

立石科学技術振興財団

助成研究成果集

【第7号】

平成10年(1998)



人間と機械の調和を促進する助成研究成果集

第 7 号

平成 10 年 9 月 (1998)

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イ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こと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. 理事長挨拶	2
2. 財団関係者寄稿（熊谷信昭 理事 科学技術会議議員・大阪大学名誉教授）	3
3. 助成研究成果の抄録一覧	4
4. 国際交流報告の抄録一覧（平成9年度）	93
5. 受領者投稿	101
榎本哲夫 京都大学大学院工学研究科精密工学専攻 助教授	101
岩田洋夫 筑波大学構造工学系 助教授	102
6. 平成9年度活動報告（業務日程・会計・アンケート）	103
7. 平成10年度助成報告（応募状況・贈呈式）	105
8. 第9回（平成10年度）助成課題一覧	106
9. 平成11年度助成候補募集案内	108
10. 財団の概要	109
11. 役員・評議員	110
編集後記	111

ごあいさつ

このたび、助成研究成果集第7号の発行に際し、
ひとことご挨拶申し上げます。

当財団は、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、科学技術
分野で、人間と機械の調和を促進することを趣意と
して設立し、本年5月には第9回目の助成金贈呈式
をとり行うことができました。



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おります。

第7号の発行にあたり、ご寄稿いただ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、豊かで健全な最適化社会を創造するた
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
えております。

21世紀に向け、人と機械がより高次元で調和し、人間重視の視点に立った最適化
社会の創造のための、より高度な科学技術の発展に、いささかでも寄与できればと
願っております。

今後も引き続き、ご支援ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

理事長 立石 信雄

寄稿：ネアカのすすめ

世の中に「良い事ばかり」というものはないのと同様に、世の中に「悪い事ばかり」というものもまた決してない。これは、人の世にも、諸々の仕事の世界にも、技術の分野にも、また自然界にも広く共通する、単純にしてかつ重要な基本的真理なのである。例えば、一本の線路で沢山の情報を一度に送ろうとするとなるべく高い周波数の電流を流さなければならなくなるが、周波数が高くなると送ろうとする電氣的エネルギーが電波となって周囲の空間中に放射され、散逸してしまうという厄介な現象が起る。この、周波数が高くなるほど放射損失が増大するという、電力や電気信号の伝送にとってはまことに不都合な現象も、逆にこれを積極的に利用すると放送や携帯電話などの無線通信に欠くことのできないアンテナとなる。また、アンテナから放射された電波は、大気や物質中を伝搬すると、今度は電波のエネルギーが物質に吸収されて熱エネルギーに変わり、電波は減衰してしまう。これは電波を遠方まで送ろうという目的にとってはやはり非常に具合の悪い現象であるが、逆に、この現象を積極的に利用すると、例えば電子レンジや癌の温熱療法などとして活用することができる。



このような例はまだ他にも沢山あるが、仕事や研究に行き詰まったり、思い通りにならないような事態に遭遇したとき、上に述べた真理を思い出し、視点をかえて見直せば、何事にも必ず逆の良い面があることに気が付き、思いもかけない利用・活用の道が見つかったり、新しい展望が開ける可能性がある。要するに、ネアカでなければ駄目だということである。実際、昔から立派な業績をあげた国内外の大学者や大技術者をみると、総じて楽天家が多い。

しかし、ネアカは常に健全なヒューマニズムに裏打ちされたものでなければならない。日本の生んだ偉大な哲学者西田幾多郎博士が友人の著書のために書かれた序文の中に「学問も事業も究竟の目的は人情のためにするのである」という味わい深い言葉がある。この場合の「人情」というのは「人間愛」とか「ヒューマニズム」というような意味に解してよいのではないかと思う。研究者・技術者にとって何よりも大切な基本的要件は健全な人間性である。ゲーテも「良い仕事はよい人間にしか出来ない」という主旨のことを述べている。「健全なる研究は健全なる精神から生まれる」といってよいであろう。

理事・熊谷 信 昭
(科学技術会議議員
大阪大学名誉教授)

研究助成成果の抄録一覧

(年度順五十音順)

- ◆ 次数構造に依存しない非線形ロバスト適応制御とその知能化に関する研究 (951020) 6
 Nonlinear Robust Adaptive Control Independent of Structures of Degrees and Its Intellectualization
 宮 里 義 彦 文部省統計数理研究所 助教授

- ◆ 事例ベース推論に基づく非線形適応信号処理 (961001) 13
 Nonlinear Adaptive Signal Processing Method based upon a memory-based reasoning
 飯 國 洋 二 大阪大学大学院工学研究科 助教授

- ◆ バイラテラル制御系における人間の手動操作特性と
 それを考慮した人間指向のバイラテラル制御系設計 (961002) 17
 Analysis of Characteristics of a Human Operator in Bilateral Control Systems
 for Operator-oriented Design of the System
 稲 葉 毅 東京工業大学工学部 助手

- ◆ ナチュラルインテリジェンスに学ぶ知的通信技術：
 生体内代謝経路を用いた情報通信ネットワークの構造デザイン (961004) 22
 Investigation of intelligent network topology by mimicking the fault-tolerant network
 structure of metabolic pathways
 岡 本 正 宏 九州工業大学情報工学部 助教授

- ◆ マルチメディア文書の統合理解によるハイパーテキストの自動生成 (961006) 27
 Generation of Hypertext by Understanding of Multimedia Documents
 黄 瀬 浩 一 大阪府立大学工学部情報工学科 講師

- ◆ 情報の3次元可視化・操作手法に関する研究 (961010) 33
 A Study on 3-D Information Visualization and Handling
 竹 村 治 雄 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 助教授

- ◆ 宇宙科学における人体生理機能の計測装置の開発 (961018) 38
 Development of Apparatus to Measure Human Physiological Factors on Space Sciences
 三 井 石 根 国立国際医療センター脳神経外科 厚生技官

- ◆ 人工生体機構における神経系マンマシンインタフェースの開発とその応用研究 (961019) 48
 Development of Neural Man-Machine Interfaces and Their Applications for the
 Control of Artificial Organs and Prosthetic Devices
 満 潤 邦 彦 東京大学国際・産学共同研修センター 教授

- ◆ 複数の自律ロボットが知的に協調行動をして人間の活動を援助する
 システムの開発研究 (961020) 56
 Development Researches on a System to Support Human Activities with
 Intelligent Cooperations of Multiple Autonomous Robots
 油 田 信 一 筑波大学電子情報工学系 教授

- ◆ 弾性表面波霧化器に関する研究 (971004) 61
Surface Acoustic Wave Atomizer
黒 澤 実 東京大学大学院工学系研究科 助教授
- ◆ 球面超音波モータを利用した人工義手のための
ヒューマンフレンドリーなインターフェースの開発 (971012) 66
Development of human friendly interface for an artificial arm by spherical ultrasonic motor
遠 山 茂 樹 東京農工大学工学部 教授
- ◆ 脳波の非線形動特性の解析による新しい親和型インターフェイスシステム
に関する基礎的研究 (971013) 71
Study on man-machine interface system based on nonlinear dynamics of human brain wave
西 藤 聖 二 山口大学工学部 講師
- ◆ 統計的逐次決定法を用いた認識率の設定可能な
発声内容独立型話者認識法の開発 (971014) 77
Performance-controllable Text-independent Speaker Recognition Using Sequential Decision
野 田 秀 樹 九州工業大学工学部電気工学科 助教授
- ◆ 眩しさにによる誤認識を防ぐ光学フィルタの開発 (971017) 83
Development of Optical Filter Preventing Misconception owing to the Dazzle of the Light
松 田 豊 稔 熊本電波工業高等専門学校 助教授
- ◆ エレクトロニクス産業に用いられているレアメタル類の
ヒト培養細胞を用いての毒性の検討 (971020) 88
Cytotoxicity of rare earth compounds to cultured human cells
持 田 恭 島根県衛生公害研究所 主任研究員

次数構造に依存しない非線形ロバスト 適応制御とその知能化に関する研究

Nonlinear Robust Adaptive Control Independent of Structures of Degrees and Its Intellectualization

951020

研究者代表

文部省統計数理研究所 助教授

宮 里 義 彦

[研究の目的]

これまでの適応制御 (Fig. 1) の研究においては, 制御対象の次数の上界と相対次数の正確な値が, 事前に既知であると仮定されてきた。これはそれらの指標が, 制御器の構造を規定するのに必要とされるからであるが (1), 17), 現実の未知の工業プロセスに対してそれらの正確な値を知ることは困難なことが多い。

このような問題を背景として, 本研究の目的は未知の次数構造を有する制御対象について, その次数構造に依存しない新たな適応制御系の設計理論を構築することである。これに関連して研究期間中に様々な制御系設計理論が構築されたが (参考文献参照), 本稿ではその中の適応サーボ問題に話題を限定する (Fig. 2)。つまり未知外乱 d_1, d_2 の影響を受ける未知次数の制御対象の出力 y を, 特定の目標信号 y_r に追従させる制御問題を考え, その際, 未知外乱と目標信号は次数の上界が既知の線形システム (未知) により発生されるものとする。

以上の設定のもとに, まず次数は未知であるが相対次数が既知の場合に, 対象を安定化

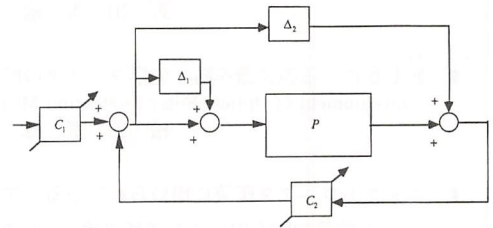


Figure 1 Adaptive control scheme

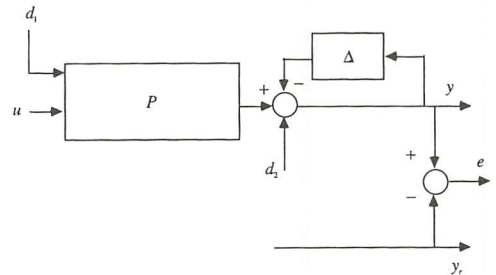


Figure 2 Adaptive servo control scheme

しつつ, 目標信号と外乱の内部モデルを推定することで外乱の影響を除去しながら目標信号に追従するような適応サーボ系の構成法を求める (適応制御器 I)。次に次数だけでなく, 相対次数もある範囲で不確定な場合 (相対次数が r 次, $r+1$ 次または $r+2$ 次の範

囲に含まれる場合、ただし r は既知) について、同様に対象を安定化して、外乱除去と目標信号追従性を有する適応サーボ系の構成法を求める (適応制御器 II)。いずれの場合も、追従誤差の漸近安定性が、信号の励起条件なしに保証される。

[研究の内容, 成果]

1. 問題設定

確定的な外乱の影響を受ける 1 入力 1 出力線形系を考える。

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) + bu(t) + gd_1(t) \quad (1)$$

$$y(t) = c^T x(t) + d_2(t) \quad (2)$$

ただし $x(t) \in R^n$, $A \in R^{n \times n}$, $b, c, g \in R^n$ である。 $d_1(t), d_2(t) \in R^1$ は外乱とする。制御対象 (1), (2) については、入力 $u(t)$ と出力 $y(t)$ が観測可能として、 A, b, c, g と状態変数 $x(t)$, および外乱 $d_1(t), d_2(t)$ は未知であるとする。さらに次数 n も未知とする。次の仮定をおく。

仮定 1 : 1-1) 制御対象 (1), (2) は可安定で可観測とする。**1-2)** $c^T(sI - A)^{-1}b$ の零点は安定とする。**1-3)** $c^T(sI - A)^{-1}b$ の高調波利得 b_0 の符号は既知とする。以下の文脈では一般性を失うことなく $b_0 > 0$ とする。**1-4)** 未知の外乱 $d_1(t)$ と $d_2(t)$ は一様有界とし、 $A_d(s)d_i(t) = 0$ ($i = 1, 2$) を満足するものとする。ただし $A_d(s)$ はモニックな $s \equiv \frac{d}{dt}$ の多項式とする。 $A_d(s)$ は未知であるとするが、その次数の上界 (以下、 n_d ($n_d \geq \deg A_d(s)$) と記す) は既知であるとする。

$c^T(sI - A)^{-1}b$ の相対次数に関する仮定は、

適応制御器 I と適応制御器 II に応じて、以下のようになる。

仮定 2 (適応制御器 I):

$c^T(sI - A)^{-1}b$ の相対次数 n^* は既知であるとする。

仮定 3 (適応制御器 II):

$c^T(sI - A)^{-1}b$ の相対次数 n^* は不確定であるとする。つまり $n^* = r, r+1$ または $r+2$ のいずれかであるとする (r は既知)。

制御対象の出力 $y(t)$ が追従すべき目標信号 $y_r(t)$ ($\in R^1$) を導入する。 $y_r(t)$ に関して次の仮定をおく。

仮定 4: $y_r(t)$ は測定可能で一様有界とする。さらに次の関係式を満足するものとする。

$$A_d(s)y_r(t) = 0$$

以上の設定のもとで、相対次数 n^* が既知の場合 (適応制御器 I) と、不確定な場合 $n^* = r, r+1$ または $r+2$ (適応制御器 II) について、制御対象を安定化しつつ、外乱の影響を除去して、追従誤差

$$e(t) \equiv y(t) - y_r(t) \quad (3)$$

を零に収束させるような適応サーボ器を構成する。

2. 適応制御器 I

まず最初に、制御対象の次数が未知であるが相対次数が既知の場合を考える。

2.1 システムの表現

適応制御器 I を構成する前に、対象の零点と $y_r(t), d_1(t), d_2(t)$ の生成モデルを考慮した追従誤差の表現を求める。次の補題が得られる。

補題 1: 仮定 1, 2 および 4 のもとで、誤差システムは次のように表される。

$$\frac{d}{dt}e(t) + \lambda e(t) = L(e(t)) + b_0 u_{fn^*-1}(t)$$

$$+ \Theta^T \omega_1(t) + \epsilon(t) \quad (4)$$

$$\omega_1(t) \equiv [u_{fn^*}(t), n_{fn^*+1}(t), \dots, u_{fn^*+n_d-1}(t)]^T \quad (5)$$

$$u_{fi}(t) \equiv \frac{1}{(s + \lambda)^i} u(t) \quad (6)$$

ただし $\lambda > 0$ は設計変数で、 Θ と b_0 は未知のシステムパラメータ、 $\epsilon(t)$ は指数減衰項の総称とする。 $L(e(t))$ は次のように定義される。

$$L(e(t)) \equiv G_0(s)e(t) \quad (G_0(s) \in RH_\infty) \quad (7)$$

2.2 適応制御器 I の設計

補題 1 の表現に基づいて導出した適応制御器の構成手順を、Table 1 に示す。

このとき次の定理が得られる。

定理 1 (適応制御器 I) :

仮定 1, 2 および 4 のもとで、Table 1 に示した制御系の全ての信号の有界性と、状態変数 $z_i(t)$ ($1 \leq i \leq n^*$) (ただし $z_1(t) = e(t)$) の零収束性が保証される。

2.3 注意

適応制御器 I の基本的な概念は、制御対象を n^* 個の階層的なサブシステム ($S_1 \sim S_{n^*}$) 分割して、各々のサブシステム (出力が $z_i(t)$ ($1 \leq i \leq n^*$)) を仮想的な制御入力 $\alpha_i(t)$ ($1 \leq i \leq n^*$) を使って、逐次安定化していくというものである。このとき各サブシステムにおいて $\alpha_i(t)$ と $z_i(t)$ の間の相対次数は 1 次となるので、伝達関数 “ $\frac{1}{s + \lambda}$ ” の強正実性を利用することで、各サブシステムに対する適応安定化制御器は容易に構成できる。そのようなサブシステムの構造を一つにまとめることで、未知の次数に対する適応制御器が実現されるのである (Fig. 3)。

Table 1 Adaptive Controller I

$z_1(t) \equiv e(t) = y(t) - y_r(t)$ $z_i(t) \equiv u_{fn^*-i+1}(t) - \alpha_{i-1}(t), \quad i = 2, \dots, n^*$
$\alpha_1(t) = -\hat{p}(t)\hat{\phi}(t) - \hat{k}_1(t)z_1(t),$ $\alpha_2(t) = \lambda u_{r2}(t) + \beta_1(t)$ $+ \gamma_1(t)\hat{\Theta}(t)^T \omega_1(t)$ $+ \hat{b}_0(t) \{ \gamma_1(t)u_{fn^*-1}(t) - z_1(t) \}$ $- k_{21}z_2(t) - k_{22}\gamma_1(t)^2 z_2(t) + \gamma_{\theta 1}(t)\tau_{\theta 2}(t),$ $\alpha_i(t) = \lambda u_{fn^*-i+1}(t) + \beta_{i-1}(t)$ $+ \gamma_{i-1}(t)\hat{\Theta}(t)^T \omega_1(t)$ $+ \hat{b}_0(t)\gamma_i(t)u_{fn^*-1}(t) - z_{i-1}(t)$ $- k_{i1}z_i(t) - k_{i2}\gamma_{i-1}(t)^2 z_i(t) + \gamma_{\theta i-1}(t)\tau_{\theta i}(t)$ $+ \gamma_{bi-1}(t)\tau_{bi}(t) + \bar{\alpha}_{i-1}(t), \quad (i = 3, \dots, n^*)$
$\beta_{i-1}(t) = \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \hat{K}_1} \dot{\hat{K}}_1(t) + \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \omega_{i-1}} \dot{\omega}_{i-1}(t) - \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial z_1} \lambda z_1(t)$ $+ \sum_{j=2}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial z_j} \{ -\lambda u_{fn^*-j+1}(t) + u_{fn^*-j}(t) - \beta_{j-1}(t) \},$ $\bar{\alpha}_i(t) = - \sum_{k=2}^{i-1} \gamma_{\theta k-1}(t) G_{13} \gamma_{i-1}(t) \omega_1(t) z_k(t)$ $- \sum_{k=3}^{i-1} \gamma_{\theta k-1}(t) g_2 \gamma_{i-1}(t) u_{fn^*-1}(t) z_k(t),$ $\omega_{i-1}(t) = [u_{fn^*-i+2}(t), \omega_{i-2}(t)]^T,$ $\gamma_{i-1}(t) = \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial z_1} - \sum_{j=2}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial z_j} \gamma_{j-1}(t),$ $\gamma_{\theta i-1}(t) = \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \hat{\Theta}} - \sum_{j=2}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial z_j} \gamma_{\theta j-1}(t),$ $\gamma_{b2}(t) = \frac{\partial \alpha_2}{\partial \hat{b}_0},$ $\gamma_{bi-1}(t) = \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \hat{b}_0} - \sum_{j=3}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial z_j} \gamma_{bj-1}(t)$
$\tau_{\theta 1}(t) \equiv G_{13} \omega_1(t) z_1(t), \quad (G_{13} = G_{13}^T > 0)$ $\tau_{\theta i}(t) = \tau_{\theta i-1}(t) - G_{13} \gamma_{i-1}(t) \omega_1(t) z_i(t),$ $\tau_{b2}(t) = g_2 \{ z_1(t) - \gamma_1(t) u_{fn^*-1}(t) \} z_2(t), \quad (g_2 > 0)$ $\tau_{bi}(t) = \tau_{bi-1}(t) - g_2 \gamma_{i-1}(t) u_{fn^*-1}(t) z_i(t), \quad (i \geq 3),$
Control Law : $u(t) = \alpha_{n^*}(t)$ Adaptive Law : $\dot{\hat{K}}_1(t) = g_{11} z_1(t)^2, \quad (g_{11} > 0),$ $\dot{\hat{p}}(t) = g_{12} \hat{\phi}(t) z_1(t), \quad (g_{12} > 0),$ $\dot{\hat{\Theta}}(t) = \tau_{\theta n^*}(t),$ $\dot{\hat{b}}(t) = \tau_{bn^*}(t).$

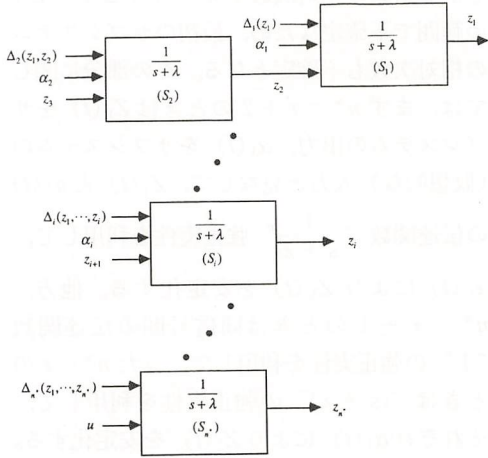


Figure 3 Scheme of adaptive controller I

3. 適応制御器 II

次に未知の次数に加えて、相対次数も部分的に不確定な場合、つまり $r, r+1$, または $r+2$ の範囲で未知の場合 (r は既知) を考える。

3.1 システムの表現

不確定な相対次数 $n^* = r+2, r+1, r$ に対して、制御対象の異なる表現を求める。

補題 2: 仮定 1, 3 および 4 のもとで、誤差システムは次のように表される。

1) $n^* = r+2$ のとき

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}E(t) + \lambda E(t) \\ = L(e(t)) + b_0 u_{fr}(t) \\ + \Theta_1^T \omega_1(t) + \epsilon(t) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} E(t) = L(e(t)) + b_0 u_{fr+1}(t) \\ + \Theta_2^T \omega_2(t) + \epsilon(t) \end{aligned} \quad (9)$$

2) $n^* = r+1$ のとき

$$\begin{aligned} E(t) = L(e(t)) + b_0 u_{fr}(t) \\ + \Theta_1^T \omega_1(t) + \epsilon(t) \end{aligned} \quad (10)$$

3) $n^* = r$ のとき

$$\begin{aligned} E(t) = L(e(t)) + b_0 u_{fr-1}(t) \\ + \Theta_0^T \omega_0(t) + \epsilon(t) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} e(t) = L(e(t)) + b_0 u_{fr}(t) \\ + \Theta_1^T \omega_1(t) + \epsilon(t) \end{aligned} \quad (12)$$

ただし

$$E(t) \equiv \frac{d}{dt}e(t) + \lambda e(t) = Z_1(t) \quad (13)$$

$$\omega_0(t) \equiv [u_{fr}(t), u_{fr+1}(t), \dots, u_{fr+n_d-1}(t)]^T \quad (14)$$

$$\omega_1(t) \equiv [u_{fr+1}(t), u_{fr+2}(t), \dots, u_{fr+n_d+1}(t)]^T \quad (15)$$

$$\omega_2(t) \equiv [u_{fr+2}(t), u_{fr+3}(t), \dots, u_{fr+n_d+1}(t)]^T \quad (16)$$

とし、 $u_{fi}(t)$ は先と同じに定義される。 $\Theta_0, \Theta_1, \Theta_2, b_0$ は未知のシステムパラメータで、 λ は任意の正の定数、 $\epsilon(t)$ と $L(e(t))$ は補題 1 と同様に定義されるものとする。

3.2 適応制御器 II の設計

制御対象の異なる複数の表現に基づいて、不確定な相対次数 $n^* = r+2, r+1, r$ に対して適応制御器 II を設計する。Table 2 に構成法を示す。

このとき次の定理が得られる。

定理 2 (適応制御器 II):

仮定 1, 3 および 4 のもとで、Table 2 に示した制御系の全ての信号の一樣有界性と状態変数 $z_i(t)$ ($1 \leq i \leq r+1$) (ただし $z_1(t) = e(t)$) の零収束性が保証される。

3.3 注意

適応制御器 I の場合と同様に、制御対象は $r+1$ 個の階層的なサブシステムに分割され、各々のサブシステムは仮想的な入力 $\alpha_i(t)$ ($1 \leq i \leq r+1$) により逐次安定化される。

Table 2 Adaptive controller II

$z_1(t) \equiv e(t) = y(t) - \gamma(t),$ $z_i(t) \equiv u_{fr-i+2}(t) - \alpha_{i-1}(t), \quad (i=2, \dots, r+1)$
$\alpha_1(t) = -\hat{k}_1(t)z_1(t) - \hat{\phi}_1(t)^T \omega_1(t),$ $\alpha_2(t) = \hat{k}_{20}(t) \{ \lambda u_{fr}(t) + \beta_1(t) \} - \hat{k}_{21}(t)z_2(t)$ $- k_{22}\gamma_1(t)^2 z_2(t) - \hat{\phi}_0(t)^T \omega_0(t),$ $\alpha_i(t) = \lambda u_{fr-i+2}(t) + \beta_{i-1}(t) - z_{i-1}(t)$ $+ \gamma_{i-1}(t) \hat{B}_0(t)^T \omega_0(t)$ $- k_{i1}z_i(t) - k_{i2}\gamma_{i-1}(t)^2 z_i(t),$ $+ \gamma_{Bi-1}(t) \tau_{Bi}(t) + \hat{\alpha}_i(t), \quad (i=3, \dots, r+1),$
$\beta_1(t) = \frac{\partial \alpha_1}{\partial \omega_1} \dot{\omega}_1(t) - \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \lambda z_1(t),$ $\beta_{i-1}(t) = \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \hat{K}_2} \dot{\hat{K}}_2(t) + \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial u_{fr}^{(r-i+3)}} \dot{u}_{fr}^{(r-i+3)}(t)$ $- \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial z_1} \lambda z_1(t)$ $+ \sum_{j=2}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial z_j} \{ -\lambda u_{fr-j+2}(t) + u_{fr-j+1}(t) - \beta_{j-1}(t) \}, \quad (i=3, \dots, r+1),$ $\hat{\alpha}_i(t) = - \sum_{k=4}^{i-1} \gamma_{Bk-1}(t) G_3 \gamma_{i-1}(t) \hat{\omega}_0(t) z_k(t),$ $\hat{\omega}_0(t) = [u_{fr-1}(t), \omega_0(t)^T]^T$ $= [u_{fr-1}(t), u_{fr}(t), \dots, u_{fr+n_d-1}(t)]^T,$ $u_{fr}^{(r-i+3)}(t) = [u_{fr-i+3}(t), u_{fr-i+4}(t), \dots,$ $u_{fr+n_d+1}(t)]^T,$ $\gamma_{i-1}(t) = \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \hat{K}_1} G_1 v_1(t) + \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial z_1}$ $- \sum_{j=2}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial z_j} \gamma_{j-1}(t),$ $\gamma_{B2}(t) = 0$ $\gamma_{Bi-1}(t) = \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \hat{B}_0} - \sum_{j=4}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial z_j} \gamma_{Bj-1}(t)$ $(5 \leq i \leq r+1),$
$\tau_{B3}(t) = -G_3 \gamma_2(t) \hat{\omega}_0(t) z_3(t),$ $\tau_{Bi}(t) = \tau_{Bi-1}(t) - G_3 \gamma_{i-1}(t) \hat{\omega}_0(t) z_i(t)$ $(i=4, \dots, r+1),$
Control Law : $u(t) = \alpha_{r+1}(t),$ Adaptive Law : $\hat{k}_1(t) = \hat{k}_{11}(t) + \hat{k}_{12}(t),$ $\hat{k}_{11}(t) = \frac{1}{2} g_{11} z_1(t)^2, \quad \hat{k}_{12}(t) = \lambda g_{11} z_1(t)^2,$ $\Leftrightarrow \hat{k}_1(t) = g_{11} z_1(t) Z_1(t)$ $\hat{\phi}_1(t) = \hat{\phi}_{11}(t) + \hat{\phi}_{12}(t),$ $\hat{\phi}_{11}(t) = G_{12} \omega_1(t) z_1(t)$ $\hat{\phi}_{12}(t) = G_{12} \{ \lambda \omega_1(t) - \dot{\omega}_1(t) \} z_1(t),$ $\Leftrightarrow \hat{\phi}_1(t) = G_{12} \omega_1(t) Z_1(t)$ $\hat{k}_{20}(t) = -g_{20} \{ \lambda u_{fr}(t) + \beta_1(t) \} z_2(t),$ $\hat{k}_{21}(t) = g_{21} z_2(t)^2,$ $\hat{\phi}_0(t) = G_{22} \omega_0(t) z_2(t),$ $\hat{B}_0(t) = \tau_{Br+1}(t),$

