 2 V 以上で電流は再び印加電圧にはば比例する結果が得られた。

3. 考察

実験結果が示しているように、電流の電圧依存性が異なる 4 つの領域についてそれぞれ

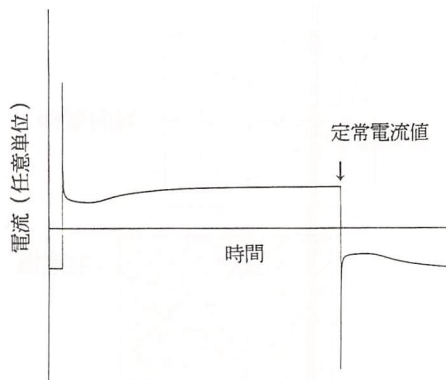


図4 異常吸収電流の例

考察する。

3.1 低電圧比例領域

通常のオーム則の成立する伝導領域である。この測定値から液晶の固有抵抗を計算すると、 $9.7 \times 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ が得られる。

キャリアの種類を知ることは現状では困難で、将来の課題としたい。ただ、次の項の考察から単一キャリアであることが想定される。

3.2 2乗領域

一般の誘電体ではオーム則に続いてチャイルド則に移行する現象が多く観測される。本実験結果でも 2 乗則が現われており、キャリアの注入が増加することによる単一キャリアの空間電荷制限電流と見なすことが出来る。

この場合のキャリアを同呈する必要があるが、本実験結果だけでは困難である。例えば、実際に検出できるかどうかは別として、ホール効果によりキャリアの正負が判定することができる。Murakami *et al.* (Mol. Cryst. Liq. Cryst. (1995) in press) によると、液晶中への光伝導による注入キャリアは正イオンとなり、電界中を伝導することが実証され

ている。このことから単純に考えると、単一キャリアは正イオンで、オーム則からチャイルド則へ移行していると考えてよさそうである。正イオンの移動度は Murakami et al. によると室温で $3.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と報告されている。

3.3 3乗領域

液晶単独の電圧電流特性として初めて観測された電圧特性である。通常の配向処理膜の有る液晶セルでは、早くから観測されており、配向層のトラップが原因と考えられてきた³⁾。しかし、今回の実験結果はかなり本質的な様相を呈している。従来、定常電流の値として電圧印加後 200 秒の電流値では決して現われなかった 3 乗領域が、500 秒での電流で現われたわけである。

この特性を説明するためには、配向層（ポリイミド）のトラップを考えることは出来ず、キャリアの二重注入による伝導を考えなければならない。つまり、正と負、両方のキャリアが液晶中に存在するのである。電圧依存性に 2 乗と 3 乗があることは、2 乗域で単一キャリア、3 乗域で二重キャリアの伝導であるとすれば、両イオンの注入レベルが異なっていることを示唆している様である。

この伝導機構に関しては、液晶のセル厚依存性を測定しなければ確実なことは結論できない。そのために、電圧電流特性の液晶層厚さ依存性を測定する必要があるようだ。

3.4 高電圧比例領域

高電圧側の比例領域はおそらく二重キャリアのオーミック伝導であろう。あるいは、トラップ制限電流と解釈することも出来る。より詳細なデータの積み重ねが必要である。

3.5 その他

今回の測定では完全な定常電流を測定することは出来なかった。吸収電流は、電圧印加 500 秒後も減少が続いている。その傾向は印加電圧の低いほうが著しい。一見逆のように感ずる。このパラドクスは異常吸収電流にありそうだ。この現象は、図 4 に示したとおり吸収電流が初めは減少しているが、最後に増加・飽和を示す現象である。この異常吸収電流は、ネマティック相で発見され、液晶の再配向による放電電流であると結論された。しかし、今回の実験で等方相でも異常吸収電流の生じることが明かとなった。同じ現象が、斎藤ら（第 20 回液晶討論会講演予稿集，2 G 507 (1994) p. 208）によっても報告されている。それにより現在、この異常吸収電流の原因は不明と言わざるを得ない。厳密に定常電流の電圧電流特性を議論するには異常吸収電流のメカニズムを先に解決しなければならない状況になってきた。

[今後の研究方向]

定常、過渡電流は残念ながらまだ完全には解明されていない。本研究では現在考えられる機構を実験結果と重ね合わせた。しかし、モデルとの整合を取るうえでも液晶層の厚さによる定常電流の変化を早急に測定する必要がある。それと共に、異常吸収電流のメカニズムを解決する必要もある。

また、伝導現象は低周波数での誘電現象と密接に結び付いていることがインピーダンス測定から明かとなったので、今後誘電特性からのアプローチと併用して研究を進める。さらに、界面におけるポテンシャルの研究も重要となり、電気化学的な手法も利用するつもりである。

[成果の発表, 論文等]

- 1) 間多 均, 液晶中のイオン伝導と高純度液晶デバイス技術—イントロダクトリートーク—, 第41回応用物理学会関係連合講演会講演予稿集 (1994) 1273.
- 2) 間多 均, 西河 輝, ネマティック液晶セルの界面インピーダンス, 静電気学会誌, **18** (1994) 299.
- 3) H. Mada and H. Yamada, Measurement of steady-state current flowing in nematic liquid crystal, Jpn. J. Appl. Phys., **33** (1994) 5886.

音声認識における聴感特性に基づく隠れマルコフモデルの 耐雑音性の改善に関する研究

A Robust Hidden Markov Model for Noisy Speech Recognition
by Incorporating Auditory Characteristics

941018

研究代表者 信州大学工学部電気電子工学科 教授 松本 弘

〔研究の目的〕

音声自動認識の実用化において、環境騒音に対する頑健性の向上は重要な課題である。近年、大語彙連続音声の認識手法として、隠れマルコフモデル（HMM）が最も強力な認識手法として広く用いられているが、これは統計的な方法であるため、雑音付加音声や発声変形を受けた音声のように、学習外の音声に対して認識精度が著しく低下するという欠点がある。そこで本研究では、HMMの中でも最も認識精度の良い連続分布型モデルに、人間の聴覚特性に関する知見を拘束条件として組み込み、HMM自身の耐雑音性能を改善するための方法を開発する。

〔研究の内容、成果〕

1. 周波数重み付け HMM

人間の聴覚は低次ホルマントのスペクトルピークに感度を有するということが知られている。従来のスペクトル距離尺度とDTWに基づく音声認識手法では、この特性を考慮した耐雑音性に優れた認識手法が考案されている。例えば、ケフレンシー重み付けケプス

トラム（群遅延スペクトルまたは周波数微分対数スペクトルに等価）は、雑音に強いことが知られている。

以下では、HMMにおいてこのような特徴を用いるときの問題点を明らかにし、聴感特性を考慮した新しいHMMを提案する。

1.1 共分散の拘束の必要性

始めに、人間の聴覚が低次のホルマントに敏感であるという特性を考慮し、 p 次のケプストラム・ベクトル

$$\mathbf{x} = [c_1, c_2, \dots, c_p]^T \quad (1)$$

から導かれる平滑化群遅延スペクトルを

$$\lambda_i = \frac{2\pi i}{2p+1}, \quad (i=1, \dots, p) \quad (2)$$

で標準化した次ベクトルを特徴量とする。

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{D}\mathbf{x} \quad (3)$$

但し、 $\mathbf{D}$ はケフレンシー重み付けの対角行列 $\text{diag}[1, 2, \dots, p]^T$ であり、 $\mathbf{C}$ は次の c_{ij} を i 行 j 列の要素とする余弦変換行列である。

$$c_{ij} = 2\cos \lambda_i j \quad (4)$$

この離散群遅延スペクトル y は、雑音により変形しやすいスペクトルの概形成分が除去され、また SNR の良いピーク部が強調されるため、雑音の影響を受けにくいという性質を持っている。

いま、 y を特徴ベクトルとする単一ガウス分布型 HMM の第 i 状態の出力確率密度関数を

$$P_i(y) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^p |\Sigma_i|}} \times \exp\left\{-\frac{1}{2}(y - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1}(y - \mu_i)\right\} \quad (5)$$

とすると、これは x を特徴ベクトルとした場合の出力確率密度関数 $Q_i(x)$ と次の関係がある。

$$P_i(y) = |CD|^{-1} Q_i(x) \quad (6)$$

それ故、特徴量として y を用いた HMM も、統計的に推定された共分散行列 Σ_i を用いる限り、対数スペクトルと等価な x を用いた場合と変わらず、群遅延スペクトルの耐雑音性能を活かすことができない。

そこで、群遅延スペクトルの利点を活かすと同時に、聴覚の周波数感度特性を考慮するため、周波数重み関数 $W(\lambda_i)$ を用いて共分散行列を次のように拘束する。

$$\Sigma_i = \alpha_i \text{diag}[W(\lambda_1), \dots, W(\lambda_p)]^{-1} \quad (7)$$

ここで $W(\lambda_i)$ は群遅延スペクトルの各周波数成分の尤度への相対的寄与を表し、 α_i は周波数重み係数を分散に変換するためのスケールである。以後、この HMM を周波数重み付け HMM と呼ぶ。従って、この HMM は、雑音の重畳で想定されるスペクトルの変動と聴覚的重要度を考慮して分布の分散を先見的に与えるものと解釈できる。

1.2 周波数重み付け関数

重み関数として次の2通りを検討した。

1. 状態独立型低域重み関数

高域の周波数成分の尤度への寄与を低減するため、次のローパス型の重み関数を全 HMM の全状態に適用する。

$$W(\lambda_i) = |1 + a \exp(j\lambda_i)|^2 \quad (8)$$

2. 平均ベクトル依存型重み関数

各状態毎にその均ベクトル μ (群遅延スペクトル) から導かれる平滑化パワースペクトルを β 乗で圧伸した次の重み関数を用いる。

$$W(\lambda_i) = \exp\{\beta l_i\} \quad (9)$$

但し、

$$[l_1, \dots, l_p]^T = CL_q \{DC\}^{-1} \mu_i \quad (10)$$

$$L_q = \text{diag}[\underbrace{1, \dots, 1}_q, 0, \dots, 0] \quad (11)$$

これは、図1に示すように、各状態のパワースペクトルに依存して、パワー

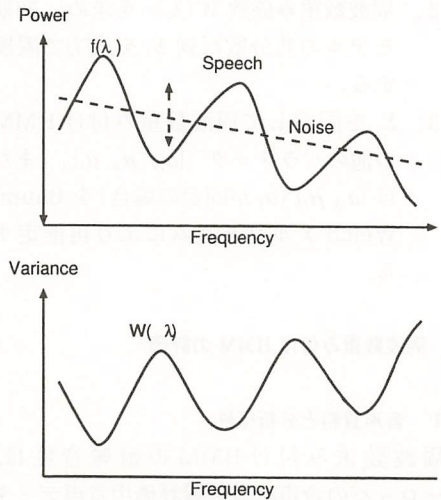


図1 周波数重み付けの概念図

が小さく雑音により変動しやすい周波数成分を抑制しようとするものである。

1.3 重み行列のスケーリング

次の2通りのスケーリング法を検討した。

1. 尤度最大基準によるスケーリング
通常の Baum-Welch アルゴリズムにより無雑音の学習サンプルから尤度最大基準で係数 α_i を推定する。
2. 正規化スケーリング
 $W(\lambda_n)$ を次の重みの総和で正規化する。

$$\alpha_i = \sum_{n=1}^p W(\lambda_n) \quad (12)$$

従って、この方法では学習サンプルの統計的変動は考慮されない。

1.4 周波数重み付け HMM の学習手順

1. 学習データから、Baum-Welch アルゴリズムで単一ガウス分布型 HMM を求め、周波数重み付け HMM の初期モデルとする。
2. 周波数重み係数 $W(\lambda_i)$ を求め、初期モデルの共分散行列 Σ_i を式(7)で置換する。
3. Σ_i を固定して周波数重み付け HMM の他のパラメータ $\{a_{ij}, \mu_i, \alpha_i\}$, または $\{a_{ij}, \mu_i\}$ (α_i が固定の場合) を Baum-Welch アルゴリズムにより再推定する。

