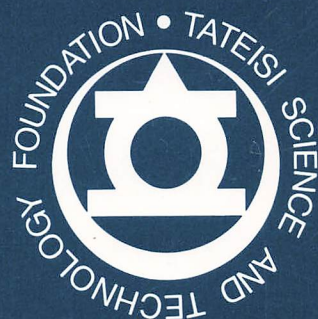


立石科学技術振興財団

助成研究成果集

【第3号】

平成6年(1994)



人間と機械の調和を促進する助成研究成果集

第 3 号

平成6年度9月(1994)

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（大澤弘之 理事 科学技術会議議員）	3
4. 第5回（平成6年度）助成課題一覧	4
(1) 研究助成（21件）	4
(2) 国際交流助成（13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）	128
8. 財団の概要	134
役員・評議員名簿（五十音順）	135
9. 平成7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5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2号を発行したのに続き、ここに
第3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
る次第でございます。



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3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。

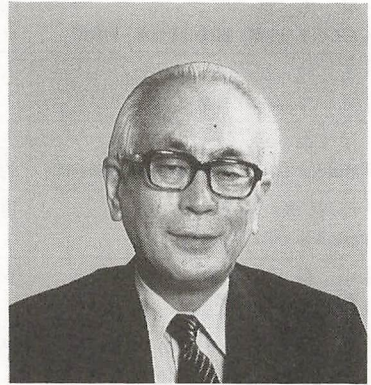
今後の本財団の活動に対し、引き続き皆様のご支援ご鞭撻を賜りますようお願い
申し上げます、ご挨拶とさせていただきます。

理事長 立石 孝雄

52万研究者へのお願い

近頃、新聞紙上にマルチメディア、情報ハイウェイ、インターネット等という文字が、毎日のように見られるようになって来た。確かに情報化時代に入りつつあるという感じだ。ところで、わが国研究分野でのこれへの対応は如何なものであろうか。将来を考え最も大事なことは何であろうか。

科学技術会議においては、研究情報の流通促進のため、ネットワーク、データベース等の整備の必要性を、これまで繰り返し指摘して来たところであるが、仲々展開の機運が得られなかった。し



かし、米国情報スーパーハイウェイ、その基盤ともなったインターネットの急速な進展等を反映して、漸く関係各方面の関心も高まり、足並を揃え得る環境となって来た。そこで、昨年7月から、研究情報ネットワークに関し、その現状及び今後のあり方について検討を進め、本年6月、総理を議長とする本会議において『研究情報ネットワークに関する当面の進め方について』という報告を行ない、これの整備と利用（アプリケーション）の推進を計ることとした。わが国研究分野での当面の対応策が盛られているものである。

研究情報ネットワークの整備・運用にあたっては、各関係者間の連携・協力の下に、公平、中立、柔軟、安定かつシームレスに推進してゆく必要があり、資金、人材、支援体制等の制度面などで今後特段の努力が払われねばならない。

しかしながら、研究者にとっては、情報ネットを自己のみのための研究に利用する以上に、研究成果のデータベース化のために大いに努力することが、最も大事なことはないかと考えている。情報化の眞の意義は、そのコンテンツを大いに利用することで、世のため、人のために寄与することなのであるから。わが国52万人の研究者の全てが、この努力を行なった時には、画期的な研究社会が生成しているであろう。

科学技術会議議員 大澤 弘 之

第5回（平成6年度）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
麻 生 武 彦 京都大学工学部 電気工学教室・助教授	国際協同による多点オーロラステレオ観測と画像の計算機トモグラフィー解析による3次元発光構造の復元手法の研究
新 井 民 夫 東京大学工学部・教授	人間と協調しやすい移動ロボットの開発
伊 東 幸 宏 静岡大学工学部 情報知識工学科・助教授	主観的感性語彙を用いた自然語文による画像データベースの対話的検索
海 老 澤 嘉 伸 静岡大学工学部・助教授	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
小 田 俊 理 東京工業大学工学部 電子物理工学科・助教授	シリコン薄膜ジャイアントマイクロデバイスの研究
加 藤 博 一 大阪大学基礎工学部 システム工学科・助手	フリーハンド図面の自動認識に関する研究
川 上 浩 司 岡山大学工学部 情報工学科・文部教官助手	設計候補補創出による概念設計支援
河 口 仁 司 山形大学工学部 電子情報工学科・教授	超高速二次元アレイ光双安定素子の研究
久 野 義 徳 大阪大学工学部 電子制御機械工学科・助教授	動画像からの手指の姿勢・運動認識を用いたマンマシンインタフェース
近 藤 浩 九州工業大学・助教授	1 Bit Phase-Only Synthesis を利用した対称点・対称軸の高速検出法
谷 本 正 幸 名古屋大学工学部・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
田 畑 満 生 西東京科学大学理工学部・助教授	体内時計ホルモン用センサーの開発と応用
辻 本 浩 章 大阪大学基礎工学部・講師	香りの与える心理的影響の評価システムに関する研究
中 根 英 章 室蘭工業大学工学部 電気電子工学科・助教授	高温超伝導体による高感度磁束センサー
福 島 重 廣 九州工業大学情報工学部・助教授	医用画像の解析と診断へのコンピュータ支援のための画像認識・理解に関する基礎的研究
間 多 均 帝京大学理工学部・助教授	液晶における電気伝導メカニズムの解明
松 重 和 美 京都大学工学部 電子工学教室・教授	有機超格子薄膜および革新の電子機能デバイス創製に関する基礎研究
松 本 弘 信州大学工学部 電気電子工学科・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

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
山 口 隆 美 東海大学開発工学部 医用生体工学科・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
横 矢 直 和 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学センター・教授	画像理解のための並列協調型アルゴリズムの研究
吉 川 歩 京都工芸繊維大学工学部 電子情報工学科・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

研究助成総額 5,154 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 場 光 太 郎 東北大学工学部 機械航空工学科計測制御学講座・助手	Vision and Autonomous System Center, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University
加 茂 睦 和 科学技術庁 無機材質研究所・主任研究官	1. 第5回ヨーロッパダイヤモンド薄膜および関連物質国際会議組織委員会 2. 第2回国際ダイヤモンド薄膜セミナー
北 村 正 治 科学技術庁 航空宇宙技術研究所 宇宙研究グループ・主任研究官	第30回米国航空宇宙学会／自動車工学会／米国機械学会／米国土工学教育学会合同推進技術会議および展示会
喜 多 村 直 九州工業大学情報工学部 機械システム工学科・教授	World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering / sponsored by the Brazilian Society of Biomedical Engineering
鈴 木 寿 中央大学理工学部 情報工学科・助教授	1994 年 IEEE 情報理論国際シンポジウム
野 村 保 友 北海道大学電子科学研究所 電子機能素子部門・助手	International Society on Oxygen Transport to Tissue / sponsored by the European Society for Intensive Care Medicine
船 戸 充 京都大学工学部・助手	1. Electric Materials Conference 2. Device Research Conference
渡 辺 富 夫 岡山県立大学情報工学部 情報システム工学科・教授	ブラウン大学ブラドリ・リサーチセンター
乾 敏 郎 京都大学文学部・助教授	第16回注意と遂行国際シンポジウムに Dr. Max Coltheart を招聘
笹 尾 勤 九州工業大学・教授	九州工業大学に Dr. Jon T. BUTLER を招聘
白 井 克 彦 早稲田大学理工学部・教授	1994 年音声言語処理国際会議に Dr. Ilse LEHISTE を招聘
長 尾 真 京都大学工学部 電気工学・教授	第15回計算言語学国際会議 Coling 94, および京都大学工学部電気工学第2学科長尾研究室に Dr. Eva Hajicova を招聘
山 本 裕 京都大学工学部 応用システム科学教室・助教授	京都大学（共同研究）に Dr. Pramod P Khargonekar を招聘

国際交流助成総額 624 万円
平成6年度助成総額 5,778 万円

助成研究成果の掲載抄録一覧 (年度順五十音順)

- ◆ ディスクリプタシステム表現によるシステムの解析 (901014) 8
 Systems Analysis via Descriptor Systems Approach
 汐 月 哲 夫 熊本大学 工学部・助教授
- ◆ 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) 12
 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
- ◆ 混合モード回路シミュレータの開発 (921001) 20
 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
- ◆ 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) 24
 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
- ◆ 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) 30
 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 工学部・教授
- ◆ 生物神経系機能の情報処理技術への応用基盤の確立 (921010) 34
 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) 40
 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
- ◆ 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) 46
 Development of CAE Systems Based on Boundary Element Design Sensitivity Analysis Approach
 松 本 敏 郎 信州大学 工学部生産システム工学科・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) 50
 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
- ◆ デジタル制御系の最適化・知能化の研究 (921016) 54
 Intelligent Control and Optimization of Digital Control Systems
 山 本 裕 京都大学 工学部・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) 58
 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

◆ 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)	64
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—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)	70
Study on Higher Cognitive Functions and Artificial Neural Networks for Human-Machine Interaction	
渡 邊 一 央 北海道工業大学 工学部・教授	
◆ 画像時系列からの動きの検出と評価の研究 (931002)	76
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	
◆ 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)	82
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	
◆ 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)	86
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)	
◆ 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)	92
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	
◆ 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)	98
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	
◆ 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)	102
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	
◆ 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)	106
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	
◆ 3次元形状計測用高速高機能複合画像センサの研究 (931014)	110
High-Speed Image Sensor for Three Dimensional Shape Measurement	
馬 場 充 岡山大学 工学部・助教授	
◆ マイクロアクチュエータ用形状記憶合金薄膜の開発 (931016)	114
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	
◆ 自動車内空調装置による生体に及ぼす影響 (931017)	120
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	
◆ 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)	124
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	

ディスクリプタシステム表現によるシステムの解析

Systems Analysis via Descriptor Systems Approach

901014

研究代表者

熊本大学工学部 助教授

汐 月 哲 夫

[研究の目的]

本研究の目的は、モデリング、解析・シミュレーション、制御系設計等システムを扱うあらゆる分野での基礎的な手法としてディスクリプタシステム理論を展開することと、そこで得られた知見や各種アルゴリズムを計算機のプログラムとして実現し、様々な応用分野で活用できる対話型計算機システムを構築することである。そして、知的な制御系設計環境の基礎を築くことである。

[研究の内容、成果]

研究内容は(1)システムのモデリングに関する研究(2)解析とシミュレーション手法に関する研究(3)制御系設計に関する研究(4)制御系設計用対話型計算システムに関する研究の4つの項目に分けて行われた。以後各項目について概要を述べる。

システムのモデリング

ディスクリプタシステムとはベクトル空間上で定義された微分演算子 $D(:=d/dt)$ を含んだ方程式系

$$f(x, Dx, u; t) = 0 \quad (1)$$

である。この形式のシステム表現は、ディス

クリプタシステム表現以外に中間標準系, singular systems, implicit systems, generalized state space form, semi-state systems, ... など、使用される分野や若干の定義の違いにより様々な名称で呼ばれている。これは、このシステム表現がある特定の分野で人工的に提唱された特殊なものではなく、あらゆる分野において必然的に出現する極めて自然なシステム表現であることを意味している。従って、ディスクリプタシステムのモデリングは非常に多くの分野にまたがっている。

このシステム表現の特徴を既成のシステム理論と比較検討するために(1)を線形近似して

$$E\dot{x}(t) = Ax(t), \quad x(0) = x_0 \quad (2)$$

と表すことにする。本報告ではディスクリプタシステムと呼ぶこととし、以後 DS と略す。また比較のために用いる状態空間表現は SS と表す。

本研究により、このシステム表現には以下のような特徴があることが明らかになった。

自然な表現 システムの物理的構造を保存する自然な表現である。特に、係数行列 $E, A, \dots$ がパラメータに関してアフィンであることが多いので、見通しのよい設計作業が可能である。また、

$1/m$ のようなパラメータの逆数が現れないため $m=0$ を同一のモデルで扱うことが可能である。

SSの自然な拡張 モード，可制御性，可観測性，状態フィードバック，最適制御など従来状態空間表現で展開されてきた各種のアルゴリズムは若干の拡張を行うことでほとんどそのまま使用することができる。さらに，SSでは表現できなかったモデルや扱いが困難だった問題が簡単化されるという意味で，SSの自然な拡張であるといえる。

プロパーでないシステム PID 制御における微分器やモデルマッチング問題の手順中に現れるプロパーでない仮想的な伝達関数を表現できるため，状態空間モデル上で確立された設計・評価アルゴリズムをほとんどそのまま利用することができる。

動的+代数的方程式表現 動的性質（微分方程式）と拘束条件のような代数的性質を一つの式で表すことができる。従って，機械系における衝突や電気系におけるサージなど急峻な状況の変化を表現し，これを扱うための厳密な数学的手法を提供できる。

これらの特徴を生かすことで以下のようなシステムの表現が容易に行えることが確かめられた。

寄生要素を持つ電気回路 回路中に微小の誘導成分 (L) (容量成分 (C)) があるとき，瞬間的な電流 (電圧) 変化が回路素子に破壊的な障害を与えることがある。このような現象は電流や電圧の変化をディラックのデルタ関数で表現することで数学的な厳密さを保ちながら

扱うことができる。

拘束条件下の機械系の運動方程式 関節，レール，壁面などで運動学的に拘束を受けている機械系の運動方程式はニュートンの運動方程式に機構的拘束を表す代数方程式をつけ加えたものとなる。これは，DS そのものである。これにより，運動の自由度が縮退することや衝突により衝撃力が発生することが説明できる。

大規模システム 直列結合や状態フィードバックなどのシステムの合成は，システムの入出力変数間に代数的な拘束を設けることと等価である。このような観点からシステムの合成を DS で表現すると，極めて簡潔で見通しのよいものが得られる。この特徴を生かすと，複数のサブシステムの集合体としての大規模システムが表現できる。

プロパーでない有理関数 古典的な制御理論ではシステムを伝達関数という有理関数で表現することで望ましいコントローラを設計する手法を提案してきたが，そのため物理的には実現不可能なプロパーではない有理関数は扱う必要がないと考えられていた。しかし，今日のポストモダンコントロール時代では設計仕様の表現や設計アルゴリズムのなかでプロパーでない有理関数を頻繁に用い，その有用性はあきらかである。これらのシステムは DS を用いて統一的に表すことができる。

解析とシミュレーション手法

まえに述べたように，DS は現代制御理論における状態空間表現や古典制御理論における伝達関数とは異なり，代数的関係を含んだ

あるいはプロパーでないシステムを扱う理論である。従って、その解析やシミュレーションにおいても若干の注意を要する。しかし、線形システムがモードに分解できるという基本的な性質に着目すれば、DSはその自然な拡張としてとらえることができる。すなわちインパルスモードを導入することにより

$$\left. \begin{array}{l} \text{SS=指数モード} \\ \text{DS=指数モード+インパルスモード} \end{array} \right\} \text{と}$$

とらえることができる。これは以下のようにまとめることができる。

[クロネッカ標準形]

DSは指数モードとインパルスモードの2つのモードからなり、それぞれ

$$(sE-A)V_s = E V_s (sI-A_s) \quad (3)$$

$$(sE-A)V_f = A V_f (sN-I) \quad (4)$$

と書くこともできる。これをまとめると

$$\begin{aligned} & (sE-A) \begin{bmatrix} V_s & V_f \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} E V_s & A V_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} sI-A_s & 0 \\ 0 & sN-I \end{bmatrix} \end{aligned}$$

となる。 $(sE-A)$ が正則($\det(sI-A) \neq 0$)のとき $\begin{bmatrix} V_s & V_f \end{bmatrix}$ と $\begin{bmatrix} E V_s & A V_f \end{bmatrix}$ はともに正則になることが知られている。このとき

$$\begin{bmatrix} sI-A_s & 0 \\ 0 & sN-I \end{bmatrix} \quad (5)$$

をクロネッカ標準系という。ここで、 N はべき零行列である。 μ は

$$N^{\mu-1} \neq 0, N^{\mu} = 0 \quad (6)$$

を満たす正整数でべき零指数あるいはシステム(2)のインデックス(インパルス指数)と呼ばれる。

N が零行列($N=0$)であることと $\mu=1$ は等価である。また、この場合には、 V_2 は E の零化空間の基底ベクトルのみからなる。つまり、

$$E V_2 = 0 \quad (7)$$

である。

また、(4)を満たす V_2 が存在しない場合は(つまり、 $\text{rank } E=n$) $\mu=0$ とする。これは $N=[\]$ (空行列)と書くこともある。

特に、インデックス1($\mu=1$)の場合には

$$\begin{bmatrix} sI-A_s & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix} \quad (8)$$

となる。

また、インデックスの値によらずこの系の特性多項式は

$$\phi(s) = \alpha \det(sI-A_s), \alpha = \pm 1 \quad (9)$$

となる。すなわち、インパルスモードは特性多項式には反映されない。

ここで、 $\Phi_A(t)$ 、 $\Psi_N(t)$ を

$$\Phi_A(t) = e^{At} \quad (10)$$

$$\Psi_N(t) = - \sum_{i=0}^{\mu-1} N^i \delta^{(i)}(t) \quad (11)$$

と定義すると、

$$\frac{d}{dt} \Phi_A(t) = A \Phi_A(t) \quad (12)$$

$$\Phi_A(0) = I \quad (13)$$

$$\Psi_N(t) = N(\dot{\Psi}(t) - \delta) \quad (14)$$

は容易に確かめられ、これらの記号を用いると初期状態

$$x(0) = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

に対する(2)応答波形 $x(t)$ は

$$x(t) = V_1 \Phi_{A_1}(t) \eta_1 + V_2 \Psi_N(t) N \eta_2 \quad (16)$$

と表すことができる。

ここで、 $\delta^{(n)}$ を計算機で扱えるような適切な関数で近似することで DS のシミュレーションが可能である。

[制御系設計に関する研究]

本研究における制御系設計に関する研究成果としては

状態フィードバックによる極配置アルゴリズム

2次形式評価関数による最適制御アルゴリズム

参考文献

inner-outer 分解アルゴリズム

H_∞ ノルムの計算

正実性定理の DS による表現

有界実定理の DS による表現

などがある。

[対話型計算システム]

制御系設計に使用できる対話型計算システムとして今日では MATLAB が非常に普及してしまっている。MATLAB とは連立方程式や固有値問題などを解くための行列計算パッケージからなる基本部分と、問題に応じたツールボックスとからなる。Tool-Box には信号処理、パラメータ同定、制御工学、ロバスト制御、ニューラルネット、ファジィ理論など各分野に応じたものが商品化されているが、DS に関係が深いのは Control-Toolbox と Robust-Toolbox である。

本研究において対話型計算システムを扱う方法には、MATLAB を使用して DS のためのツールボックスを作成することと、MATLAB の基本部分に相当するパッケージ

から作成するのと 2 通りの方法がある。

[今後の研究の方向、課題]

これまでに述べたようにディスクリプタシステム表現は非常に汎用性の高いシステム表現で、その可能性は研究者の創造性に依拠していくらでも拡大できると言われている。特に、今日ほぼ実用レベルでは完成したと思われる H_∞ 理論を基礎としたロバスト制御理論との融合が極めて重要である。モデルマッチング問題においてはしばしばプロパーではないシステム表現が登場する。また、サーボ問題等状態空間表現上で培われてきたアルゴリズムをロバスト制御に生かすためには DS の表現能力は極めて有効である。さらに、適応制御やパラメータ同定などの分野においても、パラメータ空間でのアフィン性等を保存する DS は有効である。このように、DS を用いることにより従来の制御理論と設計アルゴリズムはより強力なものになる可能性があり、その観点からの研究が必要である。

[成果の発表、論文等]

- 1) 汐月哲夫：ディスクリプタ・システムにもとづく制御；講習会 Talk 制御理論テキスト，計測自動制御学会（平成 2 年 4 月・名古屋）
- 2) 汐月哲夫・川路茂保：純正的成分に着目したディスクリプタシステムの低次元化アルゴリズム；計測自動制御学会論文集，Vol. 24, No. 10, 1056 / 1063 (1988)
- 3) Shiotsuki, Kawaji: On a canonical form of descriptor-systems; Proc. on the 27th CDC, Austin TX (1985)
- 4) Shiotsuki and Koda: A linear approximation method of physical systems with uncertain parameters; Proceedings of MECHATRONICS, Oct. 20 - 22, 1992

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—

Ultrasonic Emission Tactile Sensor and Tactile Tensor Cell —New Tactile Sensing Principles Based on Orderness of Elastic Fields—

911002

研究代表者 東京大学工学部計数工学科 教授 安藤 繁

[研究の目的]

場の秩序性の定量化原理とは、着目する場がどれだけの有効自由度の変量により支配されているかを調べることにより場の特徴を分類し、同時にそのような場を生じさせる外界事象に関する情報を得ようとする方法のことである。また、場の秩序性の強調原理とは、そのような秩序の構造がより明確化するように場に変形を加えることにより、初期知覚段階から中間統合段階に至るセンシング情報処理の基本部分を実現しようとする方法のことである。これらいずれも我々独自の的方法論であり、これまで視覚センサと聴覚センサをターゲットに、多くの具体的センサやセンシングアルゴリズムとして、原理自体の高度化と応用とを図ってきた。

今回、我々が試みたのは次の二つのアプローチである。一つは、弾性体でできた触覚センサ表面と対象との接触によって表面に発生し弾性体内部に伝搬する超音波の波動場に上記方法論を適用し動的な接触点の定位と分類を可能にする方法、一つは、対象との接触によって表面に与えられた変形が弾性体内部に生成する応力テンソル場に上記方法論を適

用し、静的な接触点の定位と接触形態の分類を可能にする方法である。

[研究の内容、成果]

1 超音波輻射触覚センサ

1.1 接触の複雑さと波動場の秩序構造

図1のようなセンサ構造を考えよう。有機圧電薄膜であるPVDFのマトリクスが半径 R の半球状の超音波媒体の中央に埋めこまれている。いままさに接触が生じた表面上の点の方位座標を (θ_i, ϕ_i) , $(i=1, \dots, N)$ とする。各々の点から発せられる超音波輻射波の波形を $f_i(t)$, 4個のPVDFマトリクスエレメントA, B, C, Dの座標を (Δ, Δ) , $(-\Delta, \Delta)$, $(-\Delta, -\Delta)$, $(\Delta, -\Delta)$ としよう。そうすると、これらのエレメントの出力は

$$p_X(t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{X_i}} f_i \left(t - \frac{R_{X_i}}{c} \right) \quad (1)$$

(X: A, B, C, or D)

と書かれる。ここで c は音速, R_{X_i} は i 番目の輻射源とPVDFエレメントX, ($X=A, B,$

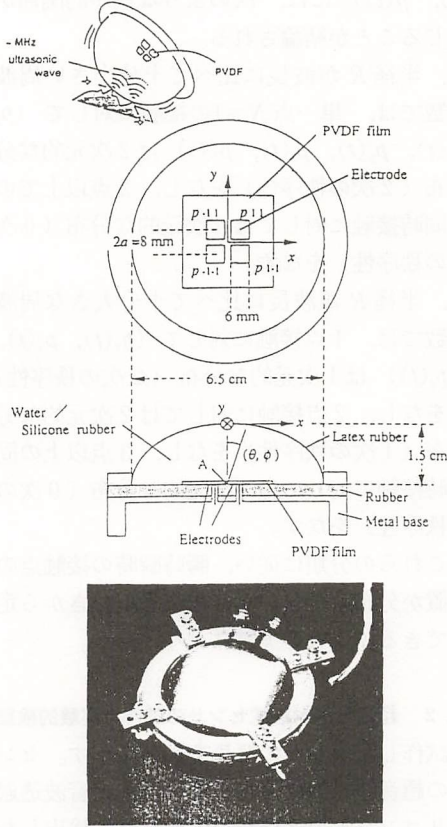


図1 超音波輻射触覚センサの写真。媒体には薄いゴム膜に入れられた水を用いている

C, D) との距離を表わす。 $R \gg \Delta$ を仮定すると, R_A, R_B, R_C, R_D は

$$R_A \simeq R - \Delta \sin \theta_i \cos \phi_i - \Delta \sin \theta_i \sin \phi_i$$

$$R_B \simeq R + \Delta \sin \theta_i \cos \phi_i - \Delta \sin \theta_i \sin \phi_i$$

$$R_C \simeq R + \Delta \sin \theta_i \cos \phi_i + \Delta \sin \theta_i \sin \phi_i$$

$$R_D \simeq R - \Delta \sin \theta_i \cos \phi_i + \Delta \sin \theta_i \sin \phi_i$$

のように近似される。したがって(1)式は

$$p_A(t) \simeq \sum_{i=1}^N (1 + \xi_{xi} + \xi_{yi}) \tilde{f}_i(t + \tau_{xi} + \tau_{yi}) \quad (2)$$

$$p_B(t) \simeq \sum_{i=1}^N (1 - \xi_{xi} + \xi_{yi}) \tilde{f}_i(t - \tau_{xi} + \tau_{yi}) \quad (3)$$

$$p_C(t) \simeq \sum_{i=1}^N (1 - \xi_{xi} - \xi_{yi}) \tilde{f}_i(t - \tau_{xi} - \tau_{yi}) \quad (4)$$

$$p_D(t) \simeq \sum_{i=1}^N (1 + \xi_{xi} - \xi_{yi}) \tilde{f}_i(t + \tau_{xi} - \tau_{yi}) \quad (5)$$

のように表現される。ただし

$$\tilde{f}_i \equiv \frac{1}{R_i} f_i(t - \frac{R_i}{c}) \quad (6)$$

は i 番目の輻射源の波形を原点で受けた波形,

$$\tau_{xi} \equiv \frac{\Delta \sin \theta_i \cos \phi_i}{c} \quad (7)$$

$$\tau_{yi} \equiv \frac{\Delta \sin \theta_i \sin \phi_i}{c} \quad (8)$$

はセンサ間でそれらの輻射波を受ける時間差,

$$\xi_{xi} \equiv \frac{\Delta \sin \theta_i \cos \phi_i}{R_i} = \frac{c \tau_{xi}}{R_i} \quad (9)$$

$$\xi_{yi} \equiv \frac{\Delta \sin \theta_i \sin \phi_i}{R_i} = \frac{c \tau_{yi}}{R_i} \quad (10)$$

は振幅差を表わす。

さて(2)式と(5)式から音場の空間微分 $p_x(t)$, $p_y(t)$ を求めてみると, 場の秩序に関して注目すべき性質が見えてくる。すなわち $p_x(t)$, $p_y(t)$ は

$$\begin{aligned} p_x(t) &\simeq \frac{p_A(t) - p_B(t) - p_C(t) + p_D(t)}{4\Delta} \\ &\simeq \frac{1}{2\Delta} \sum_{i=1}^N (\xi_{xi} \tilde{f}_i(t) + \tau_{xi} \tilde{f}_{ii}(t)) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 p_y(t) &\simeq \frac{p_A(t) + p_B(t) - p_C(t) - p_D(t)}{4J} \\
 &\simeq \frac{1}{2J} \sum_{i=1}^N (\xi_{yi} \tilde{f}_i(t) + \tau_{yi} \tilde{f}_{ii}(t)) \quad (12)
 \end{aligned}$$

のように、個々の輻射源が作る音場 $\tilde{f}_i(t)$ とその時間微分 $\tilde{f}_{ii}(t)$ の線形結合により書かれ、音場 $p(t)$ とその時間微分 $p_i(t)$ 自体も

$$\begin{aligned}
 p(t) &\simeq \frac{p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) + p_D(t)}{4} \\
 &\simeq \sum_{i=1}^N \tilde{f}_i(t) \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_i(t) &\simeq \frac{\partial}{\partial t} \frac{p_A(t) + p_B(t) + p_C(t) + p_D(t)}{4} \\
 &\simeq \sum_{i=1}^N \tilde{f}_{ii}(t). \quad (14)
 \end{aligned}$$

のように、同じく $\tilde{f}_i(t)$ と $\tilde{f}_{ii}(t)$ の線形結合により書かれる。これらの関係を行列の形にまとめたものが

$$\begin{bmatrix} p_x(t) \\ p_y(t) \\ p_i(t) \\ p(t) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^N \begin{bmatrix} \tau_{xi} & \xi_{xi} \\ \tau_{yi} & \xi_{yi} \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{f}_i(t) \\ \tilde{f}_{ii}(t) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

である。これは、ベクトル $(p_x(t), p_y(t), p_i(t), p(t))$ の時間軌跡は各音源ごとの時間軌跡の和に分解されたことを意味する。この時間軌跡の分布の縮退度を秩序性と考えると、1音源に対してはどのような観測点でも3次の秩序性が現れること、独立な各時間軌跡が合成されることにより音源数に応じた秩序性の低下が生じることが分かるであろう。

これから、接触によって PVDF エレメント上に生じる超音波音場 $(p_x(t), p_y(t), p_i(t), p(t))$ には、次のような秩序的関係が生じることが結論される。

1. 半径 R が波長に比べて十分小さい周波数では、単一点 $N=1$ の接触に対して $(p_x(t), p_y(t), p_i(t), p(t))$ は2次元的な分布(2次の秩序性)をなし、2点以上での同時接触に対しては4次元的な分布(0次の秩序性)をなす。

2. 半径 R が波長に比べて十分大きな周波数では、1点接触に対して $(p_x(t), p_y(t), p_i(t))$ は1次元的な分布(2次の秩序性)をなし、2点接触に対しては2次元的な分布(1次の秩序性)をなし、3点以上の同時接触に対しては3次元的な分布(0次の秩序性)をなす。

これらの分類に従い、瞬時瞬時の接触点の位置が分布直線ないし分布平面の傾きから定位できる。これを実験により示そう。

1.2 超音波輻射触覚センサの試作と実験的検証

試作したセンサの写真を図2に示す。センサの超音波媒体材料としては水と超音波透過シリコンゴムの2種類を実験した。検出した超音波の帯域は最大1MHzまでである。接触による超音波は非常に微弱であるので、回路設計や雑音の遮蔽などには十分な注意が払われている。

図3(a), (b), (c), (d)に実験結果の一例を示す。(a), (b), (c)は実際の接触で生じた超音波輻射波の受波波形であり、明瞭な超音波パルスが観測可能であること、および接触の位置により各エレメントの受波波形には安定した時間差が生じていることが分かる。また振幅が雑音レベルを越えた波形の前半部で、時間空間微分の分布に明瞭な秩序性が確認できた。図3(d)はこの分布の傾きから求めた定位位置を示す。実際の位置と良い一致を示

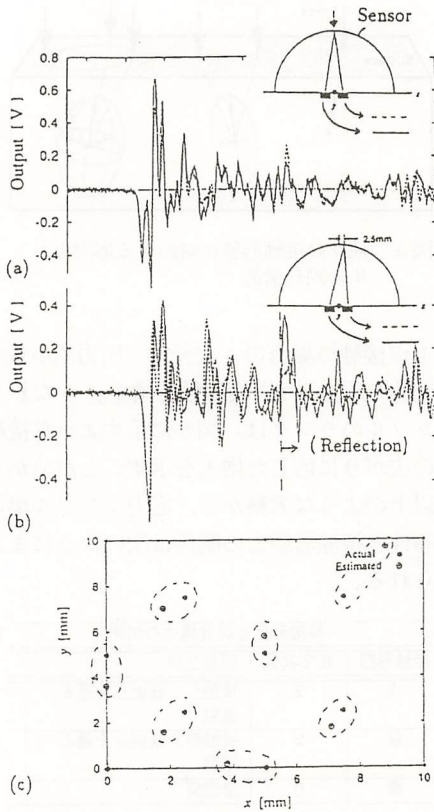


図2 実験結果の例。(a): 直上点 $(x, y) = (0, 0)$ [mm]での接触による受波波形, (b): 同じく $(2.5, 0)$ [mm]での波形, (c): 同じく $(5, 0)$ [mm]での波形, (d): PVDF エlement出力による接触点定位の結果

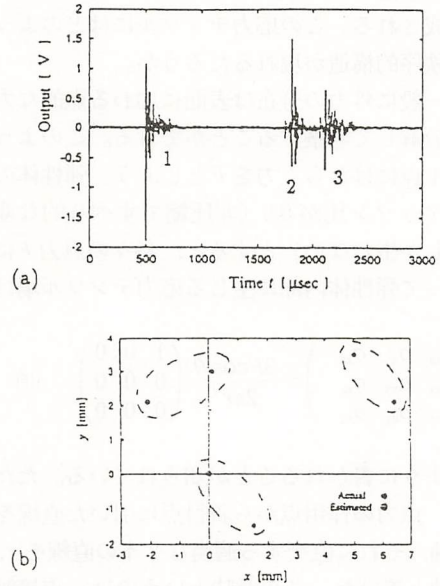


図3 3点同時接触の分離検出の実験結果
(a): 3個の輻射波を含む受波波形,
(b): 接触点の定位結果

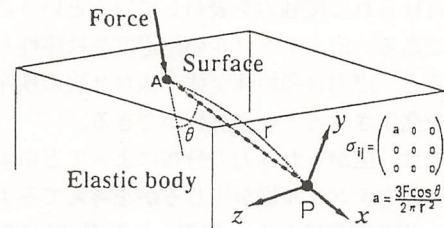


図4 単一点力によって生じる応力テンソル

している。

このセンサは時間分解能が非常に高い ($50 \mu\text{sec}$ 以上) ため、一見同時に生じたように見える複数点ないし面的な接触も時間的に分解してセンシングすることができる。図4はこのような実験結果の一例である。

2 触覚テンソルセル

2.1 接触形態と応力テンソル場の秩序構造

弾性体のセンサ表面に外力分布による変形が加わった図4のような状況を考えて。表面の外力分布によって弾性体内部には歪みが

発生し応力（方向性ある“圧力”）の分布が形成される。この応力テンソルにはどのような秩序的構造が現れるだろうか。

一般に外力の分布は表面に加わる点的な力に分解して考察することができる。このような1点にはたらく力を $\vec{F}$ としよう。弾性体のポアソン比が0.5（非圧縮ですべり的な変形しか生じない）とすると、各々の点力 $\vec{F}$ によって弾性体内部に生じる応力テンソル場は

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \frac{3F\cos\theta}{2\pi r^2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

のように書かれることが知られている。ただし、点力の作用点から着目点に引いた直線を x 軸、それに直交する適当な2本の直線を y, z 軸と置いた。この意味というのは、点接触によって生じる応力テンソルは場所によらずランク1の行列であって、対応する固有ベクトルは接触点の方向を向き、固有値は接触点からの距離の平方根とコサイン則によって重み付けられた接触力を表わしているということである。応力テンソルの縮退度を秩序性と見ると、点力は弾性体全体一様な2次の秩序性を発生させるという解釈ができる。

では、広がった外力の分布によってどのような応力テンソル場が生じるかを考えてみよう。場の線形性から、位置 $\mathbf{r}$ の面素 dS に加わる点力を $\mathbf{F}(\mathbf{r})dS$ 、これによって生じる応力テンソルを $T(\mathbf{r}, \mathbf{F}(\mathbf{r}))dS$ と置くと、面 S 上の外力分布によって生じる合成テンソルは

$$T_F = \int_S T(\mathbf{r}, \mathbf{F}(\mathbf{r}))dS. \quad (17)$$

のように書かれる。この合成過程で応力テンソルの固有構造はどのように変化するだろうか。答えは明快であって、接触点数が増すに従い、向きの異なる“圧力”が合成的に働い

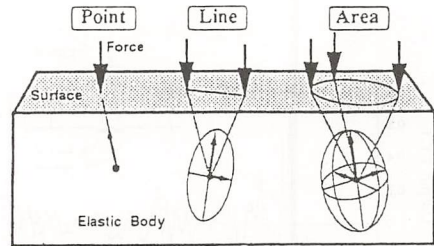


図5 種々の接触形態に対応する応力テンソルの固有構造

て1点接触の場合の1次元的“圧力”から多次元的“圧力”へと複雑性を増す。すなわちテンソルのランクは、図5に示すような接触面の広がりに応じた増大を示すことが分かる。

以上のような考察から、応力テンソル場の秩序性と接触形態との関係は次のようにまとめられる。

接触形態と固有構造の関係		
接触形態	秩序次数	固有空間
点	2	接触点と観測点を通る直線
線	2	接触線と観測点を通る平面
面	0	全空間

2.2 テンソルセルの試作結果と実験的検証

今回試作したテンソルセルの構造を図6に示す。約6 mm 各の立方体表面にPVDF有機圧電膜を各面2分割、合計6分割して張り付けてある。各出力の適切な演算により応力テンソルの6成分が取り出される。図7は、

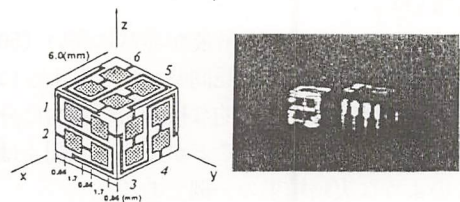


図6 試作したテンソルセルの構造

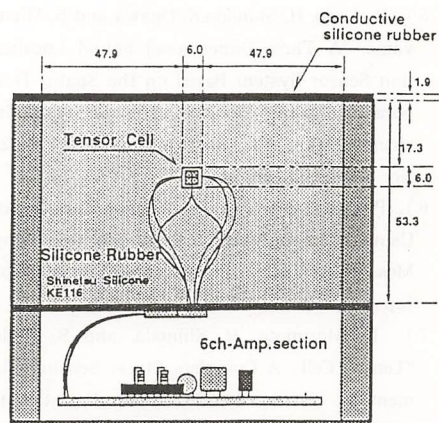


図7 試作した触覚センサの構造

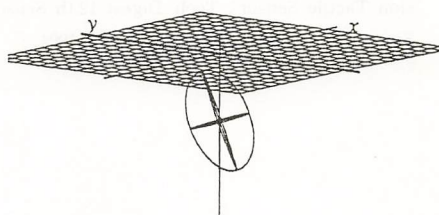


図8 線接触に対して観測された応力楕円体

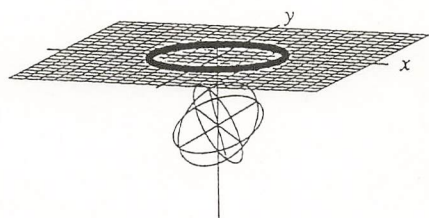


図9 面接触に対して観測された応力楕円体

検証のために1個のテンソルセルのみを用いて実現した触覚センサの構造である。

図8と図9は、このセンサに線的な接触力と面的な接触力を与えた際に観測された応力テンソルをラメの応力楕円体を用いて表わしたものである。固有ベクトルの向きが接触位置の方向を表わしていること、および固有値

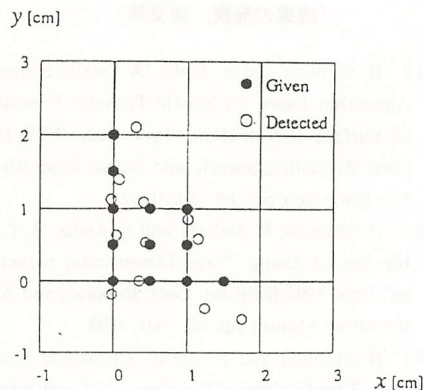


図10 応力テンソルの固有構造に基づく接触形態の分類

に接触形態の違いがよく現れている。図10は第1固有値で規格化した第2固有値と第3固有値による接触形態の分類結果である。このような接触形態の分類は、応力テンソ場の秩序性のみに基づくため、接触点と観測点の位置関係によらずに可能である。

[今後の研究の方向、課題]

以上述べたように、今回我々は場の秩序性の定量化原理に基づき二つのアプローチを試みた。この二つのアプローチは、弾性体の動的（波動的）な秩序構造と静的な秩序構造に着目したものである。これら我々独自の方法論をさらに発展させ、またこれまで開発してきた視覚センサと聴覚センサと組み合わせることにより、統合的なセンサ構造ならびにセンシングアルゴリズムとしてさらなる高度化と応用を図ってゆきたいと考えている。

最後に、今回の研究援助に対し謝意を表するとともに、基礎科学技術の発展のために、長期的視野にたった援助活動を今後も継続されることをお願いしたい。

[成果の発表, 論文等]

- 1) H. Shinoda and S. Ando, "A Tactile Sensing Algorithm Based on Elastic Transfer Function of Surface Deformation", Proc. 1992 IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing, San Francisco, pp. 589 - 592, 1992.
- 2) H. Shinoda, M. Uehara and S. Ando, "A Tactile Sensor Using Three-Dimensional Structure", Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Atlanta, pp. 435 - 441, 1993
- 3) H. Shinoda and S. Ando, "Ultrasonic Emission Tactile Sensor for Contact Localization and Characterization", Proc. 1994 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, San Diego, 1994.
- 4) D. Dornfeld and C. Handy, "Slip Detection Using Acoustic Emission Signal Analysis", Proc. 1987 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 1868 - 1875, 1987.
- 5) S. Ando, H. Shinoda, K. Ogawa and S. Mitsu-yama, "A Three-Dimensional Sound Localization Sensor System Based on the Spatio-Temporal Gradient Method", Trans. Soc. Instrumentation and Control Engineers, vol. 29, No. 5, pp. 520 - 528, 1993.
- 6) P. Chen and S. Ando, "Sound Localization Using a Single Sensor", Proc. 1992 Int. Symp. Measurement and Control in Robotics Tsukuba, Japan, pp. 695 - 700, 1992.
- 7) N. Morimoto, H. Shinoda, and S. Ando, "Tensor Cell: A Complete Stress Sensing Element of Tactile Sensor", Tech. Digest 12th Sensor Symposium, Osaka, Japan, pp. 179 - 182, 1994.
- 8) H. Shinoda and S. Ando, "Ultrasonic Emission Tactile Sensor", Tech. Digest 12th Sensor Symposium, Osaka, Japan, pp. 87 - 90, 1994.