しかし対象の相対次数が $n^* = r+2, r+1, r$ の範囲で不確定なため、最初のサブシステムの相対次数も不確定となる。その部分に関しては、まず $n^* = r+2$ のときは $Z_1(t)$ をサブシステムの出力、 $\alpha_1(t)$ をサブシステムの (仮想的な) 入力と見なして、 $Z_1(t)$ と $\alpha_1(t)$ の伝達関数 “ $\frac{1}{s+\lambda}$ ” 強正実性を利用して、 $\alpha_1(t)$ により $Z_1(t)$ を安定化する。他方、 $n^* = r+1$ のときは同信号間の伝達関数 “1” の強正実性を利用して、また $n^* = r$ のときは “ $(s+\lambda)$ ” の強正実性を利用して、それぞれ $\alpha_1(t)$ により $Z_1(t)$ を安定化する。2 番目以降のサブシステムに関しては、対応する出力 $z_i(t)$ ($2 \leq i \leq r+1$) と仮想入力 $\alpha_i(t)$ ($i \geq 2$) の相対次数が 1 次であることから、適応制御器 I の場合と同様に逐次的に安定化制御器を構成することができる (Fig. 4)。

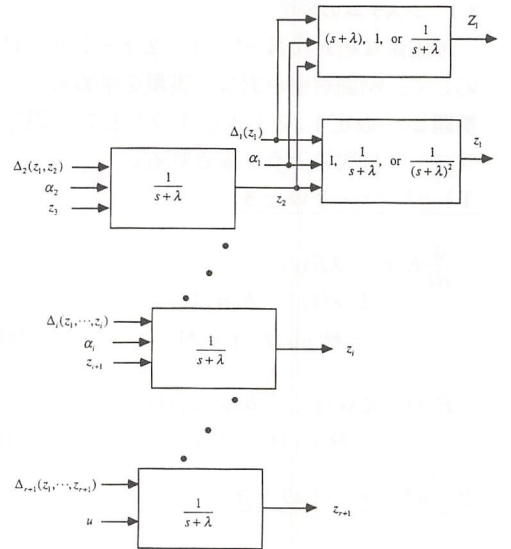


Figure 4 Scheme of adaptive controller II

[今後の研究の方向, 課題]

以上, 未知の次数と不確定な相対次数を有する対象のロバスト適応制御に関する最近の成果の一部を説明した。関連する結果や他の制御法(適応安定化やモデル規範形適応制御)の結果も同様に求められている(詳細は参考文献3)–9)(未知の次数の場合), および参考文献10)–16)(不確定な相対次数の場合)を参照のこと。従来のロバスト適応制御の研究においては非構造的な不確定性に対する大域的漸近安定性が達成されなかったが1), 本研究で求めた2つの制御器は非構造的な不確定性下の適応制御において, 安定性が保証されるだけでなく, ロバストパフォーマンスをも論じられる領域が存在することを示唆している。

本研究と適応制御全般の今後の方向, 課題としては, 様々な非構造的な不確定性が存在するときのロバストパフォーマンスをより厳密に明らかにすることと, それに加えて, 他の制御方式との関係, たとえばLQ型の最適制御や近年の非線形 H_∞ 制御との関連を調べることがあげられる。現時点においても, 適応制御器Iを少し修正することによって, ある種のLQ型の評価関数に対して準最適な制御系を構成することが出来るし, 別の修正を加えることによって, H_∞ の観点から, つまりある種の L_2 ゲインに関する評価関数に対して準最適な制御系を実現出来ることが, 関連する研究結果から判明している。それらについては今後の研究の中で発展させていく予定である。

[参考文献]

- 1) P. A. Ioannou and J. Sun, Robust Adaptive Control, PTR Prentice-Hall, 1996.
- 2) M. Krstić, I. Kanellakopoulos, and P. V. Kokotović, Nonlinear and Adaptive Control Design, John Wiley & Sons, NY, 1995.
- 3) Y. Miyasato, "Adaptive variable structure control for nonlinear systems with unknown degrees," *Preprints of IFAC Symposium on Robust Control Design*, pp. 69–74, Rio de Janeiro, 1994.
- 4) Y. Miyasato, "Model reference adaptive control for nonlinear systems with unknown degrees," *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3056–3061, Orlando, 1994.
- 5) 宮里義彦, "次数に依存しない非線形適応制御系の構成法(任意の相対次数に対する構成)," 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, pp. 324–333, 1995.
- 6) Y. Miyasato, "Nonlinear adaptive control for nonlinear systems with unknown degrees (minimal number of tuning parameters)," *Proceedings of 1995 American Control Conference*, pp. 2505–2509, Seattle, 1995.
- 7) Y. Miyasato, "Globally bounded robust adaptive controller with arbitrarily small residual tracking error," *Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3947–3952, New-Orleans, 1995.
- 8) 宮里義彦, "大域的有界性と制御誤差のバイアス補償機能を有するロバスト適応制御," 計測自動制御学会論文集, Vol. 32, pp. 26–34, 1996.
- 9) 宮里義彦, "Backstepping法によるロバスト適応制御," 計測と制御, Vol. 35, pp. 430–434, 1996.
- 10) Y. Miyasato, "Adaptive servo controller for systems with unknown degrees and uncertain relative degrees," *Proceedings of 1997 American Control Conference*, pp. 1662–1666, Albuquerque, 1997.
- 11) Y. Miyasato, "Model reference adaptive control for systems with unknown relative degrees," *Proceedings of European Control Confer-*

ence 1997, Brussels, 1997.

- 12) Y. Miyasato and S. Hanba, "Adaptive control for nonlinear systems with unknown degrees and uncertain relative degrees, *System Identification 1997 (SYSID '97)*, pp. 903-908, 1997.
- 13) Y. Miyasato, "A design method of universal adaptive stabilizer," *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 2, pp. 1896 - 1901, 1997.
- 14) 宮里義彦, "不確定な相対次数に対するモデル規範形適応制御系の構成法 (任意の 3 次の幅の不確定性に対する構成)," 計測自動制御学会論文集, Vol. 34, pp. 87 - 95, 1998.
- 15) Y. Miyasato, "A design method of universal model reference adaptive controller," *Proceedings of 1998 American Control Conference*, Vol. 1, pp. 609 - 613, 1998.
- 16) 宮里義彦, "次数と相対次数に依存しない非線形適応制御系の構成法 (相対次数が 3 次の範囲で不確定な場合)," システム制御情報, Vol. 11, No.6, pp. 330 - 340, 1998.
- 17) K. S. Narendra and A. M. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems*, Prentice-Hall, New Jersey, 1989.

事例ベース推論に基づく非線形適応信号処理

Nonlinear Adaptive Signal Processing Method
based upon a memory-based reasoning

961001

研究代表者

大阪大学大学院工学研究科 助教授

飯 國 洋 二

[研究の目的]

人間は、過去の事例に基づいて現在の事例を解析し適切に判断・処理する能力を持つ。本研究では、このような人の柔軟な情報処理機能を信号処理に導入することにより、非線形かつ非定常の信号を予測・推定する方法を提唱し、実データを用いて性能を評価する。

[研究の内容、成果]

1 問題設定と提案手法

時刻 t における k 次元入力 $x_t = (x_{1,t}, x_{2,t}, \dots, x_{k,t})$ とスカラ出力 y_t が、未知の時変非線形関数 f_t を用いて、

$$y_t = f_t(x_t) + e_t, \quad (1)$$

と表されたとする。ただし、 e_t は観測雑音である。本研究では、過去の入出力データをデータベース化し、それを元に新たな入力点（質問点）における出力を推定する。計算手順を以下にまとめる。

1. データベースの時間更新、つまり最新のデータを挿入するごとに最も古いデータを削除することで、最新の N 組

のデータ $\{(x_i, y_i)\}_{i=t-N}^{t-1}$ をデータベース化する。

2. 質問点近傍のデータを領域検索する。
3. 検索結果をもとに RBFN (Radial Basis Function Network) を使って局所モデルを構成し質問点における出力を推定する。

この方法は、信号に対する知識をすべてデータベース化し、必要なときに必要なだけ知識を抽出することでより高精度の推定を行う新しい信号処理手法である。そのため、入出力特性を表現する数学モデルや IF-THEN ルールが不要であり、それらを獲得することが困難な非線形性、非定常性を有する信号に対して特に有用となる。

2 データベースの時間更新

データベースを時間更新する目的は、時々刻々とデータが観測される場合でも記憶容量を一定以下に押さえ、 f_t の時間変化に対応するためである。本研究では、データ構造として k 次元デジタル探索木 (k -d トライ) を選び、その効率のよい時間更新法を開発した。

2次元入力データ

$$\begin{aligned} x_1 &= (0.5, -0.5) & x_2 &= (0.75, 0.5) \\ x_3 &= (-0.75, 0.25) & x_4 &= (-0.5, -0.5) \\ x_5 &= (-0.75, 0.75) & x_6 &= (0.25, 0.5) \end{aligned}$$

に対するトライの構造の時間変化 ($N=3$) を図1に示す。 k - d トライは、ポインタを記憶しておく内節点とデータを記憶しておく端節点からなる。本手法では、ポインタ領域と

データ領域を完全に分離することで、メモリ位置のみでデータの時間情報が得られるようにした。図中右ブロックがポインタ領域、左ブロックがデータ領域であり、 $D_i = (x_i, y_i)$ である。データ領域の右端のポインタ p は、データの削除/挿入位置を指示しており、時刻とともにインクリメントされる。これにより、各端節点が時間情報をいちいち記憶しておかなくても、検索したデータと p の相対的位置から、データの時間情報が得ることができる。

3 局所モデルの構成

領域検索で抽出したデータ $\bar{x}_i$ を RBF 中心点として、RBF で局所モデルを構成した。

$$f(x) = \sum_{i=1}^M c_i \exp\left(-\frac{\|x - \bar{x}_i\|}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

RBF を適用する際、これまでではデータ数の増加とともに計算量が大幅に増加するという問題があった。しかし本手法では、領域検索で抽出したデータのみを使って RBF を構成するのでその問題が解決できる。

3.1 数値実験

次の時変関数について考える。

$$\begin{aligned} y_t &= g(g(g(x_t))) + e_t \\ &= f(x_t) + e_t \\ g(x) &= \begin{cases} 4x(1-x) & ; 1 \leq t \leq 200 \\ 1-4x(1-x) & ; 201 \leq t \leq 400 \end{cases} \quad (3) \end{aligned}$$

ただし、 e_t は平均 0、分散 0.01 のガウス雑音である。まず、100 組のデータ $\{(x_i, y_i)\}_{i=1}^{100}$ を記憶しておき、異なる質問点に対する出力を推定した。そして、重み $w(x) = \exp(-x^2/2\sigma_w^2)$ を持つ局所線形モデル ($LLM(\sigma_w^2)$) との性能を比較した。

LLM と RBF で実現される非線形写像を図2に示す。これより、RBF と LLM (0.01)

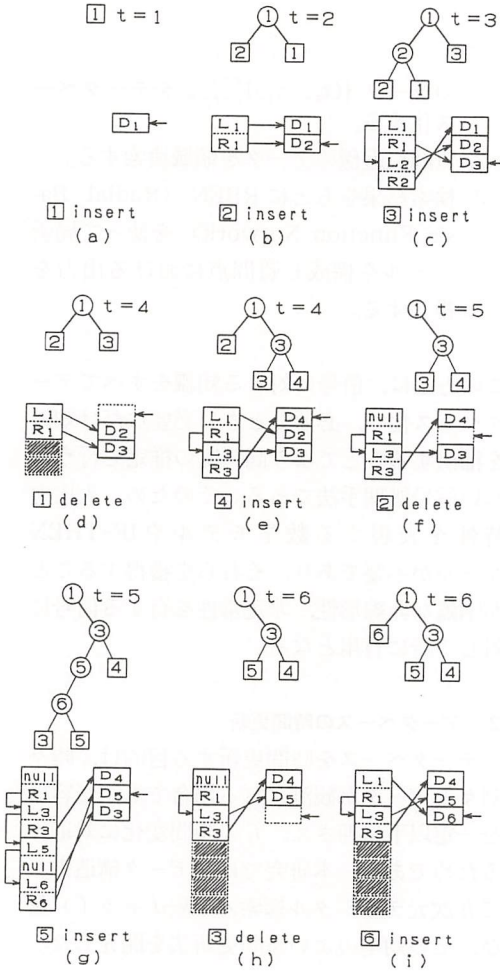


図1 k - d トライの時間更新 ($N=3$)

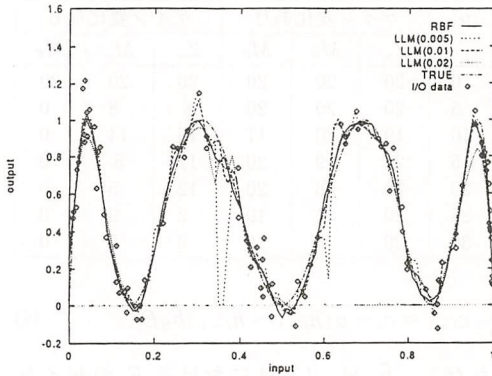


図2 非線形写像能力の比較

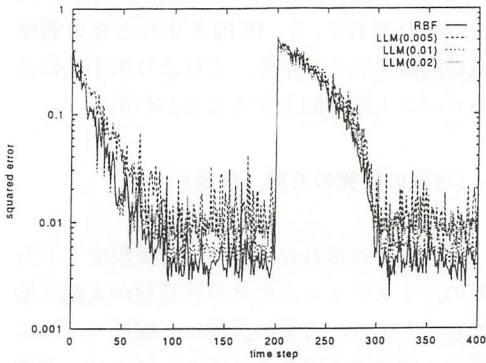


図3 収束曲線の比較

は同等の性能があるものの、LLMは σ_w に対して敏感であることがわかる。つぎに、 $N = 100$ として質問点 x_i に対する出力 y_i を逐次推定した。図3は推定誤差信号の100回の集合平均を示す。これよりRBFの性能がよいことがわかる。

3.2 音声の予測符号化

音声データ（データ数 10^5 , 11025Hz, 8bits）に対して、本手法を使って5次の非線形ARモデルを当てはめた。ただし、 $N = 2000$ とした。図4(a)は音声信号、(b)はLLM、(c)はRBFで得られた誤差信号である。こ

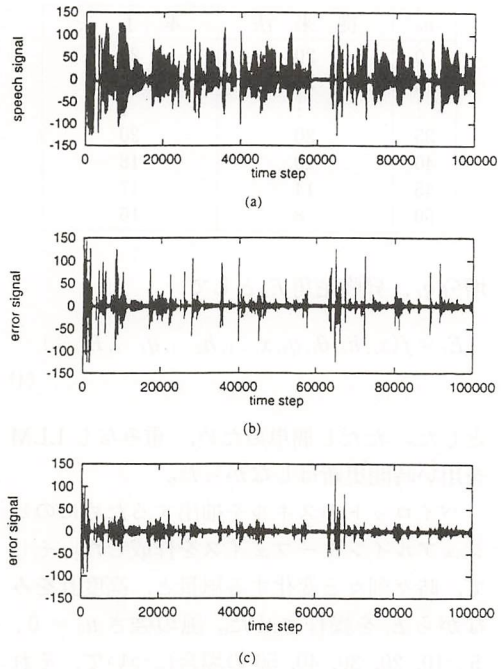


図4 (a) 音声信号
(b) LLMによる誤差信号
(c) RBFによる誤差信号

れより、RBFがよい結果を与えることがわかる。

4 フライトコントロールへの応用

従来のALS (Automatic landing system) では、ALSの制御入力とパイロットの制御入力に大きな違いから、モード切替時に発生する入力ギャップにより重大な事故の原因となる場合がある。それを防ぐためには、パイロットのスキルを何らかの方法でALSに組み込むことが重要となる。そこで、パイロットのスキルを、航空機の状態からパイロットの動作への非線形写像として捉え本手法を適用した。具体的には、時刻 t における水平位置 x_t 、高度 h_t 、ピッチ角 θ_t 、ピッチ

表1 着陸成功回数の比較 (20 回中)

u_0	従 来 法	本 手 法
0	20	20
5	20	20
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
35	20	20
40	20	18
45	14	17
50	8	16

増分 q_t , 昇降舵角 E_t として,

$$E_t = f(x_t, h_t, \theta_t, q_t, x_{t-1}, h_{t-1}, q_{t-1}, E_{t-1}) \quad (4)$$

とした。ただし簡単のため、重みなし LLM を用い時間更新はしなかった。

パイロットのスキルを抽出するためにのビジュアルインターフェイスを作成した。そして、時々刻々と変化する風景と、高度計をみながら E_t を操作させた。風の強さ $u_0 = 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50$ の場合について、それぞれ 30 回の成功例をデータベース化した。新たな試行に対する着陸成功回数を表 1 に示す。ただし、各 u_0 ごとに 20 回の試行を行った。これより、本手法が優れていることがわかる。

飛行機の動特性が変化した場合でも、人間は飛行機の状態と予測した状態との差を評価しながら E_t を巧みに調節しようとする。ここでは、そのスキルを組み込んだ。つまり、

$$h_{t+1} = g(x_t, h_t, \theta_t, q_t, x_{t-1}, h_{t-1}, q_{t-1}, E_t). \quad (5)$$

として本手法を適用した。そして、 h_{t+1} がその推定値 $\hat{h}_{t+1}$ に近づくように、 E_t のゲイン c を次式で更新した。

表2 ロバスト性の比較

u_0	ゲイン変化あり			ゲイン変化なし		
	Z_w	M_w	M_E	Z_w	M_w	M_E
0	20	20	20	20	20	20
5	20	20	20	8	8	0
10	19	20	17	16	14	0
15	20	19	20	12	8	0
20	20	8	20	12	5	0
25	20	11	19	2	9	0
30	20	3	19	0	5	0

$$c_{t+1} = c_t - \mu(h_{t+1} - \hat{h}_{t+1})\delta_8 E_t. \quad (6)$$

ただし、 δ_8 は、LLM における E_t のゲイン係数である。

飛行機の動特性を決める定数 Z_w , M_w , M_E を、それぞれ 2, 5, 10 倍させたときの着陸成功回数を表 2 に示す。これより本手法によりロバスト性が向上することがわかる。

[今後の研究の方向、課題]

本方法では優れた近似精度を実現できるものの、1 ステップあたりの計算量が大幅に増加してしまう。今後の課題は、線形モデルに基づく従来法と融合させることにより、両者の欠点を相補う方法を検討することである。

[成果の発表、論文等]

- 1) Y. Iiguni, I. Kawamoto, N. Adachi, "A non-linear adaptive estimation method based upon local approximation," IEEE Trans. Signal Processing, vo. 45, no. 7, pp. 1831–1841, 1997.
- 2) Y. Iiguni, H. Akiyoshi, N. Adachi, "An intelligent landing system based upon a human skill model," IEEE Trans. Aerospace Electronics Systems, vo. 34, no. 3, pp. 877–882, 1998.

バイラテラル制御系における人間の手動操作特性と それを考慮した人間指向のバイラテラル制御系設計

Analysis of Characteristics of a Human Operator in Bilateral Control Systems for Operator-oriented Design of the System

961002

研究者代表

東京工業大学工学部 助 手

稲 葉 毅

共同研究者

東京工業大学工学部 助教授

松 尾 芳 樹

【研究の目的】

人間と操作対象機械が双方向に力情報をやり取りする手動制御系をバイラテラル制御系と呼び、ロボットのテレオペレーションや、人間とロボットの協調作業系などその応用は広く期待されている。しかし、操作性を向上させるために効果的な対象機械への力学特性の与え方について明確な検討結果は見られない。そこで本研究は、操作者にとって操作性のよいバイラテラル制御系の設計法を開発することを念頭に置き、バイラテラル制御系における人間の操作特性の解析とそれを利用した人間指向のバイラテラル制御系の設計法について検討する。

【研究の内容、成果】

1. バイラテラル制御系の一般形

本研究で取り扱うバイラテラル制御系の一般形を Fig. 1 に示す。一般に人間が対象機械に対して力を出して操作するシステムはこの一般形で表すことができる。Fig. 1 にお

いて、人間は操作対象の出力である制御量 $y(t)$ を視覚で検出し、目標値 $r(t)$ に近付けるように補償特性 $H_c(s)$ の出力として手先位置目標値 $x_r(t)$ を発生する。さらに、その手先位置目標値 $x_r(t)$ に実際の手先位置 $x(t)$ を近付けるように手先位置補償制御特性 $H_M(s)$ が力を発生し、人腕の受動的インピーダンス特性 $H_D(s)$ の影響分が差し引かれて操作力 $f(t)$ となり、操作器 $A(s)$ に入力される。操作器の出力である手先位置 $x(t)$ が操作対象への入力となり、操作対象特性は入力から制御量 $y(t)$ までの伝達特性 $P_y(s)$ と操作反力までの伝達特性 $P_f(s)$ からなると考える。バイラテラル制御系の一般形は、人間の操作特性を含む制御ループとして、

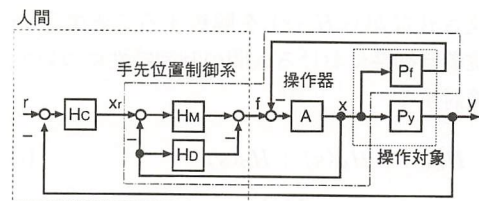


Fig. 1 バイラテラル制御系の一般形

視覚に基づく外側の制御ループと、力覚情報に関連する手先位置制御ループを持つ二重構造になっていると考えられる。

ところで、人間は操作対象の特性に応じて適応的に自分自身の特性を変化させることが知られている。よって、操作性を考慮した制御系の設計には人間の操作特性の適応の性質が重要である。過去に報告されている、いわゆる手動制御系に関する研究の結果は、Fig. 1 の一般形のうち視覚に基づく外側の制御ループに関するものがほとんどであり、内側の手先位置制御系については明示的に取り扱われていなかった。そこで、本研究では Fig. 1 の一般形のうち特に手先位置制御系について検討し、特に人間の適応の性質について明らかにする。

2. 手先位置制御系の特性測定と解析

2.1 測定実験の設定と実験系の構成

まず、Fig. 1 の一般形のうち手先位置制御系部分だけを考えるため、実験は人間に視覚情報を与えない形で行う。さらに、手先位置目標値 $x_r(t)$ を 0 とし、手先位置制御系を人間側と機械側の 2 つのブロックにそれぞれまとめ、特性測定のための外乱信号 $f_d(t)$ を加えることで Fig. 2 に示すような手先位置制御系の測定系が得られる。ここで、 $H_E(s)$ を人間の等価手先位置補償制御特性、 $A_E(s)$ を等価操作器特性と呼び、それぞれ (1), (2) 式で表される。本研究では $A_E(s)$ を様々に変化させながら $H_E(s)$ を解析することで手先位置制御系における人間の制御特性について検討する。

$$H_E(s) = H_M(s) + H_D(s) \quad (1)$$

$$A_E(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)P_f(s)} \quad (2)$$

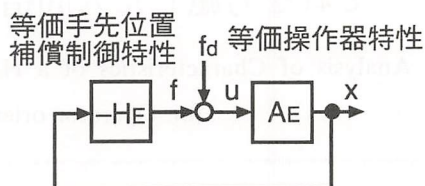


Fig. 2 手先位置制御系の測定系

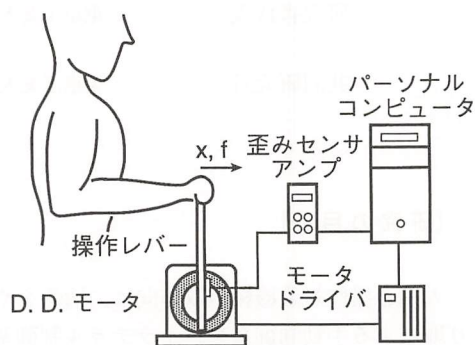


Fig. 3 実験系の構成

Fig. 2 の測定系を実現するため Fig. 3 に示すような構成の実験装置を用意した。D. D. モータに操作レバーをとりつけ操作器とし、パーソナルコンピュータによって人間の手先において指定した等価操作器特性が得られるようにトルク制御する。操作力はレバーに張り付けたストレインゲージで検出する。被験者はランダム性の力外乱により揺り動かされる手先位置を初期位置に保持するよう補償制御する。その際に自分の手先位置を見ないでリラックスした状態でレバーを操作することなども指示した。被験者は健常な男子大学院生とし、操作に十分慣れた状態で測定実験を行った。

2.2 実験結果

等価操作器特性としては、基本的な機械要素特性であるバネ・マス・ダンパ特性

(3)式) を実現した。各パラメータをさまざまに変化させ 23 通りの特性について測定実験を行った。これら実験結果を等価操作器特性の主帯域 (1 ~ 30 [rad/s]) におけるゲイン特性に応じて 2 次遅れ型, 1 次遅れ型および比例型に分類しそれぞれについて検討した。

$$A_E(s) = \frac{1}{Ms^2 + Ds + K} \quad (3)$$

〈2 次遅れ型等価操作器に対する制御特性〉

2 次遅れ型等価操作器に対する代表的な実験結果 2 つを Fig. 4 に示す。

まず, Fig. 4 (c) から手先位置制御系の開ループ特性がそのクロスオーバー周波数 ω_{c1} , ω_{c2} 付近で 1 次遅れ型になっていることがわかる。これは Fig. 4 (a) のような 2 次遅れ型等価操作器に対して, Fig. 4 (b) のように操作者が等価手先位置補償制御特性を 1 次進み型とし開ループ特性を整形することで閉ループ系の安定性を保っていることを示している。次に, 手先位置制御系の開ループ特性のクロスオーバー周波数に注目する。Fig. 4 (c) を見ると, クロスオーバー周波数は等価操作器特性によって ω_{c1} , ω_{c2} のように変化している。しかし, それぞれのクロスオーバー周波数における等価操作器特性のゲインを Fig. 4 (a) から読み取ると約 -70 [dB] とほぼ一致している。そこで, 2 次遅れ型等価操作器特性に対する実験結果のうち, 安定動作が達成できているものについて, クロスオーバー周波数と, クロスオーバー周波数における等価操作器特性のゲインの関係を Fig. 5 のようにプロットした。Fig. 5 から, 等価操作器特性に応じて開ループ特性のクロスオーバー周波数は約 1 ~ 約 10 [rad/s] の範囲内で変化するものの, クロスオーバー周波数における等価操作器特性のゲインは約 -70 [dB] でほぼ一