2. 周波数重み付け HMM の評価

2.1 音声資料と分析条件

周波数重み付け HMM の耐雑音性は、ヨーロッパの音声認識装置評価用音声データベース (NOISEX-92) を用い、単語音声認

識実験で評価した。成人男性話者 1 名の英語 10 数字 20 回発声のデータのうち、10 回分を学習データとし、残りの 10 回分をテストデータとした。

ディジタル化された音声波形 (標本化周波数 16 kHz, 量子化 16 bits) に対し、25 ms のハミング窓を掛け、1 次の適応プリアンファシスを施し、10 ms のフレーム周期で 26 次の LPC 分析を行い、16 次の LPC メル・ケプストラムを特徴ベクトル $\mathbf{x}$ として用いた。雑音としては、白色ガウス雑音、及びローパス雑音 (スペクトル特性は約 -6 dB/oct), 及び自動車雑音を用いた。

連続分布型 HMM として 26 状態の left-to-right モデルを用いた。周波数重み付け HMM の初期モデルとして、通常の単一無相関ガウス分布 HMM を使用した。また、比較の対象に、上記の初期モデルと同じ HMM 及び全モデルの全ての状態の対角共分散を全学習単語の分散に固定した全分散固定 HMM (HMM-GT) をとりあげた。

2.2 重み関数とスケーリングの効果

始めに、平均ベクトル依存型重み関数 (-PW) の最適特性の検討と、尤度最大基準によるスケーリング (.S) と正規化スケーリング (.N) について比較を行った。結果の一例として、SNR 0 dB のローパス雑音に対する、平均ベクトル依存型重み関数の圧伸係数 β と打ち切り次数 q の効果を図 2 に示す。他の雑音についても、同様の検討を行った結果、尤度最大基準によるスケーリングではほとんど効果がないが、正規化スケーリングを行うことにより、どの雑音についても (β, q) が (0.4, 8) のときに、重みなし ($\beta = 0.0$, 即ち、対角等分散) に比べおおきな認識率の改善が得られた。

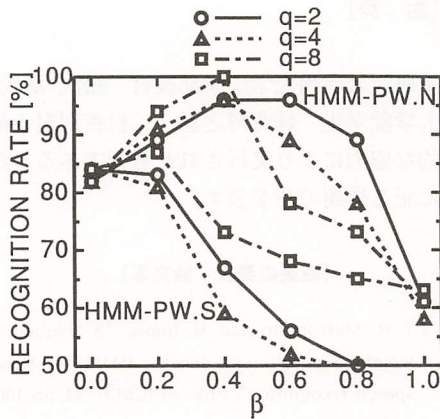


図2 平均ベクトル依存型重み関数の平坦化パラメータ (β , q) の効果 (SNR 6 dB のローパス雑音の場合)

一方、状態独立型低域重み関数 (-FW) について同様の検討を行った結果、平均ベクトル依存型の場合と同様、正規化スケーリングのときに周波数重み付けの効果が得られた。しかし、最適なローパス特性 (白色, ローパス, 自動車雑音に対してそれぞれ $a = 0.6, 0.2, 0.4$) で得られる認識率は、多くの場合平均ベクトル依存型の場合より低いことがわかった。

以上の結果を基に、最適な平均ベクトル依存型重み関数を用いた周波数重み付け HMM (HMM-PW. N) を無相関 HMM 及び全分散固定 HMM (HMM-GT) と比較した結果を表 1 に示す。HMM-FW. N は SNR 12 dB の白色雑音, SNR 6 dB のローパス雑音, 及び SNR 6 dB の自動車雑音に対し通常の無相関 HMM に比べそれぞれ約 65%, 40%, 30% 認識率が向上し、また、HMM-GT に比べてもそれぞれ約 20%, 20%, 10% の認識率の改善が得られた。この結果より、周波数重み付けの効果は高域減衰の小さな雑音ほど大きいといえる。

表 1 周波数重み付け HMM (-PW. N) と無相関 HMM, 及び分散固定 HMM (-GT) との耐雑音性の比較 (ローパス雑音の場合)

(a) White noise

SNR (dB)	0	6	12	18	24
HMM (%)	10	20	36	69	97
HMM-GT (%)	37	61	80	100	100
HMM-PW. N (%)	42	82	100	100	100

(b) low-pass noise

SNR (dB)	-6	0	6	12	18
HMM (%)	11	20	57	96	100
HMM-GT (%)	28	63	81	99	100
HMM-PW. N (%)	32	80	98	100	100

(c) Car noise

SNR (dB)	-6	0	6	12	18
HMM (%)	24	43	94	100	100
HMM-GT (%)	27	65	98	100	100
HMM-PW. N (%)	45	80	98	100	100

表 2 標準及び周波数重み付け HMM への状態数の影響

状態数	8	16	26
HMM	46%	62%	57%
HMM-PW. N	61%	84%	98%

2.3 状態数の影響

以上の実験では、状態数を 26 状態としたが、最後に、通常の HMM と最適な (p, q) に設定した HMM-PW. N に対する状態数の影響を調べた。表 2 に SNR 6 dB のローパス雑音に対する状態数と認識率の結果を示す。これより、通常の HMM では、状態数を 16 以上に増やしても効果がないが、HMM-PW. N では 8 から 26 状態にすることにより約 40% 認識率が改善される。従って、周波数重み付け HMM では状態数を多く設定することが重要であることがわかる。これは、状態数を増すことで、実効的に継続時間長の下限が制限されるためである。

[今後の研究の方向、課題]

今後は、周波数重み付け HMM を混合分布型 HMM に拡張するため、各分布の重み関数の最適なスケーリング法を開発する必要がある。特に、実データの統計的分布を考慮するためにも、スケーリングの誤り最小基準による学習法を検討する予定である。本研究で開発した周波数重み付け HMM は、中程度の SNR の範囲であれば、これだけで高い認識率を達成することが可能であるが、より低 SNR の変動騒音に対しても、雑音低減手法や平均ベクトルの雑音への適応化手法と組み合わせ、より耐雑音性に優れた認識システムを実現する必要がある。

[謝 辞]

本研究は信州大学工学部技官 松沢 清氏、同大学院学生 妹背博之君、二村善則君の献身的な協力により実行されたものである。ここに記し感謝の意を表す。

[成果の発表、論文等]

- 1) H. Matsumoto and H. Imose, "A frequency-weighted continuous density HMM for noisy speech recognition", Proc. of ICSLP-94, pp. 1007-1010 (1994).
- 2) H. Matsumoto and Y. Nimura, "An improved spectral subtraction with smoothing for noisy speech recognition", Proc. of The 15th International Congress on Acoustics, pp. 1-4 (1995) (to be presented).

ヴァーチャル・リアリティ（仮想現実感）の 医療への応用のための基礎研究

An Application of Virtual Reality to Medical Care

941019

研究者代表 東海大学開発工学部医用生体工学科 教授 山口 隆 美

〔研究の目的〕

本研究の目的は、我々が構想するハイパーホスピタル（電子情報ネットワーク上に、ヴァーチャル・リアリティ（仮想現実感）をヒューマン・インタフェースとして展開される新しい医療施設）のために開発した、各種疾患患者のための仮想現実感インタフェースのハードウェアおよびソフトウェアがヒトに及ぼす影響を疲労生理学的に研究し、安全性、最適設計の指針などを検討するものである。

〔研究の内容・成果〕

1. はじめに（研究の背景）

ハイパーホスピタル構想では、仮想現実空間に、従来の病院の保持する機能のうち人と人とのコミュニケーションに関連する部分と、実際に行われる診察、検査、外科的処置などの一部を実現し、患者といわゆる医療機関一病院、診療所などを結ぶだけでなく、分散配置される検査センターなども有機的に接続することを目指す。このようなハイパーホスピタルを実現するためには、ヒューマンインタフェースとしての仮想現実の開発が必須であるが、このシステムを医療機関の一部とし

て使用するためには、システム自体が患者に重大な身体的、精神的影響を与えないことが確認されなければならない。医療のためのヒューマンインタフェースとしてのVR技術の展開には、このような安全性に関する基本的検討が必要であると考えられる。

そこで本研究では我々のこれまでの研究結果を踏まえ、実験条件などをさらに厳密に設定し、改良された装置を用いて、我々がこの目的で開発したVRシステムを利用し、その安全性について生理学的、生化学的、心理学的な検討を試みた。

2. 作業負荷と各種指標の測定

2.1 作業負荷

本研究では、VRによって生じる心理的ストレスなどを測定する目的で、10人の健康男子学生（20.6才±2才）を被験者として負荷実験を行った。本研究では立体映像ではないビデオを使用する比較実験（Control Experiment）と、VRを使用する本実験（VR Experiment）を行って被験者に対する影響を比較した。

比較実験として、それぞれ20分間の環境ビデオ（流水の映像を繰り返すもの）を15

分間の休憩をはさみ、二回連続注視させた。比較実験開始前と実験終了後に問診、体温、クレペリン型加算テスト、カテコラミンの測定を行った。二回のビデオ連続注視のそれぞれ実験直前直後の計4回血圧、心電図の測定を行い、休憩時間直前に問診、体温、クレペリン検査の測定を行った。

本実験であるVRによる負荷実験では、同じ10人の健常被験者に対し日を改めて同時刻から、装着したHMD内に表示された仮想空間内において、我々が電子ナースと呼ぶエージェントからの質問に回答することと、その後一定時間動きのあるCG画像を体験することを課した。被験者に与えられた負荷の内容は、低ストレス性負荷20分間と高ストレス性負荷20分間で構成されている。低ストレス性負荷では、被験者のごく一般的な日常生活に関する質問10分間とこれに引き続くゆっくりとした動きのCG画像10分間を体験することを課した。高ストレス性負荷では、被験者の性生活や学校での成績に関する質問10分間と動きの速いCG画像10分間を体験することを課した。この作業中の生理的指標などの変化を測定し環境ビデオを注視させる比較実験及びVR使用により負荷を与える高、低ストレス実験での比較、検討をおこなった。