混合モード回路シミュレータの開発

Development of Mixed-Mode Circuit Simulator

921001

研究代表者 静岡大学工学部光電機械工学科 助教授 浅井 秀 樹

[研究の目的]

設計回路規模の大型化に伴い、シミュレータの果たす役割は益々大きくなることが予想される。回路解析における最大の問題は解析精度と解析速度のトレード・オフにある。例えば、論理解析では速度は得られるが解析精度の点で問題があり、一方、アナログ解析では、詳細な解析が可能な反面、膨大な計算時間が必要となる。従って、ディジタル/アナログ混在大規模回路の解析には、要求される解析精度/速度に柔軟に対応できる混合モードシミュレータの開発が不可欠となる。本研究においては、混合モードの内、回路レベルとタイミングレベルでのシミュレーションの高速化について検討を行った。

[研究の内容、成果]

1) 回路シミュレータの開発 [2] [3]

直接法に基づく回路シミュレーションの高速化のために、回路分割技法が研究されてきた。節点分割法では局所基準節点集合の取り扱いが問題となるが、弱結合している部分回路間においては、局所基準節点部も分割できる。この結果、部分回路は完全に分離され、直接法ベースの様々な解析手法を各部分回路毎に独立に適用する事が可能となる。本研究

で提案する動的回路分離技法によれば、部分回路の潜在性を巧妙に利用できる上、強結合部は連結したままで解析されるため、一般の緩和法に見られる収束性の劣化もほとんど認められなかった。更に、部分回路間の結合強度を基準にした動的回路分離技法と論理解析で用いられるセレクトティブ・トレース方式を結合する事により、各解析時刻で活性な部分回路のみを階層的に選択して解析するアルゴリズムを構成した。各部分回路の活性度に応じて解析ポイントを選出する事は波形緩和法等で用いられるマルチレート数値積分の考え方に相当するため、等価的に直接法/波形緩和法混合モード解析が実現された。マスタースレーブ型Tフリップフロップからなる非同期式カウンタの時間解析を例として回路規模(節点数)の増加に伴うCPUタイムの関係を図1に示す。ここで4つの手法は、各々、

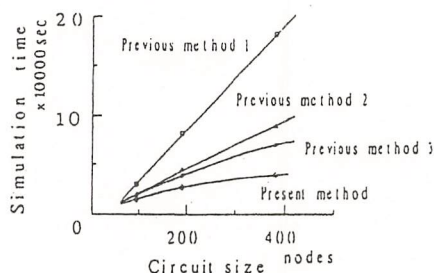


図1 回路規模と解析時間

手法1：階層分割を用いた直接法

手法2：手法1に階層的潜在性を加えた手法

手法3：手法2に回路分離技法を加えた手法

本手法：手法3にセレクトィブトレース技法を加えた手法

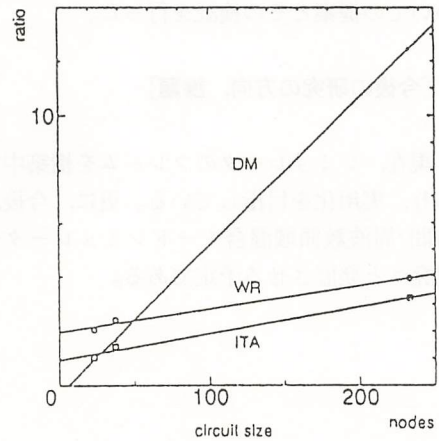
である。図1より、本シミュレータが極めて高速であることが分かる。

2) タイミングシミュレータの開発 [1] [4]

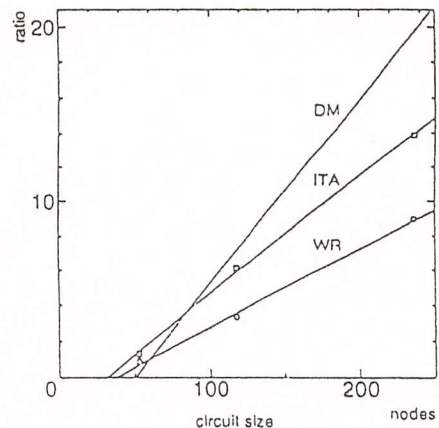
現在最も広く利用されている SPICE では、直接法を適用している。直接法には、フィル・イン発生による計算効率の劣化や大規模行列の扱いによる使用メモリの増加などの問題がある。そこで近年、緩和解析が注目されてきた。緩和解は、大規模回路をいくつかの部分回路に分割し、緩和反復により、回路全体の解を求める方法であり、計算過程においてスパース性も保たれ、メモリ効率が良いなどの利点がある。しかし、解の収束性、安定性に関する問題があり、その適用が、係数行列の対角優位性が保たれ、収束が保証される MOS 回路に限定されており、強い帰還路を含む回路やバイポーラ回路などへの適用はほとんど示されていない。MOS 回路では、各節点間の結合強度が解析区間を通してほとんど変化しないので、静的回路分割が用いられる。これに対してバイポーラ回路では、素子の動作領域によって各節点間の結合強度が大きく変化するため、静的な分割では、解析の効率向上は望めない。

本研究では、バイポーラトランジスタの動作領域に基づく動的回路分割技法を緩和解に適用し、バイポーラ回路の解析を効率的に行う方法について検討した。バイポーラトランジスタは、エバースモデルで置き換えられる。このとき、モデル内のダイオードが順バイアス状態であるか逆バイアス状態であ

るかにより、トランジスタの状態を ON 状態と OFF 状態に分け、OFF 状態の場合に回路を分割する。各時刻で回路分割を動的に行い、波形緩和および反復タイミング解析を実行した。(a) リングオシレータと (b) リプル加算器を例として、回路規模に伴う CPU タイムの関係を図2に示す。ここでは、直接法 (DM)、動的分割技法に基づく波形緩和



(a) Ring oscillator



(b) Ripple adder

図2 回路規模と解析時間

法 (WR), 動的分割技法に基づく反復タイミング解析 (ITA) についての結果が示されている。図 2 より, 本研究で提案した動的分割技法に基づく緩和アルゴリズムが直接法に基づくアルゴリズムに比べて優れていることが分かる。

以上, 本研究においては, 直接法に基づく回路シミュレーションおよび緩和法に基づくタイミングシミュレーションの高速化技術についての提案とその検証を行った。

[今後の研究の方向, 課題]

現在, シミュレータのフレームを構築中であり, 実用化を目指している。更に, 今後, 時間/周波数領域混合モードシミュレータの開発へと発展させる予定である。

[成果の発表, 論文等]

- 1) "Relaxation-Based Algorithms for Bipolar Circuit Analysis", Proc. of 1993 Joint Technical Conf. on Circuits/Systems, Computers & Communications, pp.566-569 (July 1993) and to appear in IEICE Trans. on Fundamentals, Vol. E 77-A, No. 6 (June 1994).
- 2) "SPLIT 2.2: 混合モード回路シミュレータ", 電子情報通信学会技術報告, NLP 93-86, pp. 9-16 (1994-03).
- 3) "Mixed Mode Circuit Simulation Using Dynamic Network Separation and Selective Trace", IEICE Trans. on Fundamentals, Vol. E 77-A, No. 3, pp.454-460 (March 1994).
- 4) "Iterated Timing Analysis with Dynamic Partitioning Technique for Bipolar Transistor Circuits", Proc. of 1994 IEEE Int'l Symp. on Circuits & Syst., Vol. 1 of 6, pp.411-414 (May 1994).

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

Geometric Modeling System by Active Vision with Reactive Planning

921002

研究代表者 大阪大学工学部電子制御機械工学科 助教授 浅田 稔

[研究の目的]

視覚情報を利用した環境や物体の幾何モデリングは、人工知能やロボティクスの中心課題のひとつである。本研究では、観測者の行動を、観測中の認識結果を用いて動的に立案(プランニング)することにより、高効率かつ正確な環境モデリングを行う能動視覚(アクティブビジョン)システムに必要なアルゴリズムを開発し、本システムの有効性・実現性について検討するを目的とする。

ここでは、6軸多関節ロボットアームの先端に取り付けられたTVカメラを想定し、人間が適当に提示し、動かす対象物体を追跡することにより、対象物体の形状推定する枠組について検討する。動的立案機能を実時間で実現させるためには、処理時間を必要とする3次元の定量的な再構成過程を用いることは適当ではない。そこで本研究では、単純な視覚追跡機能をロボット視覚の基本的なビヘービアとしてとらえ、追跡時に生じるフローパターン、ロボットアームの動き、対象物体の動きを考慮することにより形状推定する。これらの情報が得られれば、形状推定は既存手法を流用できるので、本報告では、人間が提示し、動かす対象物体から生じるフローパターンから、ロボットアームを制御して対象物を追跡する手法の原理と実システム

を紹介する。

[研究の内容、成果]

人間が提示した対象物を追跡する手法は、最近、ビジュアルサーボ機構として実現する研究が行なわれているが、対象物体の3次元形状もしくは、対象までの距離を既知とするものが多い。ここでは、未知物体を対象と考えているので、画像上の運動パターンのみが入力情報となる。よって、画像上の運動パターン、すなわち、オプティカルフローのみから、対象の運動パターンを消去させるためのアームの運動制御を実現する。3次元情報が欠如しているので、ここでは、フローパターンの定性的な性質を用いて、アームを制御する。

1 フローパターンを用いたビジュアルサーボ

1.1 座標系の定義

まず、単眼視の場合の座標系を定義する。対象物体は、ある点を中心にして並進速度(U, V, W)、回転速度(w_x, w_y, w_z)で運動しているとする。そして、この中心点を物体中心の座標系 O として、図1のように座標系を設定する。カメラの光軸は、 Z 軸と一致しており、カメラ中心は $(0, 0, Z_c)$ にあ

る。カメラ中心から光軸方向に焦点距離 f だけ離れた位置に光軸と直交する平面（画像面）が存在する。画像座標系の x, y 軸は、物体中心の座標軸 X, Y 軸にそれぞれ平行になるように設定する。

2 カメラのモデル

図1から、物体中心座標系から見た*i*番目の特徴点の座標 $P = (X_i, Y_i, Z_i)$ と画像上に写っている特徴点の座標 $p = (x_i, y_i)$ の関係は、以下になる。

$$x_i = \frac{fX}{Z_c - Z_i}, \quad y_i = \frac{fY}{Z_c - Z_i} \quad (1)$$

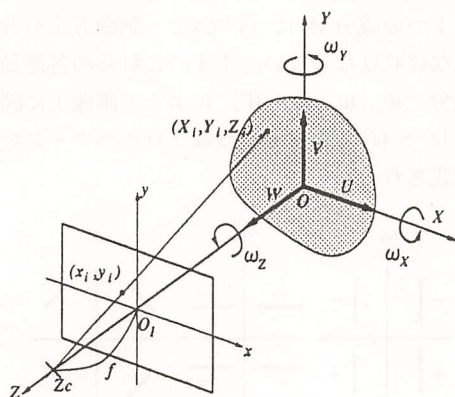


図1 座標系の設定

3 オプティカルフローの解析

並進速度 (U, V, W) , 回転速度 (w_x, w_y, w_z) で物体が運動している時, 物体面上の i 番目の特徴点 $P = (X_i, Y_i, Z_i)$ は次のように運動する。

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_i \\ \dot{Y}_i \\ \dot{Z}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} \quad (2)$$

そこで、この特徴点 P の運動により、画像面上に生成されるオプティカルフロー $(\dot{x}_i, \dot{y}_i)$ は式 (1), (2) により以下のように求められる。

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= \left(\frac{fX}{Z_c - Z_i} \right)' \\ &= \frac{fU}{Z_c - Z_i} + \frac{Wx_i}{Z_c - Z_i} + w_x \frac{x_i y_i}{f} \\ &\quad + w_y \left\{ \frac{fZ_i}{Z_c - Z_i} - \frac{x_i^2}{f} \right\} - w_z y_i \\ \dot{y}_i &= \left(\frac{fY}{Z_c - Z_i} \right)' \\ &= \frac{fV}{Z_c - Z_i} + \frac{Wy_i}{Z_c - Z_i} - w_x \\ &\quad - \left\{ \frac{fZ_i}{Z_c - Z_i} - \frac{y_i^2}{f} \right\} + w_y \frac{x_i y_i}{f} + w_z x_i\end{aligned}$$

また、先の特徴点がある平面 $Z=pX+qY$ 上に載っていると仮定し、その平面の投影像上には、次のようなオプティカルフロー $(\dot{x}_i, \dot{y}_i)$ が生じる。

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= \frac{fU}{Z_c} + Ax_i + By_i + Cx_i y_i + Dx_i^2 \\ \dot{y}_i &= \frac{fV}{Z_c} + Ex_i + Fy_i + Gx_i y_i + Hy_i^2\end{aligned}\quad (3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} A &= \frac{pU}{Z_c} + \frac{W}{Z_c} w_y p & B &= \frac{qU}{Z_c} + q w_y - w_z \\ C &= \frac{qW}{Z_c f} + \frac{w_x}{f} & D &= \frac{pW}{Z_c f} - \frac{w_y}{f} \\ E &= \frac{pV}{Z_c} - w_x p + w_z & F &= \frac{qV}{Z_c} + \frac{W}{Z_c} - w_x q \\ G &= \frac{pW}{Z_c f} - \frac{w_y}{f} & H &= \frac{qW}{Z_c f} + \frac{w_x}{f} \end{aligned}$$

である。そこで、画面上のオプティカルフローの平均値 $(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$ について考えてみる。

物体内部の点で図 2 のような領域 $I \sim IV$ における 4 点 (l, l) , $(-l, l)$, $(-l, -l)$, $(l, -l)$

$-l$ におけるフローの平均値を対象物体内部のオプティカルフローの平均値とする。すなわち、

$$\begin{aligned}
 \bar{\dot{x}}_i &= \frac{\dot{x}_I + \dot{x}_{II} + \dot{x}_{III} + \dot{x}_{IV}}{4} \\
 &= \frac{fU}{Z_c} + l^2 \left(\frac{pW}{Z_c f} - \frac{w_y}{f} \right) \\
 \bar{\dot{y}}_i &= \frac{\dot{y}_I + \dot{y}_{II} + \dot{y}_{III} + \dot{y}_{IV}}{4} \\
 &= \frac{fV}{Z_c} + l^2 \left(\frac{qW}{Z_c f} + \frac{w_x}{f} \right) \quad (4)
 \end{aligned}$$

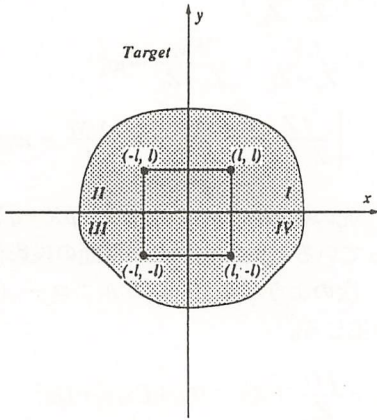


図2 オプティカルフローの平均値の計算

今、これら4つの点を画面中央付近の点であるとするとき $l \approx 0$ としても良いので、結局、フローの平均値は、

$$(\bar{\dot{x}}_i, \bar{\dot{y}}_i) = \left(\frac{fU}{Z_c}, \frac{fV}{Z_c} \right) \quad (5)$$

となる。従って、フローの平均値を用いて、物体の並進速度 (U, V) に追従できるような制御則を立てることができる。すなわち、物体の並進速度 (U, V) による画面上での目標のフローベクトルを v_d 、フローの平均ベクトルを $\bar{v}$ とすると、フィードバック入力 v_{trans} として次のようなものを考えればよい

ことになる。

$$v_{trans} = -K_{trans}(\bar{v} - v_d)$$

ここで、

$$K_{trans} = \begin{bmatrix} K_t & 0 \\ 0 & K_t \end{bmatrix}$$

である。対象の見かけの運動パターンを消去したいときは、 $v_d = 0$ である。

3.1 フローパターンの定性的表現を用いたビジュアルサーボ

前節までの手法により、物体の並進運動の2つの成分に対する追従はできる。そこで次に、回転運動成分 (w_x, w_y, w_z) と並進運動の1つの成分 W についての、制御方法を考えなければならない。まず、これらの各運動成分 (w_x, w_y, w_z, W) によって画像上に図3(a)~(d)で表せるようなフローパターンが生成される。

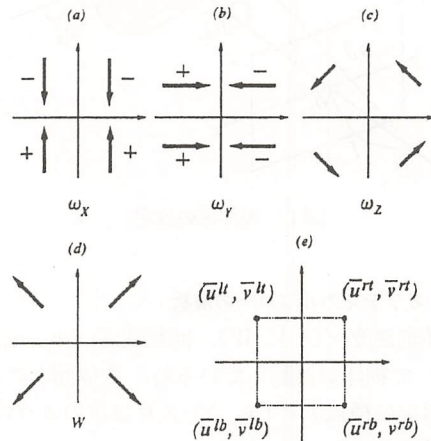


図3 フローパターン

先の式から、各運動成分によって生じる画像でのフローベクトル (u, v) は次のようにな

る。

$$W \text{ による: } \begin{cases} x \text{ 方向: } W \left(\frac{x_i}{Z_c} + \frac{q x_i y_i}{Z_c f} + \frac{p x_i^2}{Z_c f^2} \right) \\ y \text{ 方向: } W \left(\frac{y_i}{Z_c} + \frac{p x_i y_i}{Z_c f} + \frac{q y_i^2}{Z_c f^2} \right) \end{cases}$$

$$w_x \text{ による: } \begin{cases} x \text{ 方向: } w_x \frac{x_i y_i}{f} \\ y \text{ 方向: } w_x \left(-p x_i - q y_i + \frac{y_i^2}{f} \right) \end{cases}$$

$$w_y \text{ による: } \begin{cases} x \text{ 方向: } w_y \left(p x_i + q y_i - \frac{y_i^2}{f} \right) \\ y \text{ 方向: } -w_y \frac{x_i y_i}{f} \end{cases}$$

$$w_z \text{ による: } \begin{cases} x \text{ 方向: } -w_z y_i \\ y \text{ 方向: } w_z x_i \end{cases}$$

これらの値を用いることにより、前節と同様に図3 (e) で示される4つの領域でのフローの平均値 $(\bar{u}^r, \bar{v}^r)$, $(\bar{u}^l, \bar{v}^l)$, $(\bar{u}^{lb}, \bar{v}^{lb})$, $(\bar{u}^{rb}, \bar{v}^{rb})$ を、つぎのように計算できる。

$$\begin{cases} \bar{u}^r = aW + bw_x + cw_y - lw_z \\ \bar{v}^r = aW - cw_x - bw_y + lw_z \\ \bar{u}^l = dW - bw_x - cw_y - lw_z \\ \bar{v}^l = -dW - cw_x + bw_y - lw_z \\ \bar{u}^{lb} = eW + bw_x - cw_y + lw_z \\ \bar{v}^{lb} = eW + cw_x - bw_y - lw_z \\ \bar{u}^{rb} = -gW - bw_x + cw_y + lw_z \\ \bar{v}^{rb} = gW + cw_x + bw_y + lw_z \end{cases} \quad (6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} a &= \frac{l}{Z_c} + \frac{ql^2}{Z_c f} + \frac{pl^2}{Z_c f} \\ b &= \frac{l^2}{f} \\ c &= pl + ql - \frac{l^2}{f} \\ d &= -\frac{l}{Z_c} - \frac{ql^2}{Z_c f} + \frac{pl^2}{Z_c f} \\ e &= -\frac{l}{Z_c} + \frac{ql^2}{Z_c f} + \frac{pl^2}{Z_c f} \end{aligned}$$

$$g = -\frac{l}{Z_c} + \frac{ql^2}{Z_c f} - \frac{pl^2}{Z_c f}$$

である。そこで、式(6)を持ちいて各運動成分 (w_x, w_y, w_z, W) を平均フローベクトルで、次のように表現する。

$$pW = (\bar{u}^r + \bar{u}^l + \bar{u}^{lb} + \bar{u}^{rb}) \frac{Z_c f}{4l^2}$$

$$qW = (\bar{v}^r + \bar{v}^l + \bar{v}^{lb} + \bar{v}^{rb}) \frac{Z_c f}{4l^2}$$

$$w_x = \frac{(\bar{u}^r + \bar{u}^{lb} - \bar{u}^l - \bar{u}^{rb}) - (\bar{v}^r + \bar{v}^l + \bar{v}^{lb} + \bar{v}^{rb})}{4b}$$

$$w_y = \frac{(\bar{u}^r + \bar{u}^l + \bar{u}^{lb} + \bar{u}^{rb}) - (\bar{v}^r - \bar{v}^l + \bar{v}^{lb} - \bar{v}^{rb})}{4b}$$

$$w_z = \frac{(\bar{u}^{rb} + \bar{u}^{lb} - \bar{u}^r - \bar{u}^l)}{4l} \quad (7)$$

従って、平均フローベクトルを計算し、これらの式を用いることにより各運動成分の符号を決めることができる。

そして、画像中のフローベクトルを目標の状態に達成させるフィードバック入力 u_{rot} を、これらの符号と各運動成分毎のパラメータを用いて次のように生成する。

$$u_{rot} = -K_{rot}(\text{sgn}(w_x), \text{sgn}(w_y), \text{sgn}(w_z), \text{sgn}(W))^T \quad (8)$$

ここで、 $\text{sgn}(\)$ は、符号を表す関数である。また、

$$K_{rot} = (K_{wx}, K_{wy}, K_{wz}, K_W)$$

である。このパラメータを調整することにより、カメラを物体に対して追従させる。

4 実験システム

図4に、構築中のサーボシステムを示す。6自由度ロボットアーム (Js5) の手先に、CCDカメラを取り付ける。このカメラから

の入力画像から、視覚追跡システムにより、実時間でオプティカルフローを抽出し、平均値フローの計算をホスト CPU ボードにより行う。対象物体は、はじめ画像の中央付近に投影されているとする。図5に、実験中のロボットアームの様子を示す。

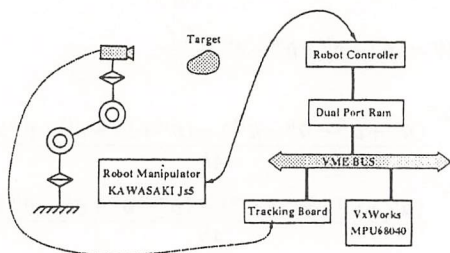


図4 システム構成

図6に、抽出されたフローパターンの例を示す。抽出されたフローパターンによりアームの制御パラメータを決定し、コントローラに送信する。

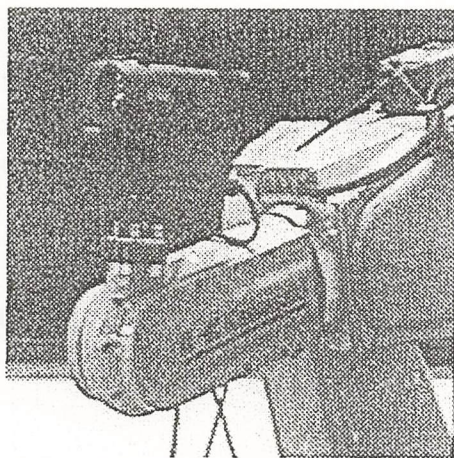


図5 実験中のロボットアーム



図6 フローパターン

5 今後の方針

実システムは現在、構築中であり、アーム制御の安定性、獲得されたデータ（アームの運動情報、画像上のフローパターン）からの形状推定手法などを検討中である。

提案した視覚サーボによる対象物体の追跡手法は、動的立案機能を実現する一つの基本行動と考えられる。対象物体の形状推定が、視覚サーボ系と同時に働くことが可能になれば、対象物体の末観測部を計測するための運動パターンを v_d として生成することにより、運動系と密に結び付いた視覚観測系が実現可能と考えられ、今後の研究課題である。

〔成果の発表、論文など〕

- 1) 中村, 浅田, 細田, 1994年11月日本ロボット学会学術講演会発表予定。

関連論文：形状推定

- 2) 浅田, 中村, 「照明条件および反射係数未知の場合の筒状物体の形状復元」, 情報処理学会論文誌, vol. 34, no. 5, pp. 884-891, 1993.

関連論文：視覚サーボ

- 3) 細田, 浅田, 「構造やパラメータに関する知識を

ボットシンポジウム予稿集, pp. 37-42, 1994.

4) 浅田,「ダイナミックシーンの理解」,電子情報通信学会,1994.

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

A Study on a Diagram Acquisition and Generation System for Visually Handicapped Persons Using Tactile and Auditory Senses

921007

研究者代表	名古屋大学教授	大西昇
共同研究者	名城大学(前名古屋大学)教授	杉江昇
	名古屋大学大学院生	皆川洋喜
	愛知県立名古屋盲学校教諭	小野田明好
	愛知県立名古屋盲学校教諭	水谷厚彦

[研究の目的]

図は文字と同様に重要な情報表現であるが、盲人には、図をよむ手段は少なく、特に描く手段は皆無である。盲人が図を認識し、さらに頭の中のイメージを外部に表現することを可能とするシステムを研究・開発する。これにより、文字情報のみに限定されていた盲人は、格段に豊かな情報に接することができる。そのために、以下の研究・開発を行った。

[研究の内容、成果]

1. システムの構築

システムは、コンピュータ、CCDカメラ、触覚ディスプレイ、音声入出力装置からなる(図1参照)。図情報は、触覚ディスプレイのマトリクス状に配置されたピンの高さの指定(0, 1, 2の3段階の設定が可能)と、ピンへの音声情報の割当により表現される。

2. 図表現のソフトウェア作成

図を触覚ディスプレイ上の触図と音声で読

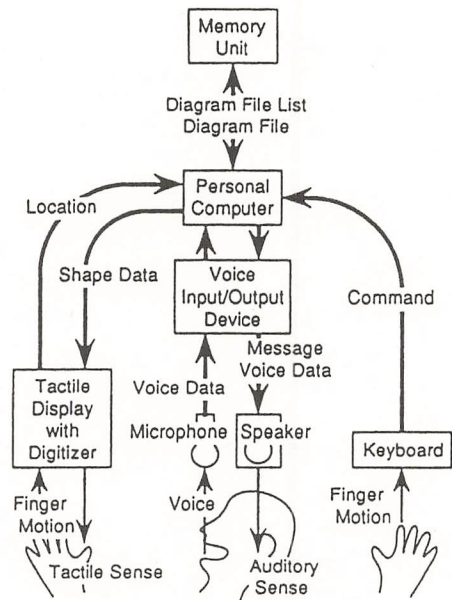


図1 システムの構成

み書きできるようなソフトウェアを作成した。触図とは、ピンの凹凸で図の平面的な広がり配置といったグローバルな情報(地図の場合、道路・建物などの位置関係)を表現するもの

である。一方、音声は触図では表現しにくい詳細な情報（地図の場合、建物・道路の名称）を表現するのに使用する。触覚と音声という複数のモダリティーを、それぞれの長所を活かし、かつ他の短所を補うように使用することで、図の認識が容易になる。図2に盲学校の生徒が本システムを使用して作成した触聴地図を示す。

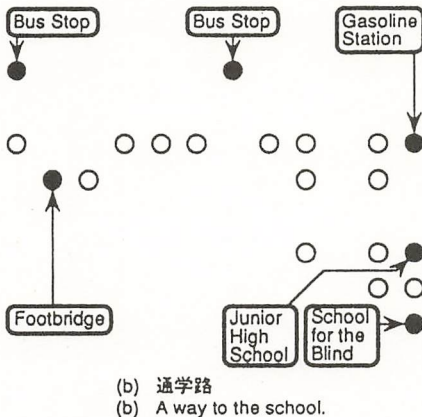
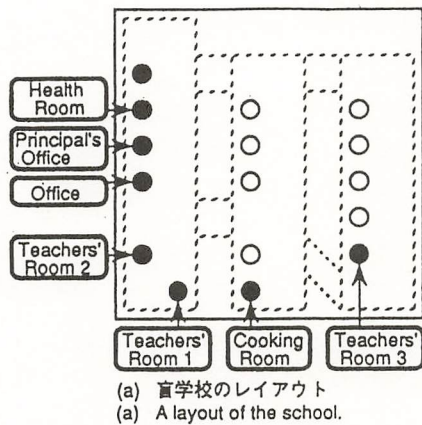


図2 盲学校生徒（18歳）が描いた触聴図
○：高さ1のピン，●：高さ2のピン，
○→：音声データ

3. 心理実験によるシステムの評価

盲学校の生徒に、製作したシステムを使用してもらい、評価を行った。被験者は高校生2名で、システムを使用した図の読みと作成の2つの課題を与えて実験を行った。その結果、1) 図の呈示法、2) 本システムによる図の表現力、3) 盲人が頭の中に描く図のイメージ、について貴重なデータが得られた。さらに、一枚の触図で表現できないような複雑な図の表現方法をどのようにすべきかと言う課題が明らかになった。

[今後の課題]

今後の課題としては、さらに詳しく盲人のイメージについて研究を行うこと、そしてシステムの表現力を豊かにするために音楽などのメディアを導入したり（マルチメディア化）、歩行地図の学習などの具体的アプリケーションを開発することである。

[成果の発表、論文]

- 1) H. MINAGAWA, N. OHNISHI, and N. SUGIE: A Vision Substitution System for Reading and Writing Diagrams using Tactile and Auditory Senses, Proc. of 3rd Int. Conference on Computers for Handicapped Persons, Vienna, AUSTRIA, July 7-9, pp. 353-362 (1992.07).
- 2) 皆川洋喜, 大西昇, 杉江昇: 触覚と聴覚による盲人用マルチメディアシステム, 第18回感覚代行シンポジウム, pp. 106-109 (1992.12).
- 3) 皆川洋喜, 伊藤毅志, 大西昇, 杉江昇: 盲人用図表現システムのための基礎的研究, 情報処理学会ヒューマンインタフェース研究会, HI 50-9 (1993.09).
- 4) 皆川洋喜, 大西昇, 杉江昇: 盲人用図表現システム, 第14回バイオメカニズム学術講演会, pp. 81-82 (1993.10).

- 5) 皆川洋喜, 大西昇, 杉江昇, 小野田明好, 水谷厚彦: 盲人の地図表現に関する実験と考察, 第19回感覚代行シンポジウム, pp. 103-106 (1993.12)。
- 6) 皆川洋喜, 大西昇, 杉江昇: 触覚と聴覚による盲人用図表現システム, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J 77-D-II, No. 3, pp. 616-624 (1994.03)。
- 7) 皆川洋喜, 伊藤毅志, 大西昇, 杉江昇, 小野田明好, 水谷厚彦: 盲人の図的理解を支援するシステム—触覚・聴覚ディスプレイの試用と考察—, 日本認知科学会第11回大会, pp. 62-63 (1994.06)。
- 8) H. MINAGAWA, N. OHNISHI, and N. SUGIE: Tactile-Audio User Interface for Blind Persons, 4th Int. Conference on Computers for Handicapped Persons, Vienna, AUSTRIA, September 14-16 (1994.09 発表予定)。
- 9) 皆川洋喜, 大西昇, 杉江昇, 小野田明好, 水谷厚彦: 盲人用地図システム—触覚・聴覚の地図表現—, 第15回バイオメカニズム学術講演会 (1994.10 発表予定)。

生物神経系機能の情報処理技術への応用基盤の確立

Functional Formulation of Biological Neuron Network as A Basis of Information Processing Technologies

921010

研究者代表	北海道大学電子科学研究所	下澤 楯 夫
共同研究者	北海道大学電子科学研究所	清水 利 伸
	北海道大学電子科学研究所	馬 場 欣 哉

[研究の目的]

動物は食べ、走り、追い、つがい、戯れるものである。これらの機能は線形な要素の集合では成し得ないことは明らかで、神経系の非線形性はその動作の鍵である。神経系の設計原理を明らかにすることは、行動の発現機構という生物学上の謎の解明のみならず、柔軟な機能をもった情報処理装置を実現するための工学的基盤としても不可欠である。

しかし、神経系は進化の産物であり、自然は我々のためにその設計図を用意してはくれない。また、一般に強い非線形性を持ったシステムの解析は容易ではない。したがって、未知の非線形信号処理系としての神経のシステム同定と機能解剖を行うための道具立てが必要になる。

我々は、Wiener の提唱した Gauss 白色雑音を用いた統計的システム同定法、いわゆる“Wiener の非線形解析法”を用いて、昆虫の感覚細胞という単純ではあるが、奇妙で厄介な性質を持った神経系の工学的定式化を試みた。

[研究の内容、成果]

1 方 法

Wiener の非線形解析では、系に、Gauss 白色雑音（以下 GWN と略す） x を入力したときの応答 y を

$$\begin{aligned} y(t) = & h_0 \\ & + \int_0^\infty h_1(\tau) x(t-\tau) d\tau \\ & + \int_0^\infty \int_0^\infty h_2(\tau_1, \tau_2) \\ & \quad \cdot x(t-\tau_1) x(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \\ & - P \int_0^\infty h_2(\tau, \tau) d\tau \\ & + \\ & \vdots \quad (P \text{ は GWN のパワースペクトル}) \end{aligned}$$

のように、入力 x の畳み込み積分の級数に展開する。積分変換核 h_n を n 次の Wiener 核と呼ぶ。この展開は線形系における入出力関係を表す畳み込み積分の形式的な拡張であり、Wiener 核はいわば線形系におけるインパルス応答の一般化されたものである。

GWN 入力と応答から未知の系の Wiener 核を推定するには、Lee と Schetzen による入出力間の多重の相互相関をとる方法を用いる (1)。それによれば、

$$\begin{aligned} h_0 &= \overline{y(t)}, \\ h_1(\tau) &= \frac{1}{P} \overline{y(t) \cdot x(t-\tau)}, \\ h_2(\tau_1, \tau_2) &= \frac{1}{2P^2} \overline{\{y(t) \cdot x(t-\tau_1) x(t-\tau_2) \\ &\quad - h_0 P \delta(\tau_1 - \tau_2)\}} \end{aligned}$$

と漸次的に求めることが出来る。

2 実験と結果

コオロギやゴキブリは腹部後端に“尾葉”と呼ばれる一対の突起を持ち、各々の尾葉には数百本の細かい毛が生えている。これらの毛は“気流感覚毛”と呼ばれ、周囲の空気の流れを検出している (2)。

各々の気流感覚毛の根元には感覚神経細胞

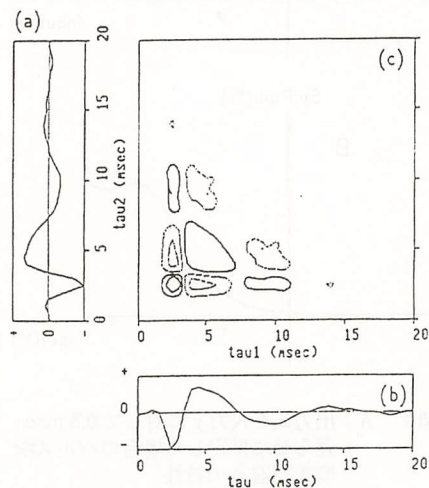


図1 感覚神経細胞の1次(a, b)と2次(c)の Wiener 核, 時間スケールは msec

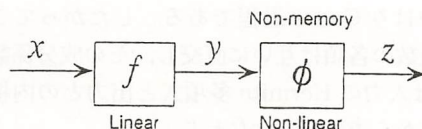


図2 感覚細胞の等価モデル

があり、細胞の先端部は毛が傾くと圧縮応力を受ける。感覚細胞は、毛の傾きに関する情報を活動電位（幅 0.5 msec 程度の電氣的なパルス）の列に変換して中枢へ伝える。

GWN で周りの空気を機械的に駆動し、感覚細胞の活動電位パルス列を出力として、この気流感覚器の Wiener 核を求めた (図1)。活動電位を 1 V、0.5 msec のパルスの有無に直してあるので、得られた Wiener 核は出力パルスの発射確率の時間変化を表すことになる。

感覚細胞の Wiener 核 (図1) を見ると、2 次の核は 1 次の核をふたつ縦横に並べて積をとった形になっている。

このように 2 次の核が 1 次の核の積の形に書ける最も単純なモデルは、図2に示すような、線形要素と記憶のない非線形要素との縦列接続である。記憶のない非線形要素は、出力パルスの発射確率はその瞬間の入力信号の瞬時値だけで決まる、非線形なパルス密度変調器である。

線形要素 f は 1 次の核 h_1 に、その出力の実効値が 1 になるような規格化をほどこして得る。

次に非線形要素 ϕ を推定する。まずパルス発生確率 ϕ を入力 y の Hermite 多項式に展開し、各時刻における $z(t)$ を $y(t)$ で表現すると、 $z(t) = \phi(y(t)) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n H_n(y(t)/\sigma_y)$ 。

(但し σ_y^2 は y の分散)

y は f による GWN x の線形量み込みだか

らやはり Gauss 過程である。したがってこの級数の各項は互いに直交し、その成分係数 a_n は入力 y の Hermite 多項式と出力との内積計算から求まる。すなわち、

$$a_n = \frac{1}{n!} \overline{z(t) H_n(y(t) / \sigma_y)}.$$

この方法で感覚細胞のパルス密度変調器の特性を推定すると、図 3 A のような非単調な山型のカーブを描く。 y とパルス列 z から、 $y(t)$ の値ごとにパルスの出た数を数えた図 3 B のヒストグラムと比べてもよく合っていることがわかる。しかしこれまでの神経生理学の知見では、神経細胞はシグモイドのパルス

発射特性を示すとされている。このようなある強さ以上の入力で応答が減る奇妙な特性をどう解釈すればよいのだろうか。

一般的に、神経細胞は刺激を受けてからパルスを発生するまでに若干の時間がかかる。刺激が弱ければパルスは遅れて発生する。つまり、刺激の受容から神経パルス発生までの間には、神経細胞膜上の電位依存性イオンチャネルによる膜キャパシタンスの充電などの物理化学的なプロセス（決定論的なダイナミクス）が働いている。

図 2 のモデルでは非線形要素 ϕ を無記憶としているし、時間遅れは線形操作だから、系全体の時間遅れは平均化されて線形要素 f

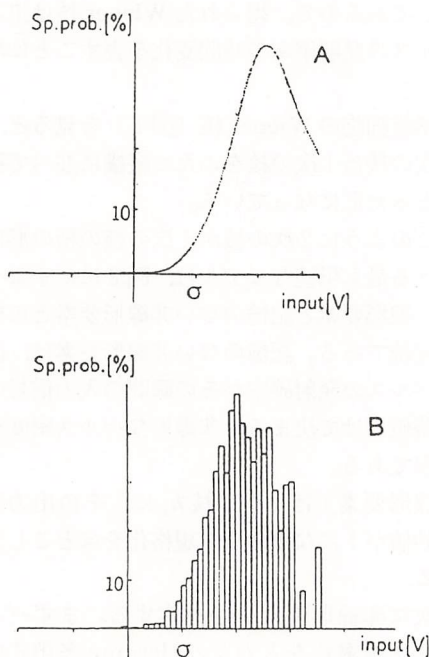


図 3 A：感覚細胞の非線形要素 ϕ の出力パルス発射確率、横軸は変調器への入力瞬時値
B：内積計算ではなく、入力が各瞬時をとったところで出ているパルスを数えたヒストグラム

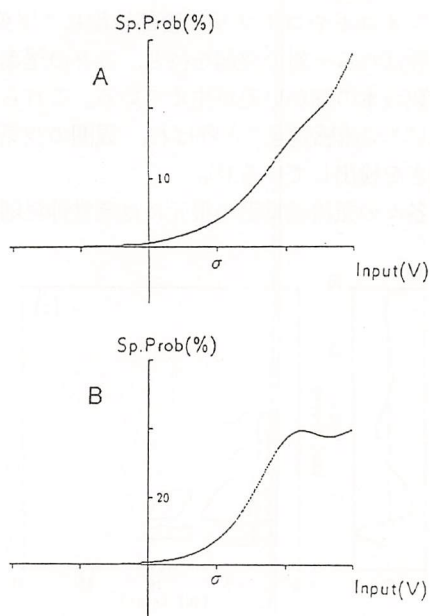


図 4 A：出力 z を入力 y に対して 0.5 msec 遅らせて推定した場合のパルス密度変調器 ϕ の特性
B：A とまったく遅らせない場合（図 3A）とのパルス密度変調器 ϕ の特性の和

の推定値に含まれている。従って、非線形要素 ϕ のみを見ると、その入力が大きいたまにはその出力パルスは平均より“早めに”出るであろうし、入力が小さければ平均より“遅れて”出ることが予測できる。

そこで、出力パルス列 z をわずかに遅らせて、非線形要素の特性を求めてみた。そうすると図 4 A のように、入力瞬時値の高いところでのパルス発生確率が高くなっている。入力が大きければパルスの発生時刻は平均より早まることがわかる。時間遅れを全て線形要素 f に押し込めて、内積計算により非線形要素 ϕ を推定すると、入力 y の高い値に対応する出力パルスは平均より早く出てしまい、その値での発生確率は低く見積もられることがわかる。

ここで、図 3 A と図 4 A とを合計した特性を求めると、一般になじみの深いシグモイドが得られる (図 4 B)。すなわち、非線形要素 ϕ は、ある時刻の近傍のどこかにパルスを発生させる (平均的) 確率でみれば入力のシグモイド函数と考えてよい。