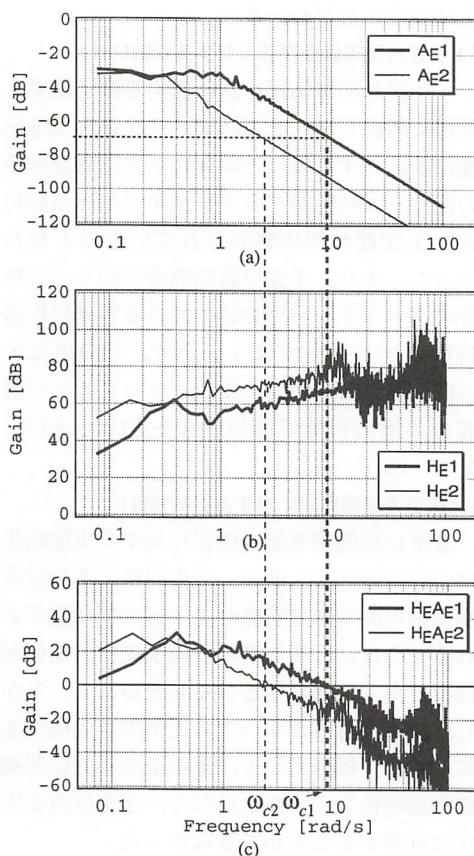


Fig. 4 2 次遅れ型等価操作器に対する測定結果例

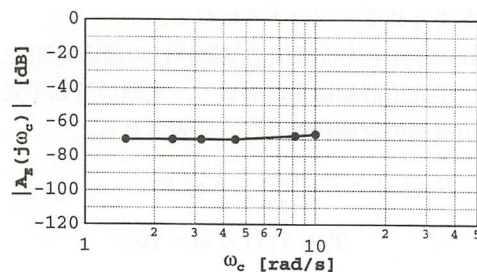


Fig. 5 手先位置制御系のクロスオーバー周波数とクロスオーバー周波数における等価操作器特性のゲインの関係 (2 次遅れ型等価操作器特性の場合)

定になることがわかる。

〈1次遅れ型等価操作器に対する制御特性〉

1次遅れ型等価操作器に対する測定結果も同様に解析した。その結果、2次遅れ型等価操作器に対する場合と同様に手先位置制御系の開ループ特性がそのクロスオーバー周波数付近で1次遅れ型に整形されていることがわかった。また、手先位置制御系の開ループ特性のクロスオーバー周波数における等価操作器特性のゲインもやはり一定で、その値は約-60[dB]であった。なお、クロスオーバー周波数の適応可能範囲は約1～約20[rad/s]であった。

〈比例型等価操作器に対する制御特性〉

最後に比例型等価操作器に対する実験結果について述べる。前の二項と同様に手先位置制御系の開ループ特性が1次遅れ型に整形されるためには、操作者の等価手先位置補償制御特性が1次遅れ型となる必要がある。しかし、測定を行ったすべての比例型等価操作器に対して、操作者は1次遅れ型の手先位置補償制御特性を示すことはなく、手先位置を安定に制御することができなかった。

3. 解析結果のまとめと考察

解析の結果得られた人間の操作特性の性質をまとめると次のようになる。

(i) 等価手先位置補償制御特性の適応範囲

手先位置制御系において、人間の等価手先位置補償制御特性は次式で表される。

$$H_E(j\omega) \approx K \frac{T_L j\omega + 1}{T_I j\omega + 1} e^{-\tau j\omega},$$

$$T_I < T_L (1 < \omega < 20)$$

$$H_E(j\omega) \approx H_{D0}(j\omega), (20 < \omega) \quad (4)$$

すなわち、1～20[rad/s]の範囲内で比例型から1次の微分型まで適応的に変化する。

これは、良く知られた視覚に基づく制御ループにおける人間の補償特性が、1次の積分型から1次の微分型まで適応可能であることと比較して特徴的である。なお、ここで $H_{D0}(s)$ は脱力時における人腕の受動的インピーダンスである。

(ii) 手先位置制御系における開ループ整形特性

等価手先位置補償制御特性 $H_E(s)$ は、手先位置制御系の開ループ伝達特性 $H_E(s)A_E(s)$ がクロスオーバー周波数 ω_c 付近において次式で表されるモデルに近似できるように適応する。

$$H_E(j\omega)A_E(j\omega) \approx \frac{\omega_c e^{-\tau j\omega}}{j\omega}, \quad \omega \approx \omega_c \quad (5)$$

これは、視覚に基づく制御ループにおける良く知られたクロスオーバーモデルと同様な性質である。

さらに、クロスオーバー周波数 ω_c は等価操作器特性 $A_E(s)$ に応じて次式が成り立つように定まる。

• $A_E(s)$ が ω_c 付近で2次遅れ型の時

$$|A_E(j\omega_c)| = -70\text{dB} \quad (1 < \omega_c < 10) \quad (6)$$

• $A_E(s)$ が ω_c 付近で1次遅れ型の時

$$|A_E(j\omega_c)| = -60\text{dB} \quad (1 < \omega_c < 20) \quad (7)$$

すなわち、手先位置制御系のクロスオーバー周波数は等価操作器特性に応じて変化する。このことは、クロスオーバーモデルでは、操作対象特性にかかわらずクロスオーバー周波数が約2～5[rad/s]の範囲内のある周波数で一定となることと比較して特徴的な違いである。

4. 操作性を考慮したバイラテラル制御系の設計 指針

Fig. 1のバイラテラル制御系の一般形に

において、一般に内側の手先位置制御系は安定で、かつそのクロスオーバー周波数は外側の視覚に基づく制御ループのクロスオーバー周波数より高いことが望まれる。このとき、本研究で明らかになった手先位置補償制御特性の適応の性質に基づけば、次のような設計指針を得ることができる。まず、前章(i)から手先位置制御系が安定であるために等価操作器特性が1次または2次遅れ型であることが要求される。次に、等価操作器特性のゲインを前章(ii)に基づいて適切に選ぶことによって手先位置制御系のクロスオーバー周波数となるべき周波数を設定することができる。視覚に基づく制御ループのクロスオーバー周波数は約2～5[rad/s]となるので、それより高く、かつ前章(ii)で示した周波数範囲内に設定することが望ましいと考えられる。このように、本研究で得られた性質を利用することで、バイラテラル制御系において従来試行錯誤的に行わざるを得なかった操作対象側の人間に対する機械力学的特性の設計に明確な指針を与えることができる。

[今後の研究の方向、課題]

操作性のよいバイラテラル制御系の設計のためには制御性能だけでなく、操作感といった感覚的な評価も必要である。人間の感覚の

客観的評価の一例として表面筋電位の利用を検討している。また、本研究で得られた基礎的な性質の人間—ロボット協調制御系設計への応用も検討中である。

[成果の発表、論文等]

- 1) 鹿谷征夫, 高木真顕, 稲葉 毅, 松尾芳樹: “バイラテラル制御系における手先運動制御に関する人間のループ整形特性”, 計測自動制御学会第35回学術講演会予稿集, (1996)
- 2) 田端 聡, 稲葉 毅, 高木真顕, 松尾芳樹, 広松敬士: “力覚に基づく人間の手先運動制御系におけるループ整形特性～人間—自動車操舵系への適用～”, 日本シミュレーション学会第16回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス発表論文集, 45/48 (1997)
- 3) 稲葉 毅, 松尾芳樹: “手動制御系における操作者の開ループ整形特性の解析と操作性を考慮した補償器設計”, 日本人間工学会誌, vol. 33, No. 3, 131/140 (1997)
- 4) Takeshi INABA, Yoshiki MATSUO: “Loop-shaping Characteristics of a Human Operator in a Force Reflective Manual Control System”, Proc. of 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 3621/3625 (1997)
- 5) 稲葉 毅, 松尾芳樹: “人間—機械制御系における手先位置制御に関する人間の開ループ整形特性”, 電気学会誌(C編), 投稿中 (1998)

ナチュラルインテリジェンスに学ぶ知的通信技術： 生体内代謝経路を用いた情報通信ネットワークの構造デザイン

Investigation of intelligent network topology by mimicking the
fault-tolerant network structure of metabolic pathways

961004

研究代表者

九州工業大学情報工学部 助教授

岡 本 正 宏

〔研究の目的〕

生化学の精力的な研究によって、細胞内の無数にのぼる化学物質の代謝経路が解明され、代謝マップと呼ばれる、いわば生体内の化学物質の道路地図のようなもの（情報通信網）が完成されつつある。その中に含まれる個々の化学反応には酵素が触媒として関与しており、トランジスタが電子やホールを増減を調節しているように、反応する物質の選択や濃度コントロールなどがなされている。この細かな道路地図、すなわち代謝マップは進化の歴史の集大成であり、自然が造りあげた知能（ナチュラルインテリジェンス）といえる。代謝マップを幾何学的に眺めてみると、スター状に広がっているもの、リング状にループを描いているもの、分岐しているもの、カップリングしているものなど、現在の情報通信網のトポロジカルな構造の基本はほとんど含まれている。しかも、代謝系は常に外界からの予期せぬ摂動を受ける開放系であるにも関わらず化学物質の情報通信の恒常性を保っている。そのために、1つのサブネットのみにリスクを集中させない多重補償系になっている。この代謝系の中に既存の情報通

信網の構造と比較して、より優れた機能特性を持つものがあれば、その機能原理を模倣することで、将来の情報通信ネットワークの構造をデザインすることが可能である。本研究の第一の目的は、情報通信に優れた機能特性を探索するための代謝経路解析用シミュレータの設計・開発である。機能特性探索はまさに抗生物質探しであり、探索に要する煩雑さをできる限り排除したシミュレータを目指す。一方、電気回路的な立場から代謝経路を捉えると、非線形連立微分方程式で記述できることから、代謝経路の中に既存の工学的な素子と比較して、より優れた機能素子が探索できれば、等価のアナログ電子回路に置き換えることでナチュラルインテリジェンスのハードウェア化が行える。これが、本研究の第二の目標である。

〔研究の内容、成果〕

情報通信に関する機能特性を探索するための代謝経路解析用シミュレータの設計・開発については、シミュレータのユーザはインターネットに接続されたコンピュータ（機種は問わない）と JAVA 対応のブラウザさえ

あれば、手軽にこのシミュレータを使えるように設計する。また、最も時間のかかる数値計算はインターネットを介して接続された計算サーバで行い、結果のみをユーザ側にするというサーバ・クライアント方式を採用する。また、代謝経路に存在する生体独特の機能素子探索については、代謝経路に存在する生化学論理デバイスをボードレベルですでにハードウェア化していることから、チップ化に向けての SPICE シミュレーションも行う。

1. 代謝経路解析用シミュレータの開発

まず、図1で示すように、マウスクリックのみで、階層性ある非線形反応系の構造を手軽にお絵描きのような感覚で定義、連結し、大規模な代謝経路（生体内化学物質情報通信網）をつくることができ、さらに、作成したモデルから、反応種の複雑な微分方程式が自動生成され、タイムコースが表示されるという一連の作業を行う Mass-action モジュールを開発した。

次に、代謝経路より情報通信に関する優れた機能特性を手軽に探索できるようにするため、コンピュータの画面上に表示された代謝マップのある領域を指定することだけですべて解析できるようなインターフェイス（代謝経路データベースルーチン）の開発を行った。図2は、代謝マップのある部分拡大図である。このようなものがコンピュータの画面に表示される。数字で表されたものはその反応を触媒する酵素の番号である。ユーザは、ここで図3のように、機能特性を解析したい領域（反応サブシステム）をマウスクリックで指定する。すると、プログラム内でその座標位置を読みとり、その領域内にある素反応ステップ（質量作用則で記述され、それぞれファイルに保存・管理している）をファイル

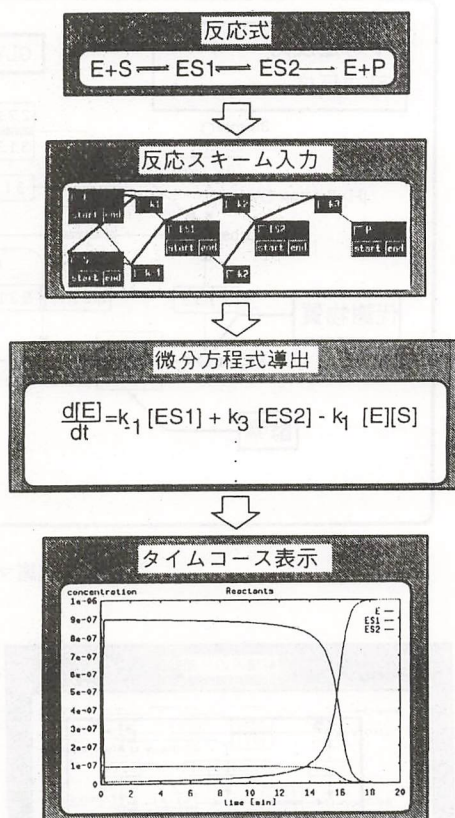


図1 反応ネットワーク解析モジュール Mass-action

よりロードする。それらを統合して、Mass-action モジュールに渡し、統合化されたものがユーザに表示されるようになっている。そして、図4で示すようなタイムコース解析が行える。しかし、現在のところ、素反応ステップに含まれる速度パラメータの値には未知のものが多く、質量作用則に基づく立式よりも、素反応ステップを関数ブロックとして捉える方が現実的なことも多い。そこで付加機能として、代謝経路の素過程でおこりうる化学物質情報通信パターンを関数ブロック化

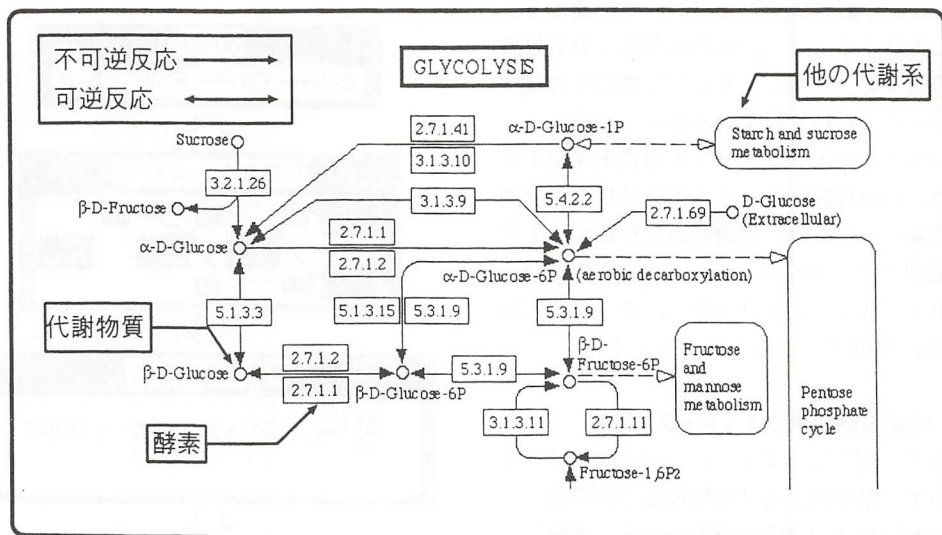


図2 代謝マップの部分拡大図

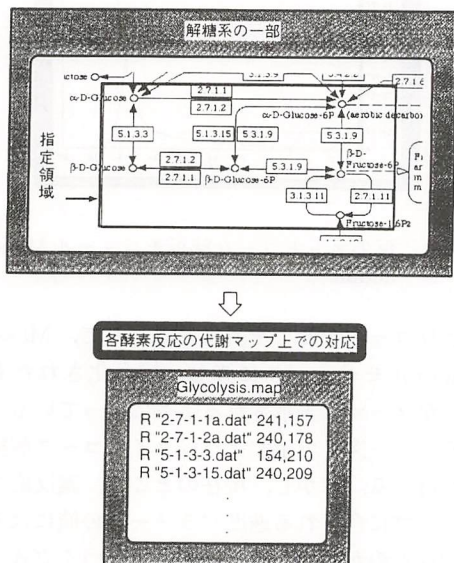


図3 代謝マップよりのクリッピング領域指定

し、その関数ブロックを連結することで、ある代謝経路の通信ブロック図が作成できるよ

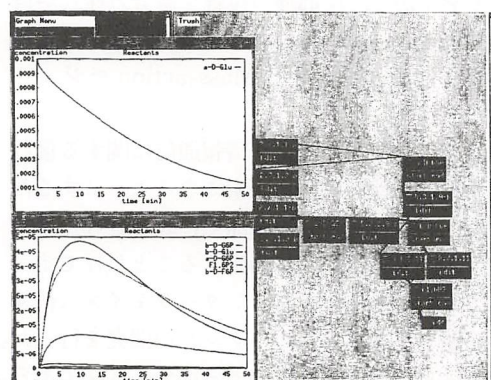


図4 機能特性（動特性）の可視化

うなインターフェイスを開発した。たとえば、あるループ状の代謝経路 ($X_1 \longrightarrow X_2 \longrightarrow X_3 \longrightarrow X_1$) があり、3つの素過程 ($X_1 \longrightarrow X_2$, $X_2 \longrightarrow X_3$, $X_3 \longrightarrow X_1$) の化学物質情報通信パターン（化学物質濃度に対する生成速度（通信すべき量に対する通信速度））がそれぞれ、 $f(X_1(t))$, $g(X_2(t))$,

$z(X_3(t))$ (f, g, z は非線形関数で, t は, 時刻 t を表す) で定義できるとすると, $dX_1/dt = z(X_3(t)) - f(X_1(t))$, $dX_2/dt = f(X_1(t)) - g(X_2(t))$, $dX_3/dt = g(X_2(t)) - z(X_3(t))$ となる。ユーザは, 関数ブロックシンボル (この場合, f, g, z) を連結するだけで, 上記のような微分方程式を直接記述することなくその代謝経路の通信ブロック図が作成され, 通信の動特性をシミュレーションできる。図5にその例を示す。A, B, C は化学物質を表す。代謝系に非常に多く存在する化学物質情報通信パターンに Michaelis-Menten 型がある。これは, 反応する化学物質の濃度を S , 生成する化学物質の生成速度を v とすると, $v = V_{\max}[S] / (K_m + [S])$ なる関係で表される。この式において, $V_{\max}$ は最大速度, K_m は $V_{\max}$ の半分の値を与える S の値である。 S に対する v をプロットすると飽和関数になり, 一般の通信量と通信速度の関係と類似している。図5において, $A \longrightarrow B$, $B \longrightarrow C$ がそれぞれ Michaelis-Menten 型で反応する場合, 関数ブロック化のイメージと開発したシミュレータ上でのシンボル表現を図に示している。一方, 代謝系の化学物質や, 反応に関する情報については, インターネッ

ト上のデータベースから入手できるようになっている。これにより, ユーザが図書館などに行って文献データを調べるといった手間が軽減される。

2. 代謝経路に存在する生化学論理デバイスの高密度化

我々は, 代謝系に数多く存在する酵素環状共役反応系 (cyclic enzyme system) が短期記憶を持ったしきい値論理素子の機能を発現することを世界でいち早く, 等価のアナログ電子回路に置き換えることで, その設計原理を模倣した“自己学習をするニューロ素子 (バイオケミカルニューロンと命名)”を世界で初めてハードウェア化した。高密度化に向けての SPICE シミュレーションのために, ボードレベルでの安定性を検討した。

[今後の研究の方向, 課題]

現在のネットワーク構築技術は, スループットを上昇させ, トラフィックを生じさせないように, 高速で通信容量の大きいケーブルを使用することに主眼が置かれ, 階層性があり, 多重補償で, フォルトトレラントなネットワークポロジをどのようにデザインするかについては, ほとんど考慮されていない。現在のネットワーク構造が多重補償系になっていないことは歴然としている。本研究において, 究極の化学情報通信網としての生体内代謝経路から, “外乱 (摂動) や障害に対して, 硬くて (強くて), 柔軟性のある” ネットワークポロジおよび通信制御方を学ぶことにより, 将来の情報通信ネットワークの構造を提言できる可能性が極めて高い。これにより, ほとんど無造作の状態に張られたネットワークをインテリジェント構造

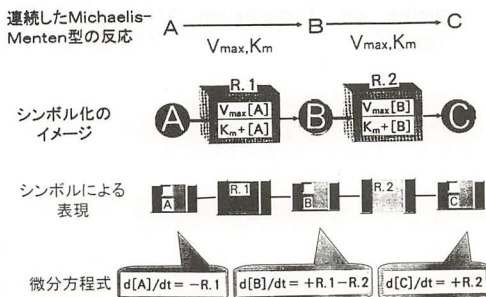


図5 代謝経路の関数ブロック化のためのシンボル表示

に改変できる。日本の厚生省に当たる米国の National Institute of Health (NIH) は、1996 年に、代謝制御機構及びネットワークの構造についての研究を精力的に押し進めるというガイドラインを発表している。本研究は、さらに一步進めて、代謝経路から学ぶ将来のインテリジェントな情報通信ネットワークの構造デザインを提唱するものであり、国内外問わずこのような試みはない。

この研究の戦略全体図を図 6 に示す。本研

究によって、代謝経路解析用シミュレータの開発が終了したので、このシミュレータを用いて、図 6 の中央に記述しているフォルトトレラントなネットワークトポロジー探索を代謝経路全体から行い、構造デザインを提言する予定である。

[成果の発表、論文等]

- 1) M. Okamoto, Y. Morita, D. Tominaga, K. Tanaka, N. Kinoshita, J. Ueno, Y. Miura, Y. Maki, Y. Eguchi: "Toward a Virtual-Labo-System for Metabolic Engineering: Development of Biochemical Engineering System Analyzing Tool-KIT (BEST-KIT)", Proceeding of a Pacific Symposium on Biocomputing '97 (ed. by R. B. Altman et al., World Scientific, New Jersey), pp. 304-315 (1997).
- 2) M. Okamoto, Y. Morita, D. Tominaga, K. Tanaka, N. Kinoshita, J. Ueno, Y. Miura, Y. Maki, Y. Eguchi: "Design of Virtual-Labo-System for Metabolic Engineering: Development of Biochemical Engineering System Analyzing Tool-KIT (BEST-KIT)", Computers and Chemical Engineering, 21(S), pp. 745-750 (1997).
- 3) M. Okamoto, T. Nonaka, S. Ochiai, D. Tominaga: "Nonlinear Optimization with Use of a Hybrid Genetic Algorithm Incorporated the Modified Powell Method", Applied Mathematics and Computation, 91(1), pp. 63-72 (1998).