2.2 生理学的測定

環境ビデオを注視させた比較実験では、2回のビデオ注視を行うが、2回のビデオ注視のそれぞれ直前、直後の計4回心電図と血圧の測定を行った。

VRによる負荷を与える高、低ストレス性実験では、負荷実験開始時から負荷実験終了時まで心電図を連続的に測定した。血圧に関しては5分おきに測定を行った。体温は負荷

実験前、前半終了後及び実験後に測定した。

2.3 生化学的測定

生化学的測定を行うにあたっては、比較実験、本実験共に実験開始から2時間前（作業負荷開始3時間前から）と実験後1時間は被験者の飲食を禁止した。さらに、負荷実験開始の1時間前に尿をすべて排出させ、500 mlの水を摂取させた。尿中カテコラミンを測定するために比較実験では実験前後の2回、本実験では実験前、低ストレス実験後、高ストレス実験後、実験終了一時間後の4回採取し合計6回尿を採取した。採取された尿の一部はサンプルとして冷凍保存し、高速クロマトグラフィーで分離後、蛍光量を測定するHPLC法で尿中の総カテコラミンのうちアドレナリン、ノルアドレナリン、ドーパミンのそれぞれの濃度を測定し尿量と積算して各排泄量を求めた。

2.4 心理学的測定

VRの与える影響を心理学的に測定するためにクレペリン型加算テスト、問診、主観的疲労とVR使用に関するアンケートを行った。クレペリン型加算テストテスト、問診は比較実験、本実験共に実験の前後及び休憩時に行い、アンケートは実験終了後に行った。

3. 結果

3.1 生理学的影響

環境ビデオを注視させた比較実験では、ビデオ注視後の方がビデオ注視前と比較して心拍数の有意（以下有意水準は5%以下）な低下が認められた（Fig. 1）。

全般的に見て、VRを使用した本実験全体と比較して環境ビデオ注視後の心拍数が有意

に低いことが認められた (Fig. 2, Fig. 3)。また, VR 負荷実験で問診と動画像が切り替わる時間では (実験開始後 10 分~11 分後), 高・低ストレス実験ともに心拍数の有意な低下が見られた (Fig. 2, Fig. 3)。

環境ビデオ注視および VR 使用で計測した血圧のデータを最高血圧, 最低血圧, 平均血圧 ((各時刻での最高血圧)+2(各時刻での最低血圧))/3 の 3 項目に分け, 時系列的に解析し, 血圧の動態への影響を検討した。環境ビデオ注視および VR 負荷による体温の変動は, 各々の実験終了後では比較実験よりも本実験の方が有意に低いことが認められた。ビデオ注視では, 最低血圧および平均血圧からは実験前後による血圧の変動に有意な差は認められなかったが, 最高血圧は実験前後で有意に下降した。また VR 負荷前後の最低血圧, 最高血圧, 平均血圧は有意に下降した。VR 負荷実験の低ストレス性問診, 低速動画および高ストレス性問診, 高速動画負荷における実験前後の血圧の動態への影響も有意に下降した。しかし低速動画から実験終了の間, 高速動画から実験終了の間で比較すると血圧は, 有意に上昇した。

ビデオ注視と VR 負荷を比較したところ, 実験前後におけるビデオ注視と VR 負荷による血圧は有意に下降した。VR 負荷実験に比べてビデオ注視の血圧の方が有意に下降していることが認められた。

3. 2 尿中カテコラミン排泄量

ビデオ注視実験では実験前と実験後の比較ではカテコラミン 3 分画 (アドレナリン, ノルアドレナリン, ドーパミン) のいずれも実験後の排出量が有意な増加が確認され, VR 負荷実験では実験前と高ストレス負荷実験後の比較でアドレナリンとドーパミンが高スト

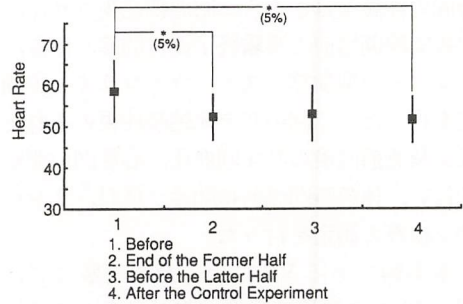


Fig. 1 Heart Rate Change in the Control Experiments

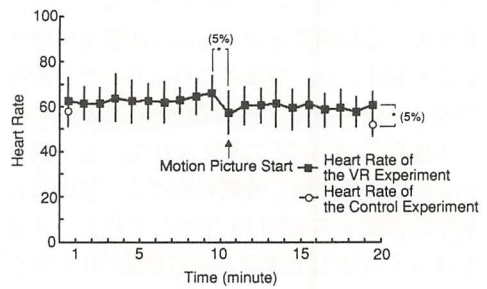


Fig. 2 Time Course of Heart Rate Change (Low Stress Interview)

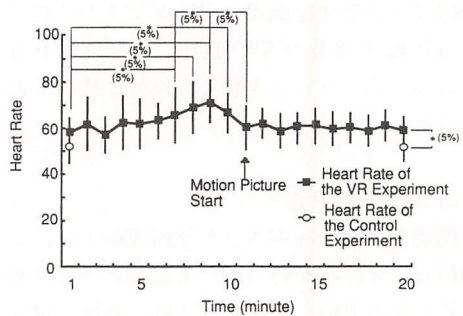


Fig. 3 Time Course of Heart Rate Change (High Stress Interview)

レス負荷後に有意な増加が認められた (Fig. 4)。

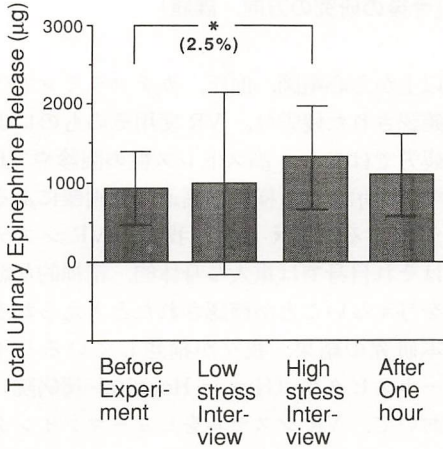


Fig. 4 Adrenalin Excretion during VR Experiment

3. 3 心理学的測定

3. 3. 1 クレペリン型加算テスト

心理的疲労の現れを調べるために、比較実験及びVR負荷実験の実験前と休憩時、比較実験及びVR負荷実験の実験前と実験後の動揺率の比較を行った。求められた動揺率の実験前、休憩時、実験後ごとの平均を比較すると、比較実験の動揺率は、休憩時に上昇する傾向をみせ、本実験では、動揺率に大きな変化がみられなかった。これらの変化には各々有意な差は認められなかった。また、本実験と比較実験の動揺率の平均を比較検討したが有意な結果は得られなかった。

3. 3. 2 問診

問診表1では、3つの項目群、眠気とだるさ・注意集中の困難・身体部位への疲労の投射について質問した。問診表2では、身体への影響について質問した。問診表3では、本実験全般に対して印象などのアンケートを行った。問診表1の第1項目群（眠気とだる

さ）については、環境ビデオを見せた比較実験では有意な差が認められ、本実験でも同じ様な傾向が見られた。また、VR負荷による本実験の実験前と実験後と比較しても、有意な差が認められた。第2項目群（注意集中の困難）については、実験前と実験後では統計的に有意ではなかったが注意集中が困難になる傾向が認められた。第3項目群（身体部位への疲労の投射）については、環境ビデオを見せた比較実験前後の差とVR負荷による本実験の前後の差を比較した所、VRでは身体部位への疲労の投射が有意に認められた。

アンケートでは、実験前の緊張を問う質問に対する訴えには、比較実験で緊張したという解答が有意に多かった他、第3項目群での身体部位への疲労の投射に関して、問診表2で質問した目の周りの訴えが本実験で多く認められた。

4. 考察

VR負荷実験中に問診画像が動画像に切り替わる時（実験開始後10分～11分の時点）で低ストレス負荷実験・高ストレス負荷実験ともに心拍数の有意な低下が認められたが、動画像では有意差は認められなかった。これよりVR負荷実験においてはVR使用によるストレス負荷よりも、心理的な問診が、緊張や心拍数の変化として表れるような興奮を示していると考えられた。

環境ビデオ注視およびVR負荷実験終了後の体温の変動は、比較実験よりもVR実験が有意に低いことが認められたが、アンケート結果から前者と後者の室温の温度差による可能性も考えられた。血圧ではビデオ注視とVR負荷実験の両方で血圧の有意な低下が認められたために、VRの使用がビデオ注視と比べて特に影響が強いとは言えない。

既に報告した実験で VR 負荷実験において統計的に有意ではないがアドレナリンの増加傾向を認めた。今回の VR 負荷実験でも実験前と高ストレス負荷実験後の値を比較したときアドレナリンの分泌量が約 70% 増加し、その変化は有意であった。しかし低ストレス負荷実験後ではアドレナリンの増加は確認されなかった。これらの結果から、VR 使用がアドレナリンの増加に関与しているのではなく、問診による心理的ストレスや、動画像による視覚的ストレスが、アドレナリンの増加に関与していると考えられる。

集中力の変化の指標となるクレベリン型心理検査における動揺率について、いくつかの比較を行ったが有意な差は認められなかった。これによりクレベリン型加算テストからは VR 使用による集中力の変化は確認されなかった。問診表 1 の第 1 項目群（眠気とだるさ）で、環境ビデオを注視させた比較実験で実験前と実験後を比較すると、比較実験では有意な差が認められ、本実験ではその傾向は認められたが有意差は認められなかった。よって比較実験で注視させたビデオが単調な映像であり、そのために疲労がでたと考えられ、心電図、血圧、カテコラミンでも本実験よりも比較実験のみに疲労が確認されている事も同じ理由と考えられた。

この事より VR 使用は単調な映像をビデオ注視するよりも疲労はないと考えられた。しかし第 3 項目群での身体部位への疲労の投射に関して、目の周りの訴えが多く、これは我々の開発した HMD に原因があると考えられ、これについては今後の改良が必要であると考えられた。

[今後の研究の方向、課題]

以上から心電図、血圧、カテコラミンで今回確認された疲労は、VR 使用そのものによる疲労ではなく、高ストレス性の問診や VR の中で提示される極度に高速の動画像による疲労であると考えられ、我々の VR システムはそれ自身では重大な身体的、精神的な影響を与えないことが確認されたと考えられる。

本研究の結果、我々が構想しているハイパーホスピタル（Hyper Hospital-超病院）において、VR システムをヒューマンインタフェースとして用いる際、すくなくとも健康男子での利用には問題はないと考えられた。

しかし問診で身体部位への疲労の投射に関して、目の周りの訴えが多かった事を併せて考えれば、HMD の改良がまだ不十分であり、今後は VR システムの軽量化等も考慮し改良を続ける必要があると考えられた。

[成果の発表、論文等]

- 1) 杉岡由喜子, 須藤三徳, 後藤源太, 忠津 聡, 中西裕二, 高橋祐一, 中山哲也, 山本康人, 五十嵐久子, 新藤邦元, 古田展康, 則武 淳, 山口隆美, 吉田敦也, 山崎清之, “仮想現実システムの人体に対する生理学のおよび衛生学的影响”, Human Interface News and Report, 9 (3) 303-312 (1994).
- 2) 古田展康, 五十嵐久子, 新藤邦元, 須田康史, 鈴木清人, 薬師寺信勝, 早坂智明, 星合清隆, 満武巨裕, 山岡徳光, 小林拓史, 則武 淳, 山口隆美, 吉田敦也, “電子情報ネットワーク上に展開され、仮想現実をインタフェースとする新しい医療空間 (Hyper Hospital) のシステム設計と試作”, Human Interface News and Report, 9 (3) 313-318 (1994).
- 3) 新藤邦元, 古田展康, 則武 淳, 五十嵐久子, 山口隆美, 山崎清之, “ハイパーホスピタルにおける仮想環境の実空間への拡張 (Virtual Re-Entry) とそのための、実空間操作体 (Virtual Stand-In)