このようにして抽出した線形要素 f と非線形要素 ϕ の縦列接続モデルが、系の振る舞いをどの程度表現できるか見てみよう。

まずある神経細胞の活動を記録し、20 秒間の GWN 刺激波形 x と神経パルス出力 z から f と ϕ を推定する。ついで、 f と ϕ の推定に用いたものとは別の GWN 波形を 150 msec 分だけ切り出して、同じ神経細胞に刺激として繰り返し 200 回与え、小さな時間幅毎に出力パルスが出現する頻度を測ってヒストグラムを得る。これを刺激回数で割れば、入力波形 x に対する神経パルスの発射率 z の実測値とみなすことが出来る (図 5, PSTH)。前もって推定された f と ϕ にこの 150 msec 分の GWN 波形を与えてモデルの

出力 z を予測し、パルス発射確率の実測値 (PSTH) と比べる。20 秒の GWN から推定した z は実際の出力をかなりよく表していることが分かる。

このように、Wiener の非線形解析法を変形することによって、高次の Wiener 核という抽象的表現から抜け出して、ある程度まで系の物理的構造と関連づけながら神経系の振る舞いを定式化できることが分かる。

[今後の研究の方向、課題]

図 5 の PSTH に見るように、この系はたかだか 200 パルス/sec 程度でパルス列を送り出している。一方、その上に乗る変調信号 y の周波数帯域幅も 200 Hz 程度である。搬送波のパルスレートと信号の帯域幅の何十倍もの高さを取る工学的なパルス密度変調とは

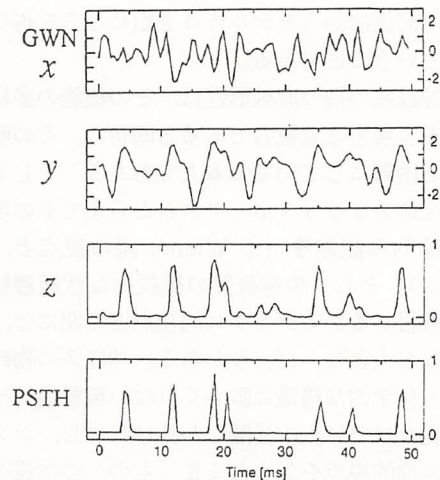


図 5 推定された f と ϕ のモデルに刺激波形を与えたときに予測される f の出力 y と ϕ の出力 z 。PSTH は、同じ刺激波形を繰り返し与えて、出力パルスを数えたヒストグラム

まるで違う「奇妙な」変調系であることに気付くであろう。

この感覚細胞にはもっといやな性質がある。同一の感覚細胞に与える刺激入力のパワーを代えてパルス密度変調特性を推定すると、その特性は入力強度につれて変わる。つまりこの感覚細胞は刺激のパワーによってパルス密度変調器として感度を2桁以上にわたって変える。

このような系をWienerの方法で推定した場合、手に入るのは系の挙動の巨視的・統計的な性質のみである。また、わずか0.5 msecのパルスタイミングのズレが非線形要素 ϕ の推定に大きく効くことから、その内部に何らかのダイナミクスを持つことも認めざるを得ない。

はっきりしていることは、遙か昔に設計図を失った神経系という生の非線形信号処理装置を調べる際、いきなりダイナミクスから手をつけることはできず、まずブラックボックス的記述法からモデル作りを始めざるを得ないということである。

神経系の持つ非線形性は、その機能の多様性を実現する立役者であると同時に、その解析を困難にしている張本人でもある。そして、系全体をブラックボックスととらえてその現象論的な記述を行うWiener流の視点と、「もの」としての神経膜の微視的な状態遷移に着目するダイナミクスの視点との間には、今なお大きなへだたりがある。神経系の物理的・化学的な構造に眼もくれない現象論的抽象化だけでは空中楼閣しか築けないし、システム論的視点を欠いたまま「もの」の性質のみこだわり続けても「樹を見て森を見ない」ことになる。

本研究では、ある簡単な神経細胞について系全体の性質の定式化に成功した。その性質

が、どのようなダイナミクスの構造と対応するのかを明らかにする研究は、今後に残されている。Wiener流の視点とダイナミクスの視点という数学的には反対向きのふたつの立場の間をうめる作業が、生物の神経系の機能の工学的応用の基盤固めに必要とされている(3)。

[研究成果の発表、論文等]

- 1) 感覚神経細胞の感度の入力パワー依存性について, 1993年電子情報通信学会秋季大会講演論文集, 6-103 (1993)
- 2) 神経細胞のパルス発生タイミングの入力振幅依存性, 1993年電子情報通信学会秋季大会講演論文集, 1-269 (1993)
- 3) 白色雑音を用いた神経系の非線形性の解析, 電子情報通信学会技術報告, MBE 93-29, 1-6 (1993)
- 4) パルス密度変調特性の推定に及ぼす神経パルス発生時間遅れの影響, 平成5年度電気関係学会北海道支部連合大会講演集, 367-368 (1993)
- 5) 神経パルス密度変調特性の Hermite 多項式による推定, 平成5年度電気関係学会北海道支部連合大会講演集, 365-366 (1993)
- 6) 非線形神経学, 数理科学, 363, 54-58 (1993)
- 7) 神経細胞におけるパルス密度変調特性の Gauss 雑音入力による推定法, 電子情報通信学会論文誌, DII (準備中)
- 8) System Identification of Non-linear Pulse-density Encoding in An Insect Sensory Neuron. Biol. Cybernetics (in preparation)

引用文献

- (1) Lee, Y.W. and Schetzen, M. Measurement of the Wiener kernels of a Non-linear System by Crosscorrelation, Int. J. Control, 2, 237 (1965)
- (2) 下澤樺夫, 動物の習性とその神経基盤, 計測と制御, Vol. 30, 426-435 (1991)
- (3) 下澤樺夫, 清水利伸, 馬場欣哉, 非線形神経学, 数理科学 No. 363, 54-58 (1993)

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

Study on Intelligent Man-Machine Communication Focusing on Multi-Fingered Robot Hands

921011

研究代表者	東京大学工学部 助教授	中 村 仁 彦
共同研究者	東京大学工学部 教 授	吉 本 堅 一

〔研究の目的〕

機械が家庭やオフィスで人間と共存し、日常的な営みを自然な形で助けるようになるには人間と機械の間のコミュニケーションの知的レベルが人間同士のそれに近づかなければならない。本研究では、汎用多指ロボットハンドを具体例として、人間の日常的な営みを援助する機械と人間との間の知的コミュニケーションを実現するための基礎を確立することが目的である。

〔研究の内容、成果〕

多指ハンドをもつロボットシステムの自律性を高め知能化することによって、人間と機械の間のコミュニケーションを容易にするというのが本研究でとった具体的なアプローチである。これによって将来の機械システムのヒューマンインターフェイスを研究する手がかりとしたいというのが長期的な本研究の位置づけである。

Fig. 1 は本研究で使用した3自由度関節指を3本持つロボットハンドである。 Fig. 2

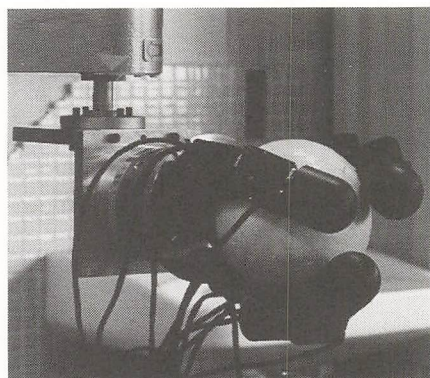


Fig. 1 A three-fingered robot hand

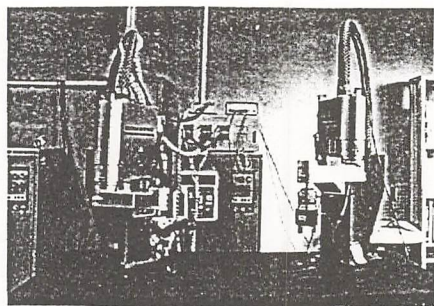


Fig. 2 A dual-manipulator system with the hand on the left

に一方の腕に多指ロボットハンドを、他方にジョーグリッパーを持つ双腕ロボットシステムを示す。これらの装置を用いて研究を行った。

本研究の成果は大きく分けて次の3つのようになる。

- (1) パワーグラスプの研究
- (2) リアクティブグラスプの研究
- (3) 自律的協調の研究

以下にそれぞれについて主な結果を要約する。

パワーグラスプの研究

パワーグラスプとは指先だけではなく指の中間リンク上の複数点での接触や掌の接触までを含める把握形態である。従来のロボットハンドの研究は指先把持が中心で、日頃人間が自然に行うこのような把握をロボットハンドに行わせるための、研究は行われてこなかった。本研究では、ロボットハンドの自律性を高めることを目的として、指や物体の形状や予期される外乱の程度に応じて、パワーグラスプを計画する方法論を構築した^{1~6)}。

一般の3次元のパワーグラスプにおける拘束と拘束力の関係を解析し、把持のロバスト性の定量化を行なう方法確立した。さらに十分な自由度をもたないリンクによって接触拘束を受ける把持として、パワーグラスプを一般化し、この様な把持形態において指関節

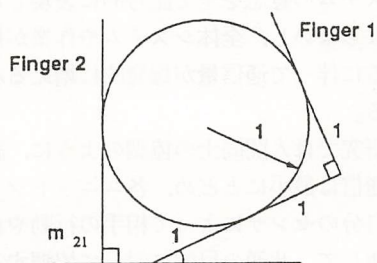


Fig. 3 A two-dimensional power grasping

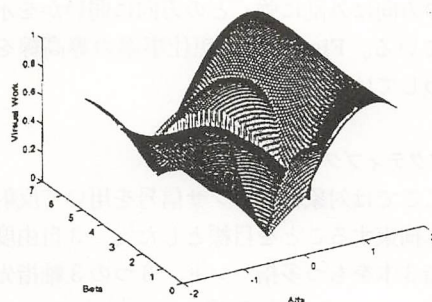


Fig. 4 The minimal virtual work rate

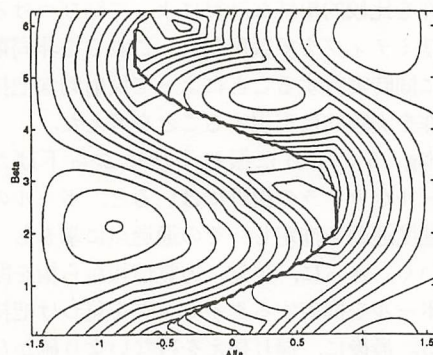


Fig. 5 Contour plot of the minimum virtual work rate

の制御によって把持対象物を操ることのできる運動方向と、接触点における拘束力が指全体として自動的にキャンセルできる外力の方向・大きさを計算する方法確立した。

Fig. 3 のような 2 次元の単純なハンドによるパワーグラスプの評価の例を示そう。このハンドがあるトルクを出してボールを平衡状態で把持している。このときボールに加わる全ての方向からの外乱力に対して、トルクを一定に保つとき、外乱力がボールを運動させるためにしなければならない最小の仮想仕事率の分布を Fig. 4 のように求めることができる。これはこの特定のパワーグラスプが

どの方向に外乱に強くどの方向に弱いかを示している。Fig. 5 は仮想仕事率の等高線を表わしている。

リアクティブグラスプの研究

ここでは対象物をセンサ信号を用いて反射的に拘束することを目標とした⁷⁾。3自由度の指3本をもつ多指ハンド、3つの3軸指先力センサ、6軸力手首センサ、トランスピュータを用いた実時間画像処理装置からなる実験システムを構築し、センサ信号と指の動作を比較的単純な計算によって結びつけるプリミティブを多数用意し、これらを非同期的に同時実行することによって反射的な把持動作を実験的に実現することを考えた。

Fig. 6 のように振り子状にぶら下げたボールがカメラの視野にはいると、ボールの加速度運動を推定し、その通過点に掌をもっていく。さらに、視覚、力覚情報から指を閉じボールを拘束するタイミングを見つけ把持する。最後に、握り替えを行ないより確かな把握を実現する。以上の動作を実験的に確認した。

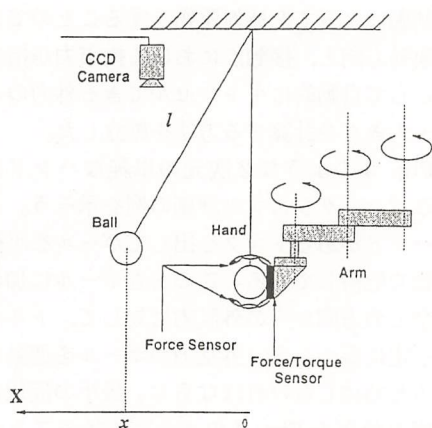


Fig. 6 Reactive grasping of a flying ball

最近、注目されているサブサンプリング・アーキテクチャに構造的には近いものであるが、センサ信号と指の動作の間に簡単な計算を許すことによって、プリミティブの作成や複数のプリミティブの合成が constructive に可能になると考えられる。

現在のところ、何とか反射的な把持が実現できたという段階であり、プリミティブの作成や合成に関する理論的な研究が今後に残された大きな研究課題である。本研究で構築した実験システムが今後の理論的・実験的研究の道具として大いに役立つと考えられる。

自律的協調の研究

将来、機械が固有のセンサによって自分の置かれている状況を認識して、人間同士の協調作業のような「柔らかなコミュニケーション」を用いて、人間＝機械間あるいは機械＝機械間の協調を行なうことが可能になると考えられる。

従来、複腕ロボットあるいは複数のロボットシステムの協調制御では、(a) 1つの「脳」によって集中的に制御すること、あるいは(b) 複数のロボットシステム間で密な通信や放送を行ない制御すること、が研究されてきた。(a) の様な「堅い」構造をもつシステムでは、システムの再構成に対処できない。また、(b) ではフレキシビリティはあるものの各システムの意志を全て記号的に表現しなければならないし、全体システムや作業が複雑になるに伴って通信量が爆発的に増える心配がある。

本研究では人間同士の協調のように、記号的な通信は最小にとどめ、各ユニットシステムが自分のセンサによって相手の行動や意志を判断して、共通の目的に対して協調するようなシステムの構成法を研究した。このよう

なシステムが完成すれば、人間の作業者とロボットシステムとの協調が、人間に負担をかけることなく自然に可能になる。本研究では、このような大きな目標を念頭に置き、2台のロボットシステム間の過渡的な受け渡し動作を通信を用いることなく実現することを研究した。

ロボットハンドをもつ1台のスカラ型ロボットと、簡単なグリッパと6軸力手首センサをもつもう一台のスカラ型ロボットで実験システムを構成した。トランスピュータを用いた実時間画像処理装置は2台のシステムに共有させた。Fig. 7 にシステム構成を示す。過渡的な受け渡し動作では、受け渡しの瞬間に主従関係を作ることが必要になる。このため「イニシアティブ」という概念を設け、センサ信号によって相手の意志を知って、イニシアティブの授受を実現した。初歩的な実験を行なった段階であり、イニシアティブの授

受の確認などができたにとどまっているが、今後も継続して研究を行ない自律的協調制御の確立を目指す。

[今後の研究の方向、課題]

パワーグラスプの研究では、今後多指ロボットハンドを用いた実験によって、本研究で得られた理論の検証を行なう。センサを用いて反射的にパワーグラスプを行なう問題への拡張も興味ある。

リアクティブグラスプの研究では、プリミティブの作成・合成の理論を研究しなければならない。これは将来の機械知能の実現に関する本質的な問題であると思われる。

自律的協調の研究では、センサを用いた運動や作業の理解、協調のためのセンサを用いたコミュニケーション法の確立、多数のセンサ情報とロボットの運動との結合方法、など機械の知能化の根本的な問題を合わせもっている。上記のような本質的な問題への理論的なアプローチが、長期的な今後の研究課題である。

[謝 辞]

本研究は東京大学大学院生 張曉毅君、宮島歩君、同学部生 合田憲次郎君、吉田哲也君の献身的な協力なしでは実行できなかった。ここに記して感謝の意を表す。

[成果の発表、論文等]

- 1) 合田憲次郎：多指ロボットハンドによるパワーグラスプ，東京大学工学部機械情報工学科，卒業論文，1993.
- 2) 合田，中村：多指ロボットハンドによるパワーグラスプ，日本機械学会関東学生会 第32回学生員卒業研究発表会講演前刷集，pp. 123 - 124, 1993.

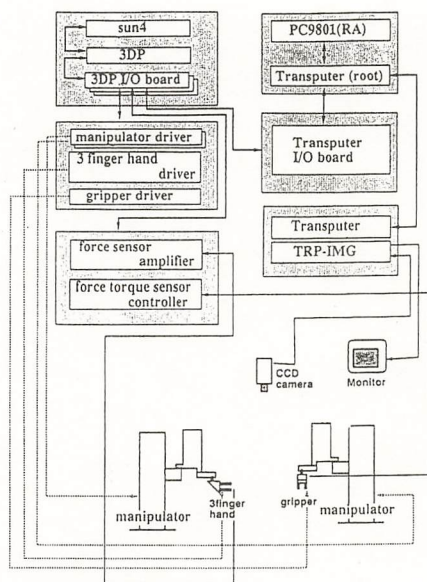


Fig. 7 Diagram of the experimental system

-
- 3) 張, 中村, 合田, 吉本: 多指ロボットハンドによるパワーグラスプのロバスト性, 第11回日本ロボット学会学術講演会論文集, No. 1, pp. 85-88, 1993.
- 4) X-Y. Zhang, Y. Nakamura, K. Yoshimoto: Grasping and Manipulation of an Object with Defective Contact, 第71期日本機械学会通常総会講演会, vol. IV, pp. 407-409, 1994.
- 5) X-Y. Zhang, Y. Nakamura, K. Yoshimoto: Robustness of Power Grasp, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 2828-2835, San Diego, May, 1994.
- 6) 張, 中村, 吉本: 不完全な接触を利用した把持と操り, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, pp. 1306-1311, 1994.
- 7) 吉田哲也: 複数のセンサを用いたロボットハンドによる物体の把持, 東京大学工学部機械情報工学科, 卒業論文, 1994.
- 8) 宮島歩: 複数のロボットの自律的協調, 東京大学大学院工学研究科機械情報工学専攻, 修士論文, 1994.

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

Development of CAE Systems Based on Boundary Element Design Sensitivity Anslysis Approach

921014

研究代表者 信州大学工学部生産システム工学科 助教授 松 本 敏 郎

[研究の目的]

機械構造物の設計を強力に支援するものとして CAE システムが導入されるようになってきた。本研究では、境界要素法による感度解析手法を取り入れることにより、設計仕様を満足する最適な設計上のパラメータの候補をコンピュータが設計者に自動的に提示することができるようにし、設計者の試行錯誤を減らし設計の効率化を図ることを目的とする。

[研究の内容、成果]

近年、有限要素法や境界要素法などの数値解析手法が CAE システムに取り入れられるようになってきた結果、設計者は構造物の設計に際して CAD のモデリングデータを基に強度、熱、振動等における力学的特性のある程度試作前に把握することができるようになった。しかし、設計仕様を満足する最適な設計上のパラメータを得るためには、設計者は種々のパラメータ値にたいして試行錯誤的に解析を繰り返さざるを得ないのが現状である。したがって現状では、強力な CAE システムといっても単なる解析ツールという段階であり、良い設計の方向は設計者自身の判断で見いださなければならない。本研究では、コンピュータと設計者をよりフレンドリにつ

なぐ CAE システムの開発をめざした。すなわち、設計変更に伴う構造物の力学的応答の変化率（感度）やパラメータの最適値を設計の進行と同時に設計者に自動的にかつ視覚的に提示できる CAE システムを開発することをねらった。その結果、設計者は設計仕様とパラメータを CAE システムに入力するだけで最適または満足な設計を得ることができるようになり、設計の迅速化・コストの低減に大きな効果があると考えられる。

本研究ではそのための基礎としてまず、境界要素法を用いた設計変数に対する系の応答の設計感度解析法を確立した。さらに、設計者に解析と同時に進行で感度係数を提示するシ

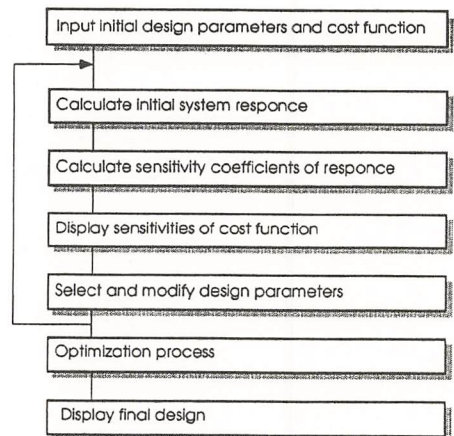


図1 開発したシステムの流れ図

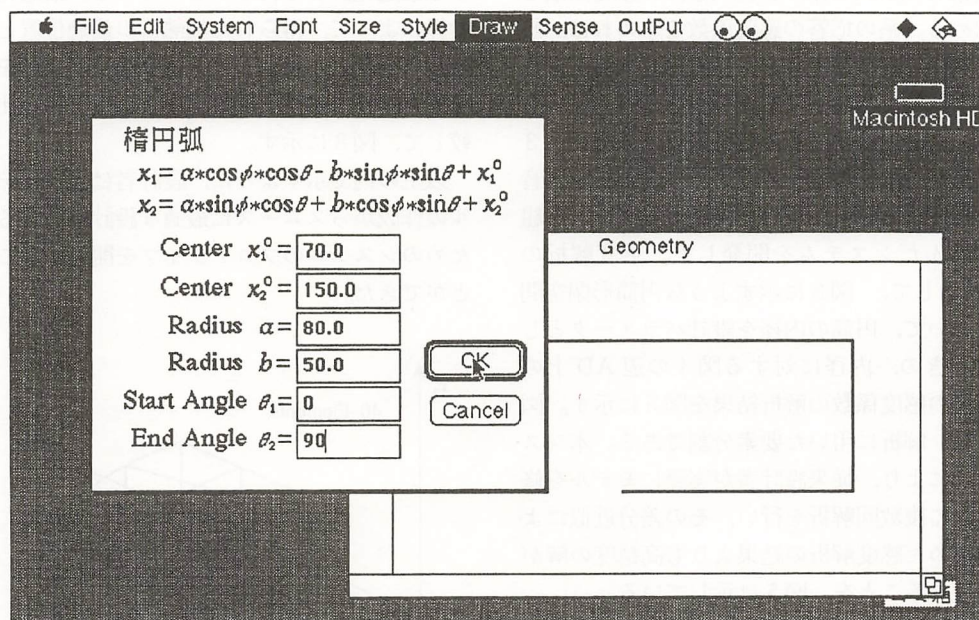


図2 設計対象の形状の記号による定義

システムを開発した。設計者は最適化解析に移行する際に、その情報を参考に行うことができる。図1に、本研究で開発したシステムの流れ図を示す。

図1に示すように、設計の最初に設計対象構造物の形状や設計パラメータ、およびコスト関数（目的関数）などを定義する必要がある。これらは、すべて図2に示すように対話的に行われる。形状は記号によって定義され、初期値を入力することによって実際の初期形状が規定される。また、境界条件や物性値などもすべて記号によって定義される。その結果、設計者がパラメータを変更したときの形状や境界条件の微分値が、記号演算により容易に得られる。

初期モデルに対する系の応答は、境界要素法によって解析される。境界要素法は、解析

対象物の境界のみの離散化で解析を行うことができる。したがって、形状の変更が頻繁に行われる設計の分野において、有効な数値解析手法となっている。境界要素法の基礎式は、離散化によって次のような代数方程式として与えられる。

$$[H] \{u\} = [G] \{q\} \quad (1)$$

ただし、 $\{u\}$ 、 $\{q\}$ は系の応答および境界条件ベクトルである。

また、系の応答の感度係数を関係づける代数方程式は、次式となる。

$$[H] \{U\} = [G] \{Q\} - [h] \{u\} + [g] \{q\} \quad (2)$$

ただし、 $\{U\}$ 、 $\{Q\}$ はそれぞれ $\{u\}$ 、 $\{q\}$ に対応する感度係数ベクトルである。本システムでは、式(1)に基づいて系の応答を求め、その

結果を式 (2) に用いて系の応答の感度係数を求める。系の応答の感度係数を求めれば、設計過程において定義した任意のコスト関数の感度係数を計算することができる。本研究では、2次元静弾性設計感度解析、2次元・3次元定常熱伝導設計感度解析、3次元定常音響設計感度解析の境界要素法プログラムを組み込んだシステムを開発した。感度解析の例¹⁾として、図3に示すような円筒形閉空間において、円筒の内径を設計パラメータとしたときの、内径に対する図4の辺AD上の音圧の感度係数の解析結果を図5に示す。図4は、解析に用いた要素分割である。本システムにより、従来設計者が実際にモデルを修正して複数回解析を行い、その差分近似により求めた感度解析の結果よりも高精度の解が得られることを、図5は示している。

また、図6～8には本システムを3次元の金型の加熱管の最適設計に適用した結果を示す。金型キャビティ表面の温度を一定にする目的関数を定義し、加熱管の金型底面からの高さ H^* 、加熱管の直径 D^* 、金型と蒸気の熱伝達係数 h^* 、蒸気温度 T_a^* を設計パラメータとする感度解析と最適化計算を行った。これら設計パラメータに対する目的関数の感度を図7に示す。設計者は、この結果を基にして、感度の大きい H^* と D^* を設計変数と

する最適化計算を行うことができる。最適化計算によって、得られた加熱管の最適位置とサイズを基に、キャビティ表面の温度分布を求めた結果を初期設計に対する温度分布と比較して、図8に示す。

以上の例で示すように、設計者は設計モデルの作成からスムーズに最適な設計解を得るためのシステムのプロトタイプを開発することができた。

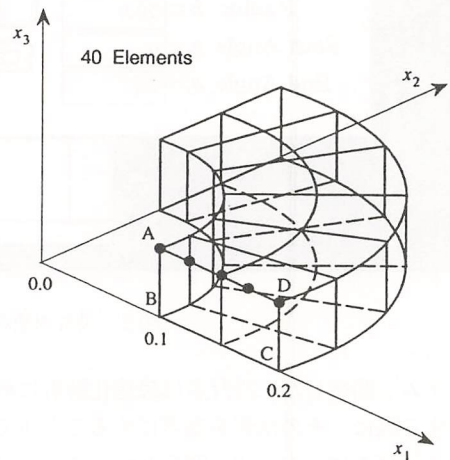


図4 円筒形閉空間の1/8領域の要素分割

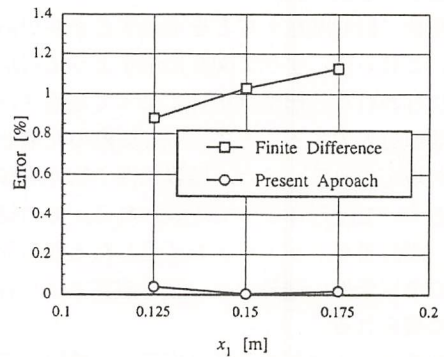


図5 辺AD上の音圧の感度の誤差

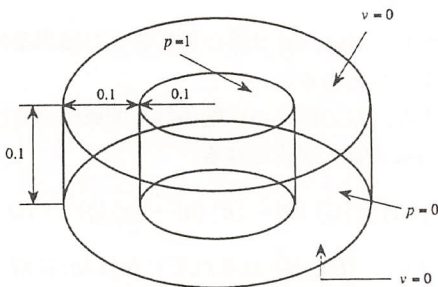


図3 円筒形閉空間

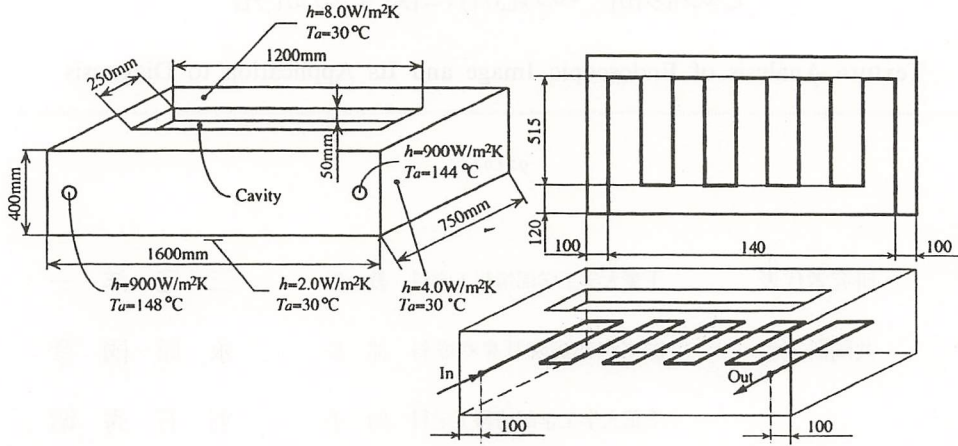


図6 加熱管を有する金型モデル

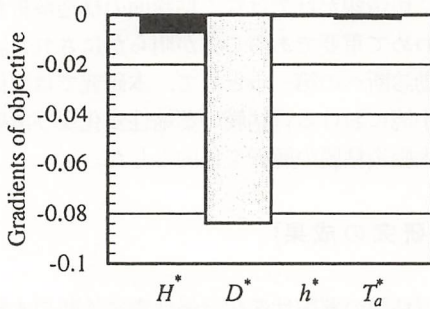


図7 目的関数の H^* , D^* , h^* , T_a^* に対する感度

[今後の研究の方向, 課題]

本研究で開発した, 感度解析のためのプログラムは, かなり高度なものとなっており, 実用に値するが, 設計対象のモデリングを行うシステムが, まだ複雑なモデルに対して適用できる段階にいたっていない。本研究では, モデリングを記号を用いて行うという考え方を新しく導入することによって, パラメータの選択や変更が容易になるように工夫した。しかしながら, 複雑なモデルになるとデータ量が多くなり, 演算速度が低下するという問

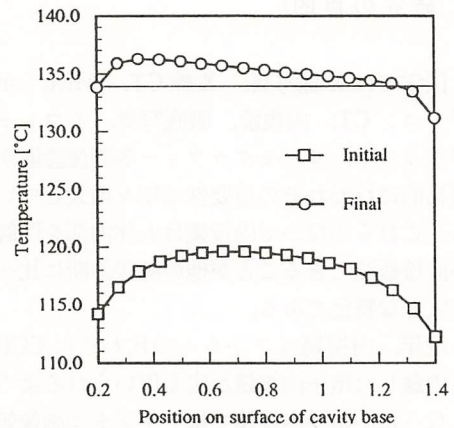


図8 最適化によって得られた金型表面の温度分布

題点が存在する。

[成果の発表, 論文等]

- 1) “境界要素法による音響問題の設計感度解析法”, 日本機械学会論文集 (C 編), 59 巻, 558 号, (1993), pp.430-435.
- 2) “境界要素法を用いた直接微分法に基づく金型の三次元定常熱伝導設計感度解析法”, 日本機械学会論文集 (A 編), 59 巻, 567 号, (1993), pp.2750-2757.

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

Texture Analysis of Endoscopic Image and Its Application to Diagnosis

921015

研究者代表	千葉大学工学部情報工学科 教授	三宅 洋一
共同研究者	国立京都病院耳鼻咽喉科 部長	永原 國彦
	千葉大学工学部情報工学科 助手	羽石 秀昭

[研究の目的]

医学ではX線写真, X線CT, MRI, ポジトロンCT, 内視鏡, 眼底写真, モワレトポグラフィ, サーモグラフィー等画像診断が日常的に行われその重要性は年々増大している。これらのなかで内視鏡は人体内部を医師が直接観測できることが他の画像診断に比べて大きな特色である。

近年, 内視鏡はフィルムの代わりにCCDを内蔵した電子内視鏡が広く用いられるようになった。電子内視鏡ではデジタル画像処理を容易に行うことが出来るため画像の強調, 色変換などの処理が種々検討されている。しかしながら, 病変の自動診断に向けた内視鏡画像の解析や処理は緒についたばかりである。我々の研究室では内視鏡分光器を開発して胃粘膜の分光反射率を測定しそのスペクトルの主成分分析や色度値から胃疾患の診断を行うことを試みてきた。また, 内視鏡画像の色再現モデルを構築しフィルムやCCDカメラの最適な分光感度分布の推定なども行ってきた。これらの研究を通して胃疾患の自動診断では

単に色情報だけではなく粘膜面の構造解析がきわめて重要であることが明らかにされた。自動診断への第一歩として, 本研究では胃体部小湾における胃粘膜の萎縮性変化及び潰瘍性大腸炎粘膜の解析を目的とした。

[研究の成果]

胃粘膜の萎縮性変化は慢性胃炎診断の本質として, さらに早期胃癌など諸疾患の背景としてもきわめて重要であると云われている。

医師は画像から得られる情報ばかりでなく患者の病歴をはじめ血圧, 体温や解剖学的所見, 過去の経験, 知識を総合して疾病の診断を行っている。従って, 自動診断を行うためにはこれら画像から得られる情報以外も考慮することが必要である。ここでは画像からの診断情報を如何に画像解析の特徴量として捕らえるかを考える。

胃粘膜萎縮度の診断では血管透見度, 粘膜面退色度, 粘膜面不整が画像からの情報として最も重要であると云われる。そこで萎縮度の程度 F が上記3種の特徴ベクトルの線形

和で表されることを仮定し画像解析を行った。

$$F = a_1 F_1 + a_2 F_2 + a_3 F_3 \quad (1)$$

ここで a_1 , a_2 , a_3 は診断における重み係数である。次の問題は F_1 , F_2 , F_3 なる特徴量を画像中から如何に抽出するかである。

一方、潰瘍性大腸炎についても同様な手法を用いて解析を行った。

血管透見度

萎縮が進行した胃粘膜では粘膜層の薄層化に伴って粘膜下層内の細動脈網が観測されるようになる。そこで血液中のヘモグロビンの分光吸収特性を最も良く反映する G チャンネル画像を用いて血管像を抽出した。すなわち、粘膜面と血管像に現れるコントラストの差異に注目して 2 値化、ラベルリング、正規化を行い、さらに全画素に対する血管像の比率に基づいて血管透見度を算出した。

図 1 に 17 種の症例に対する血管透見度を示す。ここで NP は正常粘膜、AT 1 は軽度の粘膜萎縮、AT 2 は重度の粘膜萎縮があると診断されたものである。

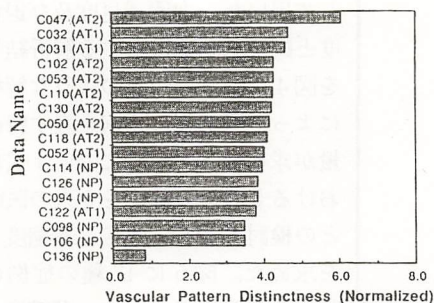


図 1 17 種の粘膜に対する血管透見度

粘膜面の退色度

粘膜面の萎縮進行に伴って粘膜面での血流が減少する。それ故、粘膜面での色は彩度低下が生じることが知られている。そこで、抽出された血管領域と照明光によるハレーションを除いた粘膜面での平均色度を計算した。図 2 に 17 種の粘膜の平均色度を CIE 1976 $u'v'$ 色度座標に示す。図から平均色度がほぼ直線上にあることからこの直線とスペクトル軌跡との交点での色度座標からの距離を基準として退色度を定義した。退色度による評価結果を図 3 に示す。

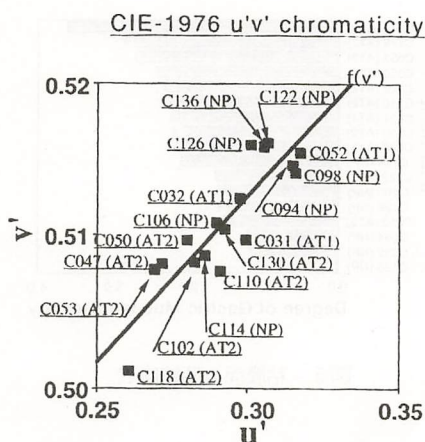


図 2 粘膜の平均色度

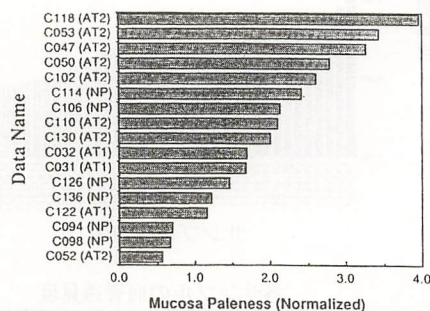


図 3 退色度による粘膜の解析

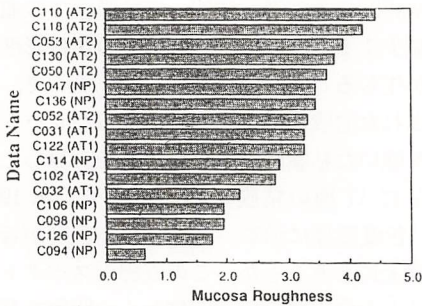


図4 粘膜面のテクスチャー解析結果

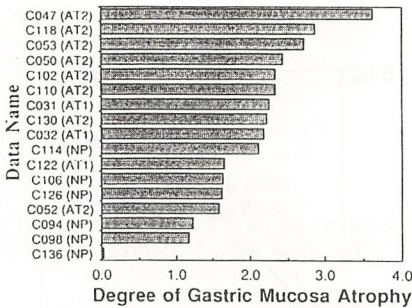


図5 粘膜面の萎縮度 F

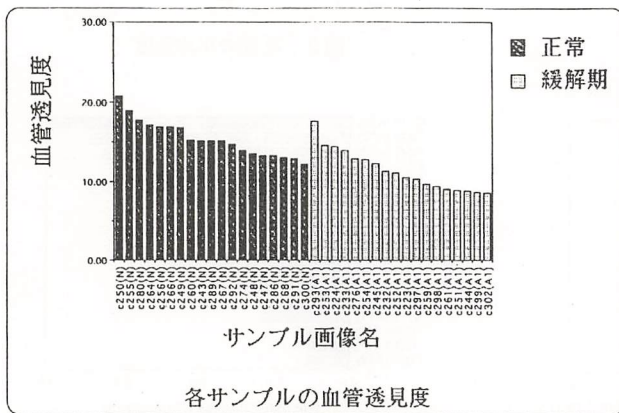


図6 37種の大腸粘膜の血管透見度による解析

粘膜面不整

胃粘膜表面は胃小区と呼ばれる規則正しい小領域から構成されている。しかし、粘膜面の萎縮が生じると隣接する胃小区との融合によってその分布は一様性を失うと云われている。そこで、テクスチャー解析によって粘膜面の不整を数量化した。テクスチャーの解析は R, G, B それぞれの画素値を変量とした主成分分析により第一主成分画像に対して行った。ちなみに 17 種の画像の第一主成分の寄与率の平均値は 0.93 であった。

画像のテクスチャーは画像中の色あるいは濃度の周期的な構造であると考えられる。テクスチャーの解析には濃度共起行列、最適なエッジオペレーターサイズに基づく手法 (Sbest 法)、パワースペクトルなどが提案されている。ここでは胃小区の平均的な大きさに注目して画像のコントラストに影響されないテクスチャー量として Sbest 法を用いた。

この手法は、ある座標 (x, y) においてそれを中心とした $K \times K$ 画素の正方領域の平均濃度とこの領域と隣接する水平方向及び垂直方向の同サイズの領域の平均濃度の差分の絶対値を基本とし、その周期構造に注目して

テクスチャー量を定義するものである。こうして求められたテクスチャーを粘膜面の不整を表す値として用いた。血管透見度及び退色度と同様な画像に対する解析結果を図 4 に示す。以上のような解析によって胃粘膜の萎縮を表す特徴量が求められた。そこで (1) 式における 3 成分の重みを 5 人の医師との検討を通して決定し萎縮度 F を求めた。図 5 に 17 種の症例に対する萎縮度 F を示す。萎縮度 F は医師の診断とほぼ対応している

ことが判る。

我々は本手法の有用性を確認するためさらに多くの症例についても検討を行っている。このような医師の知識とを対応させた内視鏡画像の解析、処理法は胃疾患の自動診断へのひとつの新しいアプローチとして意義あると考える。

潰瘍性大腸炎診断への適用

潰瘍性大腸炎はその進行に伴って正常期、緩解期及び活動期に分けられる。それらの内視鏡所見として活動期には発赤、再顆粒状の粘膜、血管の不透見度が見られ、さらに緩解期に向かうに従って血管の透見の回復が見られる。胃粘膜萎縮の診断と同様な手法、すなわち血管透見度を特徴量としてこれらの疾患の分類を試みた結果を図6に示す。ここでNPは内視鏡の専門医により正常粘膜、A1は緩解期、A2は活動期としてそれぞれ診断されたものである。図から血管透見度は正常粘膜と緩解期の診断に有効な特徴量であることが判る。さらに、胃粘膜の解析と同様にテクスチャー、色度値なども潰瘍性大腸炎の診断に用いることを試みている。

[ま と め]

我々は本手法の有用性を確認するためさらに多くの症例についても検討を行っている。このような医師の知識とを対応させた内視鏡画像の解析、処理法は胃疾患、大腸疾患などの自動診断へのひとつの新しいアプローチとして意義あると考える。

[今後の研究方向, 課題]