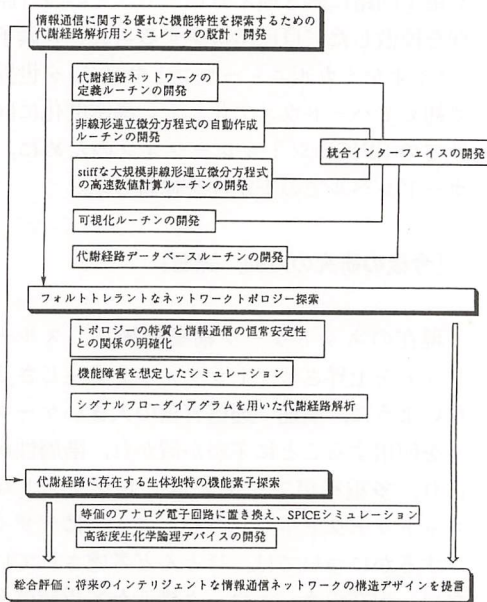


図 6 研究戦略

マルチメディア文書の統合理解による ハイパーテキストの自動生成

Generation of Hypertext by Understanding of Multimedia Documents

961006

研究代表者 大阪府立大学工学部情報工学科 講師 黄 瀬 浩 一

〔研究の目的〕

一般に、コンピュータを用いて作成された文書は、テキスト、図、表などのマルチメディアデータから構成されることが多い。このような文書では、各々のメディアに同じ情報が重複して記録されることは少なく、互いの参照関係が分かる範囲内で省略が行われる。したがって、これらのマルチメディアデータから情報を抽出するためには、相互の参照関係を同定し、互いに省略されている情報を補完する処理、すなわち統合理解が必要となる。

本研究では、メディアのうち、特にテキストと概念図の組み合わせに焦点をあて、参照関係を同定する手法を提案する。参照関係が同定されれば、個別のメディアで表現された情報の間にリンクを張り、ハイパーテキスト化することが可能となる。これにより、インターネットを介してアクセス可能な大量の文書データに対して、より柔軟な情報検索が可能となるため、情報洪水を緩和できることが期待される。

〔研究の内容、成果〕

本研究では、概念図とテキストを対応付ける方法として、

手法 1：格構造解析に基づく対応付け

手法 2：マーカパッシングに基づく対応付け

手法 3：単語照合と構文解析に基づく対応付け

手法 4：単語の出現密度に基づく対応付けの 4 種類を試みた。ここで、概念図とは、矩形などの囲み、矢線、ラベル（図中の単語）により、概念と概念間の関係を表す図であり、論文や教科書、マニュアルなどに頻出するものである。

以下では各々の手法の概要について述べる。

1 手法 1：格構造解析に基づく対応付け

概念図では、図 1 に示すような基本的関係の表現が組み合わせられ、全体として概念間の複雑な関係が表現される。手法 1 では、図 1 の基本的関係が、1 つの説明文に対応付く場合に焦点を絞り、図の基本的関係と説明文の対応付け、ならびに対応付けの結果に基づく省略の補完を行う。

図の基本的関係と説明文を対応付けるため

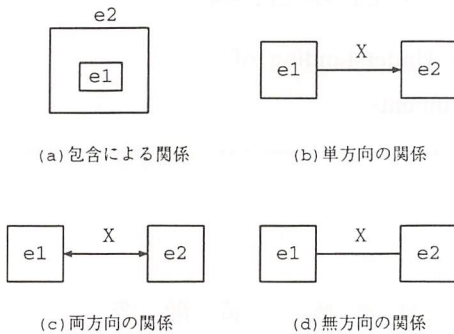


図1 図における基本的関係の表現

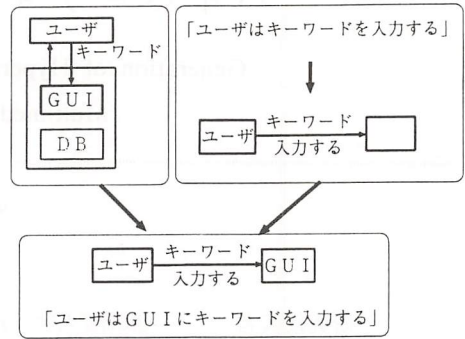


図3 手法1の処理例1

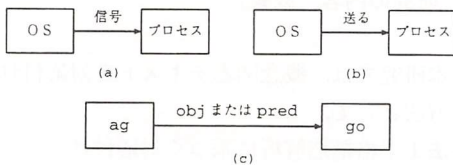
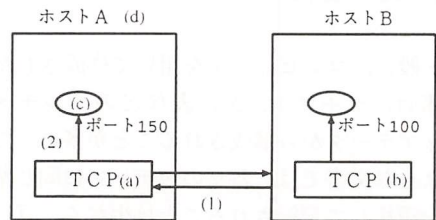


図2 文の図的表現

には、両者に共通した表現形式が必要となる。このような表現形式として、手法1では文の図的表現を用いる。文の図的表現とは、図1の基本的関係を用いて文を表すものである。このためには、(1)図1(a)～(d)のどれを選ぶのか、(2) e_1 , e_2 , X にどのような語を対応付けるのか、の問いに答えなければならない。

前者については、動詞の意味カテゴリに基づく選択法を用いる。具体的には、「構成・組織」という意味カテゴリを持つ動詞ならば図1(a)、「送信」、「受信」、「制御」、「検索」など、一方から他方への動作に関する意味カテゴリを持つ動詞ならば同図(b)、「通信」などの両方向の関係に関するものであれば同図(c)、「接続」などの方向性を持たないものであれば同図(d)を選択する。

一方、後者については、文の格構造に基づく手法を用いる。例として、「OS がプロセ



- (1) TCPモジュールは受諾の返事を
- (b)
- ホストAのTCPモジュールに送り、
- (d) (a)
- (2) TCPモジュールはそれをポート150番に伝える。
- (a) (c)

図4 手法1の処理例2

スに信号を送る」という文を図で表現することを考えてみる。この文に対する妥当な図表現は、図2(a), (b)の2種類である。これを語のグラベルを用いて表すと、図2(c)のようになる。

以上の処理は、文に格構造解析を施すことにより可能となる。

処理例を図3、図4に示す。図3は統合による補完の効果を表す例であり、統合の結果、文からは「入力する」という動作が、図からは「GUI」という動作の相手が補われた。図

4では、文中の「TCP モジュール」がホスト A, B のいずれに属するものか曖昧性があるが、対応付けにより解消されている。ここで図4の図における(a)～(d)は文中の語、(1)と(2)は文を表す。

2 手法2：マーカバッシングに基づく対応付け

手法1では、文の格構造を考慮して精密な対応付けが可能であるが、文が図の基本的関係と1対1に対応しない場合には対処できない。手法2は、この問題を解決するため、文や図に省略や言い替えがあり、1対1に対応しない場合への対処を試みるものである。

手法2では、電子化辞書研究所(EDR)の概念辞書(記述される概念と概念間の関係はそれぞれ約40万、約90万)から意味ネットを構築して利用する。手法2の特徴は、文と図で表される概念と概念間の関係を意味ネット上のパス(意味ネット内で概念をたどる道)で表し、パス同士の照合処理により、対応付けを試みる点にある。

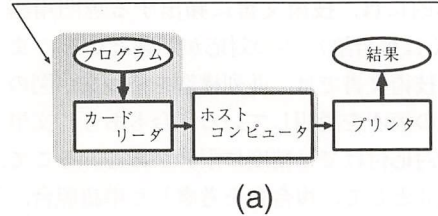
処理手順の概要は以下の通りである。

- (1) 図からラベル、文から自立語を抽出する。
- (2) ラベルの集合、自立語の集合の各々に対して、マーカバッシング¹⁾と呼ばれる処理を施し、図と文で表現された概念間の関係を意味ネット上のパスとして表現する。一般には、図と文から複数のパスが得られる。以下では、図のラベルから得たパスの集合を $\{f_k\}$ 、文 i から得たパスの集合を $\{s_j^i\}$ とする。ここで、 $f_k = \{c_{k1}, \dots, c_{km}\}$ 、 $s_j^i = \{c_{j1}^i, \dots, c_{jn}^i\}$ であり、 c_{kp} 、 c_{jq}^i はパス中の概念を表す。
- (3) パスの類似度を

$$\text{sim}(f_k, s_j^i) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{|f_k \cap s_j^i|}{|f_k|} + \frac{|f_k \cap s_j^i|}{|s_j^i|} \right)$$

とし、各文 i について類似度が最大の組み合わせ

バッチ処理とは、テープやカードに記憶させたプログラムをひとまとめにしてコンピュータに処理させるものです。



在宅勤務とは、家に居ながら仕事をするをいいます。

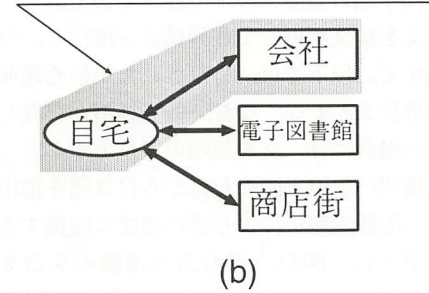


図5 手法2の処理例

わせ (f_{k^*}, s_j^i) を選ぶ。

- (4) 図から得たパス f_{k^*} が図のどの部分を表現するものかを解析し、文 i を図の部分に対応付ける。

処理例を図5に示す。図5(a)では、「カードリーダー」が省略され、また図の「ホストコンピュータ」が文では「コンピュータ」と言い替えられている。図5(b)では、「在宅勤務」など図には存在しない単語が文に現れている。手法2では、いずれの場合にも正しく対応付けがなされた。

3 手法3：単語照合と構文解析に基づく対応付け

手法2では、意味ネットを用いることにより柔軟な対応付けが可能であるが、図や文に

表現されている概念、概念間の関係が意味ネット中に存在しない場合に問題が生じる。具体的には、技術文書に頻出する専門用語（多くは複合語）への対応が問題となる。また、技術文書では、並列構造を持つ文が図の複数の箇所を説明している場合もあり、文単位の対応付けでは精度に限界がある。そこで、手法3として、複合語を考慮した単語照合、並列構造の抽出による文の分解を用いた対応付けを行った。

処理手順の概要は以下の通りである。

- (1) 文を構文解析して並列構造を抽出し、分割する。以下では、分割された単位を説明の単位 i とする。なお、並列構造が存在しない場合には、文を説明の単位とする。
- (2) 説明の単位と図の双方から自立語を抽出し、形態素解析により語の接続に変換する。以下では、図から得た語の接続の集合を $F = \{f \mid f = /w_1^f / \dots / w_n^f /\}$ 、説明の単位 i から得た語の接続の集合を $T = \{t \mid t = /w_1^t / \dots / w_n^t /\}$ とする。ここで w_i^f 、 w_j^t は単語である。
- (3) 説明の単位 i に対応する以下の集合

$$M_i = \{c \mid c \in F \text{ かつ } \exists t \in T \text{ match}(c, t)\}$$

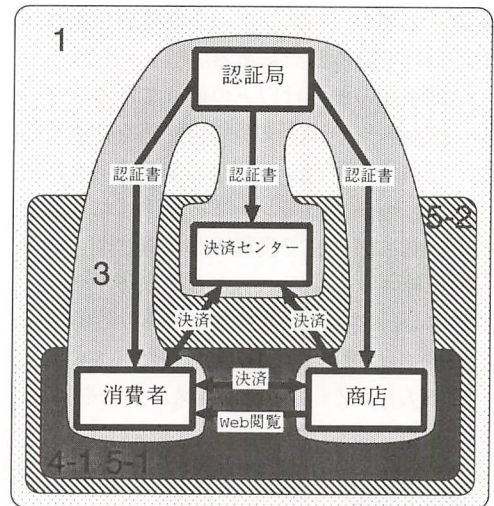
を得る。ここで、 $\text{match}(c, t)$ は、 c が t の部分列あるいはその逆のときに成り立つ述語である。同じ t に複数の c が対応付く場合には、最長のものを選ぶ。

- (4) M_i に基づいて図の部分に説明の単位 i を対応付ける。

処理例を図6に示す。図6(a)に示すように、入力文の4と5が並列構造により2つに分解されている。図6(b)に、説明の単位に対応する図の部分を示す。

1. 先に述べたように EC は現実世界の経済活動をモデルとした消費者、商店、決済センター（または銀行）のほかに、認証局を加えた4つの構成要素でとらえることができる。
2. 電子決済の方式にはいくつかのバリエーションがあり、一元的にはいえないが、大まかな動きは以下のようになりうる。
3. 認証局は EC の参加者（この場合は消費者、商店、決済センター）の社会的、経済的な信用確認をあらかじめ行なって、認証書を発行しておく。
- 4-1. 消費者はインターネット経由で商店を訪れ、
- 4-2. Web で商品情報の閲覧を行う。
- 5-1. 決済処理は決済の種類によって流れが異なるが、例えば、MONDEX のような電子現金の場合、消費者と商店間の二者間決済となり、
- 5-2. クレジットカード決済である SET プロトコルでは消費者と商店と決済センターの三者間決済となる。
6. なお、認証書による相手確認は決済処理の中で自動的に行なわれることが多い。

(a)



2: 決済 4-2: Web 閲覧
6: Web 閲覧の関係以外

(b)

図6 手法3の処理例

4 手法4：単語の出現密度に基づく対応付け

以上の手法1～3では、図に対応付ける文はすべて図を説明していることが前提条件となっている。このため、一般の文書を対象としてこれらの手法を適用するためには、文章から図を説明している部分を取り出す必要がある。手法4は、黒橋らによる語の重要箇所を特定する手法²⁾を上記の目的のために変更・適用したものである。

処理手順の概要は以下の通りである。

- (1) 図のラベルとキャプションを形態素解析し、名詞を取り出す。以下、取り出された名詞をキーワードと呼ぶ。
- (2) 文章を形態素解析し、形態素の列に変換する。
- (3) 出現位置 i の形態素に対して

$$a(i) = \begin{cases} 1 & \text{キーワードの場合} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases}$$

とし、出現密度 $d(i)$ を以下のように定める。

$$d(i) = \sum_{l=-W/2}^{W/2} h(l) \cdot a(i-l)$$

ここで、 $h(l)$ は窓幅 W のハニング窓関数

$$h(l) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos 2\pi \frac{l}{W} \right) \quad (|l| \leq W/2)$$

である。

- (4) $d(i) \geq T_h \cdot \max_i d(i)$ なる形態素を含む文を図に対応付ける。ここで T_h は閾値である。

出現密度の例を図7に示す。また、5つの文書に対する実験結果を図8に示す。この結果は、窓幅 W を100～600、閾値を0.5～0.9に変化させたときの再現率、適合率を表すものである。例えば、閾値0.7、窓幅 $W=400$ では、対応付けられた文の55%が正解であり（適合率）、全正解文の70%を正しく対応付けることができた（再現率）。

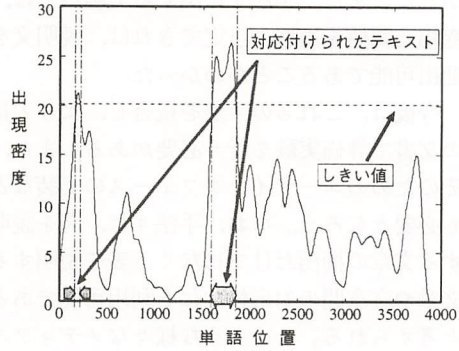


図7 出現密度の例

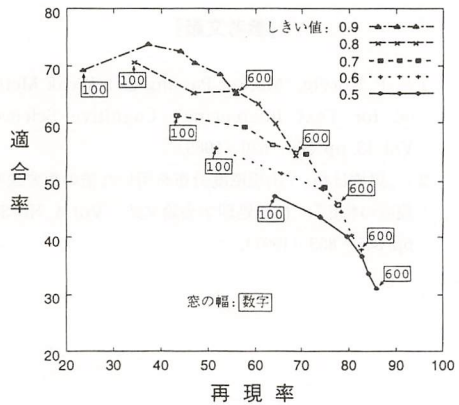


図8 手法4の実験結果

[研究の今後の方向、課題]

本研究では、手法1～3により概念図の一部と説明文の対応付け、手法4により概念図に対する説明文の抽出を試みた。手法1～3の実験結果等から、大量かつ詳細な知識を要求する手法1, 2は精密な対応付けが可能である反面、適用範囲が限られること、単語照合という単純な手法を用いる手法3でも、技術文書などの専門用語が用いられる文書では、ある程度の対応付けが可能であることがわ

かった。また、手法4に関する実験からは、窓幅と閾値を適切に設定できれば、説明文を抽出可能であることがわかった。

今後は、これらの手法を統合し、より大量の文書で評価実験を行う必要がある。また、そのためのユーザインタフェースの実装など必要となろう。なお、手法4は、図を説明する文章の抽出だけではなく、表を説明する文章や文章間の対応付けにも利用可能であると考えられる。このような様々なメディアの対応付けに手法4を利用することも今後の重要な課題である。

[参考文献]

- 1) P. Norvig, "Marker Passing as a Weak Method for Text Inferencing", *Cognitive Science*, Vol. 13, pp. 569-620 (1989).
- 2) 黒橋ほか, "出現密度分布を用いた語の重要説明箇所の特定", *情報処理学会論文誌*, Vol. 4, No. 38, pp. 845-853 (1997).

[成果の発表, 論文等]

- 1) 谷 忠明, 黄瀬浩一, 高松 忍, 福永邦雄, "解釈の曖昧性を考慮した図と説明テキストの統合理解", *電気学会論文誌 C*, Vol. 116-C, No. 11, pp. 1202-1210 (1996).
- 2) 谷 忠明, 黄瀬浩一, 高松 忍, "解釈の曖昧性を考慮した図とテキストの統合理解", 1996年電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-74 (1996).
- 3) 野久仁志, 藤野亮之, 黄瀬浩一, "マーカパッシングを利用した概念図と説明文の対応付け", 1997年電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-5-6 (1997).
- 4) 黄瀬浩一, 小島篤博, 福永邦雄, "画像・図と言語の統合", *システム / 制御 / 情報*, Vol. 41, No. 12, pp. 520-527 (1997).
- 5) 藤野亮之, 野久仁志, 黄瀬浩一, 松本啓之亮, "概念図と説明テキストの対応付け", *情報処理学会第56回全国大会講演論文集*, 1Y-3 (1998).
- 6) 水野浩之, 黄瀬浩一, 松本啓之亮, "単語の出現密度分布を用いた図表と説明テキストの対応付け", *第57回情報処理学会全国大会講演論文集*, 4V-1 (1998).

情報の 3 次元可視化・操作手法に関する研究

A Study on 3-D Information Visualization and Handling

961010

研究代表者

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 助教授

竹 村 治 雄

共同研究者

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学センター 助 手

片 山 喜 章

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 助 手

岩 佐 英 彦

[研究の目的]

計算機のハードウェア・ソフトウェアの進歩によって、従来の文字に基づくユーザインタフェースは、ビットマップディスプレイ / ポインティングデバイスを用いた GUI (Graphical User Interface) へと発展し、GUI の普及は計算機の普及に大きく貢献した。一方、最近、人工現実感、あるいは仮想現実 (Virtual Reality-VR) と呼ばれる、計算機により生成される仮想の環境をあたかも実在のものでように利用者に提示し、この仮想環境に没入し、直接この仮想環境に働きかけることを可能にするインタフェースが注目を集めている。このような環境では、利用者の空間知覚の能力を活かして、非常に効率よく種々の情報の提示 / 操作が行えることが知られている。

本研究は、従来型の 2 次元 GUI と仮想現実で用いられる 3 次元的な情報提示手法を、従来の GUI との整合性を保ちつつ融合し、人間のもつ空間知覚能力を活かした情報の表

示、検索、加工を可能とする 3 次元 GUI の実現のための方法論の確立を目指すものである。

[研究の内容、成果]

本研究では、具体的には次の 3 つのサブテーマを設定し研究を進めた。それらは、

- 各種 3 次元提示手法の有効性に関する研究、
- 頭部搭載型表示装置 (Head Mounted Display-HMD) と VDT (Visual Display Terminal) を組み合わせた情報提示手法の提案と評価、
- 3 次元インタフェース実現のためのソフトウェアライブラリ 3D ユーザインタフェースツールキットの構築、

である。

以下それぞれの研究の内容と成果について簡単に紹介する。

1. 3 次元提示手法の有効性に関する研究

ここでは、順序付き階層構造の 3 次元視覚

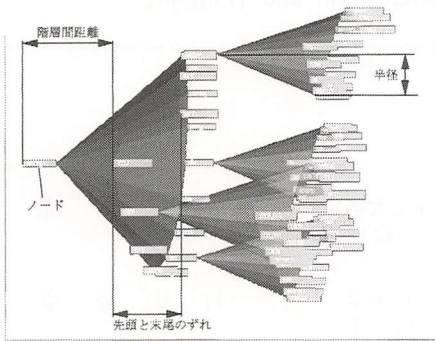


図1 Spiral Tree による表示例

化手法である Cone Tree 及び Spiral Tree において、運動立体視、両眼立体視の2種類の3次元提示手法が、利用者の情報操作に与える影響についての比較実験を実施した。

Spiral Tree は図1に示すように Cone Tree で円錐の底面の円周上に並ぶ子ノードを螺旋上に配置することで、ノードの重なりを防ぐとともに、子ノードに順序がある場合、順序関係を明示できるようにしたものである。

実施した実験は、

1. Cone Tree を用いた情報探索タスクにおける、運動/両眼立体視の比較実験、
2. Spiral Tree を用いた情報探索タスクにおける、運動/両眼立体視の比較実験、
3. Spiral Tree を用いた相違点指摘タスクにおける、運動/両眼立体視の比較実験、

の3種類である。

ここで、情報探索タスクは、ある階層構造から決められたパスを探索し、その葉ノードを見つけるタスクである。また、相違点指摘タスクとは、二つの同時に提示される Spiral Tree をブラウジングし、階層構造の

相違点を発見するタスクである。前者がある決められたパスを順に探索するのに対して、後者は相違点の発見のために階層構造全体を見渡す必要がある。それぞれの実験の結果、以下の知見が得られた。

- Cone Tree を用いた実験では、運動立体視を用いた効果が統計的に有意であり、情報探索時間が10%程度短縮されることがわかった。しかし、両眼立体視単独では有意な差は見られなかった。一方、両者を組み合わせた3次元表示手法はもっとも優れており15%程度情報探索時間が短縮されることが明らかになった。
- Spiral Tree を用いた実験では、Cone Tree の場合と異なり、立体表示の差による情報探索時間には有意な差は見られなかった。これは、Spiral Tree の表示手法自体が Cone Tree と比較してノードの重なりが少ない表示方法であり、運動立体視の効果が現われにくいと考えられる。
- 相違点指摘タスクに関しては、運動立体視が逆にタスク達成時間を増大させる傾向が見られた。これは、運動立体視を提供することで表示されている階層構造の見え方が観察者の頭の動きに追従して変化し、かえって階層構造全体の把握を困難にするためと考えられる。

これらの実験の結果は、両眼立体視や運動立体視を用いた表示を採用する場合には、個別により慎重な評価を必要とすることを示唆するものであると考えられる。

2. HMD と CRT の組み合わせによる情報提示手法の提案と評価

HMD は適切な位置検出装置を用いることで、視点追従を伴った立体表示が可能である。このため、周囲を見回すなど広範な空間に情

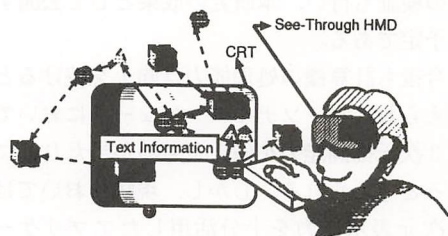


図2 CRTとHMDによる重畳表示環境

報提示が可能である。ところが表示解像度はHMDに用いられる小型液晶表示素子の性能で決まり、現状ではCRTなどのVDTに比較すると劣る。そこで、光学的シースルー可能なHMDとCRTを組み合わせることで、解像度を必要とする表示はCRTに表示し、周辺視の部分をHMDに表示する手法(図2)を提案し、この表示手法の評価実験を実施した。その結果、提案手法が表示領域の拡大には効果的であるが、HMDとCRTの表示の切り替え部分(境界領域)に改善の余地があることが明らかとなった。今後正確な重畳表示のための位置合わせ手法などを検討することで、提案手法の利点を活かせるものと考えられる。

3. 3Dユーザインタフェースツールキットの構築

これまでの研究で得られた知見を基に、3次元ユーザインタフェースを容易に構築するためのライブラリ群である「3次元インタフェースツールキット」を構築した。このインタフェースツールキットの特徴は、

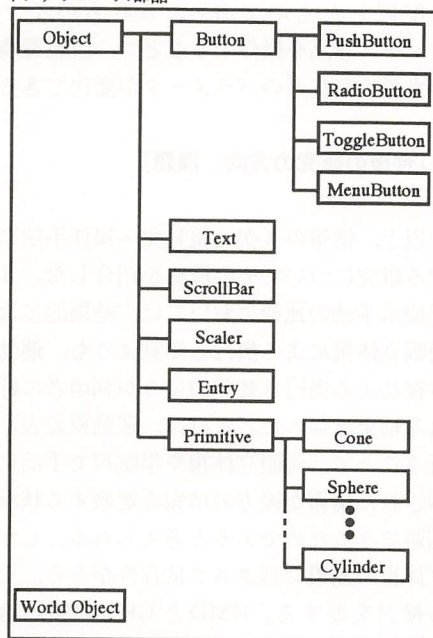
1. 種々の3次元入出力デバイスを利用者が自由に選択できるよう、これらの入出力装置を仮想化し、プログラマは入出力装置の違いを気にすることなく利用可能とした、

2. 2次元GUIで用いられるメニュー、ボタン、スライダーなどのインタフェース部品を3次元化し提供した、
3. ライブラリはC++のクラスライブラリとして提供され、オブジェクト指向のプログラミングが可能である、

などである。

実際に作成したクラス構成を図3に示す。また、本ライブラリを用いて作成したプログラムの例を図4に示す。図4は、箱庭的仮想世界に3次元インタフェース部品である、ス

インタフェース部品



入力・表示装置制御部

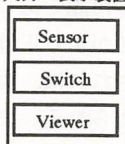


図3 ツールキットのクラス構成

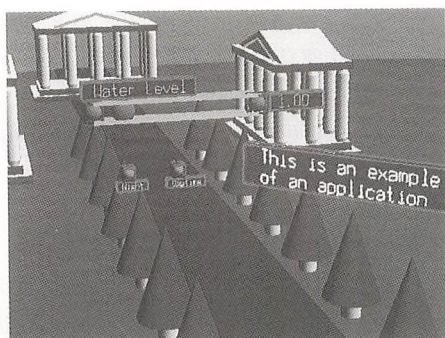


図4 プログラミング例

ケーラ、ダイアログボックス、ラジオボタンを配置したものであり、これらのインタフェース部品を操作することで、仮想環境内の光源設定などのパラメータが変化できる。

[今後の研究の方向、課題]

以上、情報の3次元視覚化・操作手法に関する研究についてその概略を紹介した。3次元提示手法の比較においては、結果的には、両眼立体視による奥行き知覚よりも、運動立体視による奥行き知覚のほうが利用者に好まれる結果となった。これは、運動視差表示を行うことで、両眼立体視や単眼視で手前に表示された情報が後方の情報を遮蔽する状況を回避できるためであると考えられる。しかし、立体視の効果にはタスク依存性があり、更なる検討を要する。HMDとCRTの組み合わせによる重畳表示は、CRTの表示面の大きさに制約を受けない情報提示が可能であり、両者のスクリーンの位置合わせがより正確に行え、さらにHMDが小型化されれば、実用的な情報提示手法であると考えられる。また、3Dユーザインタフェースツールキットは今後も機能を追加するとともに、有効性につい

での検証も行い、本研究の成果として公開する予定である。

今後も計算機の処理能力は向上を続けると考えられ、パーソナルコンピュータにおいても3次元描画能力を備えたものが当たり前になると考えられる。しかし、現状においては3次元表示能力を十分活用したアプリケーションソフトウェアは少ない。3次元GUIに関する知見が不足していることも一因であろう。3次元GUIの構築を補助するツールキットが広く普及する必要もあると考えられる。また、デスクトップメタファに変わる3次元GUIに適したメタファが必要である。本研究の成果をもとに、これらの方面での更なる検討を実施する予定である。

[成果の発表、論文等]

- 1) T. Okuma, H. Takemura, Y. Katayama, H. Iwasa, and N. Yokoya: "3D visualization of hierarchical ordered information: Spiral Trees", Proc. 1st Int. Conf. on Applied Ergonomics (ICAE '96), pp. 668-671, Istanbul, Turkey, May 1996.
- 2) 大隈隆史, 竹村治雄, 片山喜章, 岩佐英彦, 横矢直和: "三次元視覚化手法 Spiral Tree による情報のブラウジング支援", 第40回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, No. 2011, May 1996.
- 3) 清川 清, 世利彦彦, 竹村治雄, 岩佐英彦, 横矢直和: "仮想物体組み立て操作における表示装置による影響の検討", テレビジョン学会ヒューマンインフォメーション研究会, テレビ学技報 HIR 96-87, October 1996.
- 4) 大隈隆史, 竹村治雄, 岩佐英彦, 片山喜章, 横矢直和: "三次元視覚化手法 Spiral Tree による仮想空間内での情報ブラウジング", 第39回自動制御連合講演会講演論文集, No. 3035, October 1996.
- 5) 大隈隆史, 竹村治雄, 岩佐英彦, 横矢直和: "重畳表示による作業領域拡大の実験評価", 電子情報

通信学会画像工学研究会, 信学技報 IE 96-109, February 1997.

- 6) N. Hiraki, K. Kiyokawa, H. Takemura, and N. Yokoya: "Imposing geometric constraints on virtual objects within an immersive modeler", Proc. 7th Int. Conf. on Artificial Reality and Tele-Existence (ICAT '97), pp. 178-183, Tokyo, Japan, December 1997.

- 7) 世利至彦, 大隈隆史, 清川 清, 竹村治雄, 横矢直和: "汎用 3 次元ユーザインタフェースツールキットの実装", 電子情報通信学会画像工学研究会, 信学技報 IE 97-157, February 1998.

- 8) 大隈隆史, 竹村治雄, 片山喜章, 岩佐英彦, 横矢直和: "Spiral Tree: 順序付き階層構造の三次元視覚化手法", 電子情報通信学会論文誌 (A), Vol. J81-A, No. 2, pp. 280-288, February 1998.