- の開発, Human Interface News and Report, 9 (3) 319-324 (1994).
- 4) H. Igarashi, J. Noritake, N. Furuta, K. Shindo, K. Yamazaki, K. Okamoto, T. Yamaguchi, A. Yoshida, "Is the Virtual Reality a Gentle Technology for Humans? —An Experimental Study of the Safety Features of a Virtual Reality System—", Proceedings of the 1st International Workshop on Net-worked Reality in Tele-communication, 511-515 (1994).
- 5) J. Noritake, H. Igarashi, N. Furuta, K. Shindo, T. Hayasaka, K. Yamazaki, A. Yoshida, T. Yamaguchi, "The Hyper Hospital, A Networked Reality Based Medical Care System", Proceedings of the 1st International Workshop on Networked Reality in Telecommunication, 631-636 (1994).
- 6) N. Mitsutake, K. Hoshiai, H. Igarashi, Y. Sugioka, Y. Yamamoto, J. Noritake, K. Yamazaki, K. Okamoto, A. Yoshida, T. Yamaguchi, "A Preliminary Study of the Human Interface Using Event Related Potential for the Control of the Virtual Reality System", Proceedings of the Second Annual International Conference "Virtual Reality and Persons with Disabilities", 83-86 (1994).
- 7) T. Yamaguchi, J. Noritake, H. Igarashi, N. Furuta, K. Shindo, K. Yamazaki, H. Okino, A. Yoshida, "The Hyper Hospital—a Network Oriented Virtual Reality Based Medical Care System—", Proceedings of the Second Annual International Conference "Virtual Reality and persons with Disabilities", 164-169 (1994).
- 8) 萩田泰治, 吉田敦也, 山口隆美, "超病院における電子スタッフの発話音質が利用者に及ぼす影響", 第10回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, 391-396 (1994).
- 9) T. Yamaguchi, N. Furuta, K. Shindo, T. Hayasaka, K. Yamazaki, J. Noritake, H. Igarashi, A. Yoshida, "The Hyper Hospital —A Novel Medical Care System on the Virtual Reality Network—", Proceedings of the 16th Annual Intern'l Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 16, 1388-1389 (1994).
- 10) T. Yamaguchi, N. Furuta, K. Shindo, T. Hayasaka, H. Igarashi, J. Noritake, K. Yamazaki, A. Yoshida, "The Hyper Hospital —A networked reality based medical care system—", IEICE Transactions on Information and Systems, E 77-D(12) 1372-1378 (1994).
- 11) H. Igarashi, J. Noritake, N. Furuta, K. Shindo, K. Yamazaki, K. Okamoto, T. Yamaguchi, A. Yoshida, "Is the virtual reality a gentle technology for humans? —An experimental study of the safety features of a virtual reality system—", IEICE Transactions on Information and Systems, E 77-D(12) 1379-1384 (1994).
- 12) A. Yoshida, T. Yamaguchi, K. Yamazaki, "Quantitative Study of Human Behavior in Virtual Interview Sessions for the Development of the Hyper Hospital— A Network Oriented Virtual Reality Based Novel Medical Care System", IEICE Transactions on Information and Systems, E 77-D(12) 1365-1371 (1994).
- 13) 山岡徳光, 古田展康, 星合清隆, 五十嵐久子, 満武巨裕, 薬師寺信勝, 小林拓史, 高橋裕一, 中山哲也, 山本康人, 杉岡由喜子, 則武 淳, 鈴木清人, 早坂智明, 須田康史, 吉原佳正, 中西裕二, 山崎清之, 岡本克郎, 吉田敦也, 山口隆美, "バーチャルリアリティにより構築される新しい医療施設—ハイパーホスピタルのコンセプトおよび実装—", Journal of Advanced Science, 6(3/4) 65-71 (1994).
- 14) 中山哲也, 中西裕二, 則武 淳, 五十嵐久子, 吉田敦也, 山崎清之, 岡本克郎, 山口隆美, "仮想現実使用時の循環, 呼吸動態に対する影響の検討", Journal of Advanced Science, 6(3/4) 72-75 (1994).
- 15) 新藤邦元, 田中俊行, 須田康史, 五十嵐久子, 吉田敦也, 山崎清之, 岡本克郎, 山口隆美, "仮想現実使用時の尿中カテコールアミン・唾液 pH による疲労の測定", Journal of Advanced Science, 6(3/4) 76-79 (1994).
- 16) 高橋裕一, 後藤源太, 須藤三徳, 忠津 聡, 五十嵐久子, 吉田敦也, 山崎清之, 岡本克郎, 山口隆美, "仮想現実使用時の生理的および心理的疲労の定量的測定とこれにおよぼす諸要因の検討", Journal

- of Advanced Science, 6 (3/4) 80-88 (1994).
- 17) 山口隆美, “ハイパーホスピタル (超病院) の研究”, バイオインダストリー, 12 (2) 5-14 (1995).
- 18) 中西裕二, 早坂智明, 山口隆美, “ハイパーホスピタル (超病院) のための, エンドユーザ (患者) が構成を自由に変更できる仮想世界構築システムの概念と実装例”, Human Interface News and Report, 10 (2) 233-240 (1995).
- 19) 中山哲也, 忠津 聡, 杉岡由喜子, 古田展康, 新藤邦元, 小林拓史, 高橋裕一, 日下優子, 後藤源太, 須藤三徳, 山本康人, 山岡徳光, 早坂智明, 中西裕二, 山崎清之, 山口隆美, 人工現実感をもたらす生理的疲労の定量的検討—コントロール研究—, Human Interface News and Report, 10/(2) 241-248 (1995).

計算機の援用によるファジィ範疇法の 測定精度と使いやすさの改善

Improvement on Accuracy and Usability of the Method of Fuzzy Categories Using Computers

941021

研究代表者

京都工芸繊維大学工学部
電子情報工学科 助手

吉 川 歩

【研究の目的】

ファジィ範疇法は、「かなり高い」のように言語ヘッジと呼ばれる程度修飾語と被測定属性から構成された言語カテゴリーを目盛として測定された人間の主観に関連した量や程度（以下、主観量）を定量化する方法である。この手法では対象の主観量は言語カテゴリーに対応したファジィ集合を介して与えられるので、対象の主観量やカテゴリーの表す程度の境界の不明瞭さを考慮した定量化が反復測定を要せず行えるという特徴を持っている。その反面、カテゴリーのファジィ集合を被験者自身に同定させる必要がある。

このファジィ範疇法の主観量の測定精度や使いやすさを改善するために、すでに多重尺度図法や、Between 集合による間のカテゴリーの利用が提案され、実験を通してその有用性が検証されている。しかしこれらは測定値が得られた後の操作により精度を高める方法であるため、カテゴリーのファジィ集合の同定がうまく行われていなければ意味を成さない。したがってファジィ範疇法の測定精度および使いやすさの改善を行うためには、

ファジィ集合の同定法の改善が重要である。

従来、ファジィ範疇法ではファジィ集合の同定法として、ファジィグラフ評定尺度図法（以下、FGRS 法）が利用されていたが、次章で述べるように測定精度、特に使いやすさに関する問題点を有している。これまで同定法の使いやすさに着目した研究はほぼ皆無であるが、同定の正否に重要な意味を持つため軽視することはできない。またこれはファジィ範疇法のみならず、ファジィ集合を用いた応用一般に共通する重要な問題である。

そこで本研究では、計算機を援用することにより使いやすさを改善した新しいファジィ集合の同定法を提案する¹⁻³⁾。そして境界漸近推定法と名づけられた提案手法と実際の応用でよく利用されている FGRS 法の 2 つを用いたファジィ集合の同定実験を通して、両手法の使いやすさ、得られるメンバシップ関数（以下 MF）の関係、反復同定の精度を比較し、提案手法の有用性を明らかにする^{4,5)}。

[研究の内容、成果]

1. 提案した同定法^{1,2)}

1.1 従来法の問題点

ファジィ集合の同定法の使いやすさに影響を及ぼす主たる要因として次の2点を挙げることができる。

- ① 同定法のユーザインタフェースの良否
- ② 同定の際にファジィ集合に関する知識を要求する程度

特に後者はファジィ集合に関する専門的な知識を持たない同定者に対する影響が大きい。ファジィ範疇法の回答者の場合は、いわゆるファジィ理論に関する素人であることが多いため、その影響を軽減するような方法であることが望ましい。

従来提案されているファジィ集合の同定法は回答方法により、該当要素応答法と呈示要素評定法の2つに大別することができる。前者は呈示された所属度に対応する要素あるいは要素の範囲を回答させる方法であり、代表的な手法としてFGRS法が知られている。この手法は「所属度1」と「所属度0より大」の2つの範囲（1レベル集合、台集合）を尺度図上で直接回答させるものであり、実

際の応用でも広く利用されている。後者は逆に呈示された要素の所属度を回答させる方法であり、代表的な手法としては直接評定法がよく知られている。この手法では与えられた要素に対する所属度を数値もしくは尺度図を用いて0から1の実数値として回答させる。

これらの手法を比較したものが表1である。使いやすさへの影響についてみると、まずFGRS法では回答の際のレベル集合の理解およびファジィ集合の想起の必要性が使いやすさを低下させる。さらに4端点により形状が決定されるため、それらの記入のずれの影響が大きいこと、また端点記入の際の自由度が大きすぎて迷うことが挙げられる。一方直接評定法では、所属度を数値として回答させるため所属度の適切な理解が必要である。さらに形状の表現に不要な要素の回答を要求するため回答回数が多くなり、被験者に負担を強いることとなる。

ところでこのFGRS法の使いやすさに影響する要因は、レベル集合端点の直接回答に起因している。つまりこの点を回避すれば使いやすさの改善が可能となる。そこで回答方法に呈示要素評定法を用い、さらに回答対象要素の呈示方法を工夫することにより、直接評定法で見られた問題点をも回避し、FGRS

表1 代表的な3種のメンバシップ関数同定法の比較

名 称	ファジィグラフ評定尺度図法	境界漸近推定法	直接評定法
手法の大別	該当要素応答法	折衷法	呈示要素評定法
回答内容	1レベル集合、台集合の端点	呈示要素の所属度の3値評定	呈示要素の[0, 1]所属度
得られる形状	台形型	台形型	任意形状
回答回数	最大4	通常全要素数の1/2以下	全要素数
使いやすさへの影響	ファジィの知識の要求	(特になし)	・所属度の適切な理解が必要
	ユーザ・インタフェース	・回答回数が多くなる場合がある(形状に依存)	・回答を要しない要素の回答を要求する ・回答回数が多い