本研究では胃粘膜萎縮および潰瘍性大腸炎

を対象としたがさらに多くの疾病および症例に対する解析が必要である。また、特徴ベクトルに対する重み係数の医師による変動をどの様に解釈するかの問題もある。さらに、テクスチャー解析を行う前の歪補正の他、高さ情報など3次元計測値のような新しい特徴量の抽出、統計的決定法などについても検討することが必要である。

[成果の発表, 論文等]

- 1) K. Gono, H. Haneishi, K. Nagahara and Y. Miyake: Analysis of Gastric Mucosa Images by Electric Endoscope and its Applications to Diagnosis, IS & T Annual Conference Paper Summaries, 265-268 (1992, NJ, USA)
- 2) 原健児, 羽石秀昭, 永原國彦, 三宅洋一: 電子内視鏡画像の好ましい色再現について, 第23回画像工学コンファレンス論文集, 199-202 (1992, 東京)
- 3) 羽石秀昭, 後野和弘, 矢口博久, 三宅洋一: 内視鏡胃粘膜像の特徴抽出とその診断への応用, 電子情報通信学会論文誌, D-II, J 76-DII, No. 2, pp. 325-333 (1993)
- 4) 羽石秀昭, 八木橋裕, 三宅洋一: 電子内視鏡画像の歪み補正: 応用物理学会秋季大会論文予稿, 30 aF/III (1993, 札幌)
- 5) 周世辛, 羽石秀昭, 前川高天, 三宅洋一: 潰瘍性大腸炎内視鏡画像の解析 (I): 応用物理学会秋季大会論文予稿, 30 aF/III (1993, 札幌)
- 6) H. Haneishi, T. Ogura, and Y. Miyake: Profilometry of gastro-intestinal surface using an endoscope with laser beam projection, accepted Optics letter
- 7) H. Haneishi and Y. Miyake: Distortion Compensation of Electronic Endoscope Image, Proc. IEEE Medical Imaging Conference (in printing)

ディジタル制御系の最適化・知能化の研究

Intelligent Control and Optimization of Digital Control Systems

921016

研究者代表

京都大学工学部 助教授

山 本 裕

[研究の目的]

デバイス技術の進歩とともにディジタル制御の重要性はますます高まってきている。しかしながらディジタル制御においては i) 定常的なリップルが生じサンプル点間の応答が劣化する, ii) エイリアシングと言う現象のために高周波特性が劣化し, しかも低周波領域に悪影響を与えと言う問題点があり, しかもこれらは密接に関連している。このような問題, 特にリップルの最適除去のためには一般化ホールド関数を用いることが有効であるが, これまでは有効な定常リップルの特徴づけが知られておらず, また解析的設計では多様な条件に対応することが困難で, かつ使いづらいという難点があった。本研究では, これらの難点を克服するために, ニューラルネットワークなどに見られる学習法を取り入れ, 使いやすくかつ条件の変化に強い設計法の確立をめざす。同時に, エイリアシングに見られる高周波成分の悪影響を取り除いて, より基本的なサンプル点間特性の把握を目指す。

[研究の内容, 成果]

1. 定常リップルの特徴づけとその学習的低減

例えば図1のような単一フィードバック

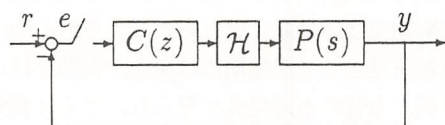


図1 単一フィードバック系

ディジタル制御系を考えよう。ただし $P(s)$ は連続時間プラント, $C(z)$ は離散時間補償器, $\mathcal{H}$ は $\mathcal{H}(u)(\theta) = H(\theta)u$ として定義されるホールド回路 (D/A コンバータ) である。この制御系の特徴は言うまでもなく, 連続時間プラントをディジタルデバイスで制御するところにある。このような制御系の利点は, 一つには複雑な制御ロジックがディジタルデバイスによって簡単に実現できるところにあるが, 一方ではディジタル系特有の問題として, サンプル点間にリップルと呼ばれる波打ち現象が生じてしまうところにある。本研究ではこのような問題点に対して以下のようなアプローチをとった:

- 代表者らによって導入されたリフティングと呼ばれる手法によって, 従来不可能とされていた図1の系の伝達関数を導入する。
- その伝達関数によって定常リップルを完全に特徴づける。
- ホールド関数を学習的に変化させることにより定常リップルを低減させる。

今少し具体的に、 $C(z)$ 、 $P(s)$ の最小実現をそれぞれ (A_d, B_d, C_d) 、 (A_c, B_c, C_c) とする。そうすると

$$\begin{aligned} \hat{e}(\theta) &= \hat{r}(\theta) - C_c \left[B(\theta) C_d e^{A_c \theta} \right] \\ &= \begin{bmatrix} zI - A_d & B_d C_c \\ -B(h) C_d & zI - e^{A_d h} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B_d \hat{r}(0) \\ 0 \end{bmatrix} \\ B(\theta) &:= \int_0^\theta e^{A_d(\theta-\tau)} B_c H(\tau) d\tau \end{aligned}$$

を得る¹⁾。ここで θ はサンプル点間変数を定めるパラメータであるが、リフティングにより、もはや時間変数でないことに注意する。この右辺を $W_{er}(z)[r]$ と書き、それが安定とすると、次の事実がなり立つ^{1,4)}。

- ・定常信号 $zv(\theta)/(z-1)$ に対する定常リップルは $W(1)[v]$ で与えられる。
- ・正弦波状信号 $zv(\theta)/(z-e^{jwh})$ に対する応答は $e^{jwkh} W(jwh)[v]$ 、 $k=0, 1, 2, \dots$ に漸近する。ただし h はサンプリング周期である。

これによりサンプル点間応答が伝達関数によって完全に特徴づけられることがわかった。さらに正弦波状信号に対する応答も、本質的に定常的であり、各サンプル点毎に起こる変化は位相ずれであることが判明した。この事実は繰り返し制御系のような学習制御において、サンプル点間の応答が定常的になることを示すものであり、その学習的リップル低減を可能にすることがわかった。

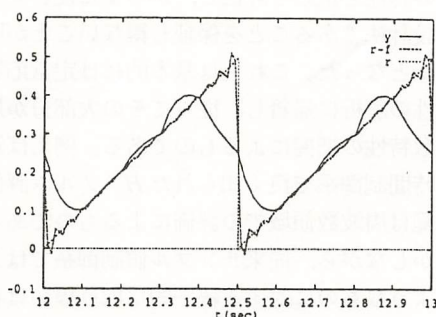
さらに、上の伝達関数はホールド関数 $H(\theta)$ に陰に依存しており、その関係を $e(\theta) = W_H[v]$ (簡単のため添字 er を省略) と書いたとすると、感度関数

$$\frac{\partial}{\partial H} W_H[v]$$

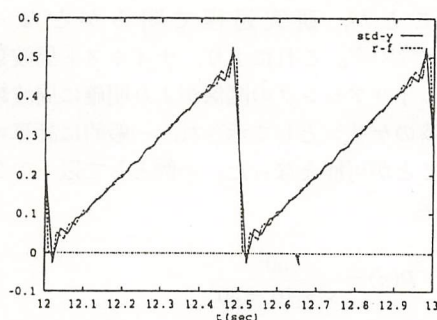
を計算し、それを数周期毎にフィードバック

することにより誤差を学習的に低減させることが可能である^{2,9)}。これにより鋸波状の目標入力に対する繰り返し制御系の応答を、

1. 学習則によらなかった場合
 2. ホールド関数を学習的に改善した場合
- に分けて以下の図に示す。本研究における学習則の効果が良く現れていることがわかる。



のこぎり波状入力に対する出力



学習則を用いた場合の出力

図2 リップルの学習的低減

2. 定常特性と周波数応答

以上により定常リップルの学習的低減が周期的目標関数などに対しては非常に効果的であることがわかった。しかし同時に本研究に

よって

- リップルが生じるのはどのような周波数成分であるか
- プラントモデル偏差に対するロバスト性を補償するにはどのような尺度によらねばならないか

などを明らかにせずには、真に得られた制御系の特性を正しく評価し、かつまた使いやすい設計法であることを保証し得ないことが明らかとなった。これらは基本的には定常応答特性の解析に帰着し、従ってその大部分が周波数特性の把握によるものである。例えば連続時間制御系で良く知られた H^∞ ノルム評価規範は周波数領域での評価によるものである。しかしながら、従来サンプル値制御系ではこのようなものに対する統一的な取り扱いは存在しないものと考えられてきた。

幸い、本研究で得られた伝達関数と定常応答はこの局面を切り開き、サンプル値制御系の周波数応答と呼ぶにふさわしいものを与えることが、研究過程で明らかとなった^{1, 4, 5, 6, 7, 8)}。これにより、ナイキスト周波数とエイリアシングの関係がより明確に周波数応答のゲインとして示され、一般的に計算することが可能となった。一例として以下の2次系

$$P(s) = \frac{50^2}{s^2 + 10s + 50^2}$$

をサンプル値系とみなして（サンプル時間 $h = 0.1$ sec）周波数応答を計算した時のゲイン線図を示す。本来 50 rad/sec にだけある共振峰がより低周波の $50 - 2\pi / 0.1 \text{ rad/sec}$ にもエイリアスとして現れている様子がわかる。このエイリアスは H^∞ 制御問題における不確定性の評価に現れると、低周波におけるロバスト安定条件を劣化させる原因とな

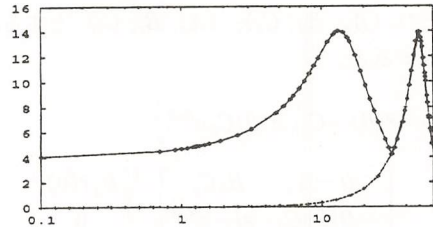


図3 $\frac{50^2}{s^2 + 10s + 50^2}$ のリフティングされた周波数特性

る。このように周波数領域において系の特性が明確にとらえられるようになったことが、本研究のもう一つの成果であり、デジタル制御の特性把握を非常に使いやすくしたものと言えよう。

[今後の研究の方向, 課題]

以上の成果により、本研究は当初の目標をほぼ達成したものと考えられるが、周波数領域の特性把握をさらに進めてより完成された設計手法とするには、以下のような研究が必要である：

- サンプル値周波数応答の計算アルゴリズムの改善。現在これは有限次元固有値問題の求解計算を繰り返す行なうことによっているが、より実用的なものとするため、高速アルゴリズムの開発が急務である。
- サンプル値周波数応答を計算することにより、連続時間特性をそこうことなく、どの程度長いサンプル周期を設定できるかがこの分野の鍵となる。
- サンプル値周波数応答の実験的同定法。これについてはノイズジェネレータをDSPに接続することにより、実験的測定を行な

う方法を研究中である。
 以上のような方向にそって今後の研究を行
 なっていく予定である。

[成果の発表, 論文など]

- 1) 山本裕, “サンプル値制御系の関数空間モデルと伝達関数,” 計測と制御, vol. 32, No. 2, pp. 101 - 106 (1993)
- 2) Yutaka Yamamoto, “Learning control and related problems in infinite-dimensional systems,” *Essays on Control: Perspectives in the Theory and its Applications*, Ed. by H. L. Trentelman and J. C. Willems, pp. 191 - 222, Birkhäuser (1993)
- 3) Yutaka Yamamoto, “On the state space and frequency domain characterization of H^∞ -norm of sampled-data systems,” *Systems and Control Letters*, vol. 21, pp. 163 - 172 (1993)
- 4) Yutaka Yamamoto, “A function space approach to sampled-data control systems and tracking problems,” *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-39: 703 - 712 (1994)
- 5) Yutaka Yamamoto and Mitsuhiro Araki, “Frequency responses for sampled-data systems—their equivalence and relationships,” to appear in *Linear Algebra and Its Applications*.
- 6) Y. Hayakawa, S. Hara and Y. Yamamoto, “ H_∞ type problem for sampled-data control systems—a solution via minimum energy characterization,” to appear in *IEEE Trans. Autom. Control*.
- 7) Yutaka Yamamoto, “Frequency response and its computation for sampled-data systems,” to appear in *Proc. MTNS-93, Regensburg, Germany* (1993)
- 8) Yutaka Yamamoto and P. P. Khargonekar, “On the frequency response of sampled-data systems,” *Proc. 32nd CDC*: 799 - 804 (1993)
- 9) 手塚博久, “サンプル値制御系のリップルとその学習による低減化,” 平成4年度京都大学工学部応用システム科学専攻修士論文
- 10) H. J. Zwart, Y. Yamamoto and Y. Gotoh, “On the Stability Uniformity of Infinite-Dimensional Systems,” *Proc. 10th Int. Conf. on Analysis and Optimization of Systems: State and Frequency Domain Approaches for Infinite-Dimensional Systems*, Lecture Notes in Control and Information Sci., vol. 185, pp. 401 - 409, Springer (1992)

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

Protocol Analysis : An Alternative Approach to the Evaluation of Educational Software

921017

研究代表者 東京家政学院筑波短期大学情報処理科 助教授 余 田 義 彦

〔研究の目的〕

今まで、教育用ソフトの評価では、教師や研究者がソフトを自分で試してみても、基準を充たしているかどうかチェックする方法がとられてきた。

この方法は、欧米で開発されたもので、簡便で能率的なため、公的機関によるレビューの評価に広く用いられてきた。

しかし、評価項目の記述が「教育方法」というように大まかで、「劣る—優れる」というような主観の基準でしか評定していないため、そのソフトで学習者は何を考え、どのような情意的体験をするのかといった教育の本質に関わる問いに客観的に答えることができなかった。

本研究では、学習者の発話（つぶやきや仲間との対話）を分析することで、ソフトによってどのような種類の思考や情意的体験が引き出されているか計量的に明らかにする手法を開発する。そして、それにもとづいて教育用ソフトを評価する方法を開発する。

〔研究の内容・成果〕

1. 評価手法の概要

1-1. 評価の基本的な考え方

教育用ソフトで学習している学習者の発話

には、何らかの思考活動が伴っている。そこで、発話をそれに関係する思考活動の種類によって分類する。そして、分類された発話の数を指数として、そのソフトがどのような思考活動や情意的体験を引き出していたか明らかにしようというのが本手法の基本的な考え方である。

この思考活動の類型化は、文献研究や発話分析の経験をもとにおこなった。図1は、それを内容と活動の二つの観点で整理したものである。この分類を思考活動カテゴリーと呼ぶ（各項目の詳細な定義は余田1991を参照）。

思考活動 思考内容		a 観察 や 認知	b 言葉 の 記憶 や 想起	c 適用	d 考案	e 評価	f メタ 認知
課 題 領 域	1. 事実						
	2. 概念						
	3. 手続き						
	4. 因果関係						
5. 計画領域							
6. 情意領域							
7. 社会領域							
8. 操作領域							
9. 準課題領域							

図1 思考活動カテゴリー

1-2. 評価の手順

評価は次の手順で行う。

- ①学習者二人に、教育用ソフトで学習をさせ、そのようすをビデオカメラで記録する。そのとき、学習者には話し合いながら学習を進めるよう指示しておく。
- ②①のビデオを再生し、学習者の発話を文書化する。分析にともなう負担を軽減するため、文書化は以下のように、4分おきに1分ずつサンプリングして行ってもよい。
1分 4分 1分 4分 1分 4分
↑ 「割愛」 ↑ 「割愛」 ↑ 「割愛」
文書化 文書化 文書化
- ③②で得た発話記録を文の単位に分解する。そして、それぞれが思考活動カテゴリーのどれに関係するか検討し、分類する。
- ④③で分類された文の数を指数として、どのような思考がどの程度多くおこなわれていたか表す。これをグラフで図式化したものを、思考活動プロフィールと呼ぶ。
- ⑤④の思考活動プロフィールを用いて、教育用ソフトの特性を調べ評価する。

2. 平成4年度の研究の概要

平成3年度までの研究の成果は、本手法の有用性を確信させるものであった。しかし、評価したソフトや分析した発話データの量が限られており信頼性や妥当性の吟味が充分とは言えなかった。また、評価結果の利用法に関しても研究の余地が残されていた。

平成4年度は、マルチメディアの英語教育ソフトへ本手法の適用を試みた。そして、次のことを行った。

- ①英語教育ソフト評価の理論的枠組みづくり
- ②ソフト改訂への本手法の適用
- ③評価の信頼性の検討
- ④評価の妥当性の検討

3. 英語教育ソフト評価の理論的枠組み

3-1. 英語教育用思考活動カテゴリー

英語などの言語学習では、認知的・情意的領域に加え、発音やリスニングといった精神運動的領域に関わる思考が重要な役割をもつ。そのため、図1の思考活動カテゴリーを、英語教育用ソフトの評価へそのまま適用することはできない。そこで、新たに英語教育用の思考活動カテゴリーを開発した(図2)。

この中で、活動次元のカテゴリーについては Valette と Disick (1972) による教材内容分類の5段階(機械的技能、知識、転移、意思伝達、批評)をそのまま取り入れた。この5段階は、図1に示した活動カテゴリーの分類(観察や認知、言葉の記憶や想起、適用、考案、評価、メタ認知)のうち、最初の5つの要素と符合するものである。

3-2. 評価の視点

思考活動プロフィールを用いると、たとえ

思考活動 思考内容		a J 機械的 技能	a E 機械的 技能	b 知識	c 転移	d 意思伝達	e 批評	f メタ認知
課題 領域	1. 発音							
	2. 単語							
	3. 文							
	4. 文法							
	5. 文脈							
	6. 生活・文化様式							
7. 計画領域								
8. 情意領域(正)								
9. 情意領域(負)								
10. 社会領域								
11. 操作領域								
12. 準課題領域								

図2 英語教育用思考活動カテゴリー

ば教育用ソフトの次のような特性が読み取れる。

①主体的に学べるソフトであったか。

視点：内容次元が計画領域で活動次元が意思伝達、批評、メタ認知に分類される発話がどの程度あったか。活動次元で、批評やメタ認知に分類される発話がどの程度あったか。

②興奮を引き起こすソフトであったか。

視点：内容次元で、情意（正）に分類される発話がどの程度あったか。

③暗記を強いるソフトでなかったか。

視点：活動次元で、知識に分類される発話がどの程度あったか。

④英会話や英文に親しませるソフトだったか。

視点：内容次元で、文や文脈に分類される発話がどの程度あったか。

⑤生活・文化様式を学習できるソフトだったか。

視点：内容次元で、生活・文化様式に分類される発話がどの程度あったか。

⑥使いやすいソフトであったか。

視点：操作に分類される発話がどの程度あったか。

ところで、思考活動カテゴリーは、評価者が発話記録を眺めてゆく場合、特定の思考に

関する発話だけを透過して認知しやすくするフィルターのようなはたらきもしてくれる。

たとえば、次のような観点で発話を抽出して眺めることは、ソフトの特性の理解や、改善点を探るうえで役立つ。

⑦正の情意体験はソフトのどのような要素によって引き起こされているか。

⑧負の情意体験はソフトのどのような要素によって引き起こされているか。

4. 教育用ソフト改訂への本手法の適用

4-1. 背景と目的

今まで、教育用ソフトの評価は、教師がソフト選びで参考にできる資料の提供を目的として行われることが多かった。しかし、同じぐらい、教育用ソフトの開発者のための評価も重要である。ソフトの特性を明らかにし、それを開発ヘフィードバックさせ改善に役立たせる評価、すなわち教育学でいうところの形成的評価である。

筆者は、本評価手法の重要な応用分野として形成的評価を考えてきた。そこで、実際にマルチメディア英語教育ソフトの形成的評価を本手法でおこない、その実行可能性を探ることにした。

4-2. 評価対象のソフト

評価対象のソフトは、次の二つである。

①プロトタイプとして開発したソフト（プロトタイプ）

②①の評価をもとに改訂したソフト（改訂版）

これらはともに、マルチメディアを利用してロールプレイング形式で英語の学習（主にリスニングスキル）を進めるようになっている。

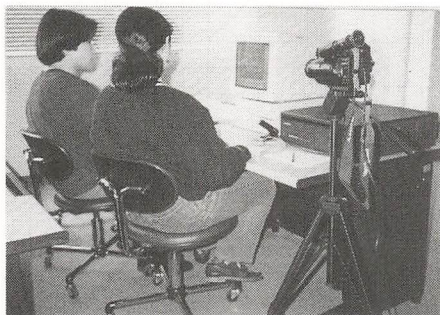


図3 学習風景をビデオカメラで記録している様子

改訂版の方は、後述するように、プロトタイプの評価結果を参考にして、ストーリー性とロールプレイング性を強めるため、推理モードと呼ぶ学習モードを導入した。

4-3. 被験者

英検2級を取得している短大生20名をプロトタイプ、改訂版それぞれの被験者とした(図3)。

4-4. プロトタイプの特徴

図4は、プロトタイプの試用で得られた思考活動プロフィールである。この図は、被験者の数だけ作ることができる。何れもよく似たものになったので、ここでは20名の発話の平均値をもとに作成した。また、活動次元は解釈しやすいように、平易な表現で記した。

本ソフトは、学習意欲の喚起と持続を目標に開発したものであった。そこで、思考活動プロフィールを、学習意欲の喚起に焦点を当てた教授設計理論であるARCS理論(Keller 1983)と関連づけ、A:注意、R:関連性、C:自信、S:満足という4つの観点で、解釈することにした。

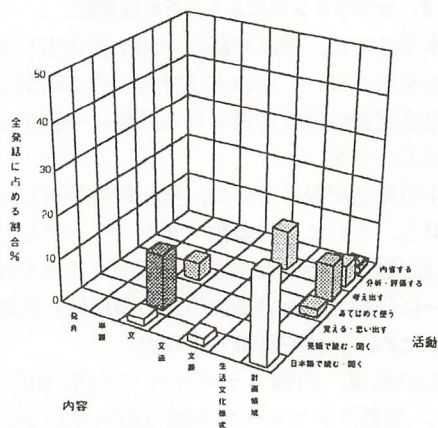


図4 プロトタイプの思考活動プロフィール

その結果、詳しくは後述するが、次のようなことが改善点として明らかになった。

- ①学習の進め方がよくわからない。
- ②ストーリー性が感じられない。
- ③自由度が大きすぎる。
- ④注意でしか学習意欲を喚起していない。

4-5. プロトタイプと改訂版の特性の比較

4-4で述べた評価を受けて、改訂版を開発した。図5は、その試用で得られた思考活動プロフィールである。

改訂版は、プロトタイプとどこが変わったのか。両者の思考活動プロフィールを比べた結果、次のことが明らかになった。

- ①楽しさが増えた。

情意(正)に関する発話の数が大きく増えた。しかも、プロトタイプでは「あっ」といった驚きが大半であったのに対し、改訂版では楽しさを反映した「笑い」も多く含まれるように変わった。こうした発話の変化は、本ソフトの魅力が、注意中心から自信や満足へも広がったことをうかがわせるものと解釈できる。

- ②ストーリー性が強くなった。

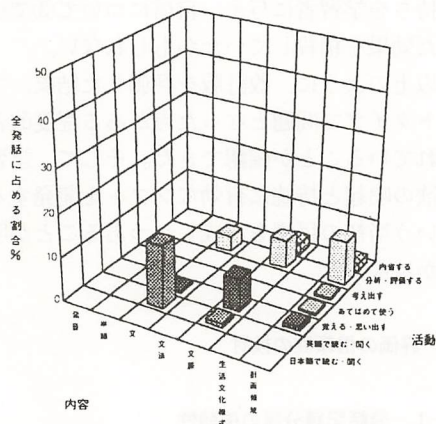


図5 改訂版の思考活動プロフィール

文脈に関係する発話が増えた。これには、シナリオの完成度が高まったことと、改訂版で推理モードが取り入れられたことが大きく関係していると考えられる。こうした変化は、関連性の側面から学習意欲の喚起に役立ったと考えられる。

③学習の進め方がわかりやすくなった。

計画領域—機械的技能J（日本語で読む・聞く）に分類される発話がなくなった。説明されなくても学習を進められるという特徴は、学習者に「やらされている」という気持ちを与えないこと、すなわち自信の側面で学習意欲の喚起に貢献していると考えられる。

④自由度が少なくなり過ぎた。

計画領域—転移（あてはめて使う）、意思伝達（考え出す）に関係する発話が減った。また、行動の選択場面で、計画領域に分類される発話が少なかった。

これらのことは、改訂版に次の点の更なる改善が必要であることを示唆している。

- ・行動を選択する余地が少なかった。
- ・よく考えて行動を選択すべきだと感じさせる工夫が足りなかった。

これらの点は、「やらされている」という気持ちを学習者に与え、自信について③で述べた効果を相殺していたかもしれない。

以上のように、改訂版を評価した結果、プロトタイプで問題となった点がある程度改善されていることが確認できた。そして、学習意欲の喚起と持続に有効なソフトを開発するという当初の目標を達成しつつあることが明らかになった。

5. 評価の信頼性の検討

5-1. 発話記録分類の信頼性

本手法で、評価・分析者の恣意性が問題に

なるのは、発話記録を思考活動カテゴリーで分類していく過程である。カテゴリーの定義が曖昧であったり、網羅性に欠ける場合、この点が特に問題になる。

そこでまず、発話記録を分類する作業の信頼性を次の方法で検討した。

Bales (1950) はカテゴリー分析の信頼性を評価する方法として、複数の評価者に同一の発話記録をそれぞれ別々に分析させ、両者の類似度を χ^2 値としてもとめている。そして、その値が有意水準50%（5%でない）の χ^2 値よりも低ければ信頼できるという目安をたてている。

そこで、二人の評価者（英語教育専攻の教育学修士と障害児教育専攻の教育学修士）に思考活動カテゴリーで、4の発話記録を分析させ、両者の類似度を χ^2 値でもとめてみた。

そうして得た値は、内容カテゴリーが3.95 ($df=5$)、活動カテゴリーが0.87 ($df=4$)であった。この値は、有意水準50%の χ^2 値より低いものであり、十分にトレーニングを受けた評価者の場合、同様の結果が得られることを示唆するものである。

5-2. サンプルングによる分析の信頼性

本手法では、発話記録の一部を抜き出して分析をおこなう。この方法で得られる結果と、全発話記録の分析で得られる結果は一致するのであろうか。

4の発話記録について、全記録を分析した結果と、5分に1分の割でサンプルングした発話記録を分析した結果の類似性（各カテゴリーに分類された発話数の比の類似性）を調べるため、 χ^2 値を計算してみた。

その結果、内容カテゴリーで1.95 ($df=4$)、活動カテゴリーで3.00 ($df=4$)という値を得た。これらの値は、ともに有意水準

50%の χ^2 値よりも低いものであり、サンプリングした発話記録からでも全発話による分析結果を推し量れることが確かめられた。同様の結果は、他のソフトを分析した場合についても得ている。

6. 評価の妥当性の検討

6-1. 検討の方法

評価の妥当性には、構成概念的妥当性と経験的妥当性がある。前者は、評価結果が評価しようとしていたもの（構成概念）であるかどうかを指す。後者は、評価結果が別の方法での評価の結果とどの程度一致するかを指す。

本手法の経験的妥当性を検討するには、前述のマルチメディア英語教育ソフトについて、被験者がどのような印象を抱いていたか質問紙法で調べ、それを4-5で述べたことから突き合わせてみればよい。

そこで、教育効果とARCS関連の印象を問う質問にSD5件法で答える形式の質問紙を作成し、4-3の被験者に答えてもらった。

6-2. 被験者による評価

改訂版は、プロトタイプとどこが変わったのか。被験者による評価では、次のことが明らかにになった。

- ①プロトタイプが持っていた音声・画像等の美しさによる第1次的な引き付けや、英語学習の気楽さに加えて、ある程度の認知面での効果が被験者に認識されるようになった。
- ②注意に関しては、知覚的喚起に加え、変化性の点で「おや」という気持ちになる被験者が多く見られた。
- ③関連性に関して、プロトタイプでは有効な反応が見られなかったが、改訂版では動機

との一致が見られるようになった。

- ④自信に関する評価は、どちらも、被験者により大きなばらつきが見られ、特徴といえるものは認められなかった。

- ⑤満足に関して、プロトタイプでは有効な反応が見られなかったが、改訂版ではそれが見られるようになった。

以上を4-5で述べたことと比べてみよう。まず、上記の①②⑤は4-5の①と一致する。また、上記の②③も、4-5の②と一致する。さらに、上記の④も4-5の③④と一致する。これらのことから、発話分析での評価は、被験者による評価と高い整合性を持つことがわかる。この結果は、評価手法の経験的妥当性を裏付けるものである。

〔今後の研究の方向、課題〕

平成4年度の研究で、本評価手法の有用性、信頼性、妥当性が確認できた。

本手法は、教育用ソフトの評価だけでなく、授業研究の評価手法として広く位置づけ、生徒達の学習活動の質を調べる道具として利用することが可能である。今後は、そうした領域への応用も研究したいと考えている。

また、本研究で開発した手法をより多くの人が利用できるようにするため、評価マニュアルの作成にも取り組みたいと考えている。

〔成果の発表、論文等〕

- 1) 余田義彦, 清水克彦, 東原義訓 (1993) マルチメディア教育ソフト「マリコ伯母さんの秘密」の形成的評価, 日本教育工学会第9回大会論文集
- 2) 余田義彦, 東原義訓 (1994) 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, 科学教育研究 (投稿中)

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 —

Strain Feedback Control of Flexible Multi-link Robot Arms — Toward Practical Applications —

921019

研究代表者

長岡技術科学大学 助教授

羅 正 華

[研究の目的]

宇宙開発や産業用ロボットの高速化、軽量化、と省エネルギー化に伴い、柔軟ロボットに関する研究はこれまで数多く行なわれてきた。柔軟ロボットの運動学、動力学、位置決めと振動制御、軌道制御、力制御などは、いずれも剛体ロボットには見られない、または剛体ロボットよりはるかに難しくなっている研究課題である。例えば、位置決めと振動制御の場合、一つの駆動モータ入力で駆動モータの位置決めと振動の抑制という二つの目標を同時に達成させる必要がある。しかし、位置決めと振動の抑制はもともと相反の関係にあり、位置決めの制御性能をよくしたければ、駆動モータの急加減速が不可欠であり、振動が起りやすい、すなわち、振動抑制の制御性能が悪くなる。逆に振動抑制の制御性能をよくしたければ、駆動モータの即応性を犠牲にしなければならないことは直観的に理解できるであろう。このように、本来相反する二つの制御性能を両立させるのは問題の難しいところである。振動制御に関する先駆的研究として、有限要素法、あるいはモード展開で有限次元の近似モデルを立て、モデルベース最適制御、特異摂動法による制御、仮想的

な集約ばねでモデリングをし、オブザーバに基づいた線形状態フィードバック制御などが挙げられる。一般的に、より正確なモデルが得られれば、よりよい制御性能が期待できる反面、モデルとその中に含まれる物理パラメータの同定の煩雑さや、コントローラの高次元化などが避けられない。

一方、実用化の立場から、簡単なセンサ出力フィードバックで制振制御ができれば最も望ましいことは言うまでもない。回転型柔軟1リンクロボットアームに限っては、歪み信号を振動抑制に利用することが早くから注目された。また筆者もそれと違う観点から歪みフィードバックの本質を理論的に解析し、実験で検証した。回転型ロボット以外に、例えば直交型、スカラ型ロボットなどが実際産業界に多数使われているにも関わらず、その振動抑制制御法についての研究は少ない。本研究では、特に回転型柔軟多リンクロボット、直交型ロボットを対象に、簡単な出力フィードバックで振動の抑制方法を新しく提案する。

[研究の内容、成果]

基本的概念を説明するために図1に示す柔軟1リンクロボットを考える。剛性の低いロ

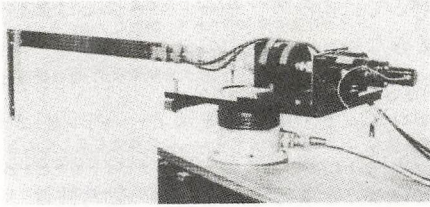


図1 回転型柔軟1リンクロボット

ロボットアームを駆動するとき、アーム自身に振動が発生する。その振幅を $w(t, x)$ とする。アームの水平面内の曲げ振動だけを考え、その動的方程式は

$$\begin{cases} \ddot{w}(t, x) + \alpha w''''(t, x) = -x\ddot{\theta}(t) \\ w(t, 0) = w'(t, 0) = 0 \\ w''(t, l) = w'''(t, l) = 0 \\ w(0, x) = w_0(x), \quad \dot{w}(0, x) = w_1(x) \end{cases} \quad (1)$$

のように書ける。ここに、 $\theta(t)$ は制御モータの回転角、 α はアームの物理定数、 $\dot{w}$ は時間微分、 w' は空間微分を表す。いまアームの根元における歪み信号 $w''(t, 0)$ が検出可能とし、何らかの方法でモータの回転速度 $\dot{\theta}(t)$ を $w''(t, 0)$ に比例するように、すなわち、

$$\dot{\theta}(t) = kw''(t, 0) \quad (2)$$

となるようにモータを制御できれば、上式の両辺を時間微分し

$$\ddot{\theta}(t) = k\dot{w}''(t, 0) \quad (3)$$

が得られるから、結局制御した閉ループの方程式は

$$\begin{cases} \ddot{w}(t, x) + kx\dot{w}''(t, 0) + \alpha w''''(t, x) = 0 \\ w(t, 0) = w'(t, 0) = 0 \\ w''(t, l) = w'''(t, l) = 0 \\ w(0, x) = w_0(x), \quad \dot{w}(0, x) = w_1(x) \end{cases} \quad (4)$$

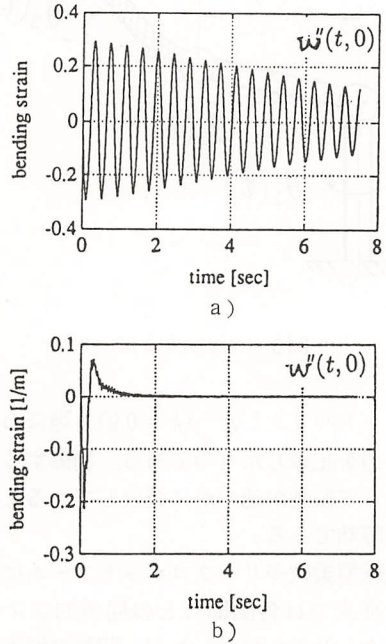


図2 歪みフィードバック制御実験結果

となる。そこで大事な問題は、(4)式の第1式における $kx\dot{w}''(t, 0)$ を導入したことによって系全体のエネルギーが減衰するかどうかである ($k=0$ の場合、すなわち歪みフィードバックを行わない場合(4)は保存系であり、エネルギーは減衰しないことに注意)。言い換えれば、 $kx\dot{w}''(t, 0)$ が減衰項になっているかどうかである。これは従来の理論的枠組内では答えできず、筆者が研究した A-依存型 (A-dependent) 作用素の理論と変数変換で完全に解決できた。(4)の解が一意に存在し、 $k>0$ である限り指数安定である。それゆえ振動制御の目的が果たせたことになる。図2は図1に示す実験装置で実験を行なった結果である。図2(a)は歪みフィードバックなしの場合のセンサ出力、図2(b)は歪み

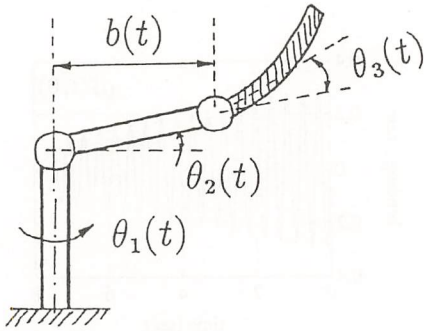


図3 3リンクロボット

フィードバックした ($k = 0.9$) 場合のセンサ出力を記録したものである。制御することによって振動が速やかに減衰していることが一目瞭然である。

回転型柔軟多リンクロボットアームに対して、従来では各関節ごとの局所的フィードバックしか考えなかったが、関節の配置の仕方によっては、それでは制御不能な振動も当然あり得る。これを克服するために大域的な歪みフィードバックが不可欠である。そのとき生じる主な問題として重力補償問題とオフセット問題がある。この二点については我々は図3に示す3リンクロボットに対してシミュレーション研究を行なった。相当長いオフセット $b(t)$ が存在しても歪みフィードバック閉ループ系が安定を保てるだけでなくよい制振性能も得られている。このことは歪みフィードバックが回転多リンクアームにも適用可能であることを示唆しているが、理論的にきちんと証明するのは難しい。

直交型ロボットはFAやFMSなどの自動組み立てラインによく用いられ、生産性を高めるには高速化が最も重要な課題である。しかし、高速化のために関節モータの急加減速が必要であり、それに伴う先端アームの振動

が避けられない。このような直交型ロボットに対しては歪みのフィードバックでは振動抑制できない。せん断力のフィードバックが必要であることがわかった。図4は試作した直交型ロボットである。先端アームの剛性が相対的に低く、その発生する振動の振幅を同じく $w(t, x)$ とすると、アームの動特性は

$$\begin{cases} \ddot{w}(t, x) + a w''''(t, x) = -\dot{s}(t) \\ w(t, 0) = w'(t, 0) = 0 \\ w''(t, l) = w'''(t, l) = 0 \\ w(0, x) = w_0(x), \dot{w}(0, x) = w_1(x) \end{cases} \quad (5)$$

で表される。ここに $s(t)$ はアームの取り付けられている移動台の移動距離である。(5)式と(1)式の違いはそのそれぞれの第1式の右辺にある。(1)式においては制御入力とはモータの関節角加速度 $\ddot{\theta}(t)$ であることにに対し、(5)式においては制御入力は移動台の線加速度になっている。いまアームの根元におけるせん断力 $w'''(t, 0)$ が検出可能で、何らかの手法でモータを制御し移動台の線速度 $\dot{s}(t)$ が

$$\dot{s}(t) = -k w'''(t, 0), \quad k > 0 \quad (6)$$

となるようにする。(6)式の両辺の時間微分を取り、 $\dot{s}(t)$ を(5)式に代入すれば閉ループ系の方程式が

$$\begin{cases} \ddot{w}(t, x) - k \dot{w}'''(t, 0) + a w''''(t, x) = 0 \\ w(t, 0) = w'(t, 0) = 0 \\ w''(t, l) = w'''(t, l) = 0 \\ w(0, x) = w_0(x), \dot{w}(0, x) = w_1(x) \end{cases} \quad (7)$$

と書ける。(7)式における速度項 $-k \dot{w}'''(t, 0)$ も実は減衰効果があることを理論的に証明できる。方程式(4)と(7)はいずれも従来では見られなかった新型の偏微分方程式であり、その解の性質に関する解析は最も興味深い。

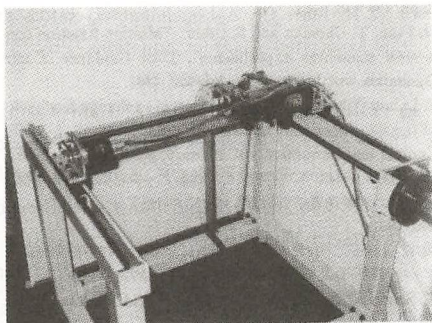


図4 フレキシブルアームをもつ XY ロボット

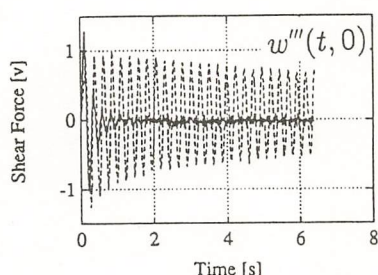


図5 セン断力フィードバック制御実験結果：センサ出力応答

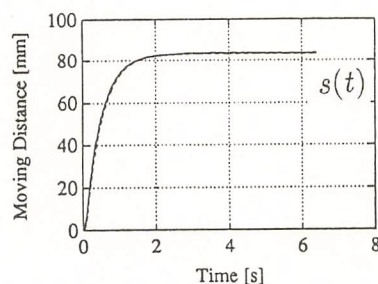


図6 セン断力フィードバック制御実験結果：移動台の移動距離応答

なお、実際にロボットを動かす場合、ロボットの移動台の移動距離も制御しなければならないので、(6)式のかわりに

$$\begin{aligned} \dot{s}(t) = & -kw'''(t, 0) - k_1(s(t) - s_d) \\ & - k_2 \int_0^t (s(\tau) - s_d) d\tau \end{aligned} \quad (8)$$

とすればよい。ただし、 s_d は移動台の目標位置。 $k_1 > 0$ 、 $k_2 > 0$ は位置決めの PI ゲインである。

図4の直交ロボットを用いて位置決め実験を行なった。図5はそのときのせん断力センサの出力を記録したものである。破線はせん断力のフィードバックを行なわない場合、実線はせん断力フィードバック制御を行なう場合である。図6は移動台の移動距離応答を示す。せん断力フィードバックするのとしないのと応答がさほど変わらないのはこの制御法の利点である。

[今後の研究の方向、課題]

回転型柔軟ロボットに対しては歪みのフィードバック、そして直交型柔軟ロボットに対してはせん断力のフィードバック、という簡単なセンサ出力フィードバック法を提案し、その有効性を理論的かつ実験的に検証した。ただし、回転型多リンクロボットの場合では、ロボット機構の多様性から、統一的な振動制御手法が確立できず、今後のさらなる検討と、制御と機構の設計の統合化が必要である。

[成果の発表、論文等]

- 1) 羅, 坂和: DSFBの柔軟多リンクロボットアームへの拡張について, 第10回日本ロボット学会学術講演会, 1992.
- 2) 西村, 羅, 坂和: DSFBによる多リンクフレキシブルアームのPTP制御, 第3回ロボットシンポジウム, 1993.
- 3) 羅, 山本: ゲイン適応によるフレキシブルロボットアームの歪み直接フィードバック制御, 日本

- 機械学会論文集, Vol. 59, No. 566, C編, pp.3146 - 3150, 1993.
- 4) 羅正華: フレキシブルマニピュレータの出力フィードバック制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 2, pp.32-38, 1994.
- 5) 羅, 北村: 直交型産業用ロボットの高速位置決めに伴う制振制御, 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol. 2, pp.681-684, 1993.
- 6) Z. H. Luo: Direct Strain Feedback Control of Flexible Robot Arms: New Theoretical and Experimental Results, IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 38, No. 11, pp. 1610-1622, 1993.
- 7) Z. H. Luo: Stability Analysis of Direct Strain Feedback Control of Flexible Robot Arms, Proc. of 1992 American Control Conference, pp. 3319-3323, 1992.
- 8) Z. H. Luo: On A-Dependent Operators and the Associated Abstract Equations, Proc. 31 st IEEE Conference on CDC, 1992.
- 9) Z. H. Luo and Y. Sakawa: Gain-Adaptive Direct Strain Feedback Control of Flexible Robot Arms, Proc. TENCON '93, Beijing, 1993.
- 10) Z. H. Luo and B. Z. Guo: Further Theoretical Results on Direct Strain Feedback Control of Flexible Robot Arms, Submitted to IEEE Trans. Automatic Control. 1993.
- 11) Z. H. Luo, N. Kitamura and B. Z. Guo: Shear Force Feedback Control of Flexible Robot Arms, Submitted to IEEE Trans. Robotics and Automation, 1994.