宇宙科学における人体生理機能の計測装置の開発

Development of Apparatus to Measure Human Physiological Factors on Space Sciences

961018

研究代表者 国立国際医療センター脳神経外科 厚生技官 三井石根

共同研究者 東京大学医学部講師 鈴木洋児

大阪医科大学整形外科講師 米澤卓実

NASA エイムス研究所 主任研究員 アラン・R・
ハーゲンス

[研究の目的]

人類は重力に逆らい直立して生活する身体資源を有しており、生理的メカニズムの全てはその機能を維持するように適応している。長期臥床（ベッドレスト）はこの適応能力を低下させる刺激となり、その状態が長期間継続するともはやこれらの能力は元の水準に回復できず、遂には“寝たきり状態”となる。健康管理学的な視点からすれば、高齢化社会が加速的に進行している我が国にあって、今後益々多くの高齢者が寝たきり状態に移行すると危惧される。他の先進諸国に比べ我が国で寝たきり高齢者が極めて多いのは、完全な安静臥床を必要としない老人患者に対しても、しばしば身体運動を欠如した無為臥床に暴露させてしまうからである。これは我が国の高齢者に対する看護力や介護力の不足にもよるが、根本には、寝たきりの身体不活動が本来いかに有害であるかを知らせ、そうならない為にはどのような運動プログラムを処方すれば

良いか、という具体的なマニュアルが無いためである。これは長期間のベッドレストが身体に及ぼす影響に関して、基礎的な知見に乏しいことにも由来する。また高齢化社会への進行の一方で、我が国は高度情報化社会にも移行し、デスクワーク中心の生活様式が一般化した結果、広く一般成人にも身体不活動型人間が急増している。ベッドレスト条件は身体不活動の典型的な実験モデルであり、これから得られる知見は身体不活動が健康に及ぼす影響を評価するための重要な指標を示唆するであろう。この領域では、従来筋骨格系あるいは体循環系に関する研究が中心であって、中枢神経系、特に脳血流や頭蓋内圧、脊髄、脊椎椎間板などに関する知見は皆無に等しい。本研究では、長期臥床と身体不活動とが中枢神経系の機能に如何なる影響を与え、それらが中枢神経系にもたらす生理学的な不利益性を検討し、その解決につながる試みを探った。

一方で長期無為臥床（身体不活動）のモデルは、宇宙飛行などによる人体の無重力環境

への暴露にも共通した要素を持つ。高齢者の長期臥床と宇宙飛行という、一見かけ離れた現象のように思われがちな両者ではあるが、過去に旧ソ連の宇宙飛行士が地球帰還後に重力の再負荷による骨折（一種の圧迫骨折）を起こしたことはよく知られている事実である。現在では、無重力環境における体力と生理機能の維持のためにはある種の運動が不可欠であるとされ、来るべき国際宇宙ステーション時代の到来に向けて、NASA では宇宙での長期滞在に耐えうる最適な運動プログラムを提唱すべく研究が進められている。

寝たきりとなった高齢者に対する、体力と生理機能維持のためのベッド上での運動プログラムが未だ確立されていない中、むしろこの分野においては、宇宙医学領域からのアプローチの方が積極的に行われている現状に鑑み、従来から共同研究を続けてきた NASA Ames Research Center（米国航空宇宙局エイムス研究所）において、長期臥床モデルにおける中枢神経系への影響に関する研究を行ったので、ここに報告する。

実験は脊椎に関するものと、脳血流及び頭蓋内圧に関するものに分けて行い、長期臥床における脳血流の変化は、東京大学医学部保健学科の主催するベッドレストスタディーに参加する中で実施した。実験にはこの研究のために我々が新たに開発した MRI-compatible Spinal Compression Apparatus を用い、さらに非侵襲的頭蓋内圧測定装置の開発にも及んだ。

[研究の内容、成果]

1. 脊椎と椎間板に関する研究

MRI (Magnetic Resonance Imaging) を用い、重力が脊椎の形態に及ぼす影響につ

いて調べた。通常、立位では腰部に体重のおよそ 50% の重力負荷が掛かっているが、MRI による脊椎撮影の際には MRI の中で水平仰臥位をとるため、この体位で撮影された腰椎は垂直方向への重力負荷からは完全に解放された状態を表わす。従って、この方法で得られた腰椎の MRI 画像には、日常生活で示す腰椎本来の形態が正確に再現されているとは言えない。これは、診療の場においても、椎間板ヘルニアを始めとした各種脊椎疾患の診断の際に、実際の状態よりも重力負荷の要素の分を差し引いた形、すなわち体重からの圧迫が軽減された状態での脊椎の形態を見ていることとなり、各疾患の正確な情報を反映してはいない可能性がある。今までのところ、この問題を解決する方法が提唱されたことはなく、MRI による脊椎疾患の診断における盲点とも考えられた。今回の実験に際して、我々は重力負荷による脊椎への影響を調べるという観点から、MRI の中で脊椎に本来掛かるべき重力相当の負荷を加える必要があった。そこで実験に先立ち、新たに MRI に対応した脊椎圧迫装置 (MRI-compatible Spinal Compression Apparatus) を開発した。これを装着して MRI の中に入った被験者の脊椎に、体重の 25% から 75% 相当までの負荷を加え、その形態学的な変化を調べた。これにより、逆に重力負荷から解放された長期臥床の状態が、脊椎に如何なる形態学的影響を及ぼしているのかを統計的に解析した。

1) MRI 対応型脊椎圧迫装置 (MRI-compatible Spinal Compression Apparatus) の開発

MRI の中では金属の使用が不可能なので、その素材をすべて非金属に統一した。このシステムは肩パッド、長さの調節により加える負荷を自在に調整できるバックルを備えたストラップ、実際に負荷に相当する力を生み出

すバンジーコード、木製のフットプレートから構成されている (Fig. 1)。ストラップの長さの調整により、体重の0%から100%までの負荷を脊椎全長にわたって加えることが可能となる。通常 MRI 装置に入る前に装着

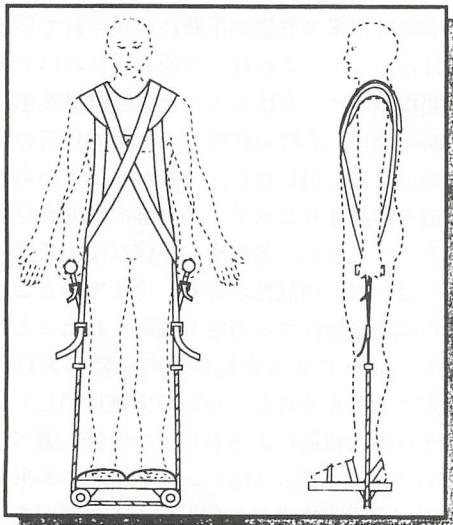


Fig. 1 The apparatus configured for whole-body compression. Optional handles allow relief of surface pressure on shoulders

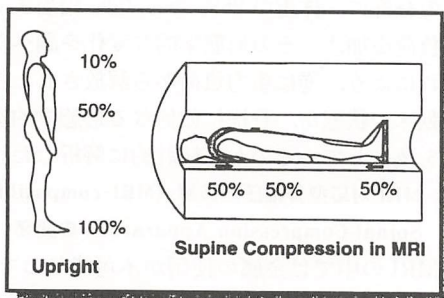


Fig. 2 Percentage body weight (BW) locally supported during upright posture (left) and supine compression with harness in MRI (right)

し、あとは必要に応じてストラップの長さを変えるだけで、得るべき負荷を加えることができる (Fig. 2)。これまでにこのようなハーネスタイプの装置は、そのアイデアも含めて提出されたことがなく、この装置の製作、使用ともに全く初めての試みである。

2) MRI 中での脊椎圧迫

33 歳から 52 歳、平均体重 72 kg の成人男性 3 人を被験者に選んだ。実験の実施に際しては、各被験者から、Stanford 大学と NASA の倫理委員会の規定に基づくインフォームドコンセントを得た。MRI は General Electric 社製 Signa (1.5 T magnet) を用いた。被験者に MRI-compatible Spinal Compression Apparatus を装着し、先ず何の負荷も掛けない状態で上位胸椎から腰椎全長に至る撮影 (T1 強調画像及び T2 強調画像) をおこない、これをコントロールとした。次いで、ハーネスのストラップを調節して、体重の 25%, 50%, 75% 相当の負荷を順次加えていき (75% 負荷は 2 人のみ)、その都度脊椎の MRI 撮影をおこなった。得られた画像から、各レベルの脊椎椎間板の中心位置を 3 次元的に計測して脊椎長の変化を追跡すると共に、脊椎のカーブに関する Cobb のインデックスを計算して負荷に伴う脊椎のわん曲変化を求めた。本来 Cobb の計測法は側わん (MRI で言えば coronal 成分) 角度の測定に用いられるものであるが、脊椎の前後方向 (sagittal 成分) に対する測定法と評価の方法が確立されていないため、今回の解析においてはこの方法を代用することとした。また T2 強調画像から腰椎椎間板の髄核における T2 値を測定し、髄核内の水分含有量の変化を捉えようと試みた。この種の試みはすでに一部で報告されているが、いずれも生体から取り出された椎間板の分離験体に

対しておこなった in vitro 系での実験であり、今回のように生体内の椎間板に対して負荷を加えた in vivo 系での実験は報告されていない。なお、各検査データの統計的解析に当たっては、危険率 5% 以下を有意性の判定基準とした。

被験者 3 名に対し、MRI 中でコンプレッションを加えた際の脊椎長の変化を調べた。胸椎上部については、心臓の拍動あるいは呼吸による胸廓運動のためかアーティファクトが強く現われた例があったため、胸椎中部から仙椎上端までの距離で評価した。実際には T7/T8 (第 7 第 8 胸椎椎間板) の椎間板髄核の中心位置と、L5/S1 (第 5 腰椎第 1 仙椎椎間板) のそれとの距離を測定して表示した。Fig. 3 は、脊椎長の変化をコントロールからの短縮率としてパーセント表示した。いずれも、体重当たり 50% の負荷を加えた時、すなわち立位の際に腰椎に掛かるであろう重力負荷相当分の脊椎長変化を示している。被験者のうち 2 名には体重の 75% 相

当までのコンプレッションを加えた。実際に得られた値は、負荷を加えないコントロールに対して、25% 負荷で 3.2 ± 0.8 mm (mean $\pm$ SD) の短縮、50% 負荷で 5.6 ± 1.1 mm, 75% 負荷では 6.8 ± 1.2 mm の短縮を示した。Fig. 4 から Fig. 7 には、コンプレッションによる脊椎カーブの変化を、やはり T7/T8 と L5/S1 との間において、Cobb のインデックスに基づいて示した。50% 負荷を加えた状態では、Cobb のインデックスが増大

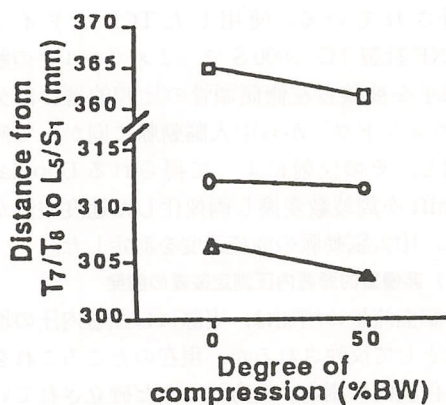


Fig. 3 Longitudinal distance between T₇/T₈ and L₅/S₁ intervertebral discs as a function of spinal compression in three subjects

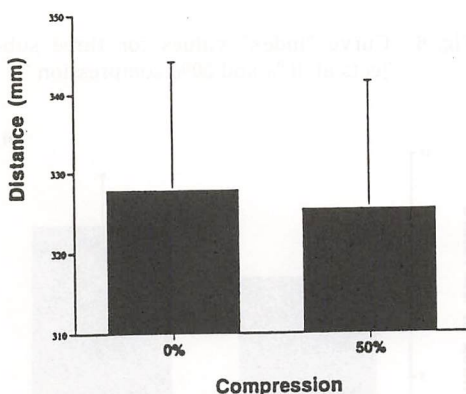


Fig. 4 Perpendicular distance between T₇/T₈ and L₅/S₁

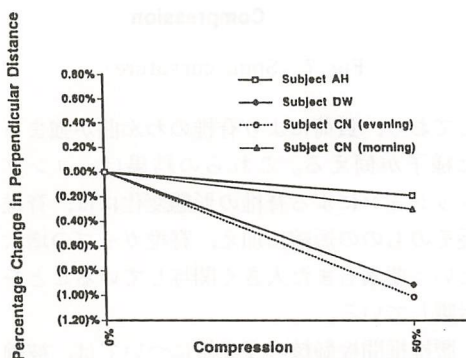


Fig. 5 Percentage change in perpendicular distance between T₇/T₈ and L₅/S₁

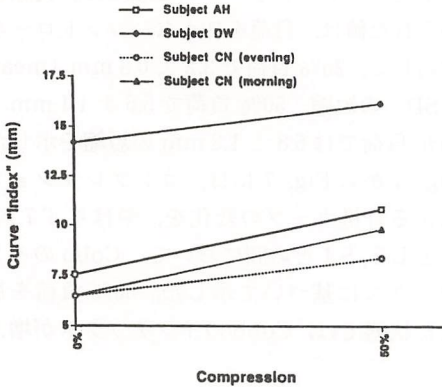


Fig. 6 Curve "index" values for three subjects at 0% and 50% compression

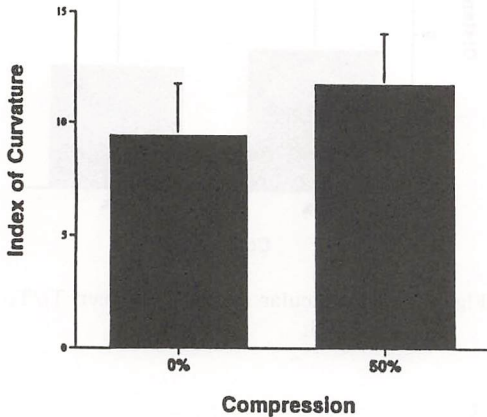


Fig. 7 Spine curvature

しており、負荷により脊椎のわん曲が強まった様子が伺える。これらの結果は、コンプレッションによる脊椎の形態変化には、脊椎長そのものの短縮に加え、脊椎カーブの増大という要素もまた大きく関与していることを示唆している。

腰椎椎間板髄核の T2 値については、被験者総数の不足と共に、各データ間のばらつきが大きく、重力負荷に伴う髄核内水分含有量

の変化の傾向を、統計的な有意差をもって検討するまでに至らなかった。

2. 脳血流と頭蓋内圧に関する研究

長期臥床時には、体循環の血行動態のみならず、その変動の影響は脳循環にも及ぶと予想される。その変化を追跡する目的で、1996年7月から8月にかけておこなわれた東京大学医学部保健学科主催による『20日間ベッドレストスタディープロジェクト』に参加した。さらに脳循環と密接に関係する頭蓋内圧について、これを非侵襲的に測定する装置の開発についても検討した。

1) ベッドレストにおける脳血流速度の測定

健常男性被験者5名に対し、20日間のベッドレスト期間において、その実施直前、実施中（7日目、14日目、20日目）、終了後3日目の5回にわたり、Transcranial Dopplar Ultrasonography（以下TCD）を用いて脳血流速度の測定をおこなった。TCDは簡便かつ非侵襲的に反復測定可能な脳血流動態の評価法として、今日では広く利用されている。使用したTCDはドイツENE社製TC-2000Sで、2メガヘルツの触探子を被験者左側側頭骨の比較的薄い部分（ウィンドウ）から中大脳動脈に向かって照射し、その反射によって得られるDopplar Shiftを周波数変換し画像化した速度波形から、中大脳動脈の血流速度を測定した。

2) 非侵襲的頭蓋内圧測定装置の開発

脳血流量の増加は、実際には頭蓋内圧の増大として反映されるが、現在のところこれを非侵襲的に測定する方法は未だ確立されていない。その試みの一つとして、耳小骨連鎖を利用して外耳腔のコンプライアンス変化を捉え、これに頭蓋内圧の変化を反映させるTMD法がある。しかしこの方法の理論的根

拠には、その大前提に脳脊髄液と内リンパ液との間に完全な交通があるとする仮定があり、しかもこの方法から得られる情報は外耳腔コンプライアンスの相対的な変化を捉えるのみで、絶対値を表わすものではないといった難点がある。今後、特に高齢者の医療の場においては、非侵襲的な医療技術の比重が高まっていくであろうと予想される中で、意識障害の機序や脳の高次機能に直接関与する頭蓋内圧を、非侵襲的に測定できる装置の開発が広く望まれている。この観点から我々は非侵襲的頭蓋内圧測定装置の新規開発に着手し、この分野における研究のみならず、その臨床面への応用も検討した。

ベッドレスト期間に入る直前の被験者5名の中大脳動脈における平均血流速度は 76.3 ± 8.6 cm/sec (mean $\pm$ SD) であり、このコントロール値は概ね成人男性の正常値に一致した。ベッドレストの進行と共にこの値は増大傾向を示し、ベッドレスト7日目では 77.2 ± 6.8 cm/sec、14日目には 89.2 ± 9.2 cm/sec と増加し、最終日20日目には 90.6 ± 8.2 cm/sec と、最高値を記録した。ベッドレスト後は再び減少に転じ、3日目には 64.8 ± 6.8 cm/sec と、コントロール値よりさらに低い値を示した。中大脳動脈の平均血流速度にはベッドレストの進行と共に明らかに増大傾向を認めたが、その傾向はベッドレスト中期（7日目から14日目）にかけて最も強く現われ、ベッドレスト初期と後期においてはさほど大きな変化を示さなかった。

従来、頭蓋骨は縫合線の閉鎖した幼年期以降にはすでに拡張する余地を残さず、非常に強固な器であると考えられてきた。したがって、骨縫合線の閉鎖する前の乳児では、頭蓋内圧の高まりに応じて頭蓋骨径も拡張するものの、すでに骨縫合線の閉鎖してしまった後

の成人においては、いくら頭蓋内圧が高まっても頭蓋骨径は決して拡張したりはしないというのが一般的な常識であった。しかし近年になってこの常識を覆す報告が散見されるに至り、成人においてもなお、頭蓋内圧の増大がわずかながらも頭蓋骨径の拡張をもたらした、したがって頭蓋内圧の変化が頭蓋骨径の変化に反映される可能性が出てきた。

我々はこの原理を利用して、頭蓋骨径のごく微少な変化を検出することにより、頭蓋内圧の変化を捉える方法を探った。新たに開発した測定装置は一種の超音波ドップラーであり、ごく微量の距離の変化を周波数変化として捉えることができる。すなわち距離の増大に伴って周波数が減少し、逆に距離が減少すると周波数が増加する。したがってこの装置では、頭蓋内圧の上昇による頭蓋骨横径の拡張が周波数の減少として計測され、頭蓋内圧の下降に伴う頭蓋骨横径の短縮は逆に周波数の増大として示される。これを用いて頭蓋内圧の変化を頭蓋骨径の変化から評価する方法の確立を検討している。

【今後の研究の方向、課題】

1. 脊椎と椎間板に関する研究

世界における成人人口の約8割が、その生涯においてなんらかの腰痛をきたすとの報告がある。この腰痛の原因としては、椎間板ヘルニアを代表とする椎間板疾患が多いと予想されるが、その椎間板ヘルニアでさえ、発生機序におけるメカニズムが十分に解明されているとは言えない。しかし人類が直立歩行を始めて以来、ヒトは脊椎の垂直方向に掛かる重力負荷から逃れることはできず、脊椎が重力から受ける影響は、人類が宿命的に背おいかんだ永遠の課題であると考えられる。

脊椎への重力負荷が腰痛を引き起こす一方で、長期臥床によっても腰痛が生じるとの報告がある。またアメリカの宇宙飛行士の6割が、飛行中の微小重力の暴露により腰痛をきたし、そのうち3割はかなり重篤な痛みを感じたという。長期臥床にしる宇宙飛行にしる、いずれも脊椎の垂直方向に掛かる重力負荷は軽減されているはずなのに、それにも関わらず腰痛をきたすということは、脊椎への過剰な負荷がその主な原因と考えられている椎間板ヘルニアにおける腰痛のメカニズムと異なる機序によるものであろうか。

脊椎の垂直方向に重力負荷が過剰に掛かる状態（すなわち椎間板ヘルニアの状態）と、重力負荷が極度に軽減される状態（すなわち長期臥床や宇宙飛行の状態）の両方において同様に腰痛の訴えが生じるとするのであれば、あるいは脊椎や椎間板には、そのバイオメカニズムにおいて最適な重力負荷環境が存在するのであって、その状態からかけ離れるのであれば正負どちらの負荷環境に傾いても、腰痛という共通の症状を呈し得るのかもしれない。脊椎と重力との関係をこの観点から問い直すことは、脊椎にとって最適な環境を探ることもつながり、一見正反対な重力環境とも思われる両者に対して共に有益な情報を与え得ると考えられる。

この研究における実験系を考える時、あまりに過大な負荷を加えることは、脊椎に非可逆的变化を与えて椎間板ヘルニアのような疾病状態を招いてしまうし、また宇宙飛行のように、重力負荷から完全に解放される機会を得ることはなかなか難しい。そこで、重力負荷を軽減させる最も簡便な手段である仰臥位において、脊椎への負荷環境を自由に設定できる方法があれば好ましいが、既存のものにそのような条件を満たす装置を見つけるこ

とはできなかった。そこで脊椎関連の研究には欠かすことのできないMRIの利用を制限することなく、脊椎に任意の圧迫を加えることのできるコンプレッションハーネスを開発する必要に迫られた。

この研究のために我々の開発したコンプレッションハーネスは、MRIのみならずCTやPET、X-ray、超音波装置など、現存するあらゆる医学的診断装置の中で用いることが可能であり、今後これを用いて脊椎関連の研究が飛躍的に進められることが期待される。また負荷の掛からないコントロールの状態では見逃しがちとなる脊椎や椎間板の微細な構造変化についても、直立した状態を再現すべく脊椎に適度なコンプレッションを加えることにより、その微細な構造変化が強調されて描出されるという利点を持つ。これは臨床医学の場で、各種脊椎疾患の診断においても大きな利益をもたらすであろう。

さらにはこのコンプレッションハーネスが治療の場にも利用されて、腰痛の軽減を図る目的に利用される可能性もある。長期臥床に伴う腰痛は、Karenらのベッドレストによる実験結果から、脊椎長の伸展に伴うものである可能性が報告されている。コンプレッションハーネスの装着が脊椎長の短縮を促すことはFig. 3から7の結果からも明らかではあるが、これは、圧迫負荷による椎間板厚の減少と脊椎わん曲の増大に起因するものと考えられる。したがって、それがはたして脊椎長の伸展に起因するものであれば、長期臥床に伴う腰痛に対してコンプレッションハーネスの適切な装着が、おそらく痛みの軽減に有効に働くであろう。もともと長期臥床を余儀なくされる高齢者にとっては、骨粗しょう症の合併など骨の脆弱性が問題となる。長期臥床を続けて骨への重力刺激を怠ることによ

り、その傾向に一層の拍車がかかることも懸念される。そのような場合にもコンプレッションハーネスを装着して重力に代わる負荷刺激に晒し、臥床したままで脊椎に持続的な等張性運動を加えることにより、骨脆弱性の進行を遅らせる助けになるかもしれない。

これはそのまま、長期宇宙滞在における宇宙飛行士の体力維持にも応用されるであろう。宇宙の微小重力環境が長期臥床に共通した要素を持つことは前にも述べたが、特に宇宙では人体のすべての方向に対して重力負荷がほぼ完全に取り除かれるため、骨量や筋量の維持もままならず、基礎体力を維持するための方法が非常に重要なテーマとなっている。このために宇宙環境に適したさまざまな運動器具が開発され、宇宙での運動プログラムもさまざまなものが提唱されてきたが、あるいはこのコンプレッションハーネスを装着しての運動プログラムやハーネスそのものが、これらの目的に利用されるかもしれない。さらには宇宙飛行士の腰痛対策に、このコンプレッションハーネスが有効に利用される可能性もある。宇宙飛行士はその宇宙滞在中に身長が4 cm から8 cm も伸びることが報告されている。彼等の腰痛がその脊椎長の伸展に起因するものであれば、コンプレッションハーネスの装着がその予防に有効であることは確実に考えられる。

2. 脳血流と頭蓋内圧に関する研究

被験者5名という限られた範囲でのデータながら、ベッドレストの進行による脳血流速度の有意な増加が明瞭に示された。それは、ベッドレスト終盤に至ってはコントロールに比べ血流速度としておよそ30%分の増加であった。TCDの測定はあくまで血流速度であり、血流量を実測するものではないが、入

射角と血管径が一定であると仮定して、血流速度の増加を血流量の増加に対応するものとして評価する場合が多い。ベッドレストの進行する過程においてもこの入射角と血管径の仮定が成り立つならば、ベッドレスト終盤には中大脳動脈を流れる血液量が、コントロールに比べて30%も増加したことを意味する。通常、脳血流量が短期間の間に30%も増加した場合、それは頭蓋内圧の急激な増大をもたらす。もし仮にこれをコントロールする機構が存在しない、あるいはその機構にながしかの破綻が生じていたとすると、脳血流の増加によってもたらされた頭蓋内圧の急激な増大は、大脳機能に致命的なダメージをもたらす。実際には脳の血管には脳血流と頭蓋内圧との間にほど良いバランスをとるオートレギュレーションという機構が存在しているため、脳血流の増加がそのまま頭蓋内圧の増大に反映されない仕組みとなっているが、長期にわたる無為臥床が、このオートレギュレーション機構になんらかの影響を与えうる可能性がある。興味深いのは、脳血流速度の増加がベッドレストの進行に伴って一律に進むのではなく、開始後7日目から14日目に至るベッドレスト中期にかけて著しい増加を示している点である。これは、自律神経反射とも関係した脳血流のオートレギュレーション機構が、ベッドレストの各時期によって異なる機序を介して作用していることの可能性を示唆する。

今回TCDを用いて血流速度を測定した中大脳動脈は、内頸動脈の延長として大脳基底核や内包を含め、前頭葉、頭頂葉、後頭葉にわたる大脳の広い領域を環流する重要な動脈である。したがってこの領域の脳血流量の増加は、一見利益があるようにも思われる。しかし前述の頭蓋内圧の問題と併せ、必ずしも