法と同等の MF を与える方法を提案する。

1.2 提案手法の原理と特徴

FGRS 法では図 1 のように、同定対象である凸ファジィ集合に対して 1 レベル集合、台集合に対応する閾値 λ_1 , λ_0 を設定し、それらの比較により端点を決定しているとみなせる。これに対し、提案手法では上記の閾値にもとづく呈示要素の所属度の 3 値評定結果 {所属, 非所属, どちらとも言えない} をもとに、レベル集合の端点が含まれる区間、つまり両端での評定が異なる区間の幅を漸近的に狭めてその位置を近似する。区間幅の狭め方として、評定が異なる区間の中点を評定させ 2 分割する方法を採用した。実際の手順は図 1 に示したようになる。なお以下の説明中の括弧内の数字は図中の要素の回答順序に対応している。また図中の例では、所属度の評定を要素と同定対象の表す程度の一一致の度合いとして回答させているので「一致」、「不

致」を用いている。

- ① 全体集合を 4 等分する 5 要素の所属度を 3 値評定させる (1~5)。
- ② 「一致」を 1 端にだけ持つ区間が存在すれば、その中点を評定させる (3~4)。もし存在しなければ、全区間の中点を評定させる。
- ③ 区間幅が最小幅に達するまで②を繰り返す (6~8)。
- ④ もう一方の端点についても行う (9~11)。
- ⑤ 「不一致」を 1 端にだけ持つ区間を見出し、その中点を評定させる (3~6)。
- ⑥ 区間幅が最小幅に達するまで⑤を繰り返す (12~13)。
- ⑦ もう一方の端点についても行う (14)。
- ⑧ 「一致」と評定された要素の上限 (9), 下限 (4) を 1 レベル集合の上限, 下限の推定値と、また「不一致」のうち 1 レベル集合の下限より左側に位置するものの中で最大値 (13) を台集合の下限の推定値、また 1 レベル集合の上限より右側に位置するものの中で最小値 (14) を台集合の上限の推定値とする。

この操作により FGRS 法から得られる MF と同等のものが得られることがわかる。本手法は境界を漸近的に推定するので、境界漸近推定法 (Boundary ASymptotic Estimation method) と名づけ、以下 BASE 法と呼ぶ。

BASE 法の特徴は次の通りである。

- ① 回答者に課せられた作業は与えられた要素の所属度の 3 値評定だけであるため、MF の形状を想起する必要も、レベル集合の概念を理解する必要もない。
- ② 端点の直接回答を要しないため、それ

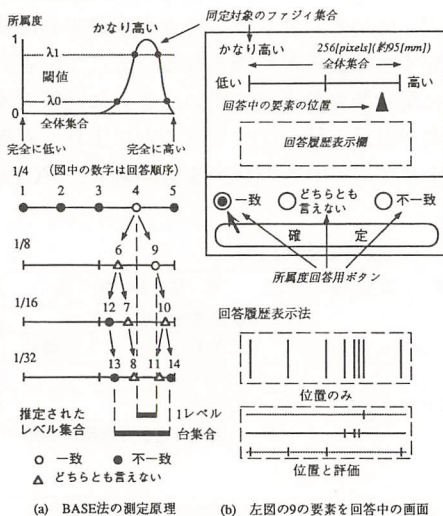


図 1 BASE 法による MF 同定の原理と計算機への実装例 (実験用画面)

らの記入ずれが形状に与える影響，記入の際の迷いなどは解消されている。

- ③ 3 値評定であるため過度に専門的なファジィ集合の知識も必要としない。
- ④ 計算機を援用して必要最小限の要素だけを回答させているため，直接評定法に比べて回答回数を軽減できる。
- ⑤ 3 値評定の際に，回答者に「所属」，「非所属」の判断に迷ったものは「どちらとも言えない」と回答するように教示することで，強制 2 者択一回答の心的な負担を軽減できる。また 3 値評定の閾値を理想値の 1，0 にそれぞれ近づけることもできる。

しかし表 1 のように FGRS 法に比べて回答回数が増加する点は使いやすさを低下させる可能性がある。この点については後に実験結果を通して検証する。

2. 実装時に考慮すべき事項³⁾

2.1 実験の目的および方法・条件

BASE 法を利用するためには計算機に実装する必要がある。このとき数種の回答履歴表示法が適用可能であるが，これらが同定法の使いやすさや得られる MF の形状に影響を及ぼす可能性がある。このため推奨される回答履歴表示法を明らかにすることは重要である。

また計算機を用いているため，各要素の評定に要した時間を測定することが可能である。すでに評価に対する確信度が回答時間に反映されるといふ知見が他の研究者により得られている。これに従えば，「所属」，「非所属」の評定の中で回答時間の長いものはその評定の確信度が低い，つまり所属度が 0.5 側に近寄っていることになるので，同定作業中に

「どちらとも言えない」とシステム側で修正してやることにより，同定される MF の形状の同定精度を高められる可能性がある。

そこで上記 2 項目を検証するため，9 種の言語ヘッジと「高い」を組合わせた言語的な高さの表現を BASE 法を用いて同定する実験を行った。図 1 のような BASE 法のインタフェースを Macintosh 上に構築し，実験に用いた。なお最小幅は全体集合長の $1/32$ とした。回答履歴表示法として図 1 に示したように「履歴表示なし」，「回答要素位置のみ表示」そして「要素位置とその評定」の 3 種を用いた。各表示法に 3 種のヘッジを割り当てた。被験者は 36 名であった。なお表示法の実験順序および履歴表示法とヘッジの組合せの影響を相殺するため，被験者ごとに呈示順序，組合せを変えた。また実験終了後に 3 種の回答履歴表示法の使いやすさを一対比較法により回答させた。

2.2 結果・考察

まず回答履歴表示法の影響についてみると，それらの違いは MF の形状および回答時間にほとんど影響を及ぼさないことがわかった。一方主観的な使いやすさの比較については，「位置および評定」を表示する方法が「無表示」(24 : 10 [名])，「位置のみ」(22 : 2 [名]) よりも使いやすくと評価された。またそれらの評価の比は 5，0.1% でそれぞれ有意であった。これより客観的な形状等には差はないものの主観的な使いやすさから，回答した要素位置と評定結果を表示する方法が推奨される。

また MF 形状の推定精度の改善への回答時間の利用可能性についてみてみると，確かに他の要素よりも回答時間の長い要素は存在する。ところが，その要素が常に端点に位置

しているとは限らないことと、また回答中に長いという判断を行うことが困難であるという理由から、同定中に同定精度の改善に利用することは困難である。しかし同定終了後に同定結果の信頼性を検討するために回答時間を有効に利用することは可能である。

3. 提案手法の有用性の実験的検証^{4,5)}

3.1 実験の目的

BASE法の使いやすさの改善に関する理論的な検討およびBASE法の計算機への実装時の検討事項については既に詳述した。そこで本章ではBASE法とFGRS法を用いたMFの同定実験を通して、BASE法の使いやすさの改善の効果について検証する。また同定法として有効に機能していることを検証するため、両手法から得られるMFの形状の比較を行う。さらに同一MFを反復して同定した際の反復精度を両手法で比較し、BASE法の同定法としての有効性を明らかにする。

3.2 実験方法・条件

実験は非反復実験と反復実験から構成されている。両実験とも6種の言語ヘッジと「高い」から構成された言語的な高さの程度を同定対象として用いた。BASE法は前章の結果を受け、図1の位置と評定をともに表示する手法を用いた。またFGRS法もMacintosh上に実装した。BASE法と同じ256[pixels]の数直線上に、1レベル集合に相当する「最もよく表している範囲」と台集合に相当する「表しているとみなせる範囲」をマウスを用いて直接画面上で回答させた。その位置をpixelを単位として測定した。なお同定対象の呈示順序はBASE法、FGRS法

とも全被験者同一とした。

被験者は非反復実験が29名、反復実験が10名であった。なお反復実験の被験者は非反復実験の参加者から任意に選択した。両実験とも被験者を2群に分け、一方はBASE法から、他方はFGRS法から実施した。また反復実験は時間をおいて、合計4回同定を行わせた。ただし第1回目の結果は非反復実験の結果を流用した。非反復実験終了後と反復実験第4回終了後にそれぞれ同定法の使いやすさの主観評価を一对比較法により測定した。

3.3 結果・考察

まず非反復実験から得られた使いやすさの主観評価についてみると、BASE法：差なし：FGRS法の比は19：2：8[名]となった。BASE法とFGRS法の比に有意差は認められなかったものの、BASE法が使いやすいと評価される傾向がある。次に反復実験による使いやすさの評価の変化についてみると、非反復実験の評価はBASE法：FGRS法＝8：2であったが、第4回実験後の評価は、3名がBASE法からFGRS法へ変化したため、5：5となった。この変化の理由として反復実験によりMFの形状が想起しやすくなったことが挙げられ、その結果回答回数が少ないFGRS法が使いやすいと評価されるようになったものと推察される。

非反復実験から得られたBASE法、FGRS法の1ヘッジ当たりの回答時間の全被験者の平均値はそれぞれ42.15[s]、16.67[s]であり、BASE法が約2.5倍の時間を要する。先の使いやすさの評価と併せて考えると多少時間を要しても与えられた要素に対する回答だけでMF形状の同定ができる方が好まれることがわかる。またBASE法の1

表2 実験から得られた指標の平均値と標準偏差

		データ数	一 致 度	類 似 度	形状の指標	位置の指標
非反復実験	BASE-FGRS	138	0.993 (0.047)	0.624 (0.181)	0.724 (0.153)	0.963 (0.032)
	BASE-FGRS	240	0.995 (0.043)	0.659 (0.167)	0.728 (0.144)	0.971 (0.026)
反 復 実 験	BASE	360	0.994 (0.036)	0.768 (0.177)	0.832 (0.112)	0.975 (0.030)
	FGRS	360	0.980 (0.113)	0.690 (0.211)	0.819 (0.113)	0.972 (0.028)

ヘッジ当たりの回答回数は12.6 [回] であった。直接評定法の33 [回] よりも少ない回数で同定が終了しており、動的な要素選択の効果が現れている。

次に両手法から得られたMFを比較する。全体集合長を1に規格化し、そして非反復実験、反復実験とも被験者の各ヘッジごとに一致度、類似度、位置の指標、形状の指標を計算した。これらの指標は、2つのMFの重なり方、位置と形状の完全な一致の度合い、位置のずれの度合い、そして形状の差異を表している。

表2に全被験者の平均値を示した。表より両実験とも一致度が1に近い値を取っていることから、互いの1レベル集合の間で共通区間を有していることがわかる。一方、類似度は0.624, 0.659となり、両手法から得られたMFは完全には一致していないことが見て取れる。さらに形状、位置の指標がそれぞれ0.72, 0.96程度の値を示していることから、この類似度の低下には形状の差異と位置のずれの両者が関与していることがわかる。

この類似度の低下を評価する際に、両手法の最小測定幅を考慮する必要がある。その幅は今回の実験条件では、BASE法は全体集合長の1/32であるが、FGRS法は1/256である。このため得られる端点の位置は完全に一致せずBASE法の最小幅分の不一致は避けがたい。仮にBASE法から得られたMFの平均形状(1レベル集合幅: 0.138,

台集合幅: 0.259)がBASE法の最小幅である0.031平行移動したとすると、元のMFとの位置の指標は0.969に低下する。また平均形状の4つの端点を最小幅だけ外側に広げた(つまりそれぞれの幅が0.062長くなった)とすると、形状の指標は0.759に低下する。さらにFGRS法の目測によるずれも加わる。これらより、本実験の類似度の低下は測定原理および目測によるずれとして説明可能であり、これらを除けば同等のMFが測定されていると結論づけることができる。