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

Study on Higher Cognitive Functions and Artificial Neural Networks for Human-Machine Interaction

921020

研究者代表
共同研究者

北海道工業大学工学部 教授
北海道工業大学工学部 教授

渡 邊 一 央
大 堀 隆 文

〔研究の目的〕

高次のヒューマンインタフェースは、人間—機械間で互いに鏡像関係にあることが基本であろう。本研究では、機械側にこのような性質を持たせるため、情報の授受・理解・表現に関する人間の高次認知機能とその基本特性を解明するとともに、それらの機能・特性を実現可能とするニューラルネットの構成法を明らかにする。

〔研究の内容、成果〕

人間の高次の情報処理様式をインタフェース機能の側面からとらえ、人間—機械間会話性向上のための高次認知機能群を抽出するとともに、心理物理実験などによりその性能特性を調べた。また、主要な機能をニューラルネットによって実現する方法を検討した。

研究成果を、以下に要約する。

1. メンタルモデル形成のためのプロトコル

人間—機械間会話性向上のために不可欠な、機械（システム）に関する脳内モデル（“メンタルモデル”と呼ばれている）を規定する性能や機能を、感覚/表出、知覚/信号化、

再認/内部表現、情報理解/創成、意志の5階層よりなるインタフェース機能構造の側面からとらえ、メンタルモデル形成に必要なプロトコルとして体系化した。

その結果、人間—機械間の会話性を向上させるためには、以下のプロトコル項目について両者間で十分整合がとれていること、あるいは会話の過程で整合をとり得るような機能を機械側にも保有させておくことが重要である、と推論された。

感覚/表出プロトコル： 明るさ・色・音などの刺激物理量の可変範囲、感覚対象の物理空間サイズ、位置、それらの指定・調整方法

知覚/信号化プロトコル： 端点・エッジ・図形素片など有意特徴項目の種類・範囲、その指定・調整方法、知覚不能部分の再送要求の手続き

再認/表現プロトコル： 再認/表現可能な文字・単語・命令などの種別・範囲、その指定・調整方法、再認不能部分の指定・再送要求方法、表現変更要求の手続き

理解/情報創成プロトコル： 知識内容の照合・理解内容の確認などの方法、追加説明要求の手続き

意志プロトコル： 構えや意図の照合方法

2. 非記号的認知対象の記憶・再現特性

本来カテゴリー化が不可能な非記号的物理量を、人間がどのように認知しているかについて手がかりを得るため、位置・傾斜・時間に関する記憶・再現特性を心理物理実験などにより調べた。

この心理物理実験より、以下のような結果が得られ、動きや変化の構成要素である、位置・傾斜と時間長では、その認知・記憶の特性が著しく異なっていることが示唆された。

- (1) 1次元および2次元領域内での位置の認知・記憶にあたっては、領域の両端や頂点、中心点、4等分点群などの記号的な長期記憶が大きく関与しており、それらの近傍では再現誤差は他の領域より顕著に小さい。
- (2) 1次元と2次元の位置再現誤差特性から、2次元位置の記憶・認知にあたっては、1次元方向の位置を記憶単位としているように見え、記号的対象の認知の際にみられるチャンク構造が窺えた。
- (3) 視覚による傾斜の再現誤差は、水平・垂直近傍では1 deg以内、45 deg近傍では約3 deg、これらから離れた傾斜では6～7 degであり、傾斜の認知・記憶にあたっては、垂直、水平、その中間といった記号的な長期記憶が密接に関与している。
- (4) 時間長の一対比較試験より、時間長の記憶誤差は、時間長1～5秒の範囲では時間長のほぼ0.3乗に、5～10秒の範囲では時間長の1乗に、それぞれ比例して単調に増大し、記号的な長期記憶の関与はみられなかった。
- (5) 上記の時間長記憶誤差は、時間的に先に提示された刺激が後に提示されたものより短めに評価されたことから生じており、時間長は数秒程度の短期記憶の過程を通じて縮小される傾向にある。

3. 局所表現型パーセプトロンの提案

感覚情報から知覚された特徴量群を文脈に基づいて取捨選択し、入力標本がどのカテゴリーに属するか選定するパターン認識機能は、最も基本的な認知機能である。選定されるべきカテゴリー群は、有限個の離散的な入力標本群に対する学習によって、多次元特徴空間内の領域として形成される。

これまで、ニューラルネットによるパターン認識は、Rumelhartらによって提案されたBack-propagation (BP) 法を用いた分散表現型の3層パーセプトロンが最も有効と考えられてきた。しかし、分散表現型パーセプトロンには、特徴空間上で複雑な形状を持つようなカテゴリー群に対して、十分な認識性能が得られにくい、学習に長時間を要する、といった問題点が付随していた。

これらの問題に対処する一手法として、ニューラルネットの中間層を1層追加し、特徴空間上の任意の離散標本群を上位中間層出力によって完全に局所表現する4層パーセプトロンとその学習方法を提案した。

- (1) まず、最も基本的なパターン認識用ニューラルネットである単純パーセプトロンの学習則を、各入力標本ごとに逐次的に適用し、多次元特徴空間上の超平面の切片群によりすべての入力標本群を完全に分離する学習を行った。このとき、入力層出力一下位中間層出力間変換行列は正則となるので、下位一上位中間層間の結合係数を調節することによって、入力層出力一上位中間層出力間変換行列を単位行列にすることができる。
- (2) したがって、上位中間層一出力層間の結合係数によって、各入力標本に対して任意の出力層出力を割り当てることが可能となる。
- (3) 応用例として、認識課題と等価な2次元3値論理関数写像課題と代表標本群によるパ

ターン認識課題に関するシミュレーションを行った。その結果、分散表現型の3層パーセプトロンと比較して1/100以下の計算時間で学習可能であることが確認された。

4. ニューラルネットによるKL変換

メンタルモデルの形成は、対象となるシステムの主要な性能や機能を抽出し、その機能や性能によって脳内に可能な限り正確にシステムを内部表現（恒等写像）することと解釈できる。このことから、認知対象を内部表現するための主要な空間軸（変数）の抽出・獲得は、人間の最も重要な高次認知機能の1つである、と考えることができる。

この考えに基づき、従来不可能であったニューラルネットによる主成分軸（変数）の抽出を可能とする、KL変換用ニューラルネットの構造とその恒等写像学習方法を提案し、その性能を確認した。

- (1)ただ1個の中間層ユニットを持つ3層パーセプトロン（単位パーセプトロンUPと略称する）の入出力間で、誤差逆伝搬法などを用いて恒等写像学習を行わせると、必ず大局的最適状態に収束し、収束状態で中間層ユニットから入力標本群の第1主成分軸への回帰成分（第1次KL変換成分）が直接出力されることを、理論的に示した。
- (2)単位パーセプトロンの入出力間恒等写像誤差を次段に送出するKL変換用基本セクションBSを多段に接続したニューラルネットが、第r段目のUP中の中間層ユニットから第r次KL変換成分を出力することを理論的に示し、ニューラルネットによるKL変換を可能にした。
- (3)原標本群を前処理用ネットワークを介して不偏化し、すべてのUP中のしきい値群を

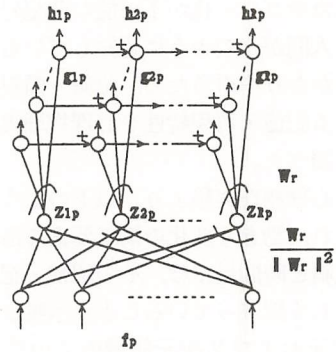


図1 KL変換用ネットワークの構造
Fig. 1 Network structure for KL transformation

不要にし、重み係数群のみで収束可能にするとともに、上・下層重み係数間に反比例的制約を与えることによって、学習を高速化する方法を提案し、シミュレーションによって従来のBP学習法に比して100倍以上の高速化が図れることを検証した。

- (4)UP群を並列に配し、出力層間に1方向的な係数1の加算的結合を施した3層構造のニューラルネットワーク（図1）が、入力一各出力層出力間での並列的に恒等写像学習を通じて、必ず大局的最適状態に収束し、その収束状態で各UPの中間層出力を介して、入力標本群のKL変換成分を抽出可能であり、多段接続型に比べ、KL変換動作を大幅に高速化できることを示した。
- (5)また、高速化が期待できる簡単な学習則を明らかにし、共分散行列が正則、非正則および固有値の多重度に係わらず、任意の入力標本群に対して、正確なKL変換と高速な学習が可能であることを、シミュレーションによって検証した。

5. パターン認識用大規模ニューラルネットの学習高速化手法

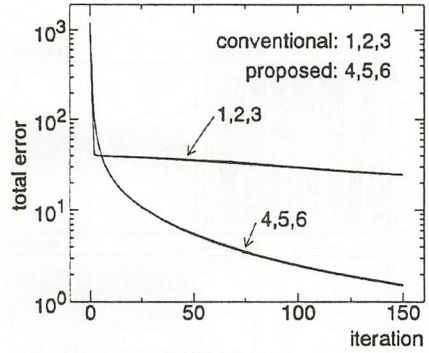
カテゴリーの生成・獲得に関連して文字認識課題を例に、ニューラルネットの大規模化に伴って顕著になる。

lucky initial問題： ネットワークの結合係数の初期値の設定が難しくなり、偶然うまく初期設定された結合係数以外では学習動作を示さない。

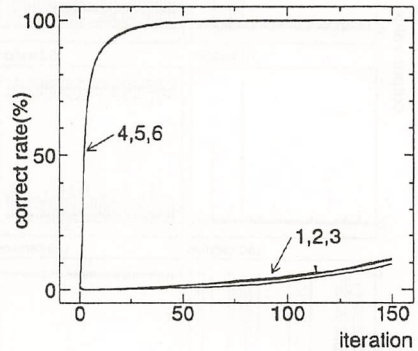
学習停滞問題： 学習動作を示し始めても、しばらくして学習停止状態に陥りやすく、かつその回復に長時間を要する。

を取り上げ、これらを解決可能な結合係数の簡便な初期値修正法と平衡化誤差逆伝搬学習法（平衡化 BP 法）を提案した。

- (1) 任意の入力標本群を、各ユニットの活性領域に再配置可能な結合係数初期値修正法を示し、従来の BP 法に適用した。その結果から、初期値の設定のみでは、lucky initial 問題は解決できるが、学習停滞問題は解決できないことを示した。
- (2) パターン認識課題では、出力層の各ユニットに対して、教師信号として 1 が割り当てられるパターンは 1 個で、他のすべてのパターン群には教師信号 0 が割り当てられる。このため、出力層各ユニットの出力誤差の、ユニットとパターンに関する、単純な総和を減少させようとする従来の BP 法では、学習初期のパターン未分離状態時に、出力層のユニット出力群が、0 近傍の非活性領域に偏移・集中し、学習停滞が生じるものと推論した。
- (3) 上記の問題点を回避する方法として、各入力パターン毎に、教師信号 1 が割り当てられる 1 個のユニットの出力誤差と教師信号 0 が割り当てられる他のユニット群の出力誤差和の比重を等しくした平衡化 BP 法を



(a) Total error



(a) Correct rate for outputs over 0.9

図2 従来法と平衡化 BP 法の学習特性の比較
Fig. 2 Comparison of learning characteristics between Conventional and Proposed methods

提案し、入力層：245、中間層：50、出力層：80 ユニットからなるニューラルネットによる手書き漢字認識課題に関するシミュレーションによって、学習停滞問題を完全に解決できることを検証した。

- (4) 提案した結合係数初期値修正法と平衡化誤差逆伝搬学習法を併用することによって、従来の BP 法に比べて、100 倍以上の学習速度を達成できた（図 2，3）。

6. 相互結合型ニューラルネットの高性能化

人間の最高次に属する認知機能として、認

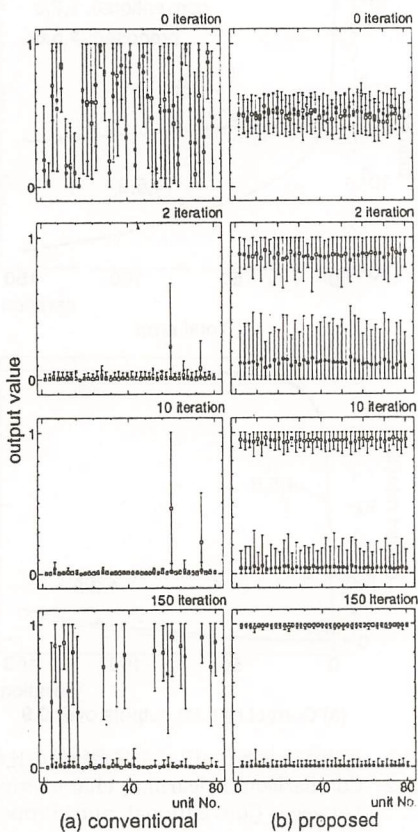


図3 従来型 BP 法と平衡化 BP 法の出力推移
Fig. 3 Transitions of output values in conventional and proposed methods

識結果の合理性や新しく理解獲得した情報から期待される効果を評価し、必要な応答や知識の再構築などの情報創成活動への意図を生じせしめる機能が考えられる。

この機能を系統的にみれば、合理性とか、期待される効果といった、総合的な評価関数に基づく内部状態の最適化の過程に関与している機能と解釈できる。

この最適化機能に関連して、相互結合型

ニューラルネットの高性能化について検討した。具体的には、相互結合型ニューラルネットに付随する局所最適解から大局的最適解への脱出方法について、代表的な制約条件付き組み合わせ問題である巡回セールスマン問題 (TSP) を取り上げ、検討を行った。

(1) 報告者らは以前、Hopfield 型ニューラルネットによる TSP の近似解の feasibility を改善するために、Lagrange 乗数による調整法を提案したが、乗数の更新に膨大な時間を要するという問題点があった。今回、Lgrange 乗数の更新がニューロンのしきい値を制御する問題と等価であることを明らかにし、高速な乗数更新方法を提案した。また、2 値ニューラルネットの状態推移と極小解の性質を分析し、従来のランダム状態集合が最適解探索の初期値としては冗長性をもつことを明らかにし、効率的な初期値発生法を提案した。最大 30 都市のランダム都市パターンを持つ問題に対して提案手法を適用し、精度をほとんど低下させずに、3 倍程度の高速化が実現可能であることを検証した。

(2) 相互結合型ニューラルネットの極小解を脱出するために、村島らによって提案された多段遷移法の欠点である計算時間の増加を抑えた 2 段遷移法を提案した。また、実際の 2 段遷移の回数を減少させるために、遷移後の状態を予測し無駄な遷移を省く仮想遷移法による高速化手法を提案した。5 ～ 30 都市からなるランダム都市パターンをもつ TSP に適用し、従来の多段遷移法に比べ、厳密解との近似誤差の増加を 30% 以下に保ちながら、計算時間を約 1/8 に減少できることを検証した。

7. ニューロン内ゆらぎを利用したニューラルネットの新学習法の提案

ニューラルネットの学習法として有効なBP法が、生体の神経回路網内で行われているとは考えにくい。神経回路網内のシナプス可塑性に関しては、Hebbの学習仮説や外山氏のCovariance ruleが提案されている。しかしこれらは、シナプス単位の学習則に言及しているもので、シナプス相互間の相互作用要素を含んでいないため、神経回路網が入力に対して望ましい応答を出力可能とするような組織的学習には発展しにくい。

報告者は、神経細胞のパルス発生過程が確率的であり、入力が一定であっても短時間でみると、発生パルスの数がゆらいでいることに着目し、このゆらぎが神経回路網の組織的学習に関与しているのではないかと、この着想を得た。

この着想に基づき、sigmoid形の連続入出力関数をもつニューロンモデル内にゆらぎ源を導入し、神経回路網の実際の出力と望ましい出力との間の誤差の変動と、各ニューロン内のゆらぎとの相関を用いて、各ニューロンのシナプス結合の修正量を推定する学習則を見だし、簡単な課題に関するシミュレーションによってその学習可能性を検証した。

[今後の研究の方向、課題]

機械に対するメンタルモデル形成のためのプロトコルの側面から、人間—機械間会話性に関与している主要な機能群を、低次の感覚レベルから最高次の意図レベルにわたって、階層的に体系化することができた。しかし、これらの主要機能群間の相互作用やそれらの統制に関与している機能群については、明らかにできず、今後の課題として残された。

一方、会話性に関与する高次認知機能のためのニューラルネットについては、局所表現型ニューラルネットやKL変換用ニューラルネットの構造と学習法を提案できた。また、従来の誤差逆伝搬法に比して、大幅に学習特

性を向上し得る平衡化誤差逆伝搬法を提案し、その効果を検証した。相互結合型ニューラルネットの最適解への収束特性を向上させ得る手法についても提案した。今後、これらの成果を併用し、ニューラルネットのさらなる高機能化・高性能化を追究してゆく予定である。

本助成による研究を通じて、ニューラルネットの主要課題である学習法に関して、新たな着想を得ることができた。ニューロン内のゆらぎと神経回路網の出力誤差変動との相関を利用してシナプス結合係数を制御する、この学習法（“並列相関学習法”と呼称する）の挙動や適用可能性について、詳細に検討してゆく予定である。

[成果の発表、論文等]

- 1) 大堀隆文, 長尾尚幸, 渡邊一央: 局所表現型4層パーセプトロンによる離散標本点群の完全分離, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J 76-D-II, 1, pp. 124-131 (1993-01)
- 2) 大堀隆文, 森俊勝, 渡邊一央: しきい値制御型ニューラルネットによるTSPの解法, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J 76-D-II, 6, pp. 1252-1260 (1993-06)
- 3) 大堀隆文, 中畑利章, 渡邊一央: 2段遷移ニューラルネットによる巡回セールスマン問題の解法, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J 76-D-II, 6, pp. 1261-1269 (1993-06)
- 4) 三谷光照, 木津徳仁, 大堀隆文, 渡邊一央: パターン認識用ニューラルネットの学習高速化手法, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J 77-D-II, 1, pp. 211-218 (1994-01)
- 5) 増田一, 大堀隆文, 渡邊一央: KL変換用3層構造ニューラルネットワーク, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), J 77-D-II, 2, pp. 397-404 (1994-02)
- 6) 大堀隆文, 山本啓了, 薛念祖, 渡邊一央: 加速勾配形ホップフィールドニューラルネットによる組合せ最適化問題の解法, 電気学会論文誌 C, 114-C, 4, pp. 420-425 (1994-04)
- 7) 渡邊一央, 三谷光照, 西田啓蔵, 大堀隆文: しきい値ゆらぎを利用した多層パーセプトロンの並列相関学習法, 電子情報通信学会論文誌 (D-II) 投稿中

画像時系列からの動きの検出と評価の研究

Detection of Movement of Living Organs and their Evaluation from Image Sequences

931002

研究代表者	山形大学工学部 教授	赤 塚 孝 雄
共同研究者	山形大学工学部 助教授	田 村 安 孝
	山形大学工学部 助教授	平 中 幸 雄
	筑波大学臨床医学系 講 師	武 田 徹

[研究の目的]

画像時系列を観測しているときには明瞭であった対象が、その中の1枚の凍結画像での識別は困難であることはよく経験するところである。また、動きを評価することで、対象の形態だけでなく機能をも評価できることになる。これらを実現する工学的手法を、具体的な対象に即した研究を重ねて開発してゆくのが本研究の目的である。

[研究の内容、成果]

具体的な観測対象として、精子運動の顕微鏡動画像による解析、腸粘膜における突発的な細胞運動の顕微鏡画像列からの検出、気象衛星画像における雲の動きの追跡、RI断層画像時系列やX線TV画像列からの心臓血管の形態と機能の解析等を取り上げて、研究を進めてきた。ここでは、大腸粘膜における突発現象の抽出と2方向撮像の冠状動脈造影画像列処理について報告する。

1. 時系列画像からの突発的变化の抽出

1.1. 大腸粘膜のエキソサイトーシス

運動物体の形状が時間的に突発的变化するものを対象として、その突然現われたり、消失したりする突発的变化の抽出方法を、大腸粘膜の刺激による杯細胞内の粘液分泌顆粒のエキソサイトーシスと呼ばれる突発的变化の自動抽出を試みた。

大腸粘膜の分泌によるエキソサイトーシス(Exocytosis)は突発顆粒として観測され、その動き領域の抽出と定量的解析が大腸疾病の診断などにとって参考となる。そのためエキソサイトーシスの領域抽出、その突発顆粒の形状や大きさ等の特徴パラメータの自動的解析が必要となる。そこで、ノマルスキー顕微鏡とビデオカメラで得られた時系列画像を計算機に読み込んで、k時間飛ばし差分法によりエキソサイトーシスを検出し、画像平滑化などの前処理とモルフォロジィフィルターによる領域統合法を用いて突発顆粒の特徴パラメータの自動的解析手法を検討した。

1.2. 突発的変化の発生モデル

ここでは、背景がほぼ静止又は緩やかに動いている観測画像において、予測できずに顆粒を発生したり消失したりするものを突発的変化と定義する。それに伴い突発顆粒の形状と大きさが時間的に変化し、また、発突的变化による画像濃淡値の変化も比較的小さいが、高速ビデオカメラで撮影した時系列画像の目視では、その突発顆粒の時間的変化がはっきり観測される。

1.3. 突発的変化の自動抽出

時系列画像の解析手順

ビデオカメラから観測された突発的变化の画像時系列を1コマごとに計算機に読み込んで、 k 時間差分法によりその変化を検出する。突発的变化とともに画像背景も緩やかに動いているので、得られた時系列差分画像に多くの雑音が含まれているので、背景雑音除去と画像二値化処理が必要となる。さらに、モルフォロジィフィルターを用いて突発的变化の領域形状や大きさおよびそれらの特徴パラメータの時間的変化を定量的に計測する。

突発的变化抽出のアルゴリズム

形状が時間的に変化する非剛体運動である突発的变化の抽出には、一般的なオプティカルフロー検出法などは直接には適用できない。そこで、画像濃淡値の時間的な変化に着目した抽出手法を考えた。

明るさの時間的な変化の抽出を行い、時間軸上に突発的に変化するものを“時間エッジ”と考えて、これを最も強調する時間間隔 k を用いる時間飛ばし差分法を用いた。

k 時間飛ばし差分法により抽出した突発的变化の領域とその持続時間を定量的に計測す

るために、エッジを保った平滑化処理を適用して雑音を除去し、判別閾値決定法に基づいて差分画像の二値化を行った。

また、二値化画像における雑音を除去し、突発的变化の動き領域を確実にするためのモルフォロジィフィルターを設計した。

1.4. 顕微鏡画像の観測

ウサギやモルモットの大腸粘膜標本において、ACh (Acetylcholine) や CCh (Carbachol) を 10 から 100 μ M の濃度で作用させると杯細胞内の分泌顆粒に特徴的な反応が現われる。はっきり見えていた顆粒が突然消失したり、見えなかった顆粒が突然見えるよ

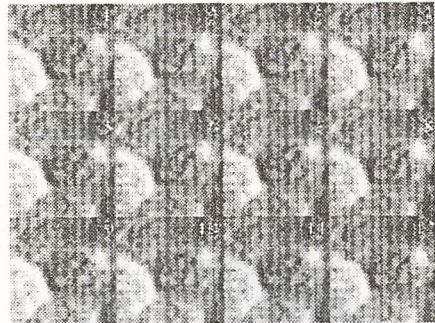


図1 大腸粘膜分泌の時系列画像

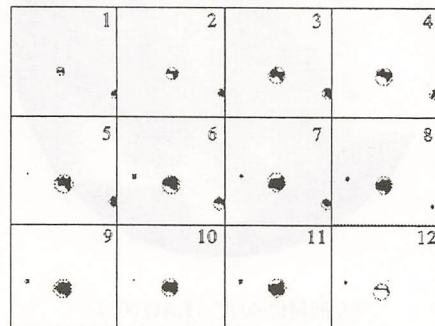


図2 突発的变化の抽出例

うに、大腸粘膜の分泌によるエキソサイトーシスが観測される。

顕微鏡を介してビデオカメラから観測されたウサギの大腸粘膜標本画像と、その画像と同時に記録された時間標識マークを利用し、1秒間30枚の $256 \times 256 \times 8$ の画像を計算機に読み込んだ(図1)。それらの画像を用いて、SN比を基準に最適な時間パラメータ k を求め、この k 時間飛ばし差分法により差分画像を得た。さらに、前述の手順でエキソ

サイトーシスの動き領域を決定し(図2)、この観測区間でのエキソサイトーシスの発生と消失の持続時間およびその突発顆粒の大きさ等の時間的パラメータを計測した(図3)。

2. 2方向撮像列からの冠状動脈3次元形状推定

2.1. 冠状動脈造影像

冠状動脈造影法によって得られる造影像は、医師の目視による読影によっており、計算機を用いる画像の利用は、特殊な目的で血管像の幅の違いを基にした狭窄度の算出や、DSAによる血管像の抽出程度である。また、直交する2方向からの撮像もよく用いられているが、冠状動脈の構造の複雑さゆえに、3次元形状の推定は熟練者でないと容易でない。

このとき、動きの情報を用いることで形状や3次元形態がより明確になるものと考えられる。そして、3次元表示を行うことにより、その理解を容易にすることを試みることに

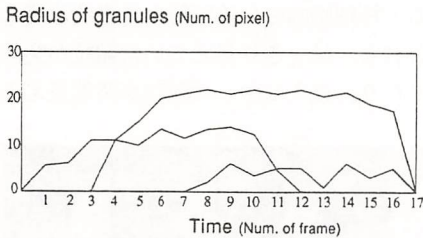
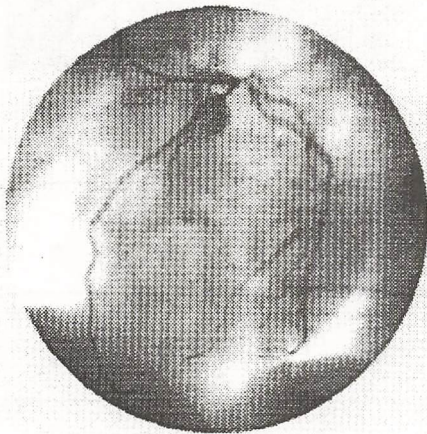
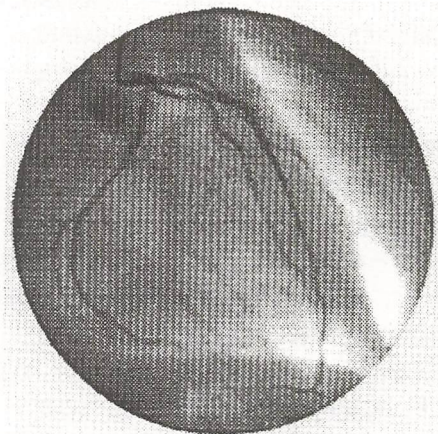


図3 突発的变化の持続時間とその突発顆粒の時間的变化



(左前斜位 60 度 (LAO 60))



(右前斜位 30 度 (RAO 30))

図4 冠状動脈造影像
ある瞬間の左右 X 線 TV 像

した。

ここで用いる冠状動脈造影像は、患者の左前方 60° と右前方 30° の直交する 2 方向からの投影像を、X 線 TV カメラによって 1/60 秒間隔で左右交互に撮像した画像列の組である。造影剤が十分行き渡ったと見られる造影剤注入後約 7 秒後からの連続した左右 1 組から 7 組の画像列を用いて処理を行い、その中の 1 つの時刻について冠状動脈像の 3 次元形状の推定を行った。この時刻の画像を図 4 に示す。

2.2. 動きを用いた冠状動脈像抽出

冠状動脈造影画像時系列の中で、冠状動脈像は他の組織と比較して速い動きをしている。この動きの差を用いて冠状動脈の抽出を試みた。

オプティカルフロー法

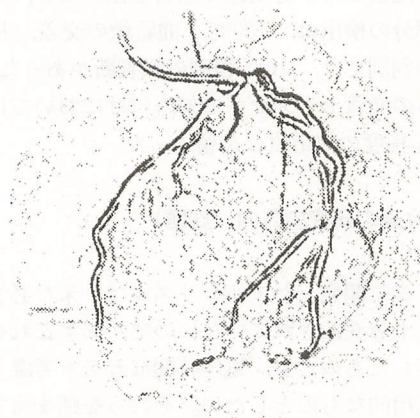
心血管の場合は剛体ではなく弾性体とみな

されるが、心臓に関する組織は他の組織に比べ速い運動をしているので、近似したフローベクトルの大きさを基に注目領域の抽出が可能と考えられる。グラディエント法を用いて抽出した冠状動脈像は次に示す手法による結果より劣ったものであった。

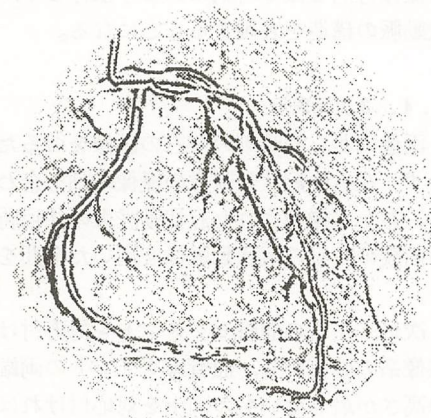
時空間差分を用いた冠状動脈像の抽出法

連続画像中で対象物体の動きがある場合、画像間の差分により、動いた部分を抽出することが出来るが、画像間のずれが僅かである場合には困難になる。そこで、輪郭強調（空間微分処理）画像の時間差分を用いることにより動きの検出力を上げる方法が考えられる。

2 つの時刻 i, j 間で $x_i - x_j$ の差分が行われるとすると、差分画像の正の部分は時刻 i における運動体の輪郭であり負の部分は時刻 j における運動物体の輪郭となる。いま、注目時刻を i とし、対象物体以外の物体は動いていないと考えられる微小時間差内で時刻 j を



(LAO 60)



(RAO 30)

図5 時空間差分画像

空間微分処理によるエッジ強調画像の着目時刻前後 6 枚の時間差分画像の加算画像

変化させて、輪郭像の差分画像列を得ると、それらの画像の正の部分は、全て時刻*i*における運動物体の輪郭となる。これらの画像を重ねることで輪郭の明瞭な画像が得られる(図5)。

2.3. 冠状動脈像の構造解析

抽出した冠状動脈像は、端点、分岐点といった特徴点と、特徴点間の血管像を血管幅を特徴に加えて表わす血管セグメントを用いて記述する。

冠状動脈像の血管セグメントの繋がり構造は、ツリー構造を取るが、血管像に重なり部分がある場合この繋がり閉ループを生じるので、この閉ループの探索を行って、血管の分岐、接触の判別を行える。重なった血管セグメントが見つかったなら、セグメントの特徴を考慮して、交差、接触の判別を行い、重なり部分と、その周辺の血管セグメントを繋ぎ合わせてゆく。

この処理により、血管セグメントの繋がり構造は撮像方向と撮像時刻にあまり依存せず、冠状動脈の構造を表現することになる。

2.4. 3次元表示

画像列から同時刻の左右の画像を得るため、まず、左右の冠状動脈像の撮像時刻を合わせる。左から撮像された冠状動脈像の注目時刻の前後の時刻の冠状動脈像を用いた補間を行う。

次に、左右の血管セグメントを対応付ける。撮像系の性質から、血管セグメントの両端点の高さが最も近いもの同士を対応付ければよい。

左右の対応の付いた血管セグメントから3次元表示を行う。この表示には、血管の骨格線のみを高速表示し自由な方向からの表現が

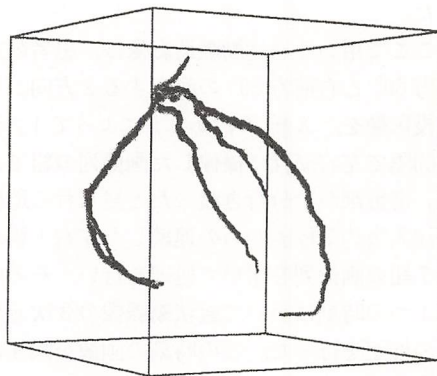


図6 冠状動脈の3次元構造推定結果

出来る方法と、血管に太さを持たせて立体感をつけて表示する方法とを用意した。前者は冠状動脈の分岐等の3次元構造を把握するのに便利であり、後者は太さの定量的な計測を導入したときに有効になる。太さを持たせた冠状動脈像の3次元表示を行った結果を図6に示す。

ここに示した手法では、DSAによる血管像と比較して十分明瞭な血管抽出ができ、交差部分の検出は、100%、血管像の交差、接触の判別では、10%程度の誤判断があった。左右の血管セグメントの対応付けにおいては、80%程度の対応付けに留まった。

[今後の研究の方向、課題]

ここで開発したアルゴリズムは、未だ必ずしも十分洗練されていないので、まずこれを充実したものとし、処理時間などをも考慮した実用的なものとなしたい。それらを踏まえて、時間と空間の情報の統合、さらには、関連した情報、経験と知識などの統合といった観点から整理した実システムの開発手法の確立に努めたい。

[成果の発表, 論文等]

- 1) 中村尚子, 黒沼修, 内田公, 伊藤渡, 赤塚孝雄, 田村安孝, 武田徹; “SPECT 画像からの心筋虚血部位形状の推定”, Med. Imag. Tech., Vol. 11(3), pp. 431-432 (1993)
- 2) 黒沼修, 湯浅哲也, 赤塚孝雄, 武田徹; “マルコフ確率場モデルによる心断層像の領域識別”, 第32回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 923-924 (1993)
- 3) 前田紀和, 田村昭博, 赤塚孝雄; “画像時系列からの複数移動体の抽出と追跡”, 第32回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 287-289 (1993)
- 4) 内田公, 赤塚孝雄; “冠状動脈造影像における血管交差判別”, 第32回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 145-146 (1993)
- 5) 山田章人, 中島孝則, 赤塚孝雄; “形状の変化する現象の追跡”, 平成5年度電気関係学会東北支部連合大会, p. 160 (1993)
- 6) 山田章人, 平中幸雄, 中島孝則, 赤塚孝雄; “LAN上での気象画像利用システム”, 計測自動制御学会東北支部第143回研究集会, 143-6 pp. 1-7 (1993)
- 7) Weiguo WU, T. Akatsuka, Y. Tamura and Y. Suzuki; Automated Extraction of Exocytosis Revealed by Video-Enhanced Microscopy, Med. Imaging Tech., Vol. 12, No. 4, pp. 433-434 (1994)
- 8) A. Uchida, T. Akatsuka, T. Takeda and Y. Tamura; Identification of coronary Arteries from time series of angiogram and its 3D understanding, Proc. of SPIE Vol. 2298. (1994) (In printing)

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

Research on the Development of New Liquid Crystal Optical Shutter
without Usage of Polarizers by Utilizing Cholesteric
Liquid Crystals and Polymer Complexes

931003

研究代表者

京都大学工学部 助教授

浅田 忠 裕

〔研究の目的〕

コレステリック液晶またはカイラル・スメクチック液晶のポリドメイン・フォカルコニック・テクスチャーの強い光散乱に基づく強い濁りを電界によりコントロールすることによって、偏光板を必要としない液晶光シャッターを開発することを目的とする。

これにより、CRT に代わる健康によく且つ低エネルギー消費の液晶ディスプレイの開発が期待される。

〔研究の内容、成果〕

これまで、液晶を利用した偏光板を必要としない液晶光シャッターとしては、動的光散乱を利用する方法と、液晶小粒を透明高分子中に分散し、電界配向によって屈折率をコントロールし光散乱を制御し利用する方法とが考えられてきた。これに対して、我々は、コレステリック液晶の強い光散乱を利用する方法を検討してきた。

コレステリック液晶のポリドメイン・フォカルコニック・テクスチャーはそれ自体強い

光散乱を示すことはよく知られている。これを光シャッターとして利用するには、フォカルコニック・テクスチャー自発的再形成をどのようにしてコントロールするかを工夫しなければならない。これに関与しうるのはコレステリックのネジリ力の制御と壁面効果の利用のみである。そこで我々はポリマー薄膜により液晶を多数の小室（細胞）にわけ、壁面効果を最高度に利用することと、カイラル液晶を適当に調合することにより、コレステリックのネジリ力を制御することを考えついて、検討に入った。

まず、5-CB を母体として、コレステリック液晶を少数添加してできたコレステリック液晶を用いた結果について述べる。Fig. 1 にコレステリック液晶として MC-15（ビフェニール型）とコレステリル・アセタイトとを用いた場合の性能を比較した。その結果 MC-15 を用いた方が明らかに性能（透過率大、しきい値電圧小、応答時間小）が良いことが判明した。MC-15 の結果（Fig. 1 に CaseA として示した）は、立ち上がり時間約 8.5（V）で 68（%）に達し、コレステリル・アセタイトを用いた場合よりはるかに

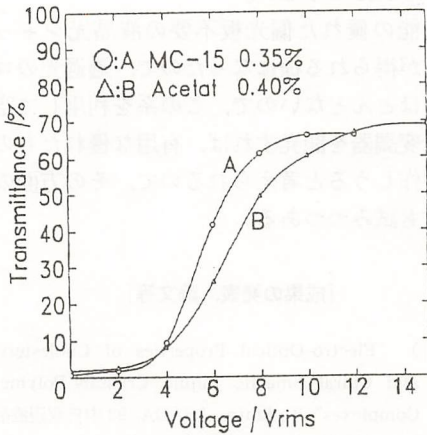


Fig. 1 Changes of transmittance against applied voltage at 500 Hz for Case A and Case B.

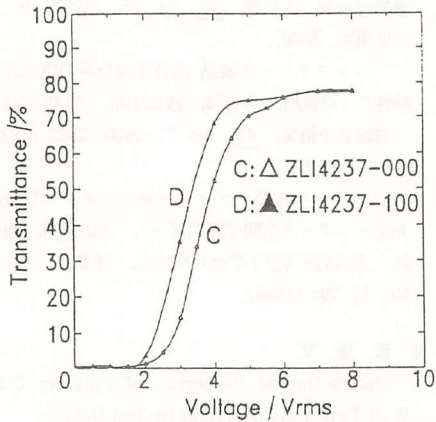


Fig. 2 Changes of transmittance against applied voltage at 500 Hz for Case C and D.