そうではないことが指摘できる。静脈にはその循環を助けるメカニズムとして静脈弁が存在している。特に四肢においてその発達が著しく、これに支障をきたせば、静脈環流に悪影響を生じる。しかし、頸部より頭側の静脈にはこの静脈弁が存在しない。したがって頭蓋内静脈の環流条件を決めているのは主に静水圧による圧差であり、この静水圧に大きく関わっているのが他ならぬ重力なのである。立位と仰臥位を比べれば、当然のこと頭部の位置エネルギーが高い立位の方が頭蓋内静水圧差は大きくなり、したがって静脈環流も容易におこなわれている。ひとたび仰臥位になればこの静脈環流が妨げられるから、仮に流れ込む動脈血の流量が増えると頭蓋内には血液が貯留する一方となり、いわゆる鬱血の状態を呈することとなる。そしてこれもまた頭蓋内圧を増大させる一因となる。仰臥位においては、脳に流入する血液量の増大を手放しでは喜べない理由がそこにある。ましてやその仰臥位が持続されて長期に至るとなれば、脳の機能に及ぼす負の影響がむしろ問題となるであろう。長期臥床においては、単純に脳血流量を増加させることが必ずしも利益とはならないことを理解し、体位による頭蓋内静脈環流の条件も考慮した上で、全体として脳の環流量そのものを増大させるような方策を考えなければならないであろう。

同様のことは、微小重力に暴露された宇宙飛行士が宇宙で経験することでもある。宇宙から報道される画面に見る宇宙飛行士達は一様に顔がむくんでいる。これはベッドレストによるものと似た条件によって、頭蓋内脳血流量が増し、頭蓋内圧も増大しているからである。地上実験で微小重力環境における循環動態を模倣する方法に、6度頭側を下げて臥床させる『6 degree head down tilt』があ

るが、これによる実験からも脳血流量の増加と頭蓋内圧の増大とが報告されている。しかし、実際に宇宙で頭蓋内圧を測定することは現在のところ不可能に近い。宇宙船内という極度に制限された環境では、侵襲的な測定方法を避けるのはもとよりであるが、頭蓋内圧を正確に測定するためには、現在のところ侵襲的な方法に頼らざるを得ないからだ。もし非侵襲的な方法によってもなお頭蓋内圧の正確な測定が可能となれば、頭蓋内環境を簡易にモニターする手段として、神経科学の領域できわめて有益な方法となることは間違いがない。頭蓋内圧から得られる情報は脳の機能維持の点から非常に重要なので、研究の領域のみならず、臨床領域においてもきわめて有用となるはずである。この必要性から、超音波ドップラーを利用した非侵襲的頭蓋内圧測定装置を開発中である。すでに原理を確立し調整段階に入っているが、この装置が完成した暁には、ベッドレストスタディーでの利用や脳神経領域の臨床への導入と共に、微小重力環境における中枢神経系の研究のため、きたるべき国際宇宙ステーション時代における宇宙での使用も視野に入れている。

[成果の発表、論文等]

- 1) Mitsui I., Ballard R.E., Wartenpaugh D.E., Schwandt D., Fechner K., Aratow M., Hargens A.R.: MRI-compatible Spinal Compression Harness. Technology 2006 Tech. Transfer Conference, Anaheim California USA, Oct. 28-31, 1996
- 2) Mitsui I., Fechner K., Hargens A.R.: Inter-vertebral disc and back pain studies using spinal compression during magnetic resonance imaging. BiOs '97 International Biomedical Optics Symposium, Feb. 8-14, 1997
- 3) Mitsui I., Fechner K., Hargens A.R.: Inter-vertebral disc and back pain studies using spi-

nal compression during magnetic resonance imaging. SPIE Proceedings Vol.2976-28, Feb. 1997

- 4) Mitsui I., Ballard R.E., Wartenpaugh D.E., Schwandt D., Fechner K., Aratow M., Hargens A.R.: Compression Harness to Study Spine Biomechanics during Weight Wearing in Supine Posture. Experimental Biology, New Orleans

Louisiana USA, April 6-9, 1997

- 5) Mitsui I., Ballard R.E., Wartenpaugh D.E., Schwandt D., Fechner K., Aratow M., Hargens A.R.: MRI-compatible Spinal Compression Harness. NASA Ames Research Center Commercial Technology Funding for 1998, Moffett Field California USA, Oct. 1, 1997

人工生体機構における神経系マンマシンインタフェース の開発とその応用研究

Development of Neural Man-Machine Interfaces and Their Applications for the Control of Artificial Organs and Prosthetic Devices

961019

研究者代表 東京大学国際・産学共同研修センター 教授 満 渕 邦 彦

共同研究者 東京大学大学院工学系研究科工学部 教授 舘 暲

国立政策研究大学院大学 教授 藤 正 巖

【研究の目的】

生体の神経系情報への直接のアクセスは、次世代のマンマシンインタフェース開発にとっては必要不可欠の手法と考えられる。本研究は、生体の神経系情報を長期間安定して直接生体から導出する手法の開発、および、この神経情報から、生体がどの器官にどのような要求を行っているかの解析を試み、その結果を用いて、実際に神経情報による外部機器の作動・制御を行う事を目的としている。

【研究の内容、成果】

1. 生体神経信号導出用電極の開発・作成とその性能評価

上記の目的に合致する生体電極として、神経再生型電極の設計、試作及び動物実験による評価実験を行い、組織学的に神経の再生を確認するとともに、再生神経からの信号計測を行った。

1-1. 神経再生型電極の設計および試作

原理： 神経再生型電極の原理、特徴は以下の通りである。原理に関しては、神経束を一旦切断し多後、断端間に多数の小孔を備えた電極を置き、この電極上の小孔を通して神経軸索を再生させると各小孔がそれぞれ独立した電極として機能し、その中に再生した神経線維の活動を記録する事ができる、というもので（図1）、この神経再生型電極は、1）電極と神経束が物理的・電氣的に強固に固定

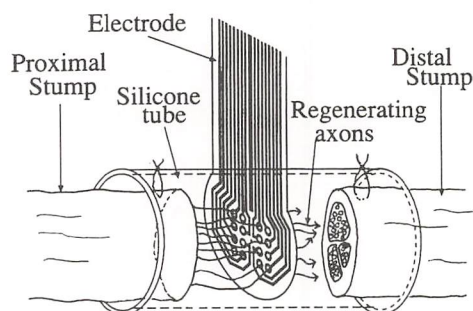


図1 神経再生型電極の概念図

されるため、長期間の安定した計測、刺激が可能であり、また、小孔の径を調整することによって、1つのチャンネルから1～数本という少数の神経線維に対する計測・刺激を行うことも可能、2) 従来の金属針電極、ガラス管電極では困難な多チャンネル入出力が可能、などという特徴を有し、1960年代の後半に原理的な提案がなされて以来、主にシリコン基板上で開発が行われてきた。

本研究では、これまで主にシリコン基板上で開発されてきたこの神経再生型電極を、フレキシブル回路基板製造技術を利用してポリイミドフィルム基板上に製作し、これによって、従来に比べて非常に簡易な製造法により、生体適合性にも優れ、より柔軟で長期の埋め込みに適した神経再生型電極の開発とその多チャンネル化を行う事を目指した。

電極の構造： 試作した電極の構造を図2に示す。電極はフィルム状の電極部とシリコンチューブでできた結合器部より構成され、埋め込み時、切断した神経束の両断端は、チューブの両端から差し込んでチューブと縫

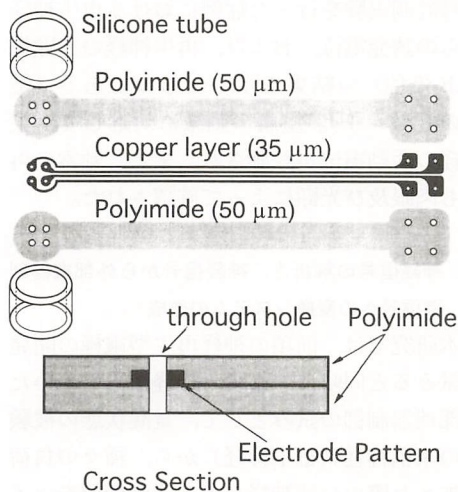


図2 試作した神経再生型電極の構造

合する。チューブの中央部は（電極孔を持つ）隔壁で仕切られており、この隔壁にアレイ状に開存させた小孔が個々の電極となっている。今回は、孔数が1個（孔径2mm）、4個（孔径300μm）、16個（孔径約100μm）の3種類の電極を試作したが、ケーブル部分には組織との癒着性の良好なポリエステルのベルアを巻き、コネクタ部が皮膚直下になるように全体を埋め込み、計測、刺激を行なうときのみ切開してフレキシブル回路基板用のコネクタを通じて、生体アンプへのケーブルと接続するようにセットした。

電極材料としては、電極部の基板には、生体適合性、柔軟性、再生を阻害しない厚み、絶縁性、加工性などを考慮して、ポリイミドを使用し、電極自体は、ポリイミドの薄いフィルム（厚さ50μm）に電極金属のパターン（厚さ35μm）がはさみ込まれた3層構造とした。この電極金属部に関しては、今回はエッチングによる加工性の容易さから、銅を使用した。銅の神経毒性を考慮し、穴開け加工後に、電極先端に電解金めっきを施した。完成した電極の写真を図3に示す。

1-2. 動物実験による電極の性能評価

製作した電極をラットの坐骨神経の切断断端間に一定期間埋め込んだ後、信号計測実験を行った。まず、ペントバルビタール麻酔下においてラットの坐骨神経を切断し、両断端を2mm程度の断端間距離において製作した電極のシリコンチューブの両端に差し入れ、10-0ナイロン糸にてそれぞれ1針ずつ縫合固定し、コネクタ部分を含む全てを皮膚下に埋め込んだ。この埋め込みを行ったラットを用いて、手術1～2か月後に、ペントバルビタール麻酔下において信号計測実験を行い、電極の性能に関する評価を行った。切断後再生させた神経の支配する領域（膝など）

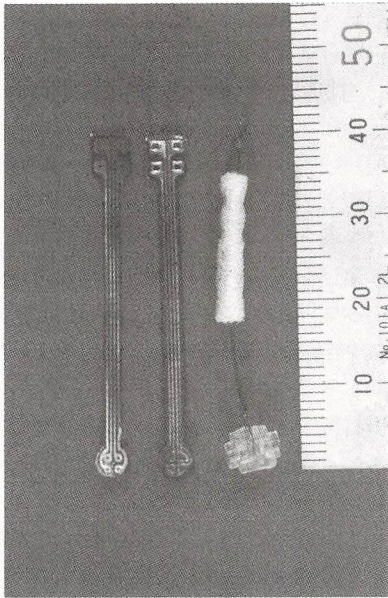


図3 今回試作した神経再生型電極

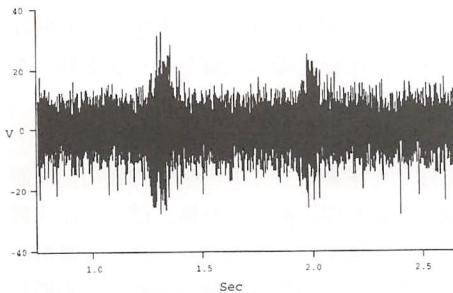


図4 埋め込み62日後に、再生させた神経の支配領域の皮膚に接触刺激を加えた際に、電極から記録された誘発電位

の皮膚に、接触刺激、あるいは電気刺激を加え、埋め込んだ電極からこれに対応した神経信号の検出を行った。また、その後、埋め込んだ電極部を露出させ、肉眼による神経再生の確認と、この再生神経組織の光学顕微鏡を用いた組織学的検討を加えた。

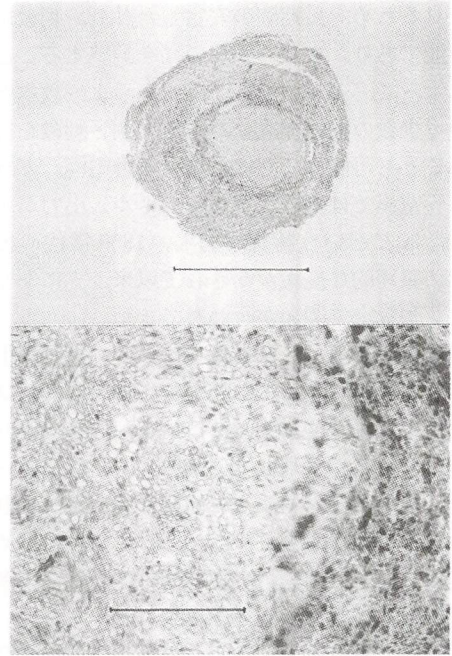


図5 埋め込んだ電極（孔）部における再生神経の組織の光学顕微鏡像（KB染色・写真中のバーは1mm）

図4、および、図5は埋め込み62日後に信号計測実験を行った症例における再生神経からの誘発電位、および、再生神経の光顕像（KB染色）の結果を示したものである（電極の孔数=1）。皮膚の刺激に対応して再生神経の活動電位が計測され、また、軸索の再生も肉眼及び光顕によって確認された。

2. 神経信号の解析と、神経信号から外部機器制御信号への変換システムの作成

本研究では、前項の神経再生型電極の開発を試みると同時に、まず、神経信号を用いた外部機器制御の試みとして、覚醒状態の被験者の末梢神経（正中神経）から、種々の負荷を加えた際の交感神経などの活動情報をマイクログラフ法を用いて計測し、神経

信号（インパルス列）の有する意味の解読を試み、この情報を用いて人工心臓の駆動条件、或いは、（人工気候室における）外部温熱環境を最適に制御するシステムの作成を試みた。マイクロニューログラム法はタングステンの非常に細い針電極を低侵襲的に経皮的に直接神経に刺入するもので、固定や記録可能なチャンネル数の問題で長期の実用に用いる事は難しいが、覚醒状態の生体からの神経信号の記録ができ、単一神経線維からの信号計測や多チャンネルの計測も可能、というメリットを有している。

本研究では、計測・同定の容易さから、外部機器制御に用いる神経活動としては皮膚交感神経活動（SSNA）を用いた。皮膚交感神経を構成している神経線維の多くは血管運動神経、発汗神経の線維であり、安静時におけるこれらのパルス数の直流成分は、温熱環境・温熱感などと密接な関連を有し、前者（血管運動神経）では、高温では神経活動は抑制され、温度の低下と共にパルス数が増加するのに対し、後者（発汗神経）では逆に、低温では神経活動が抑制され、温度がある程度上昇すると急速に活動は活性化される。また、前者（血管運動神経）のパルス数は、機械的・精神的ストレスなどによって急性的に増加し、時間遅れを伴って、末梢血管の収縮・血圧の上昇を来すことが報告されており、我々も同様の実験を行い、これら従来の報告と同様の結果を確認した。マイクロニューログラム法では、一般的に数本～数十本の神経線維の複合電位が記録されるために、運動神経、発汗神経の活動を分離して記録する事は容易ではないが、本実験では、出来る限り血管運動神経のみの活動を記録しようように、電極の位置の調節を試みた。

3. 生体神経信号による外部機器の制御とその有用性の確認

3-1. 皮膚交感神経活動を用いた人工心臓最適制御の試み

実験系を図6に示す。実験は電磁シールドルーム内で健康なボランティアを用い、神経活動の記録はマイクロニューログラム法を用いて行った。被験者を安楽椅子にリラックスした体位で腰掛けさせ、この覚醒状態の被験者の正中神経に経皮的にタングステンマイクロ針電極を刺入し、皮膚交感神経線維にあたった位置で電極を固定し、SSNAの記録を行い、同時に、この神経活動を記録している神経線維が支配する領域で、非侵襲的の血圧測定装置を用いた指動脈圧の測定と、レーザードップラー血流測定装置を用いた皮膚血流の測定も行った。種々の負荷（皮膚に対する電気刺激・ホワイトノイズによる不快聴覚刺激など）を被験者に加えた際のSSNAのパルス数の変化と、血圧・皮膚血流などの変化、およびその位相の遅れから、SSNAの変動に伴う血管活動の反応の予測を求めるア

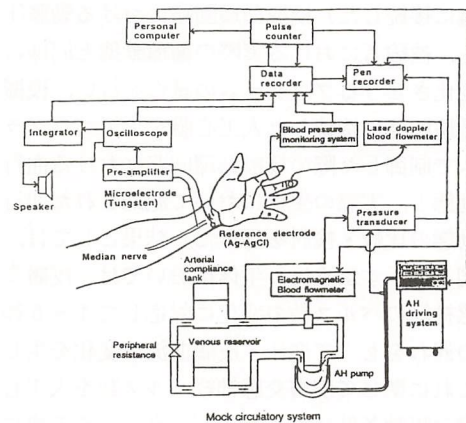


図6 皮膚交感神経活動を用いた人工心臓最適制御の実験系のダイアグラム

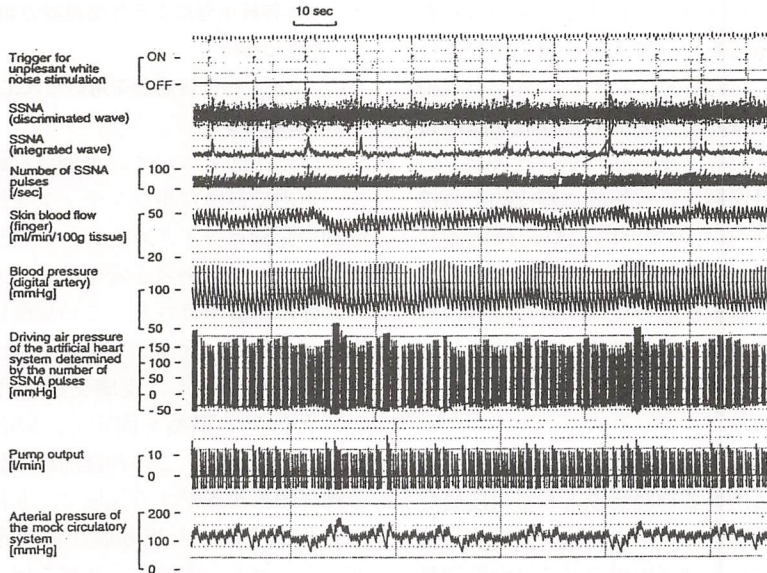


図7 被験者に繰り返すホワイトノイズ不快聴覚刺激を与えた際の、被験者の1) 皮膚交感神経活動、2) 指動脈圧、3) 皮膚血流、および、これを再現するように制御した4) 人工心臓の駆動条件、および5) これに接続した模擬循環装置の動脈圧を示す

ルゴリズムについて検討を行った。また、その結果から、皮膚交感神経活動のパルス数に対応して駆動装置の拍動数・駆動陽圧・陰圧を変化させ、人工心臓拍出量および（人工心臓に接続した）模擬循環回路における動脈圧を、被験者における実際の循環動態と同様に变化させるプログラムの試作を行い、模擬循環回路に接続した人工心臓をこのプログラムで制御した際の模擬循環回路における血行動態と、実際の生体において記録された血行動態の比較・検討を行った。結果としては、図7に示すように、生体においては、皮膚交感神経のパルス数の変化に対応して4～5秒の遅れをもって血圧・皮膚血流の変化を生じ、これに準じて皮膚交感神経パルス数を人工心臓の駆動条件にフィードバックしてやる事によって、模擬循環回路の動脈圧や人工心臓の拍出量を被験者の実際の循環動態と同様に変

化させてやることが可能であった。

3-2. 皮膚交感神経活動を用いた温熱環境自動制御の試み

一方、SSNAの直流成分（基礎活動数）は、温熱環境・温熱感などと密接な関連を有しており、これを利用して、皮膚交感神経活動のパルス数の直流成分を、外界の温熱環境（実験を行っている人工気候室の温熱環境）に実時間的にフィードバックすることによって、外界の温熱環境を最適に保つ試みを行った。実験系は、電磁シールド人工気候室内で行った以外は前の3-1の実験系とほぼ同じで、皮膚交感神経（血管運動神経）活動は、マイクロニューログラム法を用いて被験者の正中神経から計測した。まず、快適環境における同神経のパルス数を求め、さらに環境温度を高温側・低温側に变化させた際のパルス数をプロットし、環境温度（温熱感覚）の変

化に対する神経インパルス数の変化を求めた。次いで、快適環境における神経パルス数を制御の目標値とし、人工気候室の環境温を制御パラメータとして、（低環境温、あるいは、高環境温を初期設定値として）PID 制御を行い、このときの人工気候室環境温、（自己申告による）温熱快適感、神経パルス数などの変化の検討を行った。結果として、皮膚交感神経活動のパルス数をフィードバックする事によって、環境温、および温熱の快適感は最終的に無不快状態（中立温度条件）に収束し、本システムの feasibility が確認された。

【今後の研究の方向、課題】

本研究の今後の方向・課題に関しては、神経系インタフェースとしての生体電極の多チャンネル化と、神経組織に対する生体適合性の改善を挙げる事ができる。

生体の神経はそれぞれが異なる情報を伝達する非常に多数の神経線維の束から構成されており、究極的には1本1本の神経線維に対して伝達情報の読み出し、書き込みを行う必要がある。そのため、この目的に用いる電極の性能には、1) 埋め込み型で、かつ半永久的な長期間の記録が可能、かつ、2) 非常に多チャンネルの神経線維との読み出し・書き込みが可能、という両者が要求される。

前者に関しては、今回は、ポリイミドの薄いフィルムに銅製の電極金属（金を用いてコーティング）のパターンをはさみ込んだ3層構造のフィルムを用い、一応の組織適合性・生体適合性を有する事が確認されたが、どの程度の長期間計測が可能かについては、今後長期の埋込実験を行い、電極金属材料を中心にさらに検討を行っていく必要がある。

第二の問題の多チャンネル化は、神経再生

とも大きな関連を有している。将来的には神経線維の1本1本の軸索との信号の入出力を行う事も要求されるが、電極の孔径を小さくしていくと、この孔を通しての神経軸索の再生が困難になっていくことが報告されており、どの程度の径まで小さくすることが可能かなどについての検討が必要であり、また、神経再生を促進するために、チューブ内や電極内を laminin 等の神経再生促進物質でコーティングした場合の効果などに関する検討も必要と思われる。また、導出された非常に多数の神経信号の一つ一つが一体どのような情報を伝達する神経信号なのかを解析・同定する手法の開発や、逆に、人工感覚を創出させる際に神経に入力してやる刺激の強度・パターンの解析などの検討も要求され、さらに、非常に多チャンネルの信号情報の処理系の開発、電極基板における配線技術の改善などに関しても研究を進めていく必要がある。

今後これらの課題についても研究を進めていくと同時に、多チャンネル化・長期の埋込の可能な電極については、神経再生型電極に限定せず、新しい原理・手法の可能性に関しても追求していく予定である。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたって、多大な協力を頂いた鈴木隆文助手に感謝の意を表する。

【研究成果発表、論文等】

学会誌等

- 1) 鈴木隆文, 前田太郎, 鎮西恒雄, 満洲邦彦, 藤正 巖, 館 暉: 神経再生型電極 (第3報) — 末梢神経の再生能力を利用した多チャンネル生体電極による信号入出力 —, 第11回生体・生理工学シンポジウム論文集, 177-180, 1996 第11回生体・

生理工学シンポジウム, 大阪, 1996 年 11 月において発表

- 2) Kunihiro Mabuchi, Hirokazu Genno, Masaya Kunimoto, Osamu Kanbara, Takafumi Suzuki, and Tsuneo Chinzei: Use of Skin Sympathetic Nerve Activity for the Automatic Control of an Air-Conditioning System. Proceedings of 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, (CD-ROM version), 1996 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Amsterdam, Oct. - Nov., 1996 において発表
- 3) 鈴木隆文, 前田太郎, 鎮西恒雄, 満洲邦彦, 井街 宏, 館 暲: 神経再生型電極 (第 4 報) — フレキシブル基板を利用した多チャンネル電極による神経インタフェース —. 第 12 回生体・生理工学シンポジウム論文集, 393-396, 1997 第 12 回生体・生理工学シンポジウム, 町田, 1997 年 9 月において発表
- 4) T. Suzuki, T. Maeda, T. Chinzei, K. Mabuchi, K. Imachi, S. Tachi: Flexible Microelectrode for Interfacing Regenerating Peripheral Nerves. Proceeding of 19th International Conference of the IEEE EMBS, CD-ROM version, 1997 19th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Chicago, Oct. 30 - Nov. 2, 1997 において発表
- 5) 鈴木隆文, 満洲邦彦: マイクロ医療デバイスの現状. 日本 ME 学会誌 BME 12 巻 4 号, 33-35, 1998
- 6) 鈴木隆文, 前田太郎, 鎮西恒雄, 満洲邦彦, 藤正 巖, 館 暲: 神経再生型電極の開発, 医用電子と生体工学, (投稿中)

口頭発表 (アブストラクトを有するもの)

- 1) Kunihiro Mabuchi, Masaya Kunimoto, Osamu Kanbara, Hirokazu Genno, Tsuneo Chinzei, Hiroyuki Matsuura, Takafumi Suzuki, Tomotaro Tago, Yusuke Abe, Kou Imachi and Iwao Fujimasa: ATTEMPT TO USE SYMPATHETIC NERVOUS SIGNALS FOR THE CONTROL OF AN ARTIFICIAL HEART SYSTEM. The 23rd ESAO Congress, Walsaw, October,

1996

- 2) Takafumi Suzuki, Taro Maeda, Tsuneo Chinzei, Kunihiro Mabuchi, Iwao Fujimasa, and Susumu Tachi: A REGENERATION MICRO-ELECTRODE FOR THE CONTROL OF ARTIFICIAL ORGANS AND PROSTHETIC DEVICES. The 23rd ESAO Congress, Walsaw, October, 1996
- 3) 鈴木隆文, 前田太郎, 鎮西恒雄, 満洲邦彦, 井街 宏, 館 暲: 神経再生型電極による神経インタフェース. 第 36 回日本 ME 学会大会, 松本, 1997 年 4 月
- 4) Kunihiro Mabuchi, Masaya Kunimoto, Osamu Kanbara, Hirokazu Genno, Takafumi Suzuki, Tsuneo Chinzei, Hiroyuki Matsuura, Yusuke Abe, Kou Imachi, and Iwao Fujimasa: CONTROL OF AN ARTIFICIAL HEART SYSTEM USING SYMPATHETIC NERVOUS SIGNALS. 11th World Congress of The International Society For Artificial Organs, Providence (U. S. A.), June, 1997
- 5) T. Suzuki, T. Maeda, T. Chinzei, K. Mabuchi, I. Fujimasa, S. Tachi: DEVELOPMENT OF A REGENERATION MICROELECTRODE FOR THE CONTROL OF ARTIFICIAL ORGANS AND PROSTHETIC DEVICES. 11th World Congress Of The International Society For Artificial Organs, Providence (U. S. A.), June, 1997
- 6) 満洲邦彦, 神原 修, 國本雅也, 鈴木隆文, 源野 広和: 皮膚交感神経信号による実時間環境温制御の試み. 第 10 回ニューロプログラム研究会, 東京, 1997 年 6 月
- 7) 鈴木隆文, 鎮西恒雄, 満洲邦彦, 井街 宏: 人工臓器の制御を目的とした神経再生型電極の開発. 第 35 回日本人工臓器学会大会, 横浜, 1997 年 10 月
- 8) 満洲邦彦, 神原 修, 國本雅也, 鈴木隆文, 磯山 隆, 波江野茂彦, 源野広和: 交感神経信号を用いた人工心臓制御の試み. 第 13 回生体・生理工学シンポジウム, 金沢, 1998 年 9 月 (発表予定)
- 9) 満洲邦彦, 神原 修, 國本雅也, 鈴木隆文, 波江野茂彦, 源野広和: 交感神経情報のフィードバックによる外部温熱環境の実時間最適制御の試み. 第 13 回生体・生理工学シンポジウム, 金沢, 1998 年