最後に両手法の同一MFの反復同定の精度について考察する。表2からわかるように、両手法とも手法内で求めた指標の方が、手法間で求めた指標よりも高くなる傾向がある。また反復同定から得られた指標を手法間で比較すると、BASE法がFGRS法に対して高い値を取っていることが見て取れる。特に類似度、一致度はそれぞれ0.1, 5%で有意な差が認められた。このことからBASE法は使いやすさの改善にとどまらず、反復同定精度も改善できていることが明らかになった。

4. まとめ

以上本研究の結果をまとめると以下のようになる。

- ① FGRS法におけるレベル集合の直接回答に起因する使いやすさの低下を改善するために、呈示要素の3値評定をもとに計算機を援用して台形型MF

を同定する BASE 法を提案した。

- ② FGRS 法との実験的な比較を通して、BASE 法が使いやすさを改善していること、FGRS 法と同等の MF が得られること、そして反復同定精度で FGRS 法よりも優れていることを明らかにした。

ファジィ範疇法の中でカテゴリーの同定が最も測定精度に直接的な影響を与え、またその同定法の使いやすさが全体の使いやすさに影響している。したがってファジィ範疇法のカテゴリーの同定に BASE 法を適用することにより、ファジィ範疇法そのものの使いやすさ、精度を改善できるものと考えられる。

[今後の研究の方向、課題]

今後に残された課題に、カテゴリーの最適構成法がある⁶⁾。目盛の定量化にあたるカテゴリーの同定法は今回の研究により改善されたが、その目盛の選択法については残された形となった。個人に適応したカテゴリーの配置の条件を見出すことは、それを作製する実験者の立場から、それを使って実際に回答

する回答者の立場からも重要な意味を持つ。これにより更なる改善が期待できる。

[成果の発表、論文等]

- 1) 吉川ほか、計算機の援用によるメンバシップ関数同定法の改良、第 4 回 FAN シンポジウム講演論文集、7-12 (1994)
- 2) 吉川ほか、計算機を援用した台形型メンバシップ関数同定法の改良、平成 6 年電気関係学会関西支部連合大会講演論文集、G 303 (1994) (奨励賞受賞)
- 3) 吉川ほか、新しい MF 同定法—境界漸近推定法 (BASE 法) —の実験的評価、ノンエンジニアリングファジィ研究会第 5 回ワークショップ講演論文集、122-125 (1995)
- 4) 吉川ほか、計算機を利用したメンバシップ関数同定法の実験的比較、第 39 回システム制御情報学会研究発表講演会論文集、353-354 (1995)
- 5) 吉川ほか、2 種のメンバシップ関数同定法の客観的・主観的比較—ファジィグラフ評定尺度図法と境界漸近推定法について—、第 11 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、405-408 (1995)
- 6) 吉川・西村、カテゴリー尺度図の測定しやすさ感とカテゴリー配置との関係、第 11 回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム講演論文集 (1995) (印刷中)

索引 (掲載号)

007 (人間工学)

掲載号

- ◆ 音声対話時の引き込み現象の解明とそのヒューマン・インタフェースへの応用 (911019) 2
Analysis of Entrainment in Interpersonal Communication and Its Application to Human Interface
渡 辺 富 夫 山形大学工学部電子情報工学科 (助教授)
- ◆ 自動車内空調装置による生体に及ぼす影響 (931017) 3
Thermal effects of automatic air conditioner on human performance in closed space
宮 崎 正 己 早稲田大学人間科学部 (教授)
- ◆ 体内時計ホルモン用センサーの開発と応用 (941012) 4
Development and Application of the Sensor Electrode for the Time-Keeping Hormone
田 畑 満 生 西東京科学大学理工学部バイオサイエンス学科 (教授)

534 (振動, 超音波, 音響, 音声物理)

- ◆ 英語連続音声の日本語音声への変換合成 (901012) 1
Production of Japanese Continuous Speech from English Continuous Speech
有 木 康 雄 龍谷大学理工学部電子情報学科 (教授)
- ◆ 磁気センサを用いた調音器官の運動計測システムの開発研究 (911011) 2
Articulatory Measuring System Using Magnetometer Sensors
園 田 頼 信 熊本大学工学部電気情報工学科 (教授)

535 (光学, 光学部品, 機器, 色彩)

- ◆ 位相型空間光変調素子を使った実時間光処理の研究 (911006) 1
Real-Time Optical Information Processing by Using a Spatial Light Phase Modulator
大 坪 順 次 静岡大学工学部 (助教授)
- ◆ 制約伝搬計算に基づく配色支援システムに関する研究 (901016) 1
Color Design System Based on Constraint Propagation
松 山 隆 司 岡山大学工学部情報工学科 (教授)

548 (結晶学, 液晶)

- ◆ 液晶非線形光学効果による擬生体視覚情報処理複合回路網に関する研究 (911009) 1
Simulation of Visual Excitation Using Nonlinear Optics of Liquid Crystals
杉 村 明 彦 大阪産業大学工学部情報システム工学科 (助教授)
- ◆ コレステリック液晶の複合化による偏光板不要の液晶光シャッターの
開発に関する研究 (931003) 3
Research on the Development of New Liquid Crystal Optical Shutter without Usage of
Polarizers by Utilizing Cholesteric Liquid Crystals and Polymer Complexes
浅 田 忠 裕 京都大学工学部 (助教授)
- ◆ 液晶における電気伝導メカニズムの解明 (941016) 4
Electric Conduction Mechanism in Liquid Crystals
間 多 均 帝京大学理工学部 (助教授)

57 (生物科学, 生体科学, バイオテクノロジー)

- ◆ 生物神経系機能の情報処理技術への応用基盤の確立 (921010) 3
Functional Formulation of Biological Neuron Network as A Basis of
Information Processing Technologies
下 澤 楯 夫 北海道大学電子科学研究所 (教授)
- ◆ 人工神経による昆虫の行動の解明と制御 (931010) 4
Analysis and Control of Insect Behavior Using Artificial Neural Networks
下 山 勲 東京大学工学部機械情報工学科 (助教授)
- ◆ 香りの与える心理的影響の評価システムに関する研究 (941013) 4
The Study of the Evaluation System of the Emotion Evoked by the Odor
辻 本 浩 章 大阪大学基礎工学部 (講師)

61 (医学, 医用電子機器, 安全工学)

- ◆ CAD 技術の外科手術への応用 (901011) 1
Application of CAD Technology for Surgical Operation
千代倉 弘 明 慶応義塾大学環境情報学部 (助教授)
- ◆ 皮膚電気反射を用いた覚醒と睡眠の計測制御 (911016) 1
Control and Estimation of Human Emotion and Drowsiness Using Galvanic Skin Reflex
山 本 辰 馬 岡山大学工学部 (教授)
- ◆ 肺癌早期発見を目的とした専用 X 線 CT システムにおける
診断支援サブシステムの開発 (931018) 3
Computer Aided Diagnosis for the Lung Cancer X-ray CT Screening System
山 本 眞 司 豊橋技術科学大学知能情報工学系 (教授)
- ◆ 重度身体障害者介助システムに用いる非接触注視点検出法の研究 (941004) 4
A Study on a Non-Contact Eye-Gaze Detection Method Used on
Support Systems for Handicapped Persons
海老澤 嘉 伸 静岡大学工学部 (助教授)

621.315 (電子材料, 半導体, 超電導)

- ◆ VLSI GaAs デバイスの新しいオーミック・コンタクト材の開発研究 (911014) 1
Development of New Ohmic Contact Materials for VLSI GaAs Devices
村 上 正 紀 京都大学工学部 (教授)
- ◆ マイクロアクチュエータ用形状記憶合金薄膜の開発 (931016) 3
Development of Shape Memory Alloy Thin Films for Microactuators
宮 崎 修 一 筑波大学物質工学系 (助教授)

621.318 (磁気材料, 永久磁石, 電磁石)

- ◆ 高温超伝導体による高感度磁束センサー (941014) 4
High Sensitive Magnetic Sensors using High Critical Temperature Superconductor
中 根 英 章 室蘭工業大学電気電子工学科 (助教授)

621.375.8 (レーザ, 半導体レーザ, レーザ装置)

- ◆ レーザスペckル法による粘膜血流画像化装置の開発 (901002) 1
Visualization of Blood Flow in Gastric Mucosa Using Laser Speckle Method
藤 居 仁 九州工業大学情報工学部 (教授)

621.38 (半導体素子, 光電素子, X 線装置)

- ◆ X 線用多層膜反射鏡を用いた軟 X 線増幅の研究 (901007) 1
Promotion of Soft X-ray Intensity by a Multilayer Mirror
原 民 夫 理化学研究所 (研究員)

- ◆ 光触媒反応によるⅡ-VI族半導体の物性制御とディスプレイデバイスへの
応用に関する基礎研究 (901008) 1
Fundamental Research on Photocatalytic Growth of Ⅱ-VI Semiconductors
for Their Property Control and Applications to Display Devices
藤 田 茂 夫 京都大学工学部 (教授)

621.39 (電気通信工学, 通信理論, 情報理論)

- ◆ コミュニケーション行動の実態と通信系ニューメディアの受容性に関する研究 (901018) 1
Acceptance of New Telecommunication Media and Daily Communication Behavior
吉 井 博 明 文教大学情報学部 (教授)
- ◆ 広域ネットワークにおけるマルチキャスト技術の研究 (901010) 2
Study on Multicasting Technology in Wide Area Networks
森 島 晃 年 財団法人京都高度技術研究所 (研究員)
- ◆ 高度情報化生産システムにおける通信ネットワーク構成技術の開発 (911012) 1
Development of Construction Technology for Communication Networks
in Manufacturing Systems
手 塚 慶 一 大阪大学工学部通信工学科 (教授)

681.3 (情報処理, データの自動処理, 計算機)

- ◆ 自己組織により空間パターン生成回路を構成するニューラルネットワークの研究 (901001) 1
Study on Neural Network Organizing Pattern Generation Circuit by Self-Organization
岡 部 洋 一 東京大学先端科学技術研究センター (教授)
- ◆ 人間の脳の記憶系と計算機ネットワークとの共生進化についての数理的研究 (931006) 3
Mathematical Study on Symbiotic Evolution of Memory System for the
Human Brain and Computer Network
宇佐見 義 之 神奈川大学工学部物理学教室 (助手)

681.301 (情報処理の理論)

- ◆ 適応可能な論理演算 (Fuzzy²) の開発 (921006) 2
On an Adaptive Logic (FUZZY²)
太 田 道 男 筑波大学構造工学系 (教授)

681.302 (情報処理システム, データベース, 構成, 装置, 要素)