優れていることが明らかになった。なお、立ち上がり時間 $\tau_d + \tau_r = 32\text{ms}$ であった。

次に、メルク社から入手したカイラル・スメクチック液晶をコレステリック液晶に添加

Table 1. Compositions of the Samples

	A	B	C	D
5-CB	90.4%	90.4%	90.1%	90.5%
MC-15	0.35	—	0.21	0.25
Acetat	—	0.40	—	—
ZLI 4237	—	—	0.22	0.20
ZLI 4655	—	—	—	—
P (Pre)	9.22	9.21	9.47	9.05

した場合、性能がどのように変化するかを検討した結果について報告する。

入手した ZLI 4237 系と ZLI 4655 系の両者はラセンのネジレ方向が異なる。ZLI 4237 はマイナス、ZLI 4655 はプラスである。この場合も用いたプレポリマー及びその混合量はこれまでのベストのもの、即ち 10% 前後とした。コレステリック液晶は先の検討で選んだ MC-15 とした。Fig. 2 に ZLI 4237 系を用いた試料の電気光学特性を示す。図示は略すが、実験より明らかになったことは ZLI 4655 系を添加した場合、OFF 時透過率が増大し、性能として悪い傾向を示した。これに対して、ZLI 4237 系は駆動電圧はより低くなり、6 V 透過率は 75% 以上となり、透過率-電圧曲線に関するかぎり、大変良好な結果を与えるものとなる。特に ZLI 4237-100 が良い結果を与えている。ZLI 4655 系を用いると OFF 時の透過率が増大し、透過率-電圧曲線もなだらかなものとなり、我々の目指すものと正反対の方向に向かっていることが明らかである。この理由として、ラセンのネジレ方向が、用いたコレステリック MC-15 と反対であるためと考えられる。即ち、ネジレの方向の符号が反対なものを混入した

ため、もともとのコレステリックのネジレが解消される方向に向かい、OFF 時透過率が上昇したものと考えられる。また、ZLI 4237 系の添加は同符号のものの添加であるので、そのようなことが生じなかったのであると考えられる。駆動電圧が低くなり性能が向上したのは、強誘電性液晶物質の混入により電界応答性が増加したためと考えられる。強誘電性液晶物質の混入においては、また $\tau_r = 11.5$ ms (6 V) と電界応答速度も速くなるが、 τ_d が 30 ms (6V) と長くなる傾向にある。 $\tau_r + \tau_d$ が約 40 ms となり、この点に問題を残す。 τ_d が長くなるのは、2 種のカイラル性液晶の混入により、より複雑な液晶組織を再形成するための時間が必要となるからであると考えられる。

ZLI 4273-100 の添加が ZLI 4273-000 より良い結果を与えたが、その理由は、ZLI 4273-100 の方が自発分極率が高く、ピッチはゆるくて、単独で Switching Time が短いことなどによると考えられる。

[今後の研究方向, 課題]

これまでの研究で、我々の方法により実用可能な偏光板不要の液晶光シャッターが実現できることが明らかとなった今後の問題としては、アクティブ・マトリクスや TFT 方式などの電界印加・駆動方式との組み合わせを種々試み検討する必要がある。我々の開発した液晶光シャッターの製造方法において、材料は光重合前は液状であるので、現在 TFT 方式のデバイス製造法に採用されている注入方式を用いることは可能であると考えられるので、TFT 方式で実用化が可能であると思われる。ただし、その際、電界保持率を高める必要があれば、そのような液晶材料を選択

しなければならない。

性能の優れた偏光板不要の液晶光シャッターが得られる様になったので、透過光のロスはほとんどないので、この系を利用して空間光変調器を開発すれば、有用な優れたものを製作しうると考えられるので、その方面の検討も試みつつある。

[成果の発表, 論文等]

- 1) "Electro-Optical Properties of Cholesteric and Chiral Smectic Liquid Crystals-Polymer Complexes", Tadahiro ASADA, 93 中日双辺液晶顕示討論会, 中国・長春 1993.9.6-9. (The 93' Sino-Japanese Bilateral Symposium on Liquid Crystal Display, Changchun, P. R. China).
- 2) "ポリマー・セル・ウォール型液晶光シャッターについて", 湯戦昌, 浅田忠裕, 盧昌鎬, 司空同軌 (三星総合技術院・新素材研, 韓国) 第 19 回液晶討論会, 予稿集, 19, 34-35, (1993) 9/20-22 東大 (駒場).
- 3) "コレステリック液晶-高分子混合系の電気光学特性", 湯戦昌, 申冠鴻, 浅田忠裕, 第 42 回高分子討論会予稿集, 42, No. 7, 2920-2922 (1993) 9/20-22 上智大.
- 4) "カイラル液晶・ポリマーセルウォール型液晶光シャッターと空間光変調素子", 浅田忠裕, 湯戦昌, 第 43 回高分子学会年次大会, 予稿集, 43, No. 3, 794 (1994).

発 表 論 文

- (1) "Electro-Optical Properties of Polymer Cell-Wall Type Liquid Crystal Optical Devices" Zhanchang Tang and Tadahiro Asada, Chemistry Express, 8, pp. 665-668 (1993).
- (2) "Electro-optical Properties of Cholesteric and Chiral Smectic Liquid Crystals + Polymer Complexes", Tadahiro Asada, Zhanchang Tang, Changho Noh, and Dogsik Sakong, 液晶通汛 (中国), 1, No. 3, pp. 74-77 (1994).

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

Neural Image Processing Circuit Having Fuzzy Interface

931005

研究代表者	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)	上 野 文 男
共同研究者	熊 本 大 学 工 学 部 助 教 授	佐 々 木 守
	熊 本 大 学 工 学 部 助 手	杉 谷 賢 一
	日 本 文 理 大 学 講 師	北 村 芳 樹
	八 代 高 専 助 教 授	谷 口 和 孝
	八 代 高 専 助 教 授	白 井 雄 二
	熊 本 電 波 高 専 講 師	大 田 一 郎

[研究の目的]

画像処理やパターン認識などのシステムにおいて、膨大な情報を実時間処理するため高度並列分散情報処理を行なう柔軟性を持ったニューロコンピュータの開発が期待されている。従来のフォン・ノイマン型コンピュータを用いソフトウェア的に実現することも可能だが、ニューラルネットワークが持つ本質的な並列性を生かすことができずに処理が遅くなってしまう。そこでニューラルネットワークのハードウェア化が必要となる。また、入出力に柔軟性を持たせるために、ファジィ・インターフェースがあると、そのハードウェアは更に有効性を増すことになる。

近年、回路の実現方法として FPGA (Field Programmable Gate Array) が注目されている。FPGA とは、比較的高い集積度を持つプログラマブルデバイスの総称であり、ゲートアレイと PLA との間隙を埋める ASIC デバイスである。また、短期間で所望

の回路を設計できるため、特にシステムのプロトタイプング等の分野での活躍が期待されている。

そこで本研究では、画像処理向きボルツマンマシン専用プロセッサを提案し、Xilinx 社の XC 4010 LCA を用いてプロセッサの基本ユニットであるプロセッシング・エレメントのハードウェア化を行なう。

[研究の内容、成果]

1 ボルツマンマシン

ボルツマンマシン (Boltzmann Machine) は、ホップフィールドのもつ、ローカルミニマム (極小点) の問題を解決するための 1 手法として生まれたもので 1986 年に G. E. Hinton らが提案した。これは、確率的な動作するニューロ素子から構成される相互結合型並列処理システムである。ボルツマンマシンには次のような特徴がある。

- ・確率的な動作で評価関数の最小値を探索

する

• 外部の確率構造を学習する

このニューロンからなるネットワークについて考える。任意の2つのニューロンは相互に等しい強さで結合しており、各ニューロンは自分自身への直接のフィードバックを持たないとする。すなわち、 j 番目のニューロンから i 番目のニューロンへの結合荷重を w_{ij} で表したとき、 $w_{ij}=w_{ji}$ および $w_{ii}=0$ が成り立っていると仮定する。

各ニューロンの出力は0または1のいずれかの値をとり、そのどちらの値をとるかは確率的に決まる。ニューロンの出力が1をとる確率を $P(x_i=1)$ 、0をとる確率を $P(x_i=0)$ は次式で表される。

$$\begin{cases} P(x_i=1) = \frac{1}{1+\exp(-u_i/T)} \\ P(x_i=0) = 1-P(x_i=1) \end{cases} \quad (1)$$

$$u_i = \sum_j w_{ij} x_j + \theta_i \quad (2)$$

ここで、 T は温度と呼ばれる正の定数である。この式から分かるように、各ニューロンが1をとる確率は他のニューロンからの入力の荷重和 u_i の関数になっている。 T が大きな値をとると、 $P(x_i=1)$ の傾きはなだらかなになる。これはニューロンが1をとる確率が u_i の値によらずほぼ一定になることを表す。逆に T の値が小さくなるに従って、 $P(x_i=1)$ の傾きは急になり、ネットワークの動作はより決定論的になる。特に $T \rightarrow 0$ の極限においてはしきい関数になるのでネットワークの動作は完全に決定論的になる。

相互結合型の回路がある状態 x にあるとき、この状態におけるエネルギー関数は次式で定義される。

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_i x_j - \sum_{i=1}^n \theta_i x_i \quad (3)$$

ボルツマンマシンでは、動作が確率的なためエネルギーが増加するような状態が生じる。このような変化はネットワークの温度が高いほど起こりやすい。従って、ネットワークの動作において最初に温度を高くしておけば、エネルギー関数のローカルミニマムに陥った場合でもそこから脱出することができる。その後、温度を徐々に下げていくことでローカルミニマムに陥ることなくエネルギー関数の最小点に到達することができる。これがシミュレーティッドアニーリングである。ボルツマンマシンでは、このシミュレーティッドアニーリングを行なうことで系の状態がローカルミニマムに捕らわれることを逃れている。

2 画像処理向きボルツマンマシン専用プロセッサ

2.1 並列化アルゴリズム

N はニューロン数、 W_{ik} はニューロン k からニューロン i への結合荷重とすると $U_k(x_1, \dots, x_n)$ は次式で表される。

$$U_k(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^N W_{ki} x_i \quad (4)$$

ボルツマンマシンの動作手順を Pascal 風に記述すると以下ようになる。

```

1 : procedure Boltzmann Machine for
   hardware
2 : begin
3 :  $t := 0$ ; { $t$ ; iteration index}
4 : for  $i := 1$  to  $N$  to  $x_i(t) := \text{initial}$ ;
   {initialize}
5 : for  $i := 1$  to  $N$  to  $u_i(t) := U_i(x_1, \dots, x_n)$ 
6 : Next

```

```

7 :  $t := t + 1$ ;
8 : Select  $k$ -th neuron from  $N$  neurons
   at random;
9 : Fire  $k$ -th neuron in a statistical
   manner;
10 : if fire then  $x_k(t) := 1$  else  $x_k(t) := 0$ ;
11 : for  $i := 1$  to  $N$  do  $u_i(t+1) := u_i(t) + \Delta_i$ ;
12 : goto Next;
13 : end

```

ただし、 Δ_i はニューロン i の膜電位 u_i の変化分で次式で表される。

$$\left. \begin{array}{l} (a) \text{ if } x_k(t-1)=0, x_k(t)=1 \text{ then } \Delta_i = W_{ik}; \\ (b) \text{ if } x_k(t-1)=1, x_k(t)=0 \text{ then } \Delta_i = -W_{ik}; \\ (c) \text{ if } x_k(t-1)=0, x_k(t)=0 \text{ then } \Delta_i = 0; \\ (d) \text{ if } x_k(t-1)=1, x_k(t)=1 \text{ then } \Delta_i = 0; \end{array} \right\} \quad (5)$$

この Procedure では、膜電位 $u_i(t+1)$ の計算は $u_i(t)$, $x_k(t)$, $x_k(t-1)$ および W_{ik} というローカルな情報を使用するだけで実行可能であり、それは全てのニューロンについて同様である。つまり全てのニューロンについて同時並列に膜電位を計算できる。また、このアルゴリズムでは膜電位の計算時間はニューロン数に依存しない。

2.2 システムアーキテクチャ

図 1 に SIMD タイプの並列アーキテクチャを示す。アーキテクチャの特徴は全ての PE (Processing Element) が 2 種類のバス (ACTIVITY BUS, OUTPUT BUS) に結合されており、コントロールブロックにより全体を制御している。PE は 1 ビット ALU (Arithmetic Logic Unit), レジスタ等から構成されており、結合荷重を蓄えるローカルメモリを備えている。システムは次のような処理を行なう。

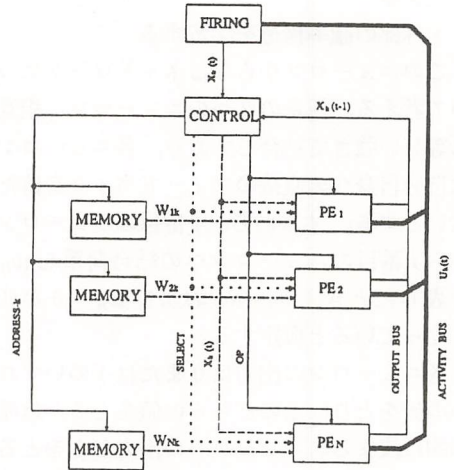


図 1 システムアーキテクチャ

- (1)ニューロン k が CONTROL ブロックの信号 SELECT によってランダムに選択される
- (2)ニューロン k は 3 ステートバッファをオープンして膜電位 $u_k(t)$ を ACTIVITY BUS に、出力 $x_k(t-1)$ を OUTPUT BUS にそれぞれ転送する
- (3)発火機能ブロックは ACTIVITY BUS より膜電位 $u_k(t)$ を受けとり、それを確率的に発火させ出力 $x_k(t)$ を決定する。CONTROL ブロックにその値を送る
- (4)CONTROL ブロックは $x_k(t)$ と $x_k(t-1)$ を受けとり式 (5) の中の 1 つの動作モードを決定する。信号 OP を各 PE に送る
- (5) $PE_i (i=1, \dots, N)$ は信号 OP, 結合荷重 W_{ik} を受けとり膜電位 $u_k(t+1)$ を計算する。 PE_k は $x_k(t)$ を受け取りレジスタに保存する
- (6)(1)に戻る

相互結合型ニューラルネットワークの場合、ニューロン数が N の時は N^2 の結合荷重が存

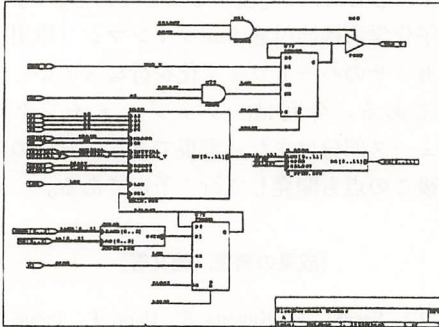


図2 プロセッシング・エレメント

在する。これによりニューロン数が多い場合はアナログ、デジタル両方式ともハードウェア・システムが構成しにくく、演算時間が長くなり、またシステムの拡張を行なうことも難しくなる傾向がある。提案するアーキテクチャは単純なバス結合構造を採用しているので必要な PE をバスに接続することにより拡張が行なえる。

2.3 プロセッシング・エレメント

処理の基本ユニットである PE を図 2 に示す。ALU は 1 ビットフルアダー、フリップフロップおよび数種のロジックから構成される。また、膜電位の計算速度を上げるため CARRY SELECT ADDER 方式を採用した。

全ての PE は CONTROL ブロックから乱数 RANDOM を受け取る。PE_i は自己認識用の I.D. アドレスをもっており、乱数と比較する。これにより PE が選択され、選ばれた PE_k は 3 ステートバッファをオープンして保存している出力 $x_k(t-1)$ と膜電位 $u_k(t)$ をそれぞれのバスに転送する。PE_i は CONTROL ブロックから信号 OP を受け取り、自分自身のローカルメモリを使いビット・シリアル演算を行なう。

3 FPGA

FPGA (Field Programmable Gate Array) はプログラマブルな論理ブロックとスイッチング・ブロックがアレー状に整列した構造をしている。今回用いた FPGA は米国 Xilinx 社の XC 4010 LCA で 400 個の論理ブロック (CLB), 160 個の入出力ブロック (IOB) を実装している。

各 CLB (Configurable Logic Block) には、プログラム可能な組み合わせ回路と記憶レジスタが入っている。組み合わせ回路は入力変数に対しブール代数を実現できる。レジスタには組み合わせ回路から、または CLB 入力から直接データがロードされる。レジスタ出力は、CLB 内部のフィードバックパスを通して組み合わせの入力とすることができる。

LCA の周辺部にはユーザ・プログラマブルな IOB (Input/Output Block) が配置されている。各ブロックは独立に入力、またはスリーステート制御付き双方向ピンになるようプログラムできる。各 IOB は入力や出力のラッチに使えるフリップ・フロップをもっている。内部配線はスイッチング・マトリクスを通して CLB, IOB に接続される。

4 PE の実現

PE はスケマティック・エディタ (OrCAD/SDT) を用いて回路図入力を行ないタイミング・シミュレーションを行なった。これから得られたネットリストを XACT (Xilinx Automatic CAE Tools) を用いてビットファイルへの変換を行なった。このビットファイルをダウンロードケーブルを通して LCA に転送した。図 3 に LCA 上に実現した PE を示す。

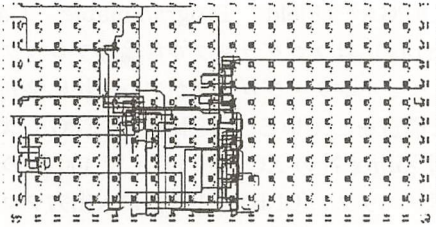


図3 LCA上のPE

〔今後の研究の方向，課題〕

本稿では，FPGAを用いてボルツマンマシン専用プロセッサの基本ユニットであるプロセッシング・エレメントのハードウェア化を行なった。XACTの自動配置配線プログラムを用いると，XC 4010 LCAでは，22個のPEが実装できる。

今後の課題は，PE間の配線遅延等を調べ，自動配置配線プログラムを用いず22個以上

のPEをLCAに実装することである。また，量子化学学習機能付きボルツマンマシン専用プロセッサのハードウェア化を行なっていく予定である。今回は，ファジィ・インターフェース部分はまだ，実現できなかったのが今後この点も開発して行く予定である。

〔成果の発表，論文等〕

- 1) Sasaki, M., Kaneda, S., Ueno, F., Inoue, T. and Kitamura, Y.: "Boltzmann Machine Processor Using Single-bit Operation", IEICE TRANS. Vol. E 76-A, No. 6 June 1993.
- 2) Zhu H. B., Sasaki M., Ueno F. and Inoue T.: "Implementaion of A Parallel Algorithm in Boltzmann Machine", Proc. of IEEE World congress on Computational Intelligence, June 1994.
- 3) Sasaki M. and Ueno F.: "A Novel Implementation of Fuzzy Logic Controller Using New Meet Operation", Proc. of IEEE World congress on Computational Intelligence, June 1994.

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

Mathematical Study on Symbiotic Evolution of Memory System for the Human Brain and Computer Network

931006

研究代表者 神奈川大学工学部物理学教室 助 手 宇佐見 義 之

共同研究者 神奈川大学工学部電気工学科 学部2年 加 納 義 樹

[研究の目的]

本研究では人間の脳と計算機の情報処理の両方の研究を融合させてこれら共存系はどのような発展をすることができるか、ということに関する一つのビジョンを描くことを目的として、以下の題材について研究を行った。

1. 大脳の記憶システムに関してシナプスレベル、解剖レベル、数理研究の知見を総合、整理し、脳の中での記憶固定のスキームを描く。2. 計算機の記憶、処理系における記憶装置の役割の特徴づけとこれの有効利用。3. 人間と計算機の共存進化という観点での一つのコンセプト提案～マルチメディアサイエンス宣言。

[研究の内容、成果]

1. 脳の記憶固定のメカニズム

本研究では、シナプスレベルでの伝達効率の増大—LTP (Long-Term Potentiation) 現象、記憶定着化に関する海馬の解剖学的知見、現在の数理的ニューラルネットモデルの研究成果を統合して、脳の中での記憶固定化

に関して次のような分析を行いこのメカニズムに関する一つのスキームを描いた。

(a)海馬は記憶そのものの貯蔵場所ではない、しかし記憶を固定化させるのに必要である。このことから長期記憶領域と海馬とのシナプス結合による閉回路の形成により、長期記憶は長期記憶保存領域へ保存され、海馬はそれの連絡路としての役割を担う、という描像が記憶の固定化に関して有力視される。

(b)LTP、シナプスの伝達効率の増大は実験によると数日から数週間続く。記憶の固定化といった場合にこれをそのまま受け入れるか否かという選択が生じる。これを受け入れる場合、記憶の干渉が生じないように、海馬内のLTPシナプスはスパース（過疎的）にしか増強されないというメカニズムがないといけなくなる。そうでない場合は未だ実験では確認されていない速く減衰する弱いLTP現象の存在を仮定しなければならない。

(c)記憶の長期保持の数理モデル。長期記憶を保持しているところは海馬とは別のところにあるとして、上述の(a)、(b)項を勘案すると図1のような海馬を通る閉回路機構が考えられる。ここで筆者はシナプス結合の2重安定

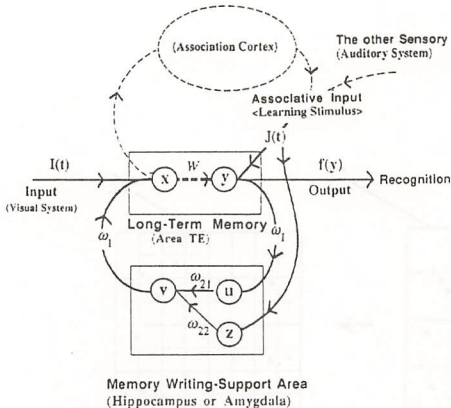


図1 長期記憶領域と海馬を結ぶ閉回路モデル

モデルを提唱し、海馬を通る閉回路を作ることによって、長期記憶領域で記憶が永続的に保持される数理モデルを提案しこれについて考察した。

このモデルの詳しい分析は論文1), 2)に記してある。これらはこれまであまり関連づけられていなかった記憶に関する代表的研究事例を関連づけ、記憶の生理的メカニズムについて一つの筋立ったスキームを描いたものである。このスキームの短所、数理モデルの限界、難点については最後の節にまとめる。

2. 計算機の記憶処理系の特徴づけとこれの有効利用～巡回セールスマン問題の世界最高速近似解法

1. の研究成果を踏まえて、計算機上で、計算機の記憶、処理能力を有効に使うことにより、OR、組み合わせ最適化問題である対称巡回セールスマン問題を最高速に解く近似解法を発見したので、以下にその内容を記す。この方法によると532都市問題の近似解がパソコンで0.4秒で求めることができる。

1. の研究に照らして、計算機の記憶系も

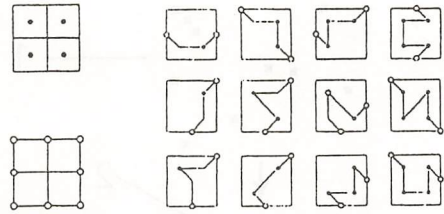


図2 基本離散空間上の最短経路

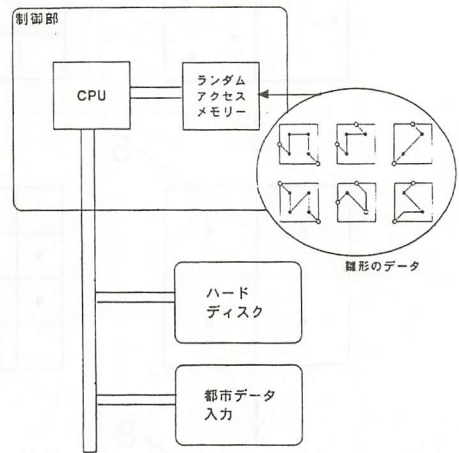


図3 計算機の記憶処理系をうまく利用したTSPの解法、RAM中に基本データをアップロードして、都市データに高速に割り当てる

かなり脳の構造に近いとも言える。この場合長期記憶がハードディスクであり、ランダムアクセスメモリーが作業記憶領域ということになる。ただし、計算機の場合RAMに一時的に作業記憶がロードされるが、脳の場合、このように明確に作業記憶がある部位に割り当てられるのかという疑問が残る。

一方計算機の場合作業記憶が一時的にRAMにロードされることによって、情報の処理能力が高速化する。そこで、一時的に

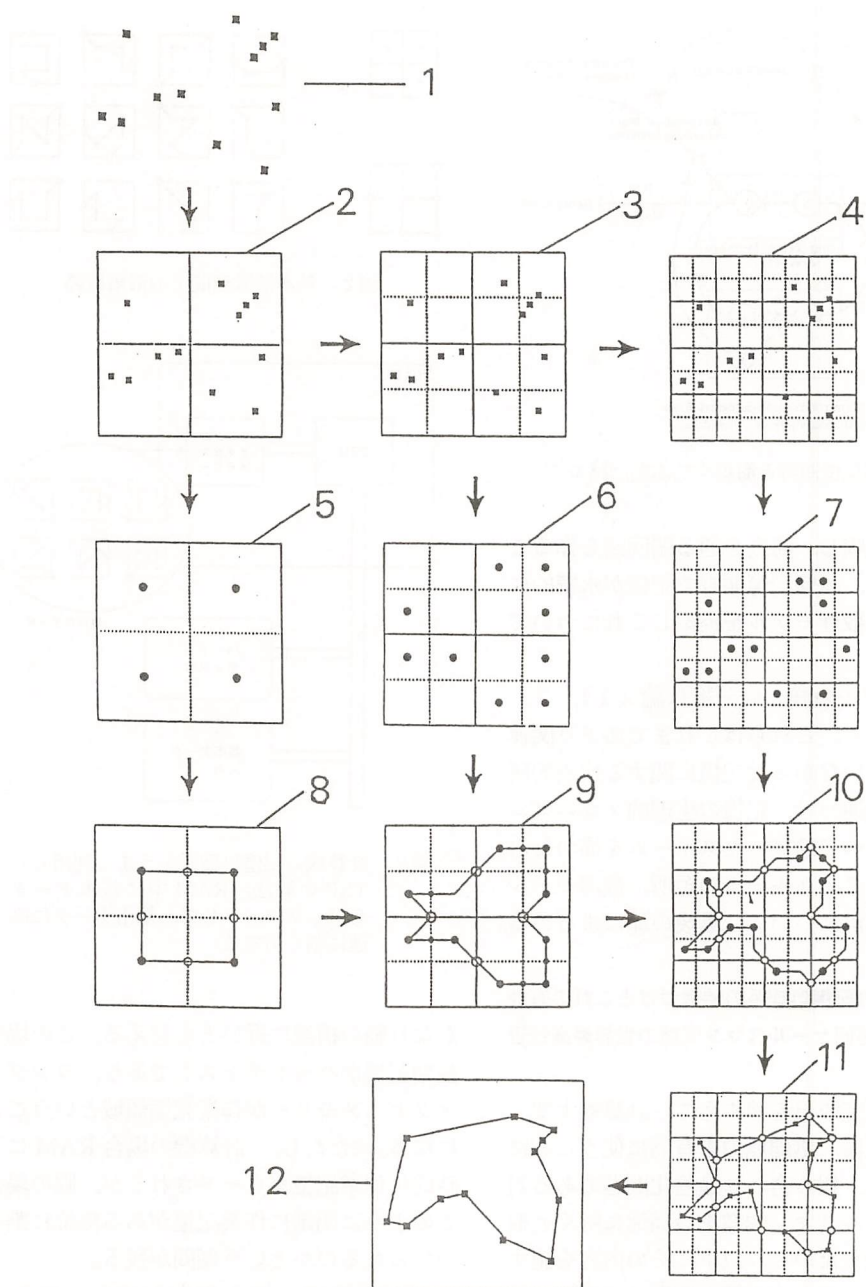


図4 TSP の計算，基本離散空間上の最適パスを実際の都市に当てはめる

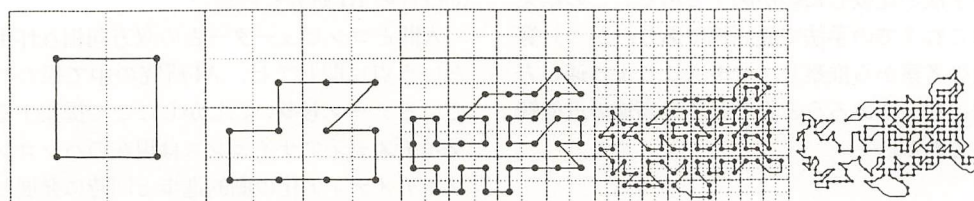


図5 本手法をアメリカ 532 都市問題に適用した場合の計算経過

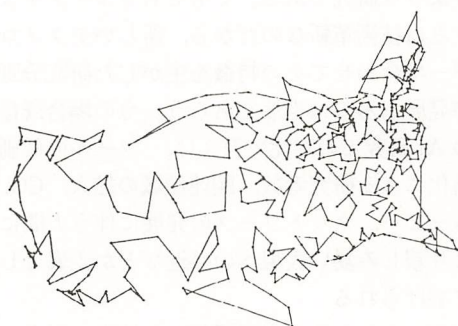


図6 本手法をアメリカ 532 都市問題に適用して得られた結果

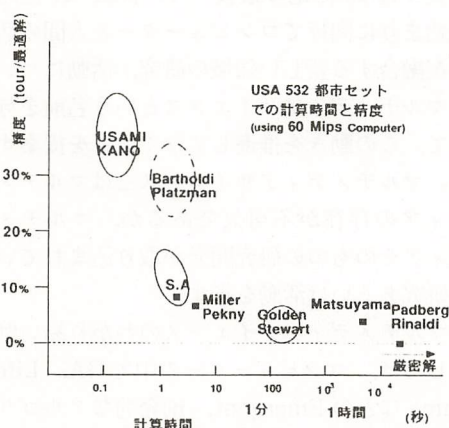


図7 既存の手法との比較, 本手法が一番速い

RAM にアップロードされた記憶を使って, 外部からの情報を高速に処理する問題があるのではないかという考え方ができる。今回の場合はこの考察を OR, 組み合わせ最適化問題である対称巡回セールスマン問題にあてはめて, これを最も速く解く近似解法を見い出した。

まず図2の様に離散化された 2×2 の基本セル上で白丸の端点から出発して黒丸の代表点を通り再び白丸の端点に達する離散化された空間上での最短路を全て求めておいてこれをハードディスク中に保存しておく。実際の TSP の計算においてはこのデータを図3の様に RAM にアップロードして, 次の様な計算を行う。

与えられた都市を, これを覆うような四角

の枠で覆い, これを次々と $1/2 \times 1/2$, $1/4 \times 1/4$, $1/8$, $1/8 \dots$ 等分してゆく (図4 (a), (b))。各セルの中で都市があればセルの中央に代表点を置く (図4 (c), (d))。最後に大きいサイズのセルから, 各セルの端点と代表点の配置に対応する離散パスを RAM 中のデータから割り当ててゆく (図4 (e), (f))。この方法を Padberg, Rinaldi が示したアメリカ 532 都市問題のデータセットに適用した様子を示したのが図5, 6である。この 532 都市問題に対してかかった計算時間は 60 Mips のワークステーション上の Unix コマンドで 0.0 秒, IBM PC 486 DII 66 Mz のパソコン上で 0.4 秒であった。これを既存

の手法と比較したのが図7である。この結果はこれまでの手法で最高速であり、かつ計算量の考察から推察し、今後もこれより速い方法はないであろうと思われる最高速の近似解法である。

3. 人間と計算機の共存～マルチメディアサイエンス宣言

我々は20世紀の最後の10年と、21世紀の始まりに向けてコンピューターと人間の活動が融合する新しい領域の研究、活動についてマルチメディアサイエンスという名前を与えて、この動きを推進してゆくことを提案する。マルチメディアサイエンスとはマルチメディアの存在が不可欠であるか、マルチメディアそのものの研究開発が取り込まれている研究あるいは活動を指す。

マルチメディアサイエンスのわかり易い例としては、コンピューターの中でGA, Life GameなどのEmergent, 創発的なアルゴリズムと、それと同時に人間がinteractiveに相互作用活動するという例が挙げられるだろう。コンピューターの映像を人間が見て反応し、その反応行動をモニターやセンサーを通じてコンピューターがキャッチし、その入力に対して、コンピューター中のアルゴリズムがまた応答するというような。この提案が既存の考え方と異なることを以下4つの項目で示す。

(a)既存の創発的アルゴリズムとの違い

従来GA, Life Game, のようにEmergent, 創発的アルゴリズムや現在の人工生命, A-Life, 的アプローチはほとんどコンピューターの中でアルゴリズムが走り、そのCGを見るというものであり、上に述べたようなマルチメディアサイエンスが持つ、人間との創発性双方向相互作用は無い。

(b)既存のAI研究との違い

人間とコンピューターとの双方向相互作用という点に関しては、AI研究の中で扱われているテーマも多い。しかしここで提案するマルチメディアサイエンスは現在のパソコンマルチメディア化の劇的進歩と同時に発展しながら、映像、音声、ネットワークをフルに活用しつつ、これら自身の開発を行う、というような研究である。そもそもマルチメディアとは技術革新なのだから、新しいテクノロジーに合わせてその特徴を生かした研究分野が発展するのは当然であろう。今の場合既存のAI研究との対比で言えば、ツールの低価格化による研究者数、関連領域の拡大、CG, ムービー、ネットワークの発展に伴う人間により親しみ易い表現への接近などが差異として挙げられる。

(c)アートなど他の表現活動との接点、融合

M. ミンスキーは1993年の人工知能学会の総合講演で、人工知能を研究することは、人間活動全てを研究することを指すと言った。マルチメディアサイエンスは表現自身の価値も積極的に評価する。科学的な研究が分野として成立しているからと言ってそれが、カッコいい、綺麗、心地良い、という情動基準といつも排他的であるべきという制限を自分から作る必要は無いように思われる。例えば脳の研究はこのような情動面を考慮しなければ成り立たないし、先のミンスキーの発言も我々の主張と両立しようとする。マルチメディアサイエンスとはハイテク関連の研究であると同時に音楽、美術、舞踏などの表現活動とも融合する新しい概念、活動である。この意味でサイエンスという言葉は適切ではないかも知れない。しかしこのような活動を通してAI研究も前進すると我々は考える。

(d)研究の拡大、産業の拡大

マルチメディアは巨大な産業市場を持つと思われる。これが正しいとすると、ここで我々が主張するマルチメディアサイエンスも当然その規模が広がり更に産業を発展させることができると考えられる。学生の理工系離れが危惧される中で、マルチメディアサイエンスはアートとの融合というような新しい魅力で若い人材の積極的参加活動が望めるものと思われる。

[今後の研究の方向, 課題]

1. の脳の記憶固定のメカニズムでは、数理モデルの時間軸、記憶の干渉についてのさらなる分析が必要である。ここまでの研究では、記憶がどのように固定化されるかの見通しについて少し前進したが、記憶が定着する過程については言葉のみの考察に止まった。この点に関して数理的考察をもう少し重ねれば、記憶の基本問題についての理解が進むと思われる。2. の計算機の記憶系～TSPの高速近似解法では、速度の面で究極的に高速な解法を発見した。計算量的にこれより速い解法は現れないと思われるので、あとは精度の問題のみが残されることになった。3. の人間と計算機の共存～マルチメディアサイエンス宣言については現在プログラムの作成中である。この点については今後さらに研究を進める予定である。

[成果の発表, 論文等]

- 1) Y. Usami: Recurrent and Competitive Network Model of Short-Term Memory, Roy. Acad. Sci and Lett. (in press) .
- 2) Usami. Y: Neural Network Theory for the Memory System with Hippocampus, 神奈川大学工学研究所所報, 16 (1993) 32-39.
- 3) Usami. Y: Solving Traveling Salesman Problem by Real Space Renormalization Technique, Proceedings of IEEE World Conference on Neural Network Florida 1994. (in press) .
- 4) 宇佐見, 加納: 巡回セールスマン問題の高速近似解法と数百都市問題の実時間処理について, 1994年度人工知能学会全国大会論文集, 印刷中
- 5) 宇佐見: 巡回セールスマン問題の超高速近似解法, 日本物理学会 (1994-3)
- 6) 宇佐見: 実空間繰り込み群的発想による巡回セールスマン問題の高速近似解法, 電子情報通信学会 (1994-3)
- 7) 宇佐見, 加納: 巡回セールスマン問題のリアルタイム解, つくば人工生命祭 (1994-4)
- 8) 朝日新聞 1994年6月6日 夕刊(東京版): 難問「巡回セールスマン問題」, 新手法の近似解法。
- 9) 宇佐見, 加納: ワークステーションによる巡回セールスマン問題の高速近似解法, Computer Today 1994年11月号.; 以下Computer Today 連載予定。
- 10) 宇佐見, 加納: 巡回セールスマン問題の高速近似解法詳報, 日本物理学会 (1994-9)
- 11) 宇佐見, 加納: 巡回セールスマン問題の高速近似解法詳報Ⅱ～マルチメディアサイエンス宣言, 日本物理学会 (1994-9)

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

Fundamental Study on the Synthesis of Intelligent Control Systems by Neural Networks

931007

研究代表者 徳島大学工学部知能情報工学科 教授 大 松 繁

[研究の目的]

本研究の目的は非線形要素や数式的に表現することが困難な不確定要素などを数多く含んでいる実在のシステムを制御するために、ニューラルネットワークを用いたニューロコントローラを導入し、人間に近い制御能力を有するインテリジェント制御系を設計し、オペレータの経験や勘に基づいた従来の手法よりも優れた制御性能を得るシステムを設計することである。

具体的には、ニューラルネットワークの特徴である学習能力を利用し、従来から産業界で数多く用いられているPID制御システムに対して、PID制御ゲインの自動調整方式を提案する。ここで提案する方式は線形系および非線形系に対しても優れた制御方式であることをシミュレーションと実際の実験を通じて定量的に検証する。つぎに、ニューラルネットワークが有している並列・分散能力を利用し、種々の未知環境および異なった設定条件のもとでもニューロコントローラには汎化機能が有ることを検証する。最後に、プロセス制御系の設計に本手法を適用し、実在のプロセス制御系の設計に対して従来の手法よ

りも本手法は優れた制御性能を有していることを実験的に検証する。

[研究の内容、成果]

上記の目的を達成するために、本研究では以下の内容について考察した。

(1) ニューラルネットワークによる適応制御系の構成

制御対象の構造は既知であるが制御対象に含まれるパラメータ値が未知であるシステムを制御する優れた手法として、適応制御が現在注目されている。他方、ニューラルネットワークは事例の学習などを繰り返すことによって未知システムに対して自己組織化能力を有していることが知られており、未知システムのモデル化などに利用可能である。本研究ではニューラルネットワークの有している並列・分散・学習の能力を活用した適応制御系の設計手法について考察し、ニューロコントローラの導入によって、従来の手法では困難であった非線形適応制御系の設計が可能であることを検討した。

この結果、1) 制御対象の逆システムを

ニューラルネットワークで実現する直列タイプのニューラルネットワーク、2) 従来の制御系による制御入力をニューラルネットワークで並列的に補正する並列タイプ、および3) 既存の制御系の制御パラメータをニューラルネットワークでチューニングするセルフチューニングタイプという3種類のニューロコントローラが適応制御系の設計に有用であることを示した¹⁾⁻⁴⁾。

また、非線形システムに対するニューロコントローラの制御能力は大きく、従来の最適制御方式では実現できなかった制御系設計が可能になることが定量的に示された。

(2) ニューラルネットワークによるセルフチューニング PID 制御系の設計

プロセス制御などで、現在最も多く利用されている PID 制御では、PID ゲインがプロセス制御のオペレータによって経験的に変更されている。そこで本研究では、ニューラルネットワークの学習能力に着目し、オペレータのかわりにニューラルネットワークを導入し、現在までのプラント稼動によって得られたプラントの入出力データ系列によってニューラルネットワークを学習し、PID ゲインを自動的に調整するセルフチューニング PID 制御系を設計した⁶⁾⁻⁸⁾。さらに、(1) で考察したニューラルネットワークによる直列タイプおよび並列タイプのニューロコントローラとの構造的な差異について考察し、それらの手法とセルフチューニングタイプニューロコントローラとの差異をシミュレーションによって定量的に考察した⁶⁾⁻⁸⁾。

この結果、セルフチューニングタイプのニューロコントローラは入出力データのみから制御パラメータをオートチューニングすることが可能であり、それによって得られたパ

ラメータはオペレータが従来から用いていたパラメータ値に近く、かつ従来の手法よりも優れた制御性能を与えることが確認された¹⁾⁻⁸⁾。

(3) ニューロコントローラによる制御性能の定量化

ニューラルネットワークは非線形電気回路網として把握することが可能である。したがって、通信理論で用いられてきた通信路容量に対応しているネットワークの容量 (Network Capacity) を導入することができる。とくに、階層型ニューラルネットワークによるニューロコントローラが、制御系の出力と予め設定された目標値との偏差をある与えられた許容誤差 ε (> 0) 以内にするようなニューラルネットワークの中間層の層数および各層内でのニューロン素子の最小数の決定法を、情報理論における ε -エントロピーの考え方に基づいて解析することが可能である。そこで、本研究では処理すべきデータがガウス過程であるときの相互情報量を導出し、ネットワークの有する容量について定量化を行った⁹⁾。

(4) ニューロコントローラのプロセス制御系への応用と制御性能の検討

温度、圧力、濃度の各変量を制御するプロセス制御問題および電気自動車のトルク制御と速度制御問題に対して、(1) と (2) で提案したニューロコントロール方式を適用し、従来の PID 制御方式による制御結果と比較検討し、本手法の優位性を検証した。とくに、温度制御系としては、加熱炉、恒温槽を用い、圧力制御系としては塩素ガス発生装置を用い、濃度制御系としてはエチレン精製プロセスを用い、それらの制御系に対して、本手法と従

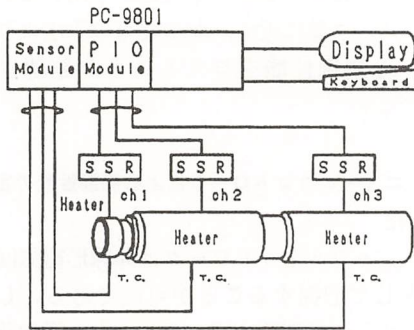


図1 加熱炉の温度制御実験装置

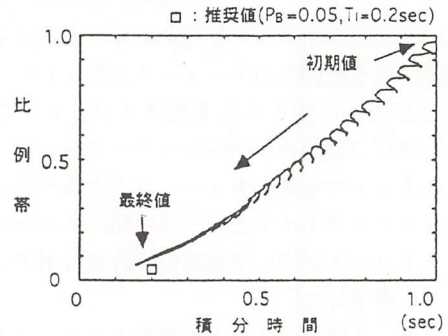


図3 無負荷運転時のPIゲインチューニング

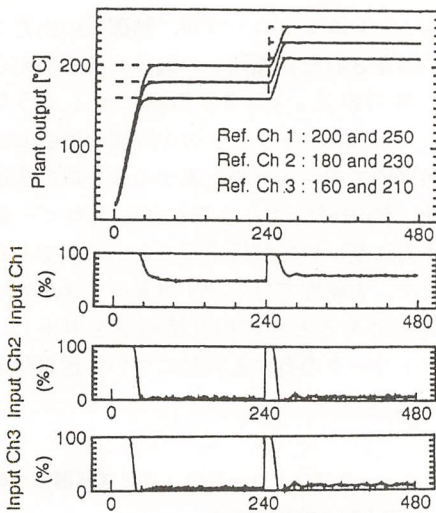


図2 加熱炉の温度制御実験結果

来手法による制御性能の比較実験を行い、従来の制御方式と比べて本手法による方式が有効であることを検証した。

その結果、温度制御実験では従来のPID制御よりも耐ノイズ性および目標値の変化や環境の変化に対して、本手法が優れていることが示された。図1は加熱炉の温度制御実験装置を示している。また、図2は本研究で提

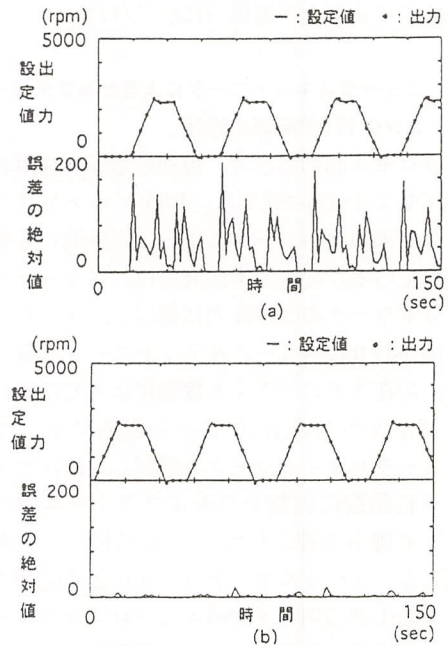


図4 無負荷運転時の速度制御結果

(a) 学習初期の結果

(b) 学習終了時の結果

案したニューロコントロール型セルフチューニングPID制御方式による制御結果を示している。

また、電気自動車のトルク制御問題では、エミュレータとして用いられたニューラルネットワークがシステムを精度良く同定していたが、このエミュレータを制御対象とみなして、チューニングしたPIDパラメータを実際の電気自動車のトルク制御問題へ適用した場合には、目標値との間に僅かな誤差を生じることが確認された。したがって、このような場合にはオンラインチューニングを行うことが必要であり、これによって、上記の誤差も減少出来ることが示された⁶⁾⁻⁸⁾。

また、電気自動車の速度制御に関しても、提案手法はかなり良好な制御性能を示している。これらの関係を示すために、図3にニューラルネットワークによるPIゲインのチューニングの状況を示し、図4にそこでチューニングされたPIゲインがさらにオンライン的にチューニングされ、制御性能が改善されていく状況を示している⁵⁾⁻⁸⁾。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では、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ついて考察し、ニューラルネットワークが有している、学習・並列・分散能力と耐ノイズ性や非線形表現能力を活用したインテリジェント制御系の設計可能性について考察した。さらに、本研究で提案した手法が、実在のプロセス制御およびトラッキング問題で有用であることを実験により定量的に検証した。しかし、本研究で行った内容はあくまで、原理的な考え方であり、応用も特定の限定された制御対象である。したがって、実在の様々な制御対象に対して、本手法を適用するためには、1) ニューラルネットワークの規模と学習能力の定量化、2) ニューラルネットワークの解の

安定性、3) 大規模な制御対象に対するニューロコントローラの設計などの課題について考察することが必要である。これらの課題は難解であり、一朝一夕に解決することはかなり困難であるが、地道な研究によって、少しずつ解決されるものと思われる。

[成果の発表、論文等]

- 1) J. Tanomaru and S. Omatu, Process Control by On-line Neural Controller, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 39, No. 6, pp. 511 - 521, 1992.
- 2) 金城, 大松, 山本, 混合型ニューラルネットワークを用いた非線形システムの適応制御, 電気学会論文誌C分冊, 113巻3号, pp. 186 - 196, 1993.
- 3) 金城, 大松, 山本, ニューラルネットワークを用いた非線形システムの近似最適制御, 電気学会論文誌C分冊, 113巻6号, pp. 394 - 401, 1993.
- 4) 松村, 大松, 樋笠, ニューラルネットワークによる電気自動車実験装置の走行負荷トルク制御, 電気学会論文誌C分冊, 113巻6号, pp. 430 - 439, 1993.
- 5) 松村, 大松, 樋笠, PID ニューロコントローラによる電気自動車のトルク制御, 電気学会論文誌C分冊, 113巻10号, pp. 841 - 848, 1993.
- 6) M. Khalid, S. Omatu, and R. Yusof, MIMO Furnace Control with Neural Networks, IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 1, No. 4, pp. 238 - 245, 1993.
- 7) M. Khalid, S. Omatu, and R. Yusof, Adaptive Fuzzy Control of a Water Bath Process with Neural Networks, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 7, No. 1, pp. 39 - 52, 1994.
- 8) M. Khalis, R. Yusof, and S. Omatu, Neural Networks for Self-Tuning Process Control Systems, Journal of Artificial Neural Networks, Vol. 1, No. 1, pp. 23 - 49, 1994.
- 9) 大松, 推定問題に対する相互情報量, 電子情報通信学会論文誌A分冊, Vol. J76-A, No. 8, pp. 1112 - 1117, 1993.