-
- 9 月（発表予定）
- 10) 鈴木隆文, 鎮西恒雄, 井街 宏, 満洲邦彦: 神経信号による外部機器制御に関する基礎的検討, 第13 回生体・生理工学シンポジウム, 金沢, 1998 年 9 月（発表予定）
- 11) 満洲邦彦, 鈴木隆文, 磯山 隆, 松浦弘幸, 鎮西恒雄, 阿部裕輔, 斉藤逸郎, 望月修一, 刈田達郎, 井街 宏: 交感神経信号のフィードバックによる人工心臓最適制御の試み, 第36 回日本人工臓器学会大会, 筑波, 1998 年 9 月（発表予定）
- 12) Kunihiro Mabuchi, Osamu Kanbara, Masaya Kunimoto, Takafumi Suzuki, Takashi Isoyama, Shigehiko Haeno, and Hirokazu Genno: ATTEMPT TO CONTROL AN ARTIFICIAL HEART SYSTEM USING SYMPATHETIC NERVOUS SIGNALS. 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Hong Kong, Oct. - Nov., 1998（発表予定）

複数の自律ロボットが知的に協調行動をして 人間の活動を援助するシステムの開発研究

Development Researches on a System to Support Human Activities with Intelligent Cooperations of Multiple Autonomous Robots

961020

研究代表者	筑波大学 電子情報工学系 教授	油 田 信 一
共同研究者	筑波大学 電子情報工学系 講師	坪 内 孝 司
	筑波大学 電子情報工学系 講師	大 矢 晃 久
	筑波大学 電子情報工学系 TARA センター 講師	マルクス・ルーデ
	トンセラー工科大学（米国）教授	アーサー C. サンダーソン

〔研究の目的〕

人間の社会は、多数の人間が自主的に行動しつつ、かつ全体として調和が保たれている。このような秩序をロボット上に実現し、多数のロボットが自主的に行動しながら、ひとつの目標を遂行する協調システムを実現する技術を開発する。このマルチロボットシステムの行動の目標を人間の活動の援助におき、このための実験システムを構築することを目的とした。

〔研究の内容、成果〕

本研究の具体的な成果は、複数の自律ロボットにより協調行動を行なうための要素技術を開発し、協調システムを実現したこと、

および、人間の活動を支援できるようなマルチロボットシステムの実現に向けて、その要素となる自律ロボットによる自律行動の例題を実現したことである。以下にその概要を記す。

1 複数の自律ロボット間の通信と協調

1.1 協調のための複数ロボット間通信システムの開発

複数のロボットが信頼性高く協調して一つの目的を達成するためには、ロボット間の通信がキーテクノロジーになる。ロボットが互いに協調するためには、ロボット間で互いの位置や状況を知ることが不可欠である。人間の場合はこれを個々の認識能力によって実現しているが、ロボット上では現実的なセンサ認識技術ではきわめて不十分である。これを

補うため、まず本研究の基礎として協調のための無線通信ネットワークシステムの開発を行った。

このネットワークシステムは、クラリオン社製の拡散スペクトラム通信によるモデムをフィジカルレイヤとして用い、その上にプロコトルを構築したものである。

自律移動ロボットの協調においては、各ロボットが他のロボットの位置情報を確実に把握することが基本となる。このため、本ネットワークには各ロボットが常時できるだけ正確に自己の位置を推定した上でそれを適当な頻度で放送するという機能を持たせている。

人間や動物が行うインプリシットな情報交換と意識的なエクスプリシットな通信の双方の実現をサポートするのが本ネットワークの最大特長である。

1.2 簡単な協調行動の設計

上記の通信ネットワークを用いて、複数(2台, 3台, 4台)の自律移動ロボットの簡単な協調行動の例を実験を含んで検討した。これにより、協調のためのロボットプログラムの書き方の作法やアルゴリズムについてのいくつかのアイディアを得ることができた。また、この成果に基づいて複数ロボット協調のためのロボット制御言語を検討した。

事前に個々のロボットの動作をプログラムするにせよ、あるいは、動作中にリアルタイムに通信で情報を交換するにせよ、複数のロボットが一つの共通の空間内で協調的に働くためには、共通の時間軸と位置座標軸を有することが不可欠である。共通の時間・空間軸を有すればその中でロボットの動作をプログラムに記述することにより、複数のロボットに協調的に振舞わせることができる。また、実時間でロボットの動作の情報を交換するためには、共通の時間・空間軸がその動作情報

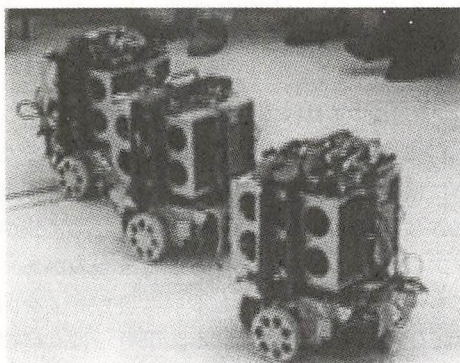


図1 3台のロボットによる協調ダンス

の表現方法のベースとなり、情報交換のプロコトルが決定される。

図1は、この考えに基づいてプログラムされた3台のロボットによる協調ダンスの光景である。本研究では、共通の時間・空間軸をベースに、まず各々のロボットの動作をプログラムしておき、次に、その各ロボットが自分の状況を互いに通信することにより、各々のロボットは、自分の動作を他に合わせるよう修正するという考え方で協調行動を実現している。

1.3 複数台のロボットの協調によるロボットの位置推定¹⁾

自律ロボットにとって自己位置の推定は主要な課題である。複数のロボットが一つの空間で働いており、それらが互いに相対的位置関係を測定できるとき、その情報を用いれば、個々のロボットによる自己位置推定は精度を向上させることができる。

まず、個々のロボットには常時推定位置とその誤差の共分散マトリクスを計算させる。また、各々のロボットは推定位置をブロードキャストする。そしてロボットが時々互いに位置関係を観測することで得られる情報を最尤推定により融合してロボットの自己位置を

推定する，という枠組を開発した。また，実験システムを構築してその有効性を確めた。

2 実環境中のロボスタナビゲーション

自律ロボットが人間の活動を支援できるためには，実環境中を頑健（ロボスタ）に移動できなければならない。すなわち，障害物やドアなど，ロボットの行方を阻むものがあったとしても，これを回避し，あるいは自らドアを開けて通ることが求められる。筆者らは，自律ロボットのために環境を整えることなく，実際に人間が生活している環境の中で自律ロボットが行動できる，というパラダイムをおき，それに必要な技術を開発した。本研究で想定した実環境は，建物内の廊下やよく整理された室内である。実験は研究室内外で行なったが，いわゆるオフィス環境を想定している。

本テーマでは，2つのサブテーマに分けその実現を行なった。そのひとつは超広角レーザレンジセンサを搭載した自律移動ロボットによる屋内ナビゲーションであり，もうひとつは，マニピュレータを搭載した自律移動ロボットによるドア開け動作を含む屋内ナビゲーションである。

2.1 超広角レーザレンジセンサを用いたナビゲーション

図2に超広角レーザレンジセンサを搭載したロボットを示す。このロボットの下部には，床面に平行な扇状のレーザ光を投射する半導体レーザ投光器を配置し，また上部に広角CCDカメラを前と左右に向けて3台配置した。扇状光はロボットの前方より±130°投射でき，カメラ一台あたりの水平視野角は108°である。これにより三角測量の原理で，扇状光の投射範囲中の1°毎の，壁などの対象物までの距離を得ている。この測距データ

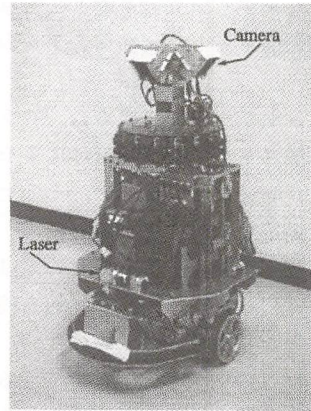


図2 超広角レーザレンジセンサを有する自律移動ロボット『山彦しえわ』

をロボットを中心とした床と平行な平面上にプロットし，直線上に密に並んだ測距点列に線分を当てはめるなどしてロボット周囲の様子を認識し，壁に沿う，障害物を発見して回避する，交差点を発見して例えば右折するなどの行動が実現できた。図3に廊下に沿う走行を行ない，走行中に前方の障害物を発見して回避する実験風景を示す。

2.2 ドア開け動作を含むナビゲーション

このサブテーマでは，幅・奥行き50cm高さ80cm程度の大きさを持つ自律移動ロボットに，ほぼ人間の腕と同じ長さを持つ6自由度のマニピュレータを搭載し，このマニピュレータの手先効果器によるドアのノブの把持と回転を含む「押し開け・引き開け」および「押し閉め・引き閉め」動作を実現した。これにより，このロボットに指示する走行経路中にドアが含まれても屋内環境をナビゲーションできるようになった。

ここでは，ドアの位置や走行可能な領域などを記述した環境地図をあらかじめロボットに対して与えておき，その上で移動の開始地点と目的地点を指示する。ロボットは，この



図3 超広角レーザレンジセンサによる屋内ナビゲーション（最上段：スタート位置にあるロボット，中段：障害物回避直後，最下段：ゴール位置に停止）

指示から環境地図を参照して経路・行動計画を行ない、どの経路でどのドアを通過して目的地に到着するか、その途中の各地点においてどのような動作をすべきかを計画する。これらの動作は「ドアを開ける動作」「廊下を走行する動作」等々に分類・構造化されて

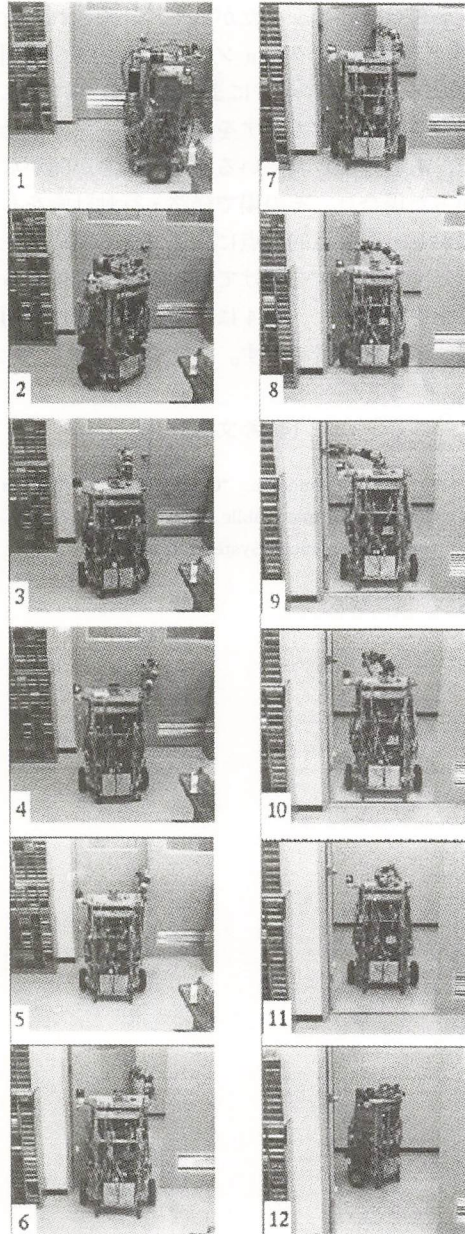


図4 『山彦 TYPE-Ten』によるドアの押し開け動作

おり、これらを「アクションプリミティブ」と名付けている。したがって、計画された行動は、個々のアクションプリミティブの系列となる。この考え方により計画した経路に沿って通過すべきドアを開けようと試みたとき、もし施錠されているなどでドアが開かなかった場合は、その場で経路・行動計画をしなおし、同じ目的地点に到達できる別経路を探し、別のドアを開けて目的地点に到達することを実現した。図4にドアを押し開けて通過する実験風景を示す。

[参考文献]

- 1) A. C. Sanderson, "Cooperative navigation among multiple mobile robots", Proc. of Distributed Autonomous Systems 2, 1996.
- 2) K. Nagatani and S. Yuta, "Designing Strategy and Implementation of Mobile Manipulator Control System for Opening Door", Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2828-2834, 1996.
- 3) 水谷圭司・油田信一, 「マニピュレータを搭載した移動ロボットによるドアの通り抜け動作—第5報 アクションプリミティブを用いた動作設計とインプリメンテーション—」, 第1回ロボティクスシンポジウム予稿集 pp. 347-352, 1996.
- 4) 水谷圭司・油田信一, 「自律移動マニピュレータによるドアの通り抜け動作—第6報動作計画法の提案とインプリメンテーション—」, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 83-84, 1996.
- 5) 安藤吉伸・坪内孝司・油田信一, 「超広角カメラと扇状光による移動ロボット用レーザ距離センサの開発と線分あてはめを用いた壁沿い走行」, 第3回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 253-260, 1998.

弾性表面波霧化器に関する研究

Surface Acoustic Wave Atomizer

971004

研究代表者 東京大学大学院工学系研究科 助教授 黒澤 実

[研究の目的]

殺菌力を持つ液体や薬液などを微粒化する噴霧装置は、衛生や環境改善などの目的から、その有用性が注目されている。これまでの噴霧器は、コンプレッサを用いた大型の装置で、騒音が大きく集中的な非効率なものであった。本研究では、コンパクトで無騒音である分散的・効率的な霧化器を開発し、医療用はもとより、重要性が広く認識されつつある環境・衛生への応用を開拓するものである。

本研究のような高周波振動での、連続的な液体の微粒化についてはまとまった研究がなく、さらに検討を進める必要がある。応用面においても、マイクロな噴霧器として、医療関係、化学関係等への発展が考えられる。

[研究の内容、成果]

a. 原理と特徴

弾性表面波霧化器は、液体を微粒化する小型化の可能なデバイスである。圧電素子にはニオブ酸リチウムを用いて、レイリー波を励振している。現在行っている霧化の方法は、Fig. 1 に示すように、弾性表面波素子の振動面に液体を広げることにより行っている。この方法では、素子表面の振動が液体に伝わり、この振動により液体表面が振動して、波

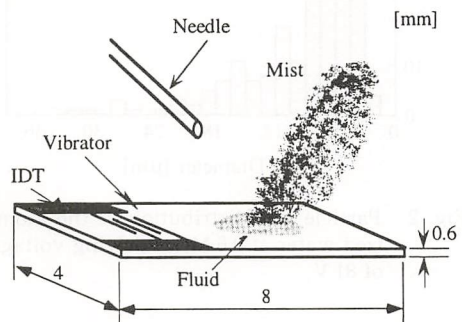


Fig. 1 Surface acoustic wave atomizer: driving frequency of 48 MHz

頭から微細な粒子が砕け散ることを利用して、これまでに利用されている超音波霧化法の一つであるが、駆動周波数が高く、素子が究めて小さくできることに特徴がある。

b. 駆動周波数と粒径

駆動周波数 9.6 MHz の振動子での水の噴霧粒径は、リニア平均で約 $8.6\ \mu\text{m}$ 、ザウター平均では約 $20\ \mu\text{m}$ であった。粒径分布の測定例を Fig. 2 に示す。また、駆動周波数 48 MHz の素子は、その寸法が $4\ \text{mm} \times 8\ \text{mm} \times 0.6\ \text{mm}$ と小型化されている。この素子では、噴霧粒径のリニア平均で $4.6\ \mu\text{m}$ 、ザウター平均で $9.5\ \mu\text{m}$ であった。高周波化により粒径が小さくなっている。粒径分布の測定例を Fig. 3 に示す。また、噴霧してい

るようすの写真を Fig. 4 に示す。

噴霧量については、9.6 MHz の素子で毎分 0.6 ml、48 MHz の素子で毎分 170 μ l であっ

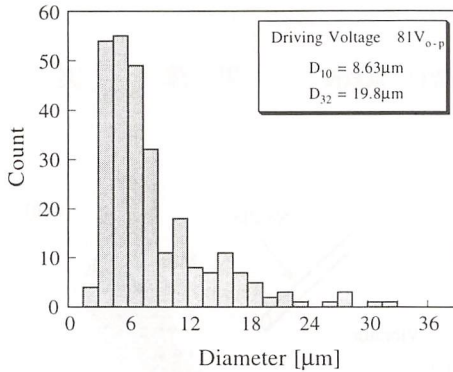


Fig. 2 Particle size distribution of the atomized water at 9.6 MHz: driving voltage of 81 V

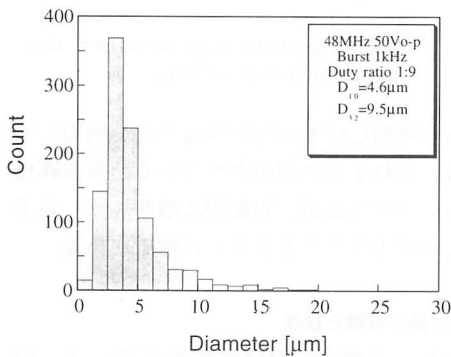


Fig. 3 Particle size distribution of the atomized water at 48 MHz: driving voltage of 50 V

た。噴霧量と粒径分布より、液体の微粒化による仕事量を求め、素子への入力電力との比から効率を算出した。その結果は、9.6 MHz の素子で 0.0043%、48 MHz の素子で 0.012% であった。他の方式との比較とともに、Table 1 に示す。高周波の素子では、すでに同等の効率となっていることがわかる。

c. 共振構造の素子による霧化

弾性表面波の振動を効率よく励振するには、Fig. 5 に示すような反射器を 2 組用いて、その間に波動が閉じ込められた構造が必要である。この弾性表面波素子の例では、駆動電極を 2 対、反射器をその外側に配置して、駆動電極に挟まれたところに、レーリー波が強く励振される構造となっている。実験に用いた素子の駆動周波数は、10 MHz、15 MHz、20 MHz、25 MHz、30 MHz、40 MHz の 6 種類

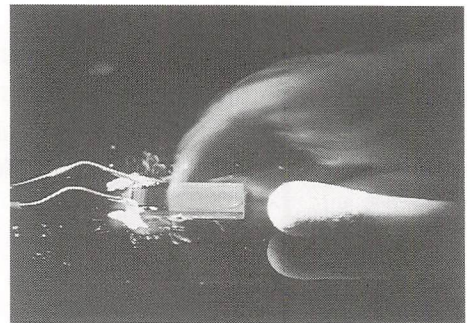


Fig. 4 Photograph of the surface acoustic wave atomizer: driving frequency is 48 MHz

Table 1 Comparison of atomizing efficiency of several kinds of ultrasonic atomizers

Type	Atomization Power [mW]	Efficiency [%]
Surface acoustic wave atomizer (9.6 MHz)	0.4	0.0043
Surface acoustic wave atomizer (48 MHz)	0.28	0.012
Spring type ultrasonic nebulizer (2.4 MHz)	5	0.0125
Low frequency ultrasonic nebulizer (50 kHz)	0.18	0.015

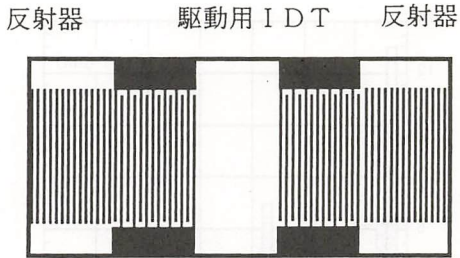


Fig. 5 Surface acoustic wave device for atomizer

である。素子の共振時の Q 値は素子によりばらつきがあるが、およそ 1000 ~ 3000 となっている。以前の素子と比較すると、同じ駆動電圧で 15 倍ほどの振動振幅が得られ (10 MHz の素子での比較) ており、低電力で霧化に必要な十分な振動振幅が得れるようになった。

噴霧の実験は、2 つの駆動用 IDT に挟まれたもっとも振動の大きなところに、微量の水を供給して噴霧粒径分布の測定と、噴霧量の測定を行った。噴霧粒径の分布の測定結果を Fig. 6 ~ 11 に示す。高周波化と連続駆動

により、噴霧粒子の微細化を期待したが、今回の実験では、そのような結果は得ることができなかった。

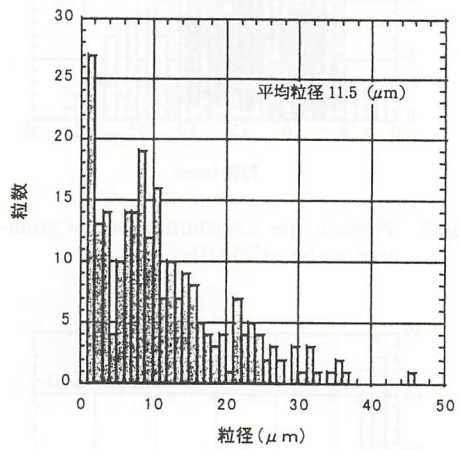


Fig. 7 Particle size distribution of the atomized water at 15 MHz

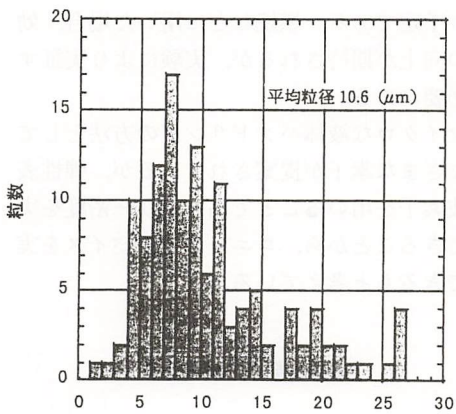


Fig. 6 Particle size distribution of the atomized water at 10 MHz

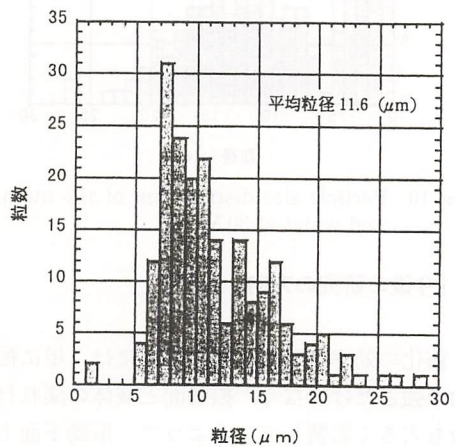


Fig. 8 Particle size distribution of the atomized water at 20 MHz

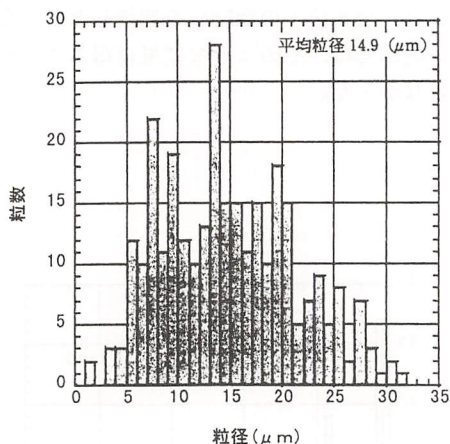


Fig. 9 Particle size distribution of the atomized water at 25 MHz

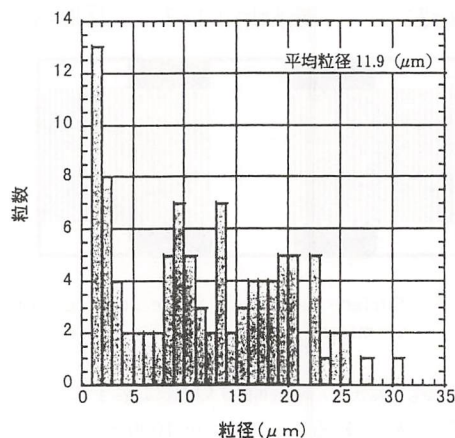


Fig. 11 Particle size distribution of the atomized water at 40 MHz

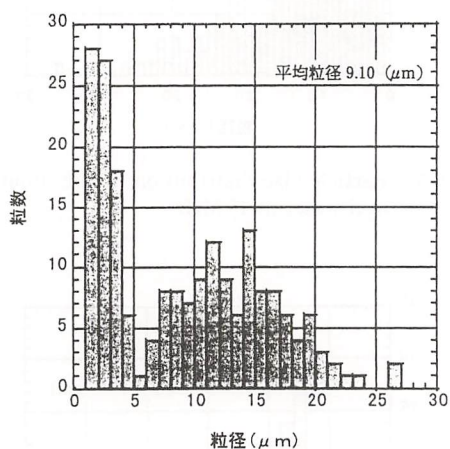


Fig. 10 Particle size distribution of the atomized water at 30 MHz

[今後の研究の方向, 課題]

霧化の効率, 噴霧粒径の分布には, 単に振動の強さだけでなく, 振動面と液体の濡れ具合も大きく影響しているようで, 振動子面上の液体の厚さをコントロールする必要がある。この理由で, 今回の実験による粒径

や噴霧量の結果が, 必ずしも最適な条件で, 噴霧を行ったとは言い難く, さらに詳細な条件設定をしたのち, 再度実験を試み, 系統的なデータを収集する必要がある。

また, 今後はこのデバイスを用いたシステム化の検討と, 実際に燃焼や化学反応に用いたときの利点について検討を進める必要がある。マイクロなシステムへの応用の可能性があるが, 具体的なシステムを考案し, 検討を行う予定である。燃焼などに用いた場合, 効率の向上が期待されるが, 実験により実証する必要がある。

マイクロな液体ハンドリングの方法としてさまざまな素子が提案されているが, 弾性表面波素子を用いることで高いパワー密度を実現できることから, ユニークなデバイスを実現できるもとを考えている。

[成果の発表, 論文等]

- 1) Kurosawa, M., Watanabe, T. and Higuchi, T.
"Surface acoustic wave atomizer with pumping

球面超音波モータを利用した人工義手のための ヒューマンフレンドリなインターフェースの開発

Development of human friendly interface for an artificial arm
by spherical ultrasonic motor

971012

研究者代表	東京農工大学工学部 教授	遠山 茂樹
共同研究者	東京農工大学工学部 教授	永井 正夫

〔研究の目的〕

これまで球面超音波モータを利用した人工義手を開発してきた。球面超音波モータとは人間の肩関節のように1関節で3自由度を有する多自由度モータである。特にこれまで開発した球面超音波モータは小型で構造もシンプルであるため、極めて軽量、高トルクで運動性能の優れた人工義手になっている。そこで、本研究では、この人工義手を装着者の意志通りで、人間の手に出来るだけ近い動きをすることが出来る入力装置を開発することを目的とする。