- ◆ エネルギー・データの視覚・情報化に関する研究 (901004) 1
A Study on Visualization and Informative Processing of Energy Data
辻 毅一郎 大阪大学工学部 (教授)
- ◆ 初心者のための情報処理教育支援システムの開発 (901003) 1
Development of a System for Beginner to Support an Information Processing Education
山 田 善 一 京都大学情報処理教育センター (長・教授)
- ◆ 並列処理アルゴリズム開発の自動化を指向する設計支援システム (911001) 2
Design Support System for Developments of Algorithms in Parallel Processings
阿 曾 弘 具 東北大学工学部情報工学科 (教授)
- ◆ 最適化問題のニューラル解法システムの開発 (921003) 2
Neural Solution Systems for Optimization Problems
浦 浜 喜 一 九州工業大学情報工学部電子情報工学科 (助教授)
- ◆ 広帯域信号の効率の圧縮への応用を考えた聴覚モデルの構成に関する研究 (921005) 2
Modeling of Auditory System for Data Compression of Wideband Audio Signal
江 端 正 直 熊本大学工学部 (教授)

- ◆ 英日会話文データベースの構築とこれに基づく会話文の翻訳と
慣用表現検索システムの研究 (911007) 2
English-Japanese Conversational Text-base Construction and Study on Conversational Text
Translation System with Idiomatic Expression Retrieving
河 口 英 二 九州工業大学工学部 (教授)
- ◆ EXAFS 解析手法の標準化に関する研究 (901005) 2
Standardization of the Data Analysis of EXAFS
黒 田 晴 雄 東京理科大学総合研究所 (教授)
- ◆ 境界要素法による設計感度解析手法を取り入れた CAE システムの
開発に関する研究 (921014) 3
Development of CAE Systems Based on Boundary Element Design Sensitivity Anslysis Approach
松 本 敏 郎 信州大学工学部生産システム工学科 (助教授)
- ◆ 学習中の学習者の発話分析にもとづく教育用ソフトの評価手法の開発 (921017) 3
Protocol Analysis: An Alternative Approach to the Evaluation of Educational Software
余 田 義 彦 東京家政学院筑波短期大学情報処理科 (助教授)
- ◆ 人間—機械間会話性向上に関する高次認知機能とそのための
ニューラルネットの構成法の研究 (921020) 3
Study on Higher Cognitive Functions and Artifitial Neural Networks for Human-Machine Interaction
渡 邊 一 央 北海道工業大学工学部 (教授)
- ◆ 三次元オプティカルフローの高速処理に関する研究 (931008) 4
High Speed Analysis of a 3-D Optical Flow Problem
近 江 和 生 大阪産業大学工学部情報システム工学科 (助教授)

681.306 (ソフトウェア, OS, 言語, 開発手法)

- ◆ 音声認識アルゴリズムの大語彙向き高度化に関する研究 (911008) 1
A Study on Advanced Algorithms for Large Vocabulary Speech Recognition
好 田 正 紀 山形大学工学部 (教授)
- ◆ 高並列計算機に於ける単一仮想空間上の並列オブジェクト指向
プログラミング言語の研究 (921013) 2
Studies on the Parallel Object-Oriented Programming Language with Shared Virtual
Space for Massively Parallel Computers
牧之内 顕 文 九州大学工学部情報工学教室 (教授)
- ◆ フリーハンド図面の自動認識に関する研究 (941006) 4
Study on Automatic Recognition Method of Freehand Drawings
加 藤 博 一 大阪大学基礎工学部システム工学科 (助手)
- ◆ 設計解候補創出による概念設計支援 (941007) 4
A Method of Creating Candidates for Computer Aided Conceptual Design
川 上 浩 司 岡山大学工学部 (助手)

681.306.1 (AI, ファジイ)

- ◆ 加工プロセス最適化のためのファジイ理論の応用 (911004) 1
Application of Fuzzy Theory for Optimizing Machining Process
稲 崎 一 郎 慶応義塾大学理工学部 (教授)
- ◆ 制御戦略知識の獲得学習に基づく知的ファジイ制御に関する研究 (901017) 2
Development of Intelligent Fuzzy Control Systems with a Learning Capability of
Strategic-Skill Acquisition
榎 木 哲 夫 京都大学工学部 (助手)

- ◆ 計算機の援用によるファジィ範疇法の測定精度と使いやすさの改善 (941021) 4
Improvement on Accuracy and Usability of the Method of Fuzzy Categories Using Computers
吉 川 歩 京都工芸繊維大学工芸学部電子情報工学科 (助手)

681.306.2 (画像処理, 人工現実感)

- ◆ 大規模仮想空間を歩行するための人工現実感 (911005) 1
Artificial Reality for Walking Through Large Scale Virtual Space
岩 田 洋 夫 筑波大学構理工学系 (講師)
- ◆ ファジィ・ニューラルネットによる線画像の認識 (901019) 1
Line Drawing Image Recognition based on Fuzzy Neural Network Technology
廣 田 薫 法政大学工学部計測制御教室 (教授)
- ◆ 計算機仮想空間における人間の運動制御特性に関する研究 (911017) 1
Study on Human Motor Control Characteristics in the Virtual Reality Space
吉 澤 誠 豊橋技術科学大学知識情報工学科 (助教授)
- ◆ 作業空間の形状情報を高速に獲得するロボットビジョンシステムの検討 (911013) 2
On a Vision System for Shape Construction of 3D Robotic World
登 尾 啓 史 大阪電気通信大学工学部精密工学科 (助教授)
- ◆ 内視鏡画像のテクスチャ解析とその診断への応用に関する研究 (921015) 3
Texture Analysis of Endoscopic Image and Its Application to Diagnosis
三 宅 洋 一 千葉大学工学部情報工学科 (教授)
- ◆ 画像時系列からの動きの検出と評価の研究 (931002) 3
Detection of Movement of Living Organs and their Evaluation from Image Sequences
赤 塚 孝 雄 山形大学工学部 (教授)
- ◆ ファジィ・インターフェースをもつニューラル画像処理回路 (931005) 3
Neural Image Processing Circuit Having Fuzzy Interface
上 野 文 男 熊本電波工業高等専門学校 (校長)
(元熊本大学工学部 教授 工学部長)
- ◆ 立体仮想臓器を用いた人工現実感を伴う解剖シミュレータの開発 (931021) 4
Development of Simulator for Anatomy with Attendance to
The Reality Using Stereoscopic Virtual Internal Organs
若 松 秀 俊 東京医科歯科大学医学部保健衛生学科 (教授)
- ◆ 新しいサブバンド方式による超高精細画像情報圧縮の研究 (941011) 4
Studies on New Subband Schemes for Data Compression of Super High-Definition Images
谷 本 正 幸 名古屋大学工学部 (教授)
- ◆ ヴァーチャル・リアリティ (仮想現実感) の医療への応用のための基礎研究 (941019) 4
An Application of Virtual Reality to Medical Care
山 口 隆 美 東海大学開発工学部医用生体工学科 (教授)

681.32 (ハードウェア, 電子計算機, ASIC)

- ◆ 4次元コンピュータグラフィックスのための超並列計算機
アーキテクチャに関する研究 (921008) 2
A Study on Massively Parallel Processing Systems for 4-Dimensional Computer Graphics
小 林 広 明 東北大学大学院情報科学研究科 (助教授)
- ◆ 超高速通信マルチポートメモリ構造・高並列処理コンピュータの試作研究 (921012) 2
Massively Parallel Computer Based on High-Speed Communication by Multi-port Memory
堀 口 進 北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科 (教授)
- ◆ 適応デバイスと自己組織化機能に関する研究 (921018) 2
Research on Adaptive Devices and Self-organization Function
米 津 宏 雄 豊橋技術科学大学電気・電子工学系 (教授)

- ◆ 混合モード回路シミュレータの開発 (921001) 3
Development of Mixed-Mode Circuit Simulator
浅井 秀 樹 静岡大学工学部光電機械工学科 (助教授)

681.327 (入出力装置, マンマシンインタフェース, 照合, 認識装置)

- ◆ 計算論的学習理論とそのマンマシンインタフェースへの応用 (901013) 1
Algorithmic Learning Theory and Its Applications
有 川 節 夫 九州大学理学部基礎情報学研究施設 (教授)
- ◆ 身振りのコード化とヒューマン・インタフェースへの応用 (901015) 1
Gesture Coding and Its Application to Human Interface
黒 川 隆 夫 京都工芸繊維大学工芸学部 (教授)
- ◆ 連続音声認識のための単語連想機構の構築に関する研究 (911010) 1
Construction of Word Associative Processor for Speech Recognition System
関 口 芳 廣 山梨大学工学部 (助教授)
- ◆ CAD システムにおけるマン・マシンインタフェースに関する研究 (901006) 1
A Study of Man-Machine Interface in Computer Aided Design System
橋 本 正 治 摂南大学工学部機械工学科 (教授)
- ◆ 手先の自然な動きを入力とするインタフェースの研究 (901009) 1
A Research of Man-computer Interface Using Natural Hand Movement
辺 見 一 男 長崎総合科学大学情報科学センター (講師)
- ◆ 高分解能触覚画像表示装置の開発 (911018) 1
The Development of a High Resolution Tangible Display Screen
米 沢 義 道 信州大学工学部情報工学科 (教授)
- ◆ 重度障害児のメンタルリハビリテーションのための図形表現システムの開発 (921009) 2
A Study on Cognitive Rehabilitation of the Handicapped Children by Computer Based Drawing System
近 藤 文 良 滋賀大学教育学部 (助教授)
- ◆ 視覚障害者のための触覚と音声による図情報表現システムの研究 (921007) 3
A Study on a Diagram Acquisition and Generation System for Visually Handicapped
Persons Using Tactile and Auditory Senses
大 西 昇 名古屋大学 (教授)
- ◆ 人間と機械の知的コミュニケーションに関する研究
多指ロボットハンドの知能化を具体例として (921011) 3
Study on Intelligent Man-Machine Communication Focusing on Multi-Fingered Robot Hands
中 村 仁 彦 東京大学工学部 (助教授)
- ◆ 調音結合処理のための文脈効果モデルに関する研究 (931001) 4
A study on contextual effect models dealing with co-articulation
赤 木 正 人 北陸先端科学技術大学院 大学情報科学研究科 (助教授)
- ◆ 自然な握み動作を入力とする 3 次元インタフェースに関する研究 (931004) 4
A study on 3-D Natural Interactive Interface by Handling Motion
井 上 和 夫 立命館大学理工学部 (教授)
- ◆ 音声認識における聴感特性に基づく隠れマルコフモデルの耐雑音性の改善に関する研究 (941018) ... 4
A Robust Hidden Markov Model for Noisy Speech Recognition
by Incorporating Auditory Characteristics
松 本 弘 信州大学工学部電気電子工学科 (教授)

681.5 (制御工学, 制御理論)

- ◆ ディスクリプタシステム表現によるシステムの解析 (901014) 3
Systems Analysis via Descriptor Systems Approach
汐 月 哲 夫 熊本大学工学部 (助教授)

- ◆ デジタル制御系の最適化・知能化の研究 (921016) 3
Intelligent Control and Optimization of Digital Control Systems
山 本 裕 京都大学工学部 (助教授)
- ◆ ニューラルネットワークによるインテリジェント制御系の
設計に関する基礎的研究 (931007) 3
Fundamental Study on the Synthesis of Intelligent Control Systems by Neural Networks
大 松 繁 徳島大学工学部知能情報工学科 (教授)
- ◆ 複数台マニピュレータによる組立作業の自動化に関する研究 (931013) 3
A Study on Automatic Assembly with Multiple Manipulators
長 田 正 九州大学工学部情報工学科 (教授)
- ◆ ロバスト制御理論に基づく伝達関数に着目した人間指向のマン・マシン制御系設計法 (931015) ... 4
Operator-Oriented Design of Manual Control Systems Based on Robust Control Theory
松 尾 芳 樹 東京工業大学工学部 (助教授)