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

Development of taste/smell-recognition system
using multichannel lipid membranes

931011

研究代表者

九州大学工学部電子工学科 助教授

都 甲

潔

[研究の目的]

高等動物における化学感覚の際立った特徴は、数十万種類とも言われる化学物質を受容して、酸味や苦味、甘味等の、縮約化された感覚を構成する能力である。さらに我々は、その構成された感覚の組み合わせによって複雑な化学組成を有する食品などの風味を表現・再構成する。これはインテリジェントな分子認識ともいえるが、その機構はいまだに解明されていない。これは、その受容レベルにおいての研究が遅れていたことに加えて、味覚・嗅覚を生じさせる事象は少数の単純な物理量の組で記述することができないからである。本研究は、化学物質を受容する素子として、申請者によって初めて提案されたマルチチャネル人工脂質膜トランスデューサを用い、さらに情報処理システムとして適当な神経回路網モデルを用いて、味覚や嗅覚の汎受容能、高識別能、高感度を実現することを目的とする。また化学感覚における情報処理メカニズムの解明と人工の味覚・嗅覚システムを構築することも目的とした。

[研究の内容、成果]

現在、視覚や聴覚の受容レベルを代行する物理量センサが比較的容易に実現されているのに比べると、味覚あるいは嗅覚センサは実現が困難で、未発達の段階にある。味覚、嗅覚感覚器は非常に多数の種類の化学物質を複合的に受容している。味覚・嗅覚センサは化学センサであるといえるが、通常の化学センサは物理量センサ同様に物質選択性が重要視され、開発が進められている。しかし、選択性の高いセンサ（例えば酵素センサ）で味覚をセンシング、表現するには、様々な味物質に対応したトランスデューサを多数用意する必要がある、現実的ではない。さらに、生物の味受容機構とは異なる機構で味物質を検出する方法では、広く知られている味物質間の相互作用（例えば苦味と甘味が混ざると、互いに抑制し合う）といった非線形的味覚現象を再現することはできない。

ここでは、受容レベルにおける非線形特性や神経系あるいは受容レベルにおける味覚・嗅覚に関する情報縮約・再構成機構を解明するべく研究を行った。

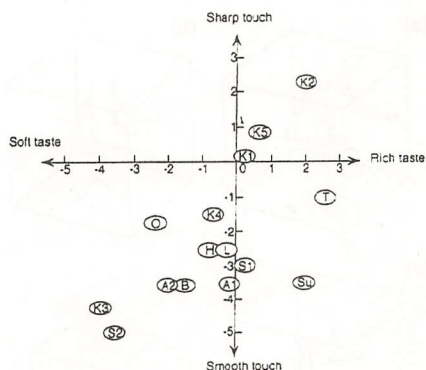


Fig. 1 Taste map obtained from the output electric-potential patterns. Symbols imply different brands of beer.

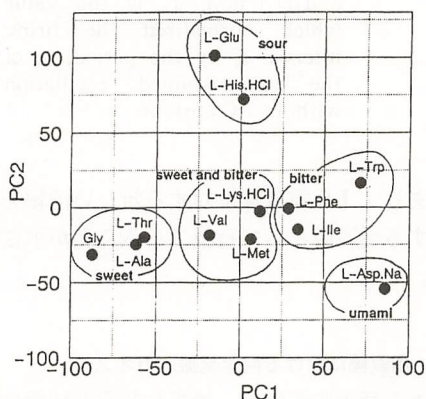


Fig. 2 Scatter diagram of principal component analysis of electric outputs from eight channels.

1 マルチチャネル脂質膜トランスデューサを用いた味覚センサ

ここでの目的は様々な多くの種類の化学物質から構成される物質の味を測定することである。つまり、ある特定の化学物質を特定することではない。従って、ある程度広い範囲

の種類の化学物質に応答する性質を有する脂質混入膜が味覚センシングシステムのトランスデューサとして用いられた。異なった荷電を持つ数種類の脂質およびそれらの混合物を成膜化し複数の種類の膜を同時に食品に適用することによって対象物の味を評価した^{1, 2, 3, 4, 5)}。結果として、様々な食品の味を膜電位パターンとして表現することに成功した。マルチチャネルトランスデューサからの電位パターンは、多変量解析によって低い次元の空間（主成分空間）に写影された。この主成分空間に写像された味覚パターンは人間（動物）の縮約化された味覚と対応づけられるべきものである。実際、官能検査によって明らかにされた人間の味覚カテゴリーは味覚センサによって構成された主成分空間においても同様のカテゴリーをなすことが判明した（Fig. 1）。アミノ酸に関しては重回帰分析も行われ人間に対する官能検査結果を再構成することが試みられた。その結果、Fig. 2に示すように多次元膜電位味覚パターンから人間と同様な5基本味への分解（表現）に成功した⁵⁾。これらの成果は、マルチチャネル型の味覚センサが人の味覚を再現し、その定量化を可能ならしめることを示唆する。

2 LB膜を用いた味覚センシング

脂質混入膜は生体膜の脂質二分子膜の持つ高い配向性や緻密な凝集状態を実現できておらず、生体膜のモデルとしては不満の残るものであった。また各種呈味物質に対する選択性も低く、酸味にも応答すると同時に塩味にも応答するといった類のものであった。もちろんこのような特性が膜ごとに異なっているため、5基本味の識別¹⁾や食品の味の比較なども可能であるが、より容易に高識別能を実現するためには比較的高い選択性を有する膜

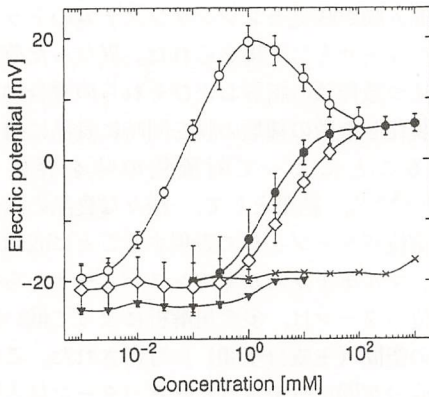


Fig. 3 Responses of the LB film to five basic taste substances.
● : NaCl; ○ : HCl; ▼ : quinine-HCl; × : sucrose; ◇ : MSG.

も必要であろう。そこで本研究では、LB法 (Langmuir-Blodgett Method) を用いて上記の条件を満たす高品質な脂質膜を作成し、より生体に近い味覚センサ系を実現することを目的とした⁶⁾。

結果として、まず、塩酸キニーネに対してはほとんど応答しなかった (Fig. 3)。これまでの脂質混入高分子膜を用いた実験からキニーネイオンが強い疎水性を持つため膜内部の疎水層に侵入・吸着することが示唆されているが、今回使用したLB膜では親水基が密に充填されているため膜表面を通過して疎水層に吸着することが困難となっているものと推測された。

今回使用したLB膜は、キニーネイオンのような両親媒性の物質に対する応答が見られないという極めて特殊な性質を持っていた。またその応答の閾値は生体における味刺激に対する受容器電位の応答の閾値、そして従来の味覚センサの応答閾値より低い値であった。

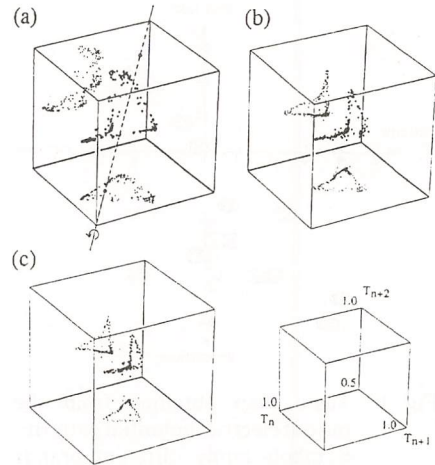


Fig. 4 Effect of quinine on the chaotic state : (a) no quinine, (b) 0.1 mM and (c) 1 mM. T_n is the value which normalized the firing interval t_n by the period, t_0 , of the self-sustained oscillation without AC current.

つまり、LB膜は味に対する新しい情報を付加する受容膜として有望であることが示された。

3 脂質膜における自励発振、カオス

ある種の脂質膜は、適当な非平衡状態におかれると膜電位の自励発振を示す^{7,8)}。この自励発振は、イオンの流れと結合した非線形現象であり生体系の神経軸索においてみられる現象と類似している。今回用いた脂質膜においては、適当な振幅、周波数の交流電流を印加すると様々なタイプの非線形現象 (同期振動、準周期振動、カオス) が観測された⁷⁾。また、適当に単純化された膜系のモデルを用いた計算機シミュレーションにおいて、これらの非線形現象が再現された⁸⁾。カオスの振

動現象は物理的に興味深いものであるが、工学的にも注目されるべき現象である。ここでは、カオス状態にある系のパラメータ敏感性を積極的に用いた高感度味覚センシングシステムの構築を試みた。その結果、Fig. 4に示すように、適当な手法で再構成されたアトラクターは、系に添加する味物質の種類に応じて様々な形を変えることが見いだされた。

[今後の研究の方向、課題]

脂質混入膜やLB膜において、様々な味物質応答が得られた。特に脂質混入膜を用いたマルチチャネル型センサは人の官能をよく表現することができた。得られた応答特性は、ある程度は簡単な電気化学的考察で説明がつくものの不明な点も多い。今後はこれら膜系に対する理論的考察をさらに進めるべきであろう。

当初の研究計画の一つであった受容膜部の小型・集積化については今回行わなかったが、今後半導体技術も併用してさらなる開発を試みる予定である。

非線形振動現象の味覚センシングシステムとしての応用に関しては改善すべき点がある。それはカオス状態を安定に保つことである。それには適当なフィードバックシステムを導入することが考えられるが、詳細な検討は今後の課題である。

非線形振動をする素子を多数結合させたシステムを情報処理系として用いることも検討中である⁹⁾。

[成果の発表、論文等]

- 1) 都甲 潔編著, 「味覚センサ」, 朝倉書店, 1993.
- 2) 都甲 潔, “味覚の工学的表現,” 電子情報通信学会誌, Vol. 76, pp. 1203 - 1208, 1993.
- 3) K. Toko, T. Matsuno, K. Yamafuji, K. Hayashi, H. Ikezaki, K. Sato, R. Toukubo and S. Kawarai, “Multichannel Taste Sensor Using Electric Potential Changes in Lipid Membranes,” Biosensors & Bioelectronics, Vol. 9, pp. 359 - 364, 1994.
- 4) Y. Kikkawa, K. Toko and K. Yamafuji, “Taste Sensing of Tomatoes with a Multichannel Taste Sensor,” Sensors and Materials, Vol. 5, pp. 83 - 90, 1993.
- 5) Y. Kikkawa, K. Toko, T. Matsuno and K. Yamafuji, “Discrimination of Taste of Amino Acids with a Multichannel Taste Sensor,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 32, pp. 5731 - 5736, 1993.
- 6) 秋山秀之, 都甲 潔, 山藤 馨, 林 健司, “LB法による味覚センサ用膜材料の開発,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 29, pp. 1012 - 1014, 1993.
- 7) Y. Saida, T. Matsuno, K. Toko and K. Yamafuji, “Chaos in Excitable Lipid Membranes,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 32, pp. 1859 - 1866, 1993.
- 8) Y. Saida, T. Matsuno, K. Toko and K. Yamafuji, “Nonlinear Dynamics in a Theoretical Model of Excitable Lipid Membrane,” J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 62, pp. 2934 - 2941, 1993.
- 9) T. Matsuno, Y. Kikkawa, M. Iguchi, K. Toko and K. Yamafuji, “Periodic Signal Learning and Recognition in Coupled Oscillators,” J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 63, pp. 1194 - 1204, 1994.

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

A Study on Automatic Assembly with Multiple Manipulators

931013

研究代表者	九州大学工学部情報工学科 教授	長 田 正
共同研究者	九州大学工学部情報工学科 助教授	查 紅 彬
	九州大学工学部情報工学科 助手	木 室 義 彦

〔研究の目的〕

複数台のマニピュレータによる組立作業の自動化は、作業効率及び作業の信頼性を高めるために重要である。しかし、一般に個々のマニピュレータに対する作業の割り当てが難しく、アルゴリズムが複雑になるため実用化が困難である。

本研究は、部品に主体性を持たせることによりマニピュレータの台数に無関係で、且つ柔軟性に富む自律分散型の自動組立システムの構成法を明らかにすることを目的としている。

〔研究の内容、成果〕

1. 分散プランニング

複数台のマニピュレータを使用した機械の組立作業を対象として、これに対する作業プランの自動生成について考察する。

通常、組立作業に対する計画を生成する場合には、全体の目標をそれぞれの部品に関する局所的な副目標に分割し、それらの副目標を達成するための計画を組み合わせることによって、全体の目標に対する計画を生成する、という方法がとられる。

しかしながら、これを実行するアルゴリズム

ムというのは、一般的に複雑なものとなる傾向がある。また、複数台のマニピュレータを使って作業を行なわせる場合、全体の作業を部分作業に分割し、これらをそれぞれのマニピュレータに割り当てる必要があるため、マニピュレータの台数やそれぞれのマニピュレータの能力に応じた作業の割り当てという複雑な問題を考慮しなければならない。

そこで、それぞれの部品をエージェントとして扱い、これらのエージェントが自分に関する副目標を達成しようとした結果として、自動的に作業計画が生成されるという方法について考えてみる。このような方法によれば、それぞれのエージェントの振舞いを自然に表現することができ、さらに複数台のエージェントが存在するため、非線形計画を容易に生成できるという利点がある。また、それぞれのマニピュレータもエージェントと考えることによって、マニピュレータに対する作業の割り当ても、エージェント間の交渉として自然に表現されることになる。

2. プランニングの概要

このプランニングシステムにおいては、機械の部品や作業台やマニピュレータはすべて、自律的な振舞いが可能なエージェントであり、また自分に関する局所的な情報のみを管理し

ている。そして、システムに与えられる最終的な目標は、それぞれの部品が達成すべき局所的な副目標の形で対応する部品に個別に与えられる。つまり、それぞれの部品は、現在自分と結合している部品や、最終的に結合すべき部品を知っており、これらと交渉することによって自分の目標を達成しようとする。

ただし、部品が自分の目標を達成するためには、部品自身の移動が必要になるのだが、これはマニピュレータに運んでもらうことにより実現する。つまり、部品は移動したい時にマニピュレータ群に対して依頼をして、返答してきたマニピュレータの中で最適なものと契約を結ぶようにする。このようにして、部品と契約を結んだマニピュレータのみが、その依頼に従って行動することができる。この場合、部品の依頼やマニピュレータの返答に、それぞれ部品自身またはマニピュレータ自身の情報を付加し、これらを部品またはマニピュレータが最適な相手を選択するための判断基準に利用することができる。

このように、プランニングシステムの主導権は部品に与えられており、マニピュレータや作業台は部品に従属するエージェントであるといえる。

ところで、部品は自分の目標を達成するために、他の部品に対して一時的な立ち退きなどの行動を依頼することが起こりうる。このため、部品間の依頼の優先順位を適切に決定しないと、部品が不必要に結合したり、デッドロックに陥る危険性がある。

以後、機械の組立を単純化した積木の積み直し、及び簡単な構造のモーターの組立/解体を例に上げ、具体的な方法を説明する。

3. 積木の積み直し問題

ここで取り扱う問題とは、いくつかのテ-

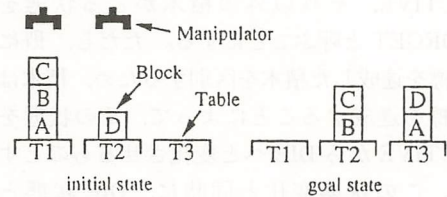


図1 積木の積み直し問題

ブルの上に積まれている積木を、複数のマニピュレータを使ってある目標の状態に積み直すというものである。(図1) この問題を解く上で次の三つのことを仮定している。

- 積木またはテーブルのすぐ上には一つの積木しか置けない
- マニピュレータは一度に一つの積木しか移動できない
- マニピュレータ同士の衝突は何らかの方法で回避される

ここで、積木やテーブルやマニピュレータはすべてエージェントとし、積木にプランニングの主導権を与えている。

それぞれの積木は、現在自分の上や下にある積木(テーブル)及び最終的に自分の上や下にあるべき積木(テーブル)を知っており、これらと交渉することによって、自分の目標を達成しようとする。ところが、すべての積木が同時に目標を達成しようと振舞えば、積木間の優先順位の決定は、非常に困難なものとなる。そこで、これを解決するために、すべての積木は何らかの状態をとり、この状態に応じてそれぞれの振舞いを変化させると考える。

ここで、マニピュレータは一度に一つの積木しか動かせないという仮定から、それぞれのテーブルについて最初に目標を達成すべき積木はせいぜい一つだけである。そこで、この優先されるべき積木がとる状態を

ACTIVE, それ以外の積木がとる状態を FORGET と呼ぶことにする。ただし, 既に目標を達成した積木を区別するため, 積木は目標を達成することによって, その状態を ACTIVE から DIE へと変化させるものとする。この状態変化と同時に, DIE 状態となった積木が自分の上に移動すべき積木に対して, 状態を変化させるように指示することによって, その指示を受けた積木は状態を FORGET から ACTIVE へと変化させることができるようにする。

ACTIVE の積木は自分のグループの振舞いを決定しなければならないが, それぞれのグループが勝手な振舞いをしてしまうと, 非効率的な積木の移動やデッドロックの原因になってしまう。このため, それぞれの ACTIVE の積木による周囲の状況判断が不可欠となる。すなわち, ACTIVE の積木は, 自分自身の上の方の状況及び, 目的地の上の方の状況をそれぞれ調べて, その組合せにより, 自分のグループの振舞いを決定するものとする。

4. 簡単な構造のモーターの組立/解体作業への応用

次に, 図2のような簡単な構造のモーターの組立/解体に対するプランニングについて述べる。ただし, 次のような条件のもとで組立/解体を行なうものとする。

- Cover を Housing に結合させていなければ, Bolt を Cover に結合させることができない
- Cover を Housing に結合させていると, Shaft を Housing に結合させることができない
- Shaft を Housing に結合させていると, Armature を Shaft に結合させることが

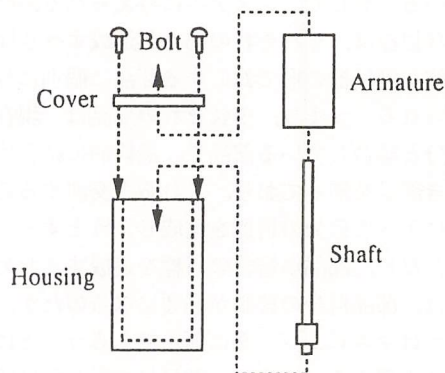


図2 簡単な構造のモーター

できない

ここでは, モーターの部品及びマニピュレータをエージェントとして扱う。

実際の機械の部品を考慮すると, 部品同士の結合関係が複雑なため, エージェントである部品の振舞いを表現するのは困難になる。そこで, それぞれの部品に他の部品と結合するために必要となる情報を知識として与えておくことを考える。すると, 部品はこの知識に基づいて振舞いを決定すればよいことになる。

ここで, 部品に与える知識というのは, その部品が結合可能な相手の部品の種類及びその部品と結合するための条件, さらにマニピュレータへの依頼の真偽である。結合するための条件というのは, 相手の部品と結合もしくは分離する時に結合してはならない部品の種類を表している。またマニピュレータへの依頼の真偽というのは, その部品が相手の部品と結合する際に, その部品自身がマニピュレータに操作を依頼するかどうかの判断を表している。

5. シミュレーション及び考察

ここでは、図3のような問題についてシミュレーションを行なった結果を示す。ただし、マニピュレータの台数は二台とし、その能力は等しいものとした。シミュレーションの結果、図4のように正しい計画が生成されたことが確認できる。

ここで提案した分散プランニングは、システムを構成する部品をエージェントとすることで、その振舞いを自然に表現することを可能にし、さらにプランニングシステム全体の柔軟性や信頼性を向上させるものである。すなわち、部品数の変化やマニピュレータの台数の増減に対しても、システムの枠組を変更することなく、そのまま自然な形で対応できる。さらに、センシング機能を付与すれば、

reactive planning も比較的容易に実現できるという特徴を有している。

しかし、システム全体を見渡すようなスーパーバイザーが存在しないため、非効率的な動作やデッドロックを生じる可能性がある。そこで、プランニングシステムにおけるエージェントの振舞いを工夫することによって、これが改善できることを示した。

そして、この分散プランニングが簡単な機械の組立/解体に対して、有効に働くことがシミュレーションによって確認できた。

[今後の研究の方向、課題]

今回使用した方法では、対象の機械がもっと複雑になった場合、対応できなくなる可能性があり、これに対処するためには部品の持つ知識を拡張する必要があると考えられる。また、実際の組立作業はさまざまな sub-assembly の組合せによって実施されるので、これらの事態にも十分対応できるようにシステムを拡張する必要がある。

[成果の発表、論文等]

- 1) T. Nagata and J. Hirai, "Parts-Oriented and Distributed Task Planning for Multiple Robots", *Proc. of 2nd IEEE Int. Workshop on Emerging Technologies and Factory Automation*, 218-222, 1993.
- 2) T. Nagata and J. Hirai, "Distributed Planning for Assembly Tasks by Multiple Manipulators", *Proc. of 1994 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 3522-3529, 1994.
- 3) J. Hirai and T. Nagata, "Agent-Oriented and Distributed Assembly Task Planning for Multiple Manipulators", *IROS'94*, 発表予定.

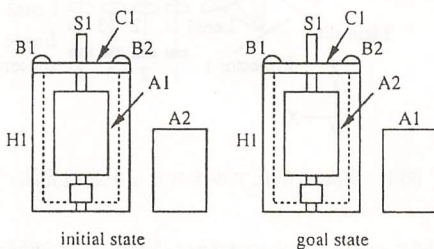


図3 部品の取り替え問題

Manipulator1 separates B1 from C1.
 Manipulator2 separates B2 from C1.
 Manipulator1 separates C1 from H1.
 Manipulator2 separates S1 from H1.
 Manipulator1 separates A1 from S1.
 Manipulator2 connects A2 with S1.
 Manipulator1 connects S1 with H1.
 Manipulator2 connects C1 with H1.
 Manipulator1 connects B1 with C1.
 Manipulator2 connects B2 with C1.

図4 シミュレーション結果

3次元形状計測用高速高機能複合画像センサの研究

High-Speed Image Sensor for Three Dimensional Shape Measurement

931014

研究者代表

岡山大学工学部 助教授

馬 場 充

共同研究者

岡山大学工学部 教 授

小 西 忠 孝

[研究の目的]

高速で3次元形状を測定するためには、(1)スリット光の掃引時間と(2)画像センサへの画像入力時間とを短縮する必要がある。

(1)のスリット光掃引時間の短縮に関して、我々は復号処理時間が原理的に0である「領域分割式マルチスリット光投光法」と名づけたマルチスリット光符号化法を考案し、スリット光の掃引を不要にする方法を提案した。

本研究では、(2)の画像データ入力時間を飛躍的に短縮する高速画像センサを提案する。さらに、提案した高速画像センサの実現可能性を検証するために3次元形状計測システムを試作する。そして、試作システムを用いて形状計測実験を行い、提案した原理の有効性を検討する。

[研究の内容、成果]

1. 領域分割式マルチスリット光投光法

図1に「領域分割式マルチスリット光符号化法」の原理を示す。この方法では、まず図の実線で示すように投光器1からレンズ1を介して複数の主スリット光を測定対象に照射する。その際、複数のレンズ2を用いて測定

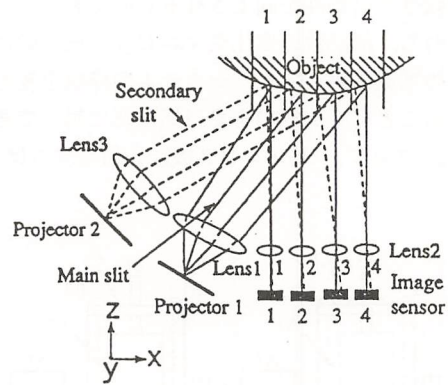


図1 領域分割式マルチスリット光投光法

領域をスリット光の本数に分割し、各領域でスリット光と画像センサを1対1に対応させる。この結果、スリット光に符号化情報を埋め込まずに複数のスリット光を符号化できる。補助スリット光は奥行き方向の可能測定範囲を拡大するためのものである。

2. 高速画像センサ

2.1 受光部の構成

図2に提案する高速画像センサの受光部の概念図を示す。図に示すように、複数の1次元CCDセンサを2次元状に配して、画像セ

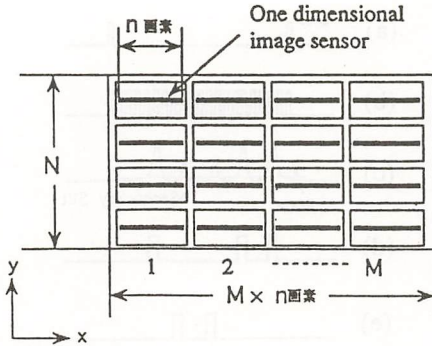


図2 高速画像センサ

ンサを構成する。そして、この画像センサを構成する個々の1次元センサを同時に駆動する。このようにすれば、画素数 n の1次元センサを y 方向に N 個、 x 方向に M 個並べた場合、 $N \times (M \times n)$ の画素の2次元画像データを通常の1次元CCDセンサ n 画素を走査するのと同じ時間で獲得できることになる。その結果、画像センサへのデータ入力時間が大幅に短縮できる。

2.2 信号処理系の構成

図3に信号処理系の構成を示す。信号処理系は受光部、駆動回路、カウンタ回路、増幅回路、2値化回路、エッジ検出回路、ラッチ

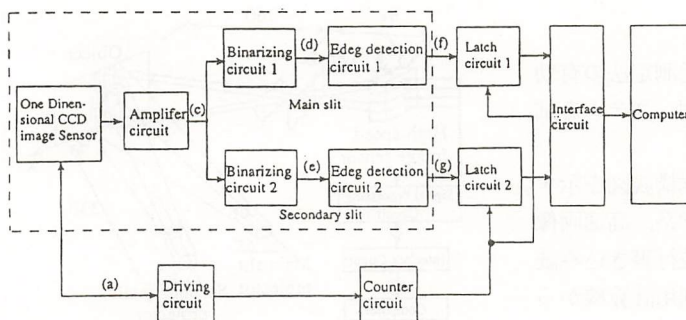


図3 信号処理系の構成

回路、インターフェース回路から成る。1組分だけ示してある図の破線で囲んだ部分は、複数個のセンサを同時駆動するので高速画像センサ受光部を構成する1次元CCDセンサの数に等しい数だけ必要である。

図4にタイムチャートを示す。図4をもとに信号処理系の動作を説明する。1次元CCDセンサは(a)の2つのSHパルスの中で(b)のクロックパルスに対応して信号電圧を出力する。このクロックパルスそれぞれの1次元CCDセンサへ同じタイミングで入力するとともに、これをカウンタ回路に入力し、その数を計数しておく。このカウント値が1次元CCDセンサの画素位置に対応する。増幅回路では1次元CCDセンサが出力した出力信号を、(c)のように増幅整形した後、2値化回路へ入力する。

2値化回路では増幅整形した信号電圧を2値化する。画像センサには主スリット光と補助スリット光の2種類のスリット光が入力するので、これを判別する必要がある。本研究では(c)に示すように両者の光強度を変えることで、その判別を行う。このとき、主スリット光と補助スリット光はそれぞれ(d)、(e)のように分離して2値化される。

エッジ検出回路では、主スリットと補助ス

リットの2値化出力の立ち上がりとしち下がり、それぞれ図4の(f)、(g)のようにエッジ検出パルスが発生させる。そのエッジ検出パルスをもとに、ラッチ回路1、2で2値化出力の立ち上がりとしち下がりのカウント値を保持し、その平均値をスリット光位置とする。

3. 画像入力時間短縮のためのインターフェース回路

本研究では、計算機へのデータ転送時間をできるだけ短縮して、高速に連続測定ができるようにするために、図5のブロック図に示すようなインターフェース回路を考案した。インターフェース回路の全体構成はメモリ制御回路、メモリブロック回路、コンピュータインターフェース回路からなる。考案したインターフェース回路の特徴は、次の2点である。

- (1) 少容量のメモリユニットを多数設ける。1つのメモリユニットにある程度の容量のデータを書き込んだら、書き込みユニットを切り換えて次のメモリユニットにデータを書き込むようにする。一方、計算機は書き込みの終わったメモリユニットから直ちにデータを読み出す。このように、書き込むユニットと読み出すメモリユニットを順次切り換えることにより、センサ出力の待ち時間をなくす。
- (2) メモリへの書き込みの制御にCPUを用いず、全て電子回路によるハードウェアで行う。この制御はメモリ制御回路で行う。

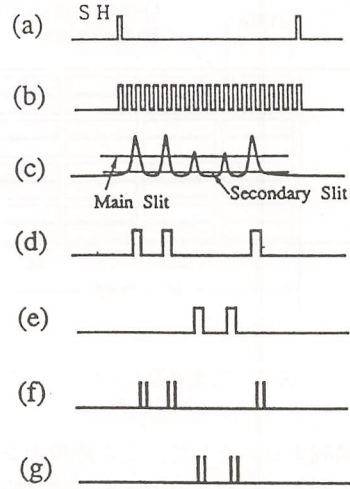


図4 タイムチャート

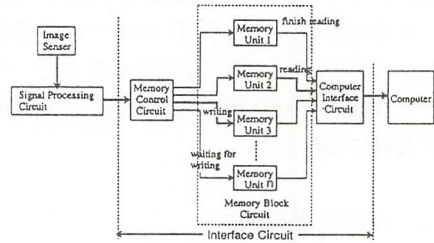


図5 インターフェース回路

4. 試作システムによる形状計測実験

4.1 システム構成

本研究で提案した高速3次元測定法の有効性を検証するため、実際に計測システムを試作して実験を行った。

図6に、試作システムの全体構成図を示す。試作システムは投光装置、光学系、高速画像センサ、信号処理回路、逐次並行書き込み読み出し型インターフェース計測用計算機からなる。

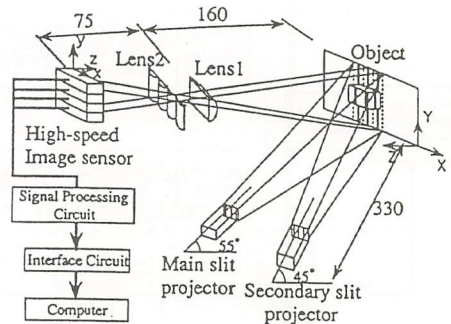


図6 3次元形状計測システム

4.2 測定結果

図7に測定結果の例を示す。測定対象は三角柱を組み合わせた物体である。図(a)が測定対象、(b)は領域分割式マルチスリット光による測定結果を、それぞれ3次元投影図で表したものである。図より対象がほぼ正確に測定できていることがわかる。本実験結果より、提案した原理の実現には大きな問題がないことが明らかとなった。

試作した高速画像センサのサンプリングタイムは3msであるので、 $16 \times 16 = 256$ 個の1次元CCDセンサから成る高速画像センサを製作すれば、256点を3msで測定できることになる。これは一点当たり $12\mu\text{s}$ で検出したことになり、従来の高速計測法の一点あたり数十～数百 μs に比べて現時点では格段に高速な計測法と言える。高速画像センサを構成している1次元CCDセンサを増加させれば、全測定時間は一定でありながら一点当たりの検出時間をさらに短縮することができる。

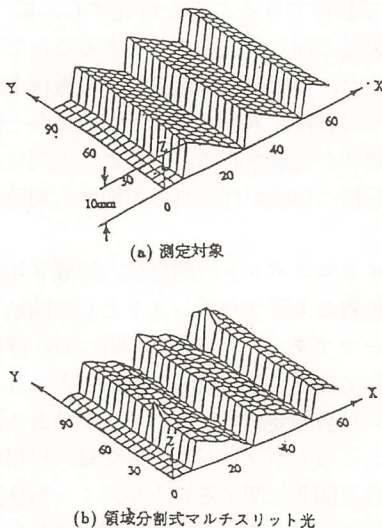


図7 実験結果

[今後の研究の方向, 課題]

実用化に当たって本研究で提案した高速画像センサの検討課題として以下の点が挙げられる。

(1) 測定時間の短縮

本研究では高速画像センサを構成するセンサ素子にCCDを用いたので、CCDの走査時間が測定時間の最も支配的な要因であった。従って、CCDに代わる非走査タイプのセンサ素子を開発すれば、さらに高速な測定が期待できる。

(2) 測定精度の向上

本研究の方法で測定時間を犠牲にすることなく、測定精度を向上させるためには、画素データの高速補間近似アルゴリズムの検討とそのハードウェアによる実現が必要である。

[成果の発表, 論文等]

- 1) 岩井, 馬場, 小西: 高精度3次元形状計測法の提案: 第32回計測自動制御学会学術講演会, 1993
- 2) 小林, 馬場, 小西, 小川: 3次元形状計測用並列駆動型高速画像センサ, 計測自動制御学会中国支部30周年記念学術講演会, 1993
- 3) 高尾, 岩井, 馬場, 小西: 実時間3次元形状計測の高精度化, 計測自動制御学会中国支部30周年記念学術講演会, 1993
- 4) 馬場, 小西, 小川, 岩井: High Speed Three Dimension Shape Measurement by Multi-Slit Ray Projection and High-Speed Image sensor, IMEKOXIII, 1994 (発表予定)
- 5) 馬場, 小西, 岩井, 高尾: 高速高精度3次元形状計測法の提案, 日本機械学会第72期全国大会講演会, 1994 (発表予定)

マイクロアクチュエータ用形状記憶合金薄膜の開発

Development of Shape Memory Alloy Thin Films for Microactuators

931016

研究代表者

筑波大学物質工学系 助教授

宮 崎 修 一

〔研究の目的〕

ICチップ上に組み込める程度の超小型駆動素子を作ることができれば、動作を伴う作業処理機能と情報処理機能を一体化したマイクロマシンが作製できる。

形状記憶合金は、極めて大きな変位と復元力を発生する形状記憶機能を有している。本研究では、Ti-Ni形状記憶合金を、スパッタリング法により薄膜化し、超小型駆動源としてのマイクロアクチュエータ素子を開発することを目的としている。

このようなマイクロアクチュエータ素子をICチップ上に組み込めば、ICは単に電気信号の処理を行う場だけではなく、スイッチ機能やその他の作業を処理できる機能を持つ場になり、人間と機械と情報とが一体化して調和が促進され、極めて大きな可能性を有すると考えられる。

近年、医学、生物学、半導体等の分野あるいは狭所作業や微細作業を行う必要のある工業分野において、細胞、ICチップやその他の微細物のハンドリングを行うマイクロマシン（1mm以下の微小機械）の開発が期待されている。既にマイクロマシンのフレームを作る技術として、シリコンの超微細加工技術などが開発されているが、微小な構造体に仕事をさせるためには更に高性能の超小型駆

動源を開発する必要がある。超小型駆動源としては、いくつかの機構が提案されているが、その中でも形状記憶合金を用いたマイクロアクチュエータは、動作と発生力が極めて大きく、しかも単純な機構であるために、小型化には極めて有利である。マイクロマシンを現実の世界で作動させるためには、このようなマイクロアクチュエータ素子の開発が不可欠である。

このようなマイクロアクチュエータ素子をICチップ上に組み込めば、作業をする機能と情報処理をする機能が微細加工技術で一体化して製作できることを可能にし、ICチップの製造と同じく大量生産できることでもある。また、情報処理機能を有する機械全体が小さくなれば、人間と機械と情報とが一体化して調和が促進される。さらに、人間に近い機能を持つ機械が作られる可能性も期待できる。

マイクロロボットの開発は、平成3年度から通産省の大型プロジェクトとして開始されたテーマであり、今後10年間に250億円が主として民間企業に投入されることになっており、社会的要請の大きいテーマである。しかし、この大型プロジェクトでは、材料の基礎研究と開発に関する視点が弱く、形状記憶合金薄膜の開発を行う研究体制にはない。このため、本申請の研究は極めて重要な鍵とな