〔研究の内容、成果〕

圧電型振動ジャイロと半導体加速度センサを用いた姿勢角センサを試作し、球面超音波モータへの入力状態の実験を行った。

1 姿勢角センサ

図1に姿勢角センサを構成する各センサの配置を示す。

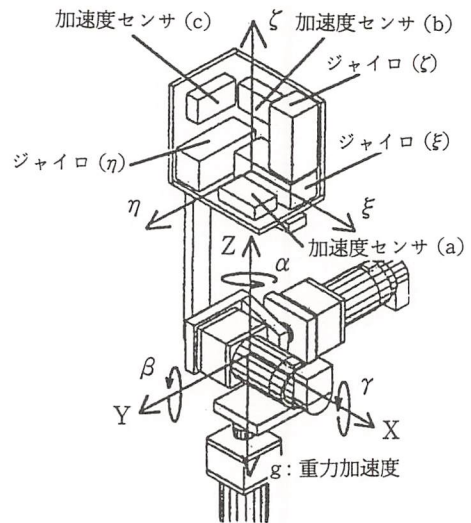


図1 姿勢角センサの配置図

時刻 $t=n$ におけるセンサ部の姿勢角をZ-Y-Xオイラー角

$$\theta_n = (\alpha_n, \beta_n, \gamma_n)^T \quad (1)$$

で表し、物体座標系（姿勢角センサ側の座標系）における各軸回りの角速度をジャイロより検出し

$$\omega_n = (\xi_n, \eta_n, \zeta_n)^T \quad (2)$$

とおくと、オイラー角座標系における角速度

$$\dot{\theta}_n = (\dot{\alpha}_n, \dot{\beta}_n, \dot{\gamma}_n)^T \quad (3)$$

への座標変換行列は式(4)のようになる。

$$\dot{R} = \begin{pmatrix} 0 & \sin\gamma/\cos\beta & \cos\gamma/\cos\beta \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 1 & \tan\beta\sin\gamma & \tan\beta\cos\gamma \end{pmatrix} \quad (4)$$

よって、センサ部のオイラー角表現は

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \dot{R} \cdot \omega_n \cdot dt \quad (5)$$

と求められる。

次に、加速度センサの感度軸をセンサ a は Z 軸、センサ b は Y 軸、センサ c は X 軸となるように配置する。このとき加速度センサを Z-Y-X オイラー角式(1)で示す角度だけ回転させると、重力加速度 $g = (-100)^T$ は式(6)のように変化する。

$$\begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma - \cos\alpha\sin\gamma \\ \cos\beta\sin\gamma & \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma \\ -\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\beta\cos\gamma \\ -\cos\beta\sin\gamma \\ \sin\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

これより加速度センサの各出力電圧は式(7)となる。

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{out}-a} &= K\cos\beta\cos\gamma + V_{0-a} \\ V_{\text{out}-b} &= K\sin\beta\sin\gamma + V_{0-b} \\ V_{\text{out}-c} &= K\sin\beta + V_{0-c} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

[V_{out} : 加速度センサ出力電圧[V] K : ゲイン[V] V_0 : 加速度 0 の時の出力電圧[V]]

各軸の加速度センサ出力よりオイラー角表

現は、

$$\beta = \text{Sin}^{-1}((V_{\text{out}-c} - V_{0-c})/K_c) \quad (8)$$

$$\gamma = \text{Tan}^{-1}(K_a(V_{\text{out}-b} - V_{0-b})/K_b(V_{\text{out}-a} - V_{0-a})) \quad (9)$$

と求められる。このとき α は、任意の値となり加速度センサからは α (ヨー) 軸は求められないことがわかる。

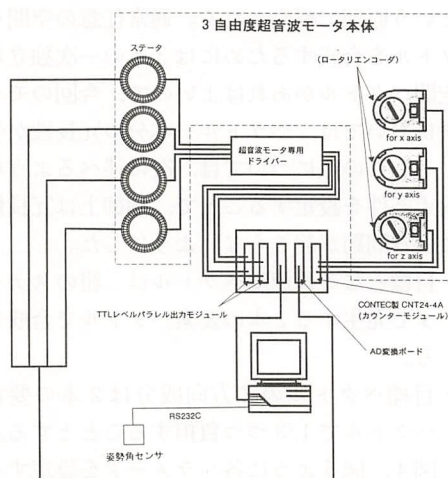


図2 実験システム図

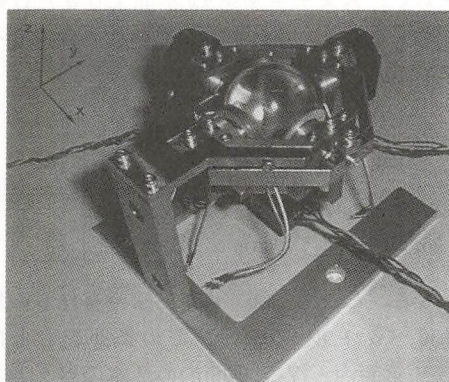


図3 3自由度球面超音波モータ

2 実験システム

図2に実験システムを、図3に3自由度球面超音波モータをそれぞれ示す。

3 制御方法

この3自由度球面超音波モータはロータを4つのステータで支持し、この4つのステータで発生する角速度ベクトルをロータ上で合成することにより、ロータに一定の空間内の任意軸まわりで角速度ベクトルを発生させるという原理で駆動される。通常任意の空間ベクトルを合成するためには3本の一次独立な空間ベクトルがあればよいので、今回のモータにおいては、ベクトル一本分の冗長性が生じる。この点については、次に述べるような拘束条件を設定することで、制御上は冗長性による問題が起こらないようにした。

- 目標となる角速度ベクトルは二組のステータで発生する2本の要素ベクトルで合成する。

- 目標ベクトルのZ方向成分は2本の要素ベクトルで1/3ずつ負担することとする。

図4、図5のように各パラメータを設定する。

また、空間上に存在する各ステータが発生する角速度ベクトルを ω_{x+} 、 ω_{x-} 、 ω_{y+} 、 ω_{y-} とおく。各ステータをxy平面より α だけ傾けるとすると、それぞれの発生する角速度ベクトル ω_{x+} 、 ω_{x-} 、 ω_{y+} 、 ω_{y-} は、

$$\left. \begin{aligned} \omega_{x+} &= a_{x+} (\cos \alpha, 0, \sin \alpha)^T \\ \omega_{x-} &= a_{x-} (-\cos \alpha, 0, \sin \alpha)^T \\ \omega_{y+} &= a_{y+} (0, \cos \alpha, \sin \alpha)^T \\ \omega_{y-} &= a_{y-} (0, -\cos \alpha, \sin \alpha)^T \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

となる。ここで、図4にあるような任意の角速度ベクトル T_e を前項での条件をもとにX-Y平面内とY-Z平面内の2本のベクトル T_{exz} 、 T_{eyz} に分解する。 T_e の大きさを1とす

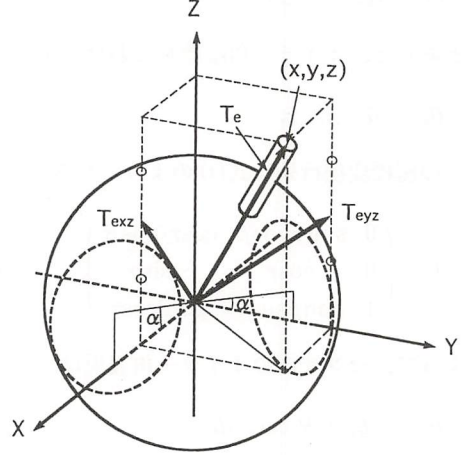


図4 ベクトル合成

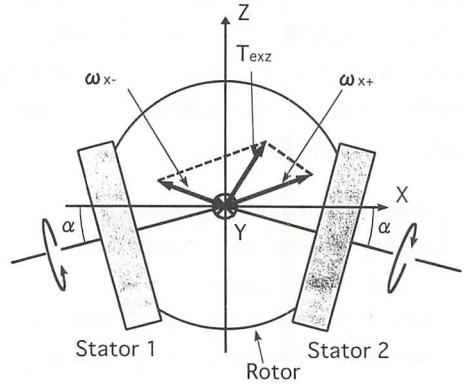


図5 X-Y平面

ると、この2本のベクトルはそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} T_{exz} &= \left(x, 0, \frac{1}{2}z \right)^T \\ T_{eyz} &= \left(0, y, \frac{1}{2}z \right)^T \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

となる。次に、 T_{exz} の方向を持ったベクトルを ω_{x+} 、 ω_{x-} の2つのベクトルで合成すると各成分は、

$$\omega_{x+} + \omega_{x-} = \{(a_{x+} - a_{x-})\cos \alpha, 0, (a_{x+} + a_{x-})\sin \alpha\}^T \quad (12)$$

であるから、式(11)の第一式と式(13)より、

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2}z &= (a_{x+} + a_{x-})\sin \alpha \\ x &= (a_{x+} - a_{x-})\cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

よって、

$$\left. \begin{aligned} a_{x+} &= \frac{1}{2} \left(\frac{z}{2\sin \alpha} + \frac{x}{\cos \alpha} \right) \\ a_{x-} &= \frac{1}{2} \left(\frac{z}{2\sin \alpha} - \frac{x}{\cos \alpha} \right) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

これらより、 T_{exz} 方向のベクトルを合成するためには ω_{x+} と ω_{x-} の大きさの比が $|a_{x+}| : |a_{x-}|$ になればよい。そこで、これらの角速度を発生するステータに inputs する印加電圧の時間的位相差を P_{x+} 、 P_{x-} 、ベクトルの大きさ係数を $a_{x+}/(|a_{x+}| + |a_{x-}| + |a_{y+}| + |a_{y-}|)$ 、 $a_{x-}/(|a_{x+}| + |a_{x-}| + |a_{y+}| + |a_{y-}|)$ とし、各ステータの発生する角速度の大きさを $\sin$ 関数で近似すると、

$$\left. \begin{aligned} P_{x+} &= \sin^{-1} \frac{a_{x+}}{|a_{x+}| + |a_{x-}| + |a_{y+}| + |a_{y-}|} \\ P_{x-} &= \sin^{-1} \frac{a_{x-}}{|a_{x+}| + |a_{x-}| + |a_{y+}| + |a_{y-}|} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

同様な計算を yz 平面においても行い、 T_{exz} 、 T_{eyz} と同じ方向ベクトルが求められる。

$$\left. \begin{aligned} T_{exz} &= R \begin{bmatrix} (\sin P_{x+} - \sin P_{x-})\cos \alpha \\ (\sin P_{x+} + \sin P_{x-})\sin \alpha \end{bmatrix} \\ T_{exy} &= R \begin{bmatrix} (\sin P_{y+} - \sin P_{y-})\cos \alpha \\ (\sin P_{y+} + \sin P_{y-})\sin \alpha \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

X 、 Y 、 Z 、 α は目標となる角速度ベクトルが決まったときに既知な値である。以上より、各ステータにそれぞれ P_{x+} 、 P_{x-} 、 P_{y+} 、 P_{y-} の時間的位相差をパラメータとして入力すると、

目標角速度ベクトル T_e が合成できる。ロータの現在姿勢が決まった時の姿勢変換は、現在姿勢から目標姿勢への姿勢変換の途中の経路はどこを通っても良いこととする。更に、常に現在姿勢を検出し、次々に更新しながら新しい現在姿勢から目標姿勢への姿勢変換を行っていき、最終的な目標姿勢に収束させる。収束の判定には目標角速度ベクトル T_e の絶対値を用い、この値がある値以下になったら目標姿勢に収束したものにする。

4 実験結果

姿勢角センサを X 方向、 Y 方向、 Z 軸回転にそれぞれ傾け、その時に駆動したロータの角度ロータリエンコーダで検出したのを図6～図8に示す。また、姿勢角センサを XY 方向に連続に動かしロータの位置を検出したのを図9、図10に示す。

これらの結果より以下のことがわかった。

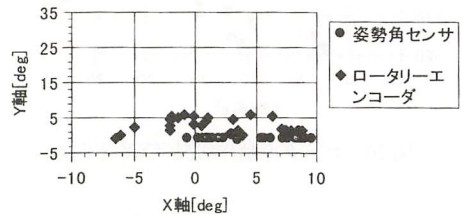


図6 姿勢角センサとロータの軌跡（X方向）

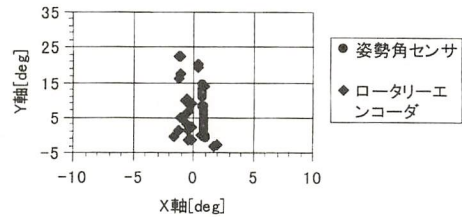


図7 姿勢角センサとロータの軌跡（Y方向）

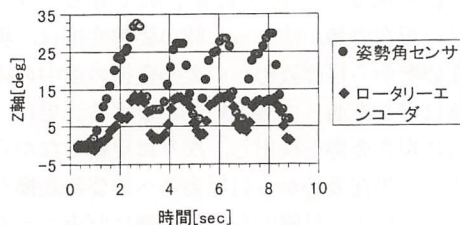


図8 姿勢角センサとロータの軌跡 (Z 軸方向)

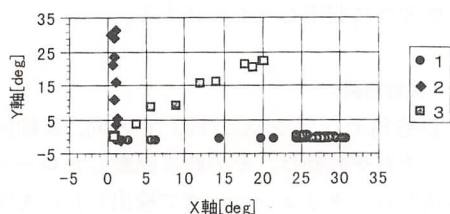


図9 姿勢角センサの動作状況 (XY 方向)

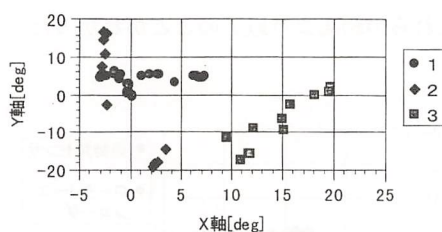


図10 ロータの動作状況 (XY 方向)

- 球面超音波モータを用いた人工義手に対して、姿勢角センサを用いることで球面超音波モータが有効に機能し入力装置に適している。
- 姿勢角センサから次々にデータが送られるので、球面超音波モータが安定しなく、誤差が積み重なってしまう。
- 小型トラックボールより姿勢角センサを使用した方が球面超音波モータへ単純にデータのを入力をすることが出来る。

[今後の研究の方向、課題]

現在、研究されている人工義手は肩、肘、手首、指と超音波モータが使用される。今回研究された入力装置をこれらの入力装置として使用するため、現段階では入力系統が不足する。よって、肩、肘、手首、指の個別の入力系統を考慮したプログラムを研究する。

[成果の発表、論文等]

精密工学会，秋季大会（1998 年 9 月）発表予定

脳波の非線形動特性の解析による 新しい親和型インターフェイスシステムに関する基礎的研究

Study on man-machine interface system
based on nonlinear dynamics of human brain wave

971013

研究者代表

山口大学工学部 講師

西 藤 聖 二

〔研究の目的〕

本研究は、人間の脳波の位相・振幅の空間分布の動態を非線形ダイナミクスの見地から解析することにより、人間の動作要求を脳波動特性の変化という形で読み取ってコンピュータなどの種々の機械の操作を可能にする新しいマン・マシン・インターフェースの開発に必要な基礎的知見の獲得を最終目的とする。脳波の非線形動特性については、これまで殆ど明らかにされていないことから、本研究では覚醒時脳波（アルファ波）の測定結果を詳細に分析し、アルファ波の非線形ダイナミクスを同定することを試みた。

〔研究の内容、成果〕

1. 測定と分析

健常者（年齢21～26歳、のべ100名以上）を対象として覚醒閉眼時及び周期閃光刺激時の脳波（アルファ波）を採取し、複素複調法によりアルファ波の瞬時位相と瞬時振幅（エンベロープ）を推定してそれらの空間動態を分析した。閃光刺激の周波数（ストロボ発火間隔の逆数）はアルファ波の定義周波数

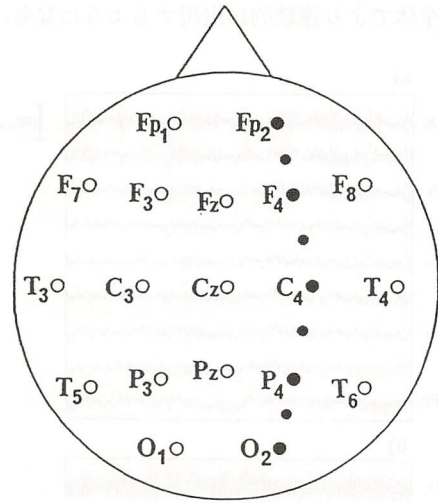


図1 脳波導出部位（○；12部位，●；9部位）

帯（8～13 Hz）を含んだ7～13 Hzの範囲に設定し、アルファ波の引き込みを誘発した。脳波採取にあたっては、図1に示すように頭部全体の12部位（○）と頭部縦断線上の9部位（●）より脳波を導出した。

2. 分析結果

図2に同一被験者の安静時（覚醒閉眼・無

刺激)と10 Hz 閃光刺激時の脳波の原波形を示す。図2 a) b) では上から下に向かって右後頭部から右前頭部への直線上9部位の脳波が示されている。安静時(図2 a))において、いずれの部位にも正弦波様の振動がみられるが、これはアルファ波とよばれる8~13 Hzの脳波リズムであり、覚醒閉眼状態においては健常者のかなりの割合で脳波記録に支配的に現れる。一般には後頭部の振幅が他の部位よりも大きい¹⁾が、振幅自体も時間的に増減を繰り返すこと(waxing and waning)が知られている。これに対し図2 b)の閃光刺激時では、アルファ波自体が頭部全体でより連続的に出現するようになり、

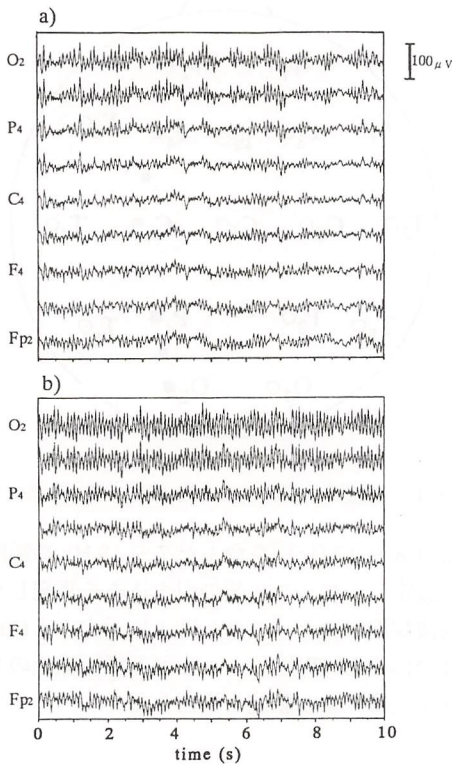


図2 a) 無刺激時, b) 10 Hz 閃光刺激時の脳波

振幅も増大していることがわかる。

図3には安静時及び閃光刺激時の脳波スペクトルが示されている。安静時には、脳波スペクトルは10 Hz付近をピークとしながらもアルファ波帯域(8~13 Hz)の全体に渡って比較的広く分布しているが、閃光刺激時では刺激周波数(10 Hz)に殆どの成分が集中することがわかる。この現象をアルファ波の引き込みといい、アルファ波が非線形振動であることの証拠の一つともなっている^{2), 3)}。このようなアルファ波の非線形性は、

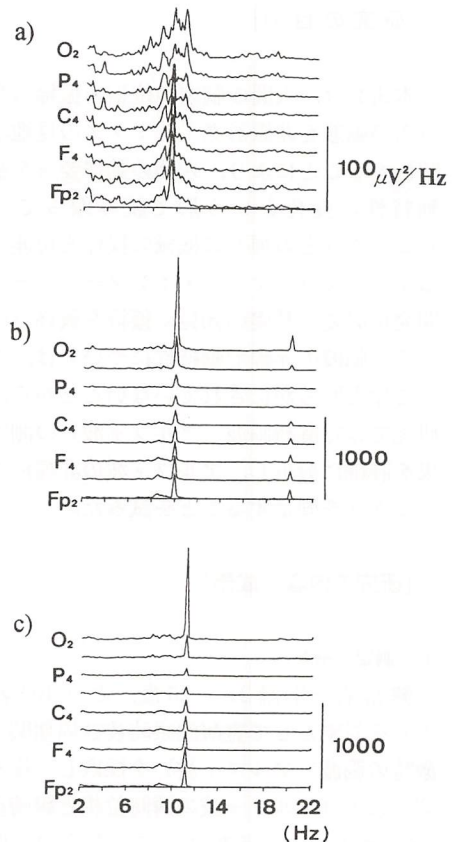


図3 a) 無刺激時, b) 10 Hz 閃光刺激時, c) 11 Hz 閃光刺激時の脳波スペクトル

脳波発見以来比較的早期に見出されていたが、アルファ波がどのようなタイプの非線形ダイナミクスで表されるかという同定の問題に関しては、これまで有効なアプローチがなされていない。最近の我々の研究によれば、無刺激時のアルファ波は振幅と位相共にかなり複雑な振る舞いを示すため取り扱いが困難であるが、閃光刺激時のアルファ波は振る舞いが単純化され、アルファ波の特性が集約された形で表されることがわかってきた。そこで以下では、閃光刺激時のアルファ波の応答と動特性を解析することによりアルファ波の非線形ダイナミクスの解明を試みる。

図4に10 Hz 閃光刺激照射前後のアルファ成分（8～13 Hz のバンドパスフィルタを施したもの）を15 試行分重ね描きしたものを示す。アルファ波は、刺激が開始されるといったん振幅が減少した後に増大し、刺激開始後700～800 ms に安定した状態に落ちついている。この振幅の安定した状態が引き込みを示していることから、アルファ波は刺激に対して1 s 以内で速やかに引き込まれることがわかる。さらに以上の応答は部位に依存せず、しかも後頭部から前頭部までははっきりした時間差もみられない。また、刺激前

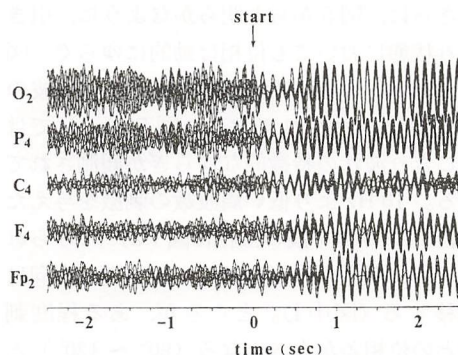


図4 10 Hz 刺激開始前後のアルファ成分

はアルファ波の位相が試行毎にまちまちであるので、アルファ成分がバラバラの曲線を描くが、刺激開始後の振幅減少過程において各試行のアルファ波の位相が揃い、一本の線のようにになっている。このことは、アルファ波が刺激以前にどのような状態にあっても、刺激に対して同じ応答を経て引き込み状態に移行することを意味し、応答が偶発的に観測されたものではなく、非線形システムとしてのアルファ波の固有の動特性を表していると考えられる。

図5には閃光刺激の照射前から終了後までのアルファ波の振幅（後頭部 O_2 のみ）と後頭部—前頭部の位相の変化が示されている。刺激開始後、約300～400 ms まではアルファ波の振幅は低いが、その後速やかに増大し、約700 ms あたりで引き込み状態に完全

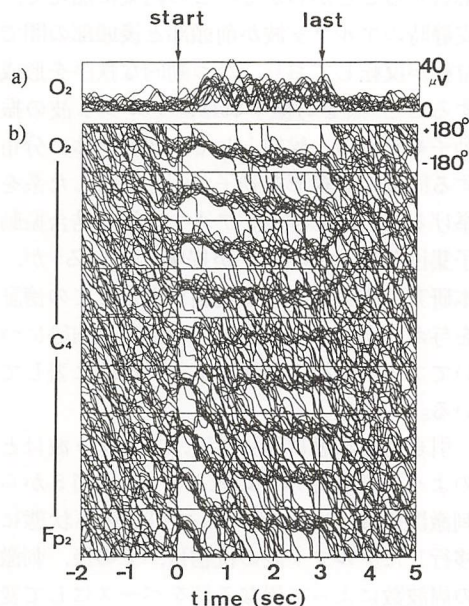


図5 10 Hz 刺激前後の a) 右後頭部 (O_2) の振幅と b) 右後頭部～右前頭部 (Fp_2) の位相曲線

に移行することがわかる。一方、各部位の位相は、刺激開始後約 400 ～ 500 ms でいったんジャンプする（特に前頭部で顕著）。その後、後頭部の位相は安定化し、刺激に対して位相同期する様子がみてとれる。以上、図 4 と図 5 より、アルファ波の閃光刺激に対する刺激開始後 400 ～ 500 ms の位相ジャンプを経て振幅増大ならびに位相同期後、引き込み状態に至るものと考えられる。一方、刺激終了後は振幅が速やかに減衰すると共に位相が引き込み状態から外れていき、約 200 ～ 300 ms で安静状態に復帰することがわかる。以上より、アルファ波が刺激に対して極めて柔軟に応答する系であることが示唆されている。また、図 5 にみられるように部位による応答の違いや応答時間の差は認められず、アルファ波が刺激に対して頭部全体でほぼ一斉に応答することがわかる。この結果に加えて、安静時のアルファ波が前頭部と後頭部の間で位相が反転しており、かつ動的な秩序を形成すること^{4),5)}を考慮すれば、アルファ波の振動子モデルの一候補として、頭部全体に分布する同種の非線形振動子が弱く結合した系を挙げることができる。アルファ波の結合振動子集団仮説は Wiener が提唱している³⁾が、本研究の成果はこれに実験事実としての傍証を与えると共に、振動子の特性や分布等についてアルファ波の描像をより具体的に表している。

引き込み状態に至った後、アルファ波はどのような性質を示すのだろうか？ 図 5 から刺激開始後 500 ～ 700 ms で引き込み状態に移行したアルファ波の位相は、その後、刺激の周波数によって異なる値をベースにして変動していることがわかる。このベースとなる位相値の刺激周波数に対する依存性を図 6 に示す。図中に示した位相値は、刺激の発火タ

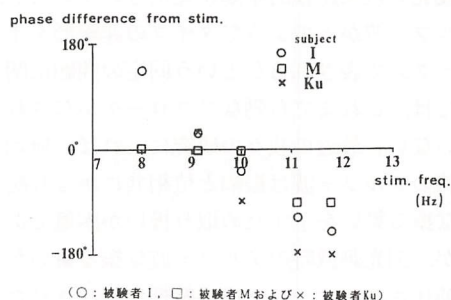


図 6 アルファ波の平均位相

イミングを位相値ゼロとした、刺激に対する相対位相差を表している。図 6 に示した 3 名の被験者に共通して刺激周波数の上昇に伴う位相値の低下がみられ、10 Hz を境として、負値に転じていることがわかる。いずれの被験者も、安静時における脳波スペクトルが図 3 のように広く分布しながらも 10 Hz 付近に比較的パワーの