681.532 (機械的量の制御, ロボット, 数値制御)

- ◆ ニューラルネットワークによる多自由度前腕筋電義手の制御法に関する研究 (911003) 1
Study on an EMG Controlled Prosthetic Forearm with Multi Degrees
of Freedom Using Neural Networks
伊 藤 宏 司 豊橋技術科学大学情報工学系 (教授)
- ◆ 動的立案機能を有する能動視覚による幾何モデリングシステム開発に関する研究 (921002) 3
Geometric Modeling System by Active Vision with Reactive Planning
浅 田 稔 大阪大学工学部電子制御機械工学科 (助教授)
- ◆ 柔軟多リンクロボットアームの歪みフィードバック制御 —実用化をめざして— (921019) 3
Strain Feedback Control of Flexible Multi-link Robot Arms —Toward Practical Applications—
羅 正 華 長岡技術科学大学 (助教授)
- ◆ 人間と協調しやすい移動ロボットの開発 (941002) 4
Development of mobile robots that can cooperate with humans
新 井 民 夫 東京大学工学系研究科 (教授)
- ◆ 1 Bit phase-only synthesis を利用した対称点・対称軸の高速検出法 (941010) 4
Symmetrical point and axis determination method using 1 Bit phase-only synthesis
近 藤 浩 九州工業大学工学部 (助教授)

681.53 (物理的量の制御, 計測制御, 計装)

- ◆ ニューラルネットワークを用いたインテリジェントチューニング PID 制御系の設計 (931019) 4
A Design of Intelligent Tuning PID Control Systems Using Neural Networks
山 本 透 岡山県立大学情報工学部 (助教授)
(元大阪大学基礎工学部 助手)

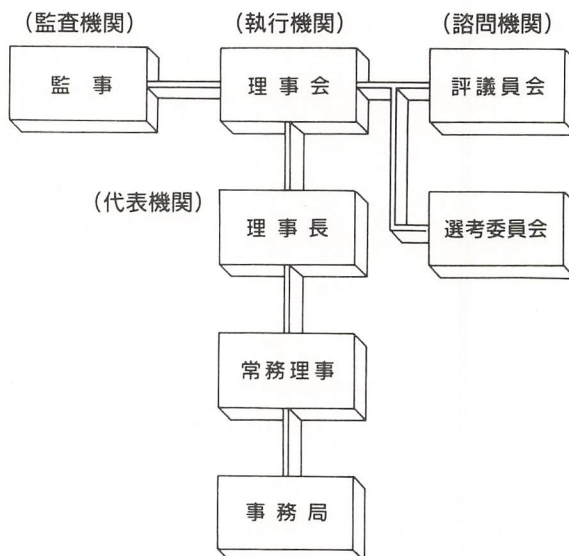
681.58 (自動制御システム構成機器, サーボコンポ)

- ◆ 集積化加速度センサの開発 (921004) 2
Development of Integrated Accelerometer
江 刺 正 喜 東北大学工学部機械電子工学科 (教授)
- ◆ ヒューマンインタフェースにおける環境世界のモデル構築に関する研究 (911015) 2
Generation of Environmental Map for Human Interface
谷内田 正 彦 大阪大学基礎工学部情報工学科 (教授)
- ◆ 超音波輻射触覚センサと触覚テンソルセル
—弾性場の秩序性に基づく新しい触覚センシング原理— (911002) 3
Ultrasonic Emission Tactile Sensor and Tactile Tensor Cell
—New Tactile Sensing Principles Based on Orderness of Elastic Fields—
安 藤 繁 東京大学工学部計数工学科 (教授)

- ◆ 味覚・嗅覚系を模したマルチチャネル脂質膜型の
 生物化学感覚認識システムの開発 (931011) 3
 Development of taste/smell-recognition system using multichannel lipid membranes
 都 甲 潔 九州大学工学部電子工学科 (助教授)
- ◆ 3次元形状計測用高速高機能複合画像センサの研究 (931014) 3
 High-Speed Image Sensor for Three Dimensional Shape Measurement
 馬 場 充 岡山大学工学部 (助教授)
- ◆ 電池駆動が可能な圧電式回転モータ / 直線モータの体系的研究 (931012) 4
 Systematic Studies of Ultrasonic Rotary Motors and
 Linear Motors Piezoelectrically Driven with Dry-Cell Battery
 富 川 義 朗 山形大学工学部電子情報工学科 (教授)
- ◆ 非線形応答の高次元情報を活用した化学センシング (931020) 4
 Chemical Sensing Utilising Higher Order Information Deduced from Nonlinear Response
 吉 川 研 一 名古屋大学大学院人間情報学研究科 (教授)

財団の概要

- 名 称 財団法人 立石科学技術振興財団
(英文名 Tateisi Science and Technology Foundation)
- 所 在 地 京都市右京区花園土堂町10番地
TEL.(075)461-4771 FAX.(075)465-3697
- 理 事 長 立石 孝雄
- 設立年月日 1990年3月6日
- 目 的 エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進する研究及び国際交流に対し助成を行い、技術革新と人間重視の両面から、真に最適な社会環境の実現に寄与することを目的とする。
- 事業内容
 1. エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進するための研究に対する助成。
 2. エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進するための国際交流に対する助成。
 3. エレクトロニクス及び情報工学の分野で、人間と機械の調和を促進するための研究成果の普及。
 4. その他、本財団の目的を達成するために必要な事業。
- 基本財産 現金10億円 株式1億3,125万円(額面)
- 財団の組織



役員・評議員

(1995-4-1 現在)

役員

理事長	立石孝雄	オムロン株式会社 取締役会長
常務理事	三笠薫	オムロン株式会社 常勤顧問
理事	伊夫伎一雄	株式会社三菱銀行 会長
理事	大澤弘之	科学技術会議議員・元科学技術庁事務次官
理事	大野豊	立命館大学理工学部 教授・京都大学名誉教授
理事	尾佐竹 洵	東京大学名誉教授
理事	熊谷信昭	前大阪大学総長・名誉教授
理事	黒田 眞	三菱商事株式会社 専務取締役・元通産省審議官
理事	巽 外 夫	株式会社住友銀行 会長
理事	立石義雄	オムロン株式会社 取締役社長
理事	諸井 虔	秩父小野田株式会社 取締役会長
監事	辻 敢	辻会計事務所 会長（公認会計士）
監事	戸 倉 晴 美	戸倉法律事務所 所長（弁護士）

(50 音順)

評議員

評議員	相磯秀夫	慶応義塾大学環境情報学部 学部長
評議員	朝倉利光	北海道大学電子科学研究所 所長
評議員	荒巻 禎 一	京都府 知事
評議員	岩井 壮 介	名城大学理工学部 教授・京都大学名誉教授
評議員	岩田 一 明	大阪大学工学部電子制御機械工学科 教授
評議員	立石 信 雄	オムロン株式会社 取締役副会長
評議員	寺野 寿 郎	国際ファジィ工学研究所 所長・東京工業大学名誉教授
評議員	長柄 喜一郎	理化学研究所 理事・元科学技術庁研究開発局長
評議員	長谷川 利 治	京都大学工学部数理工学科 教授
評議員	秦 野 勲	オムロン株式会社 専務取締役
評議員	葉原 耕 平	株式会社国際電気通信基礎技術研究所 取締役副社長
評議員	渕 一 博	東京大学工学部電子情報工学科 教授

(50 音順)

財団法人 立石科学技術振興財団

平成8年度 助成候補募集案内

（勸立石科学技術振興財団においては、下記の通り平成8年度の研究助成及び国際交流助成を行うことといたしましたので、お知らせいたします。

記

（1） 助成対象

助成金の交付対象は、次に掲げるものとします。

① 研究助成

エレクトロニクス及び情報工学の分野で人間と機械の調和を促進するための研究活動。

② 国際交流助成（派遣と招聘）

エレクトロニクス及び情報工学の分野で人間と機械の調和を促進するための研究活動を行う研究者の、海外派遣または招聘。

人間と機械の調和を促進することの内容とは、必ずしも、マンマシン・インターフェースに関する狭義の科学技術のみを意味するものではなく、上記の範囲で、科学技術を人間にとって最適なものとするための地道な草の根的基礎研究活動をも含み、広義でとらえるものとします。

（2） 金額及び件数

① 研究助成金 5千万円（1件 250万円以下、20件程度）

② 国際交流助成金 5百万円（1件 50万円以下、10件程度）

総額 5千5百万円

（3） 応募資格

① 研究者であれば、個人、グループを問いません。

② 同一内容で他の財団から既に助成を受けているか、または受ける予定になっている個人、またはグループはご遠慮ください。

③ 当財団に、結果と収支の報告書提出が可能な方。

（4） 募集期間

平成7年9月1日～平成7年10月31日（郵便局消印まで）当財団の所定用紙に記入して応募してください。

（5） 助成金交付の時期

選考委員会での選定と理事会での決定後、平成8年5月の予定。

（6） 申請書類請求及び問い合わせ先

〒616 京都市右京区花園土堂町10 勸立石科学技術振興財団事務局

☎ (075) 461-4771, FAX. (075) 465-3697

申請書類のご請求は、応募種類（研究助成、国際交流助成）をご記入のうえ、ファックスでお願いいたします。

以上

編 集 後 記

昨年の第3号に続いて、お蔭様で今年も第4号を発行することができました。ご寄稿下さいました朝倉評議員はじめ研究者の皆様、また財団関係者並びに編集にご協力下さいました皆様、大変ありがとうございました。

今回の第4号に掲載した研究課題の抄録は、第4回（平成5年度）、第5回（平成6年度）助成課題の中で研究計画の終了したものを中心に集録しています。配列は作成年度順の五十音です。

国際交流助成につきましては、本誌発行の目的から巻頭の助成課題一覧の中で、第6回（平成7年度）国際交流の派遣、招聘課題をご紹介しますにとどめました。

この第4号も前号同様、成果の抄録集とすることを継承しています。巻末の索引で、既刊号の課題を掲載していますので、ご利用下さい。

索引はできるだけJICSTのシソーラスにそった科学技術要素分類に努めましたが、中には成果である目的によって分類した方が分かりやすいと判断した場合は、そのように分類しました。

本誌は、毎年1回9月頃発行の予定です。研究成果普及事業としての本誌に関し、皆様のご意見、ご感想、ご希望などございましたらお寄せください。お待ちしております。

（勸立石科学技術振興財団 事務局

財団法人 立石科学技術振興財団
Tateisi Science and Technology Foundation
助成研究成果集 第4号
平成7年9月(1995)

発行 財団法人 立石科学技術振興財団
〒616 京都市右京区花園土堂町10 TEL (075) 461-4771
FAX (075) 465-3697

印刷 (株) 中野新文社
〒604 京都市中京区壬生相合町80-14 TEL (075) 821-4466

(本紙の一部又は全文の掲載を希望される時は、財団と研究代表者の許可を得てください。)