と思われる。基礎研究による材料開発が是非とも必要である。

〔研究の内容、成果〕

1. 形状記憶合金薄膜マイクロアクチュエータへの期待と背景

超小型駆動源としては、いくつかの機構が提案されており、表1には、マイクロアクチュエータとして期待されている材料または機構の代表例を比較してある。まず、静電型駆動機構は、シリコンの微細構造物を初めて動かすのに用いられたものであり、毎分数百～数千回転の速さで回すことを可能にした。これによりマイクロマシンが動かせるという事を認知させ、大きなインパクトを与えた。しかし、駆動力は極めて小さく、駆動電圧も高いのが欠点である。次に、圧電材料は、応答性は極めて高いのが特徴である。さらに走査トンネル顕微鏡の測定針の駆動に用いられているように、バルク状態で精密変位を制御することが可能である。しかし、このことは圧電材料をマイクロ化すると、取り出せる変位は極めて小さいということでもあり、アクチュエータを小さくしたい場合には変位量の

制約が生まれる。一方、形状記憶合金を用いたマイクロアクチュエータは、動作と発生力が極めて大きく、しかも単純な機構であるために、小型化には極めて有利である。マイクロマシンを現実の世界で作動させるためには、このようなマイクロアクチュエータの開発が強く望まれる。

形状記憶合金は、結晶学的に可逆的な相変態を利用して、記憶した形に復元する形状記憶機能を有している。その上、元のかたちに戻るときに、極めて大きな復元力と変形量を発生するため、現在、バルク材ではアクチュエータとしても多用されている。しかも、形状記憶合金は、駆動源以外に、それ自身が構造部材や関節部の機能をも併せ持つため、マシンやロボットを簡単な構造にできる。さらに、形状記憶合金の持つ最大の欠点である応答性の悪さは、駆動源が熱であることからくるが、薄膜化することにより冷却速度を高めることができるため、応答性は飛躍的に改善できる。ミクロな世界は、形状記憶合金にとってその機能を極めて有効に発揮できる場所であり、マイクロアクチュエータの最も有力な候補材料と考えられている理由でもある。

以上のような理由で、まずロボット分野のグループが自身で2-3年前からTi-Ni形状記憶合金薄膜をスパッタリング法で作りはじめた。マイクロマシン分野から形状記憶合金薄膜の開発が強く望まれていることを示すものである。しかしながら、完全な形状記憶効果をTi-Ni薄膜で実現することは容易ではない。理由は二つある。一つは、薄膜作製中の問題である。Tiは、高温で極めて活性で、酸素を初めとしてあらゆる元素と結合する性質があり、しかも僅かの他元素の混入が形状記憶特性を損なうからである。二つめの理由

表1 代表的マイクロアクチュエータ候補の特性比較

アクチュエータの種類	変位量 (ひずみ)	応答速度	発生力	駆動電圧
静電駆動	大	中 (3 kHz)	小	60 ~ 400 V
強誘電体	小 (0.1%)	高 (10 kHz)	中 (40 MPa)	数十 V
形状記憶合金	大 (5.0%)	低 (20 Hz)	大 (500 MPa)	数十 V

は、ミクロンサイズの薄膜の形状記憶特性を定量的に評価することが容易ではないことである。特性評価ができなければ、それをフィードバックして薄膜作製プロセスを改善することができないからである。

形状記憶効果を示す合金は、現在までに数十種類も発見されているが、形状回復の安定性、繰り返し機能特性、疲労特性、腐食および生体適合性等の全ての点で最も優れた材料はTi-Ni合金であり、ほとんどの応用にこの合金が用いられている。

2. 形状記憶薄膜の特性評価法

形状記憶特性の評価は、いくつかの方法を併用して行われる。まず、できた薄膜の結晶構造を知ることが必要である。形状記憶効果は、Ti-Ni合金では高温相がB2型構造であり、変態開始温度以下に冷却して現れる構造がマルテンサイト相である。実用的には薄膜が変態するかどうかということと変態温度がまず関心事であるから、この目的には電気抵抗測定と変態熱測定が一般的に用いられる。前者の場合には、薄膜を冷却加熱しながら電気抵抗を温度の関数として求める。後者では、DSC法（示差走査熱量測定法）により、変態と逆変態時の熱の出入りを温度の関数として求める。

形状記憶効果の確認を行うためには、薄膜に外力を加えなければならず、それに耐えるための膜質が必要である。成膜中の不純物の混入やボイドのようなミクロの欠陥を除けなければ、熱的に変態は示すものの、外力を加えると変形は示さず破壊することになる。

3. Ti-Ni形状記憶合金薄膜の開発と特性評価

ミクロンオーダーの厚さの形状記憶合金薄膜を実現するには、従来の合金作製法である

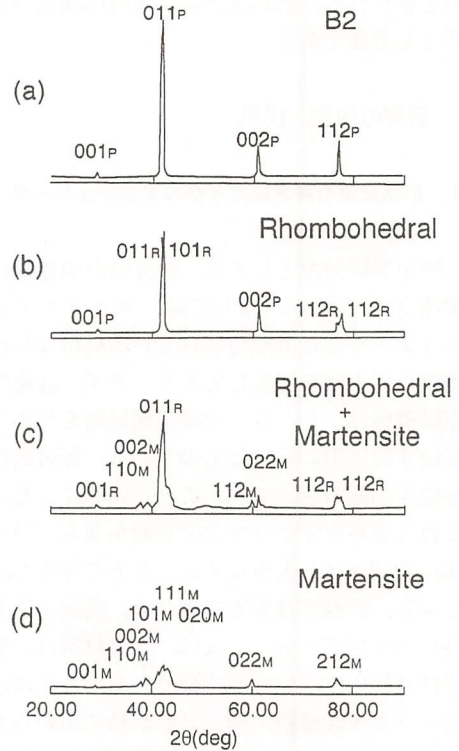


図1 Ti-Ni合金薄膜の(a)母相、(b)R相、(c)R相とマルテンサイト相の共存状態及び(d)マルテンサイト相を示すX線回折ピーク

溶解法は使えない。さらに、シリコン等の基板上に作製して微細加工の工程にのせるためにも、スパッタリング法等の新しい材料作製法で形状記憶合金を作る技術の開発が必要である。この方法は、ターゲット材料の原子を、加速されたイオンで弾き飛ばし、その原子が基板上で再結合して薄膜を作製する技術である。

本研究では、ターゲットにTi-Ni合金を使い、RF（高周波）マグネトロンスパッタリング装置でTi-Ni合金薄膜を作製した。作製した薄膜は基板から剥して特性評価を行

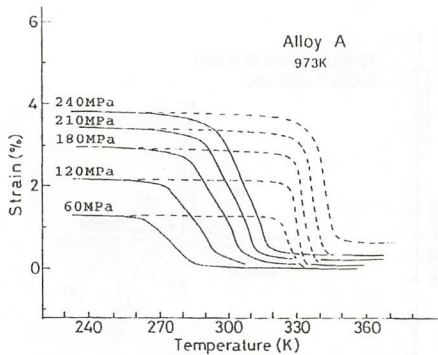


図2 Ti-50.4 at%Ni 合金薄膜の形状記憶特性。各種の一定応力下で冷却、加熱されたときの変形挙動を示す

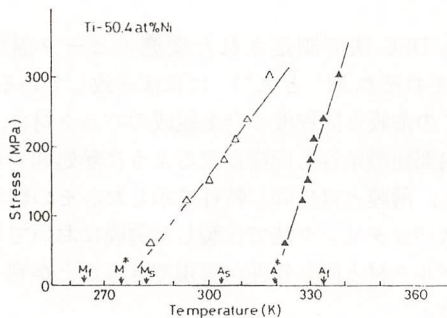


図3 Ti-50.4 at%Ni 合金薄膜の応力と変態開始温度及び逆変態開始温度の関係

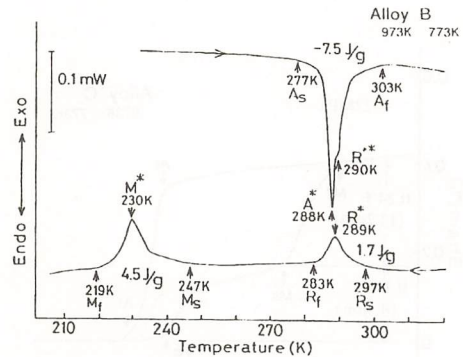


図4 Ti-51.4 at%Ni 合金薄膜のDSC曲線。R相変態とマルテンサイト変態に伴うピークが観察できる

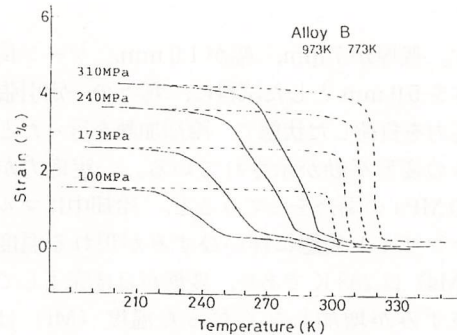


図5 Ti-51.4 at%Ni 合金薄膜の形状記憶特性。冷却中に二段階の形状変化が現れている

った。スパッタされたままの薄膜は、X線回折により非晶質と判断された。透過型電子顕微鏡によってもこのことは確認できている。結晶状態でなければ、変態が生ぜず形状記憶効果も起こらないため、結晶化温度を知ることが重要である。DSC法により求めた結晶化温度は、756 Kであったため、記憶処理はこれ以上の温度で行う必要がある。そのようにして結晶化した薄膜の高温相と低温相の

X線回折結果は、図1(a)と(d)に示すようにそれぞれB2構造と単斜晶(マルテンサイト相)であり、いずれもバルク材と同じ構造であることが確認できた。さらに、図1(b)と(c)に示すように、高温から低温へ温度変化する途中にマルテンサイト変態に先行してR相(菱面体構造)変態をすることも判った。

このようにして記憶処理を行ったTi-50.4 at%Ni合金薄膜の形状記憶特性を図2に示

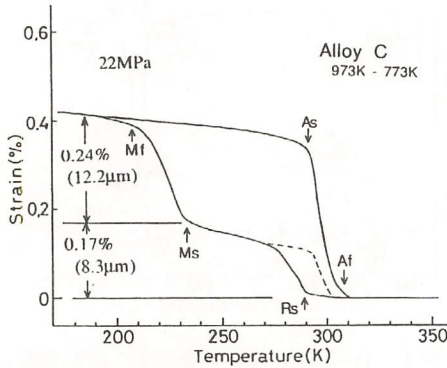


図6 低応力下での二段階形状記憶効果。一段目はR相変態により、二段目はマルテンサイト変態により起こる

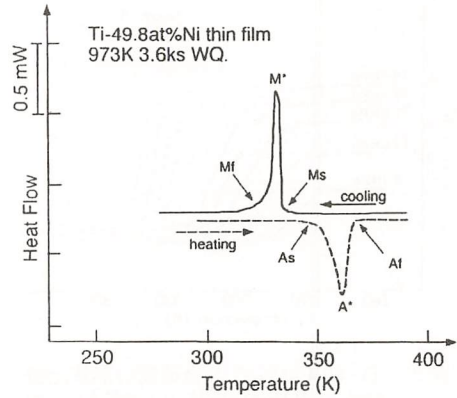


図7 Ti-48.9 at%Ni 合金薄膜のDSC 曲線。マルテンサイト変態及び逆変態に伴うピークが室温よりも高温側にある

す。膜厚が7 mm、幅が1.0 mm、ゲージ長さを5.0 mmとした試料に、種々の一定引張応力を負荷した状態で、冷却加熱を行ったときの変形挙動が示されている。一定応力が60 MPaの場合をみると、冷却中にマルテンサイト変態に伴いひずみが現れる温度(Ms)は283 Kであり、変態がほぼ完了してひずみが増加しなくなった温度(Mf)は262 Kであることが判る。反対に、加熱していくと322 Kで逆変態に伴う形状回復が急に現れる。いずれの応力下でも、冷却中の形状変化より加熱中の形状回復の方が狭い温度範囲で起こるのが特徴である。

一定応力を増加させると、それぞれの変態温度も増加することが判る。各種応力下で冷却と加熱時の形状変化が起こる温度を整理すると、図3のように応力と変態温度は直線関係を示す。これは、熱力学におけるクラウジウス-クラペイロンの関係と呼ばれ、バルク材にも認められるものである。これらの直線を応力がゼロの値へ外挿した温度は、いずれ

もDSC法で測定された変態のピーク温度(それぞれM*とA*)にほぼ一致している。この薄膜と同程度の合金組成のバルク材に、内部組織条件も同様になるように熱処理すると、薄膜とほぼ同じ特性を示した。その結果、スパッタリング法で作製した薄膜においても、バルク材と同じ特性が実現できることが判った。

次に、Ni濃度の高い試料について調べてみると、マルテンサイト変態に先立ち、R相変態が現れることも判った。前述のようにこの相変態も形状記憶効果の原因になるものであり、ひずみは小さいが温度ヒステリシスも小さいため実用的には重要なものである。DSC測定の結果も、図4に示すように冷却中に両変態に伴う二つの変態ピークが観察される。ところが、加熱によっては二つのピークはほぼ重なり、逆変態は一度で終了する。

このような変態挙動を反映して、形状変化も、図5に示すように冷却中は二段階に現れ、加熱時には一度の逆変態で起こる。基本的に

は、一段階目の R 相変態に伴う形状変化は、二段階目のマルテンサイト変態に伴う形状変化よりも小さいが、加える応力を小さくすると、両者の変形量はほぼ同じ程度にすることもできる。例えば、同様の試料に応力を 22 MPa 加えたときの変形挙動が、図 6 に示されているが、一段階目のひずみが 0.17% で二段階目のひずみが 0.24% である。変位量で表すと、それぞれ 8.3 mm と 12.2 mm であり、極めて精密に変位制御できることが判る。

以上のような形状記憶特性を多様な目的で利用するためには、変態温度を広い範囲で調整できることも重要である。現在までに、R 相変態温度は 316 K まで上げることができ、常温で使用すれば特に冷却することなく繰り返し制御できるため、実用的特性が実現されている。マルテンサイト変態温度は、薄膜で既に常温付近まで上げることができている。バルク材では、マルテンサイト変態温度は 333 K 程度のものが利用できるので、熱処理条件を工夫すれば、薄膜でもさらに上昇させることは可能である。しかし、現状でも例えば図 5 に示すように薄膜に 200 MPa 程の応力をバイアス力として加えておけば、マルテンサイト変態温度は 310 K まで上昇させることが可能である。

極最近、変態温度が室温以上の薄膜を作製することに成功した。図 7 は、その薄膜の DSC 測定結果を示している。冷却時のマルテンサイト変態ピーク温度 M^* は 327 K で、加熱時の逆変態ピーク温度 A^* は 381 K である。この薄膜を使用するに際して、冷却装置を必要としないため、バイアス力がなくても利用できるため、実用的に重要な特性である。

[今後の研究方向, 課題]

以上で紹介した形状記憶特性は、バルク材の特性に匹敵するものであり、Ti-Ni 合金薄膜においてこのような特性が開発、評価されたのは世界的に初めてである。今後、変態温度、変形挙動、変態温度ヒステリシス、繰り返し利用に対する耐久性、その他の機能特性の多様性を実現することにより、汎用性のある強力なマイクロアクチュエータ素子を提供できることが可能である。近い将来、形状記憶マイクロアクチュエータにより駆動された、マイクロマシンあるいはマイクロロボットが数多く出現することが期待される。

[成果の発表, 論文等]

- 1) S. Miyazaki and K. Nomura: Development of Perfect Shape Memory Effect in Sputter-Deposited Ti-Ni Thin Films, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS-94), Oiso, Japan (1994) p. 176.
- 2) 宮崎修一, 野村邦明, 石田章, 武井厚: Ti-Ni 形状記憶合金薄膜の変態挙動に及ぼす組成及び熱処理の効果, 日本金属学会春期大会講演概要集, (1994) p. 78.
- 3) 野村邦明, 宮崎修一, 石田章, 武井厚: Ti-Ni 合金薄膜の二方向形状記憶特性に及ぼす予ひずみの効果, 日本金属学会春期大会講演概要集, (1994) p. 81.
- 4) 石田章, 武井厚, 宮崎修一, 野村邦明: Ti-Ni 形状記憶合金薄膜の組成と変態温度に及ぼす熱処理温度の効果, 日本金属学会春期大会講演概要集, (1994) p. 987.
- 5) 野村邦明, 宮崎修一, 石田章, 武井厚: Ti-Ni 合金薄膜の形状記憶特性に及ぼす予ひずみの影響, 日本金属学会秋期大会講演概要集, (1993) p. 526.
- 6) 宮崎修一, 黒岡俊次, 星屋泰二, 石田章, 武井厚: Ti-Ni 形状記憶合金薄膜における R 相変態と変形特性, 日本金属学会秋期大会講演概要集, (1993) p. 527.

自動車内空調装置による生体に及ぼす影響

Thermal effects of automatic air conditioner on human performance in closed space

931017

研究者代表	早稲田大学人間科学部 教授	宮崎 正己
共同研究者	早稲田大学人間科学部 助手	百瀬 桂子

[研究の目的]

自動車室内は、空調装置の普及により閉鎖された熱環境系を構築している。特に夏季の直射日光に暴露された車両は、50度以上の高温に達することが知られている。

これまで熱環境の変化に対する生体の生理現象は様々な分野で研究対象とされてきた。自動車室内のような閉鎖環境の評価は、主として室内温度、湿度などの物理的環境からのアプローチが主流である。しかし環境が生体へ与える影響を考慮することなく快適な室内環境を実現することはできない。

したがって、車内環境の評価を機械（マシン）と生体（マン）から行うことが必要であると思われる。特にわれわれが注目したのは、エアコン作動初期における冷刺激の生体の呼吸・循環機能に与える影響である。直射日光下で室温が上昇した車内と、冷房装置からの冷風によって、身体に与える影響は、心拍変動、血圧、呼吸数などの生理的因子の変化として得られることが推察されている。しかしながら、これらの指標が閉鎖室内の環境評価を行う一つの指標としてどれだけ有効であるかについての研究はほとんどなされていない

のが現状である。

そこで本研究では、自動車における外的ストレスとしての熱環境系が及ぼす生体への影響と定量化することを目的とした。

[研究の内容、成果]

夏季における高温環境下での実験を行うため、直射日光が当たるようにした普通乗用車3台（T社製2000ccおよび1800ccクラス、S社製軽自動車）を用いて生理指標の測定を行った。健康な男子大学生7名（平均年齢21.2歳、SD：0.75）が本研究に参加した。被験者はシャツに下着、ズボンをはき、車内で運転時の姿勢を保持した。それぞれ心電図、血圧（最高・最低）、呼気の酸素濃度、呼吸数、呼気温、車内温度（エアコン送風口中央部、ブレーキペダル位置、運転者前額面、車内中央部）を測定した。心電図は狭い車内で測定するためにテレメーターシステムを用いて、CM3で導出し、DATデータレコーダーに記録した。血圧は自動血圧測定器により、1分間隔毎に測定、記録した。呼気ガス中酸素濃度、呼吸量は、ガスマスクに取り付けられた呼気流量計と酸素センサーにより検

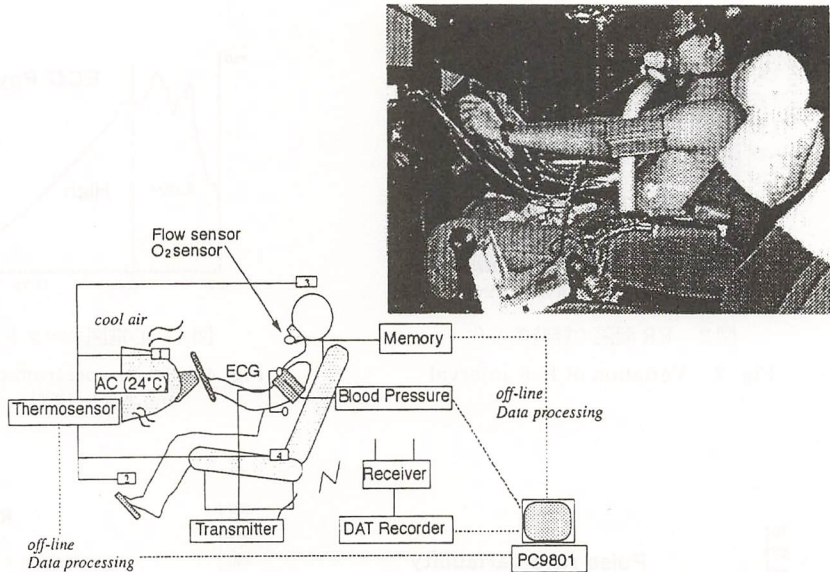


図1 車内実験システム
車内温度（センサ1～4）、呼吸、血圧および心電図はオフラインで処理した
右上は実際の車内の様子（T社製2000ccクラス普通乗用車）

Fig. 1 Experimental system
Thermosensor 1-4, respiration, blood pressure, and ECG was recorded separately.
The data was processed out of this car. (off-line processing)

出し、携帯型メモリーに記録した。車内温度、呼吸数（温度）、酸素濃度、血圧および心電図の解析はコンピュータによりオフラインでおこなった（図1）。

被験者は、車外に設けられた部屋（室温25°C）で安静状態を10分間測定した後、平均車内温約50度上昇した運転席に座った。オートエアコンを24度に設定し、乗車3分経過後に、生体情報の記録を開始した。データレコーダーに記録した心電図は、パーソナルコンピュータでサンプリング周波数100HzでA/D変換した後、時系列に従ってR-R間隔を算出した（図2）。また、一個の心電図波形の周波数解析を行い、その平均周波

数成分の高周波（High）と低周波（Low）成分の変動を求めた。

1. R-R間隔と血圧の変化

実験開始から約3分までの間において、R-R間隔の変動は小さくなり、エアコン作動後およそ7分で安静時のレベルにまで回復した。脈拍数はエアコン作動と同時に減少傾向を示し（図3）、血圧に関しては、個人差による変動が大きく、定量的な傾向はみられなかった。

2. 心電図波形の周波数解析

経時的に処理された一個の心電図波形を

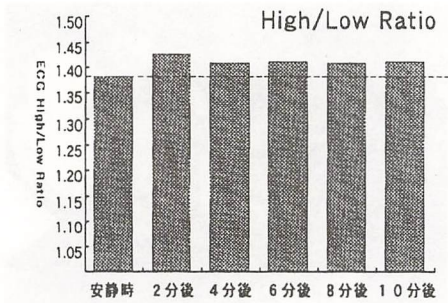


図2 RR 間隔の経時的変化

Fig. 2 Variation of R-R interval

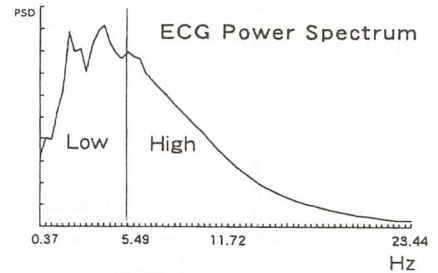


図4 心電図スペクトルの例

Fig. 4 Power spectrum of averaged one-cycle ECG

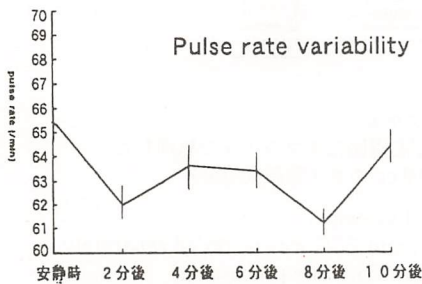


図3 脈拍数の経時的変化

Fig. 3 Variation of pulse rate

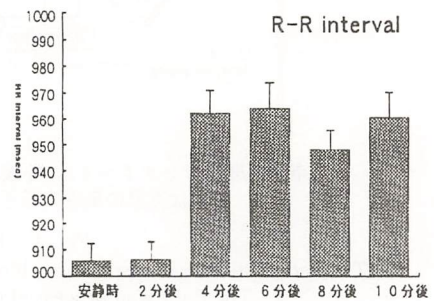


図5 心拍スペクトルの高周波/低周波比

Fig. 5 Variation of High/Low ratio from R-R spectrum

FFT アルゴリズムを用いて周波数分析を行った（図4）後、高周波・低周波成分とに分割し、それぞれのトータルパワーを求めたところ、4名の被験者で出現スペクトル波形の High/Low 比は、有意な結果を示した（図5）。

3. 酸素濃度、呼吸数、呼気温の変化

呼気ガス中の酸素濃度は、エアコンによる冷刺激を加えたことで減少傾向を示し、運転者の酸素消費量が安静時に比べて増加したことを示した。また、呼吸数の増加からも、急

激な温度環境変化に対して生体の適応現象が現われた。呼気温の変化は統計的に有意なものではなかった。

〔今後の研究の方向、課題〕

本実験のデータによると、自動車に代表されるような閉鎖室内環境下における、エアコンによる急激な強制冷却は生体の呼吸・循環機能にネガティブな影響を与え、数分間で安静時のレベルに回復することがわかった。車

内温度がオートエアコンのように自動的に制御されると生体の反応も、室温の変化に追従する形になっている。つまり、快適な室内環境を実現するために、生体に対してストレスとなっている可能性が示唆された。

このことは、外的刺激に対して自律神経系による適応が起こったことが考えられる。したがって、車内環境を改善するには、生体の因子（ヒューマン・ファクター）を考慮すべきであろう。また、車内各部の温度は機械設定した 24 度と合致せず、体感温度は低い傾向を示した。このことは、人間が自動車内の環境を自動制御される以前に至適水準を認識し、積極的に機械操作をすることで、個人の好みに応じた環境制御が行えることも示唆するものとして、注目すべき点である。つまり、自動車エアコンの使用においては、温度環境の変化が生体に及ぼす影響と、それを感じる生体（人間）について十分な配慮が必要であることが示唆された。

本実験で得られたデータは、主に高温下からの温度制御であったが、今後は車内の湿度、

照度、匂い等も含めた総合的な車内環境の研究が待たれるところである。また、時期としては夏季に限定することなく、四季を通じて検討する予定である。自動車メーカーの開発競争も成熟期をむかえ、エアコンについても機能的にはほぼ出揃った感がある。しかし、今回使用した 3 台の乗用車は、標準からそれ以下のものであったので、この点についても検討していきたいと考えている。

熱環境系における生体の生理指標は、その環境評価をする上で一つの有効な指標になりうることが考えられる。今後のさまざまな環境下での実験的研究により、さらに生理的指標がこれら環境評価の有効な指標となることが予想される。

[成果の発表、論文等]

- 1) 和泉康，江川賢一，佐藤健，藤多健史，宮崎正己：閉鎖室内環境下における生体への影響，日本人間工学会第 35 回大会（1994，6）

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

Computer Aided Diagnosis for the Lung Cancer X-ray CT Screening System

93r018

研究者代表 豊橋技術科学大学知識情報工学系 教授 山本 眞 司

〔研究の目的〕

我々は、肺癌の早期発見を目的として、従来の X 線撮影に代わり X 線 CT をベースとした肺癌検診システムの構築を提案している 1), 3)。このシステムでは一検査者あたり約 30 スライスと大量の CT 3 次元データが計測されるので、これの診断にあたり医師の負担を軽減するため、計算機を用いた画像診断支援サブシステムの開発が必須である。

そこでそのための基礎技術として、病巣陰影候補を自動認識し、陰影候補の見つかった CT 断面のみをディスプレイすることにより表示画面数を大幅に削減する方式の研究を行った。

病巣陰影候補の自動認識手法としては、Morphological フィルタの一種である Quoit フィルタなる新手法を開発した 1), 4)。これは、病巣陰影が孤立性に存在し、かつその濃度分布が病巣中心から周辺に向かって単調減少することを仮定して、この種の画像に特異的に応答するフィルタとなっている。このフィルタを各スライス断面ごとに適用することにより、病巣およびスライス断面に直交する血管陰影が正しく抽出されることを実際の症例にて確認した。

次いでこのフィルタを 3 次元に拡張した 3 D-Quoit フィルタを開発し、球状体である病巣陰影と、円柱状体である血管陰影の区別ができることを確認した。

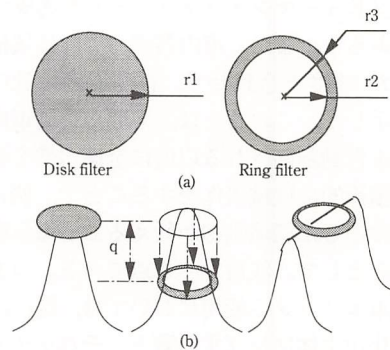


図1 Quoit フィルタ概念図

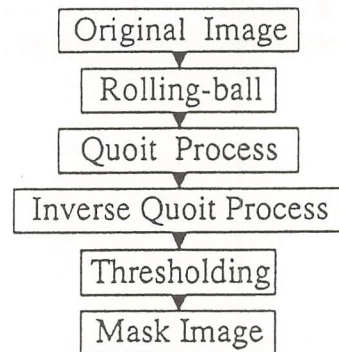


図2 Quoit 処理フロー

〔研究の内容、成果〕

1. 2次元 Quoit フィルタによる病巣陰影の粗抽出

まず始めに、各スライス断面ごとに肺癌病

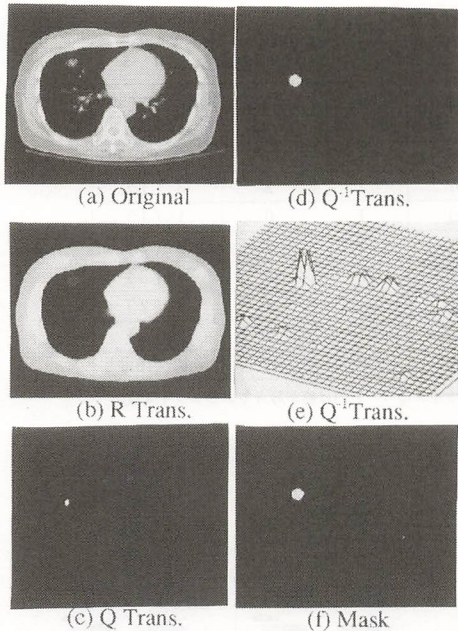


図3 Quoit 処理の流れ

巣候補の自動抽出を行い、候補が見つかったスライス断面のみを以降の検討対象として絞り込む、粗抽出のプロセスを検討した。

肺癌病巣部は、肺野内に孤立的にしかも小面積で存在する性質を利用して自動抽出を試みた。孤立性陰影の抽出に関しては、筆者らが新たに開発した Quoit (輪投げ) フィルタを応用した。

孤立性陰影に選択的に応答する Quoit フィルタの概念図を図1に示す。なお、各フィルタの半径を図示のごとく r_1 , r_2 , r_3 とする。図の (a) に示すような円盤型とリング型の二つのフィルタは、(b) 左に示すような孤立性陰影の場合、両フィルタを上からかぶせると両者の間に q なる高低差を生じる。(孤立性陰影にリングフィルタがうまくはまり込む現象からこれを Quoit, すなわち輪投げフィルタと名付けた)。ところが、(b) 右端

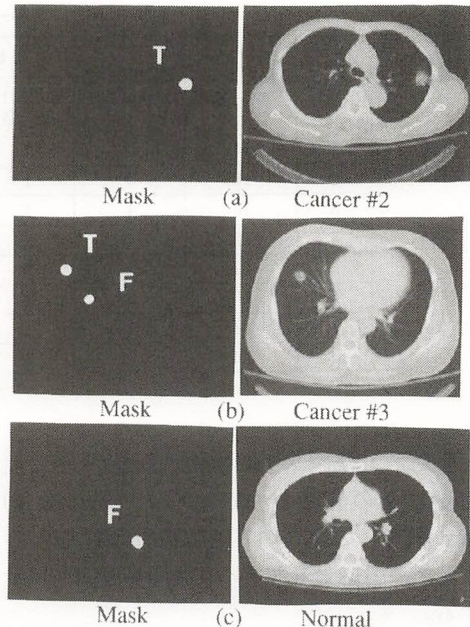


図4 Quoit 処理結果

の図のように孤立性でない部位には高低差が生じない。このような性質を利用した処理を Q 変換 (Q Trans.) および Q 逆変換 (Q^{-1} Trans.) と呼ぶことにしたが、その詳細は文献1), 4)に譲る。

実際の肺癌症例を用いて病巣陰影の自動抽出実験を行った。実験に用いた処理フローを図2に示す。

実験に用いたサンプルは、肺癌病巣を含む CT 画像7症例である。1スライス断面当たり 320×320 画素 (1 mm 分解能), スライス厚さは 10 mm であり、1患者当たり 10 ~ 32 枚のスライス断面を有するサンプルを用いた。

結果の一例を図3に示す。図は一つの癌症例に関し、図2のフローに従って各部の画像を表示したものである。なお (e) から明らかのように、振幅の低い雑音成分が観測されるので、これを適当な閾値 (実際の閾値は 150

表1 2D, 3D-Quoit 処理の癌抽出能力

症 例	スライ ス 枚 数	癌の個数 (10 mm 以上)	2 D-Quoit		3 D-Quoit		
			癌 抽 出 個 数	血管抽出 個 数	癌 抽 出 個 数	血管抽出 個 数	抽出スライス* 枚 数
1	11	1	1	4	1	1	2 (1)
2	10	1	1	6	1	2	3 (1)
3	16	1	1	11	1	0	1 (1)
4	22	1	1	9	1	2	3 (1)
5	32	2	2	16	2	1	4 (3)
6	26	2	1	13	1	4	6 (2)
7	22	1	1	10	1	2	3 (1)
計	139	9	8	69	8	12	22 (10)

* 抽出スライスの () 内は癌が写っているスライス枚数

とした) にてマスク画像化する(f)。その上で更にその面積が一定値以上(最小癌 10 mm 相当)の場合のみを病巣候補領域とみなして、対応するスライス断面を医師に呈示する。

図4 (a), (b) は他の2例の病巣候補領域のマスク画像と対応するスライス断面を示したものである(図中に正しく抽出した意味でTと表現)。病巣候補領域が精度良く抽出されていることが分かる。但し病巣以外の血管領域を抽出するケースもかなり多い。(c) および(b)の一部がその例であり、紛らわしい血管陰影を候補として抽出している(図中にFと表現)。

実際のサンプルにおいては表1の左側に示すように、7症例合計139スライス断面に対して、9個の癌病巣中8個を正抽出し、1個を誤抽出した。また69カ所の血管を誤って検出した。このように血管の誤抽出がまだ多いので、次にこの対策を行った。

2. 3次元 Quoit フィルタによる病巣抽出精度の向上

前章では2次元断面内での処理を議論したが、この処理では断面に直交する血管陰影も

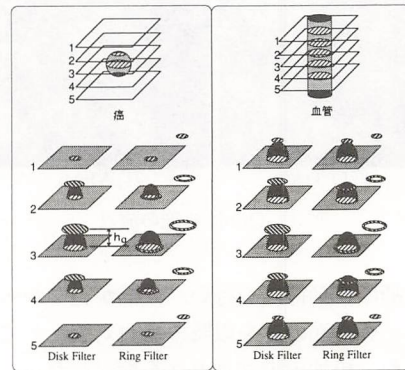


図5 3D Quoit 処理概念図

抽出することとなり、病巣と区別することができない。そこで次に、連続する5枚のスライス(注目スライス±2)を一組とする3次元フィルタ処理を開発した。これを3D Quoit 処理と呼ぶ。但し、注目スライスは2D Quoit 処理で候補領域が抽出されたスライスとする。

抽出対象としているのは孤立性癌であり、その形はおおよそ球状である。一方、抽出対象でない血管は円柱状であると言える。この特性を利用し、注目スライスの前後のスライスにかかる Quoit フィルタの径を狭めることにより、孤立性陰影の球状のものだけを抽出

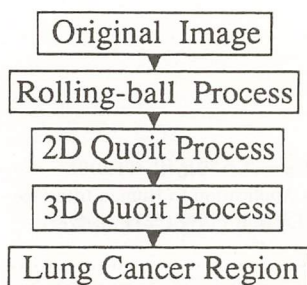


図6 実験処理フロー

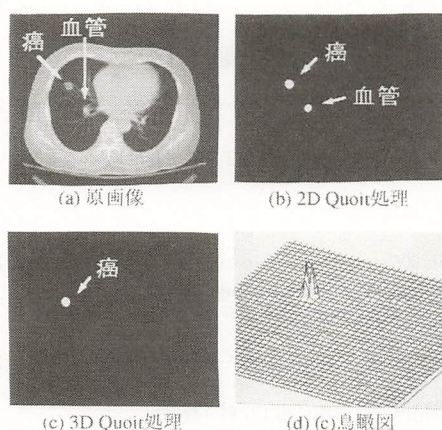


図7 実験結果画像

する(図5参照)。

実験処理のフローを図6に、結果の一例を図7に示す。また、癌患者7症例に対して2D Quoit処理、3D Quoit処理を行った結果を表1に示す。この表から明らかに、2D Quoit処理では血管を抽出したものが69カ所と非常に多かったが、3D Quoit処理によって12カ所に削減された。その結果、医師に提示すべきスライス断面の枚数は139枚から、22枚に削減された。この22枚の提示枚数中、癌病巣を含む場合が10枚であり、

残りの12枚が血管を誤抽出した場合であった。

[今後の研究の方向, 課題]

各スライス断面ごとに病巣陰影候補を自動認識し、陰影候補の見つかったCT断面のみをCRT表示することにより、表示断面を削減する方式を開発した。病巣陰影の自動認識には我々が新たに開発した2次元および3次元Quoitフィルタを用いた。このフィルタは球状の孤立性陰影のみを特異的に抽出する性質をもち、孤立性陰影の存在しないスライス断面からは何も出力がない。この処理の結果、7症例合計139スライス断面中、上記出力が22枚と、表示スライス断面が削減された。この22枚の断面中、癌病巣を含む断面が10枚であり、残りは血管部を誤検出したものであった。

今後は、血管の誤抽出をさらに削減する追加的措置を検討する必要がある、その結果を踏まえて集団検診の普及発展を図る努力を行いたい。

[成果の発表, 論文等]

- 1) 山本眞司他：“肺癌検診用X線CT (LSCT)の基本構想と診断支援用画像処理方式の検討”，信学論J76-D-II, 2, pp. 250-260 (1993-02)
- 2) 飯沼武他：“肺癌検診用CT (LSCT)の基本構想とその事前評価”，日本医学放射線学会誌, 52, 2, pp. 182-190 (1992-02)
- 3) 笹野之男他：“肺癌検診のためのX線CTの開発”，新医療, 17, 10, pp. 28-32 (1990-10)
- 4) 磯部義明他：“孤立性陰影抽出用Quoitフィルタの性質とその乳癌X線陰影抽出への応用”信学論J76-D-II, 2, pp. 279-287 (1993-02)

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)

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)

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)

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識情報工学系 (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)

621.375.8 (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)
- ◆ 広帯域信号の効率的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)

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)

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)

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 筑波大学構造工学系 (講師)
- ◆ ファジイ・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系 (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ー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)
- ◆ ファジイ・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)

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)

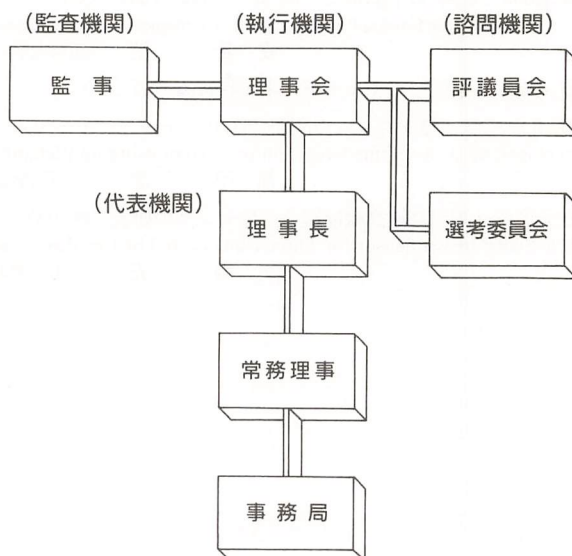
- ◆ 計算論的学习理論とそのマンマシンインタフェースへの応用 (901013) 1
Algorithmic Learning Theory and Its Applications
有 川 節 夫 九州大学理学部基礎情報学研究施設 (教授)
- ◆ 身振りのコード化とヒューマン・インタフェースへの応用 (901015) 1
Gesture Coding and Its Application to Human Interface
黒 川 隆 夫 京都工芸繊維大学工芸学部 (教授)
- ◆ 連続音声認識のための単語連想機構の構築に関する研究 (911010) 1
Construction of 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)

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)
- 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科 (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)
- 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)

- | | |
|----------|---|
| ●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

(1994-4-1 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	盛田昭夫	ソニー株式会社 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7年度 助成候補募集案内

（財）立石科学技術振興財団においては、下記の通り平成7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 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 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250万円程度、20件程度） | |
| ② 国際交流助成金 | 5百万円（1件50万円程度、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6年9月1日～平成6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7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（財）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、ファックスでお願いいたします。

以上

編 集 後 記

昨年の第2号に続いて、お蔭様で今年も第3号を発行することができました。ご寄稿下さいました大澤理事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3号に掲載した研究課題の抄録は、第4回（平成5年度）助成課題の中で研究計画の終了したものを中心に、それ以前の課題の中で前号発行以後に終了した研究課題を集録しています。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、派遣、招聘の要点のみをご紹介しますにとどめました。

この第3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。

（財）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3号

平成6年9月(1994)

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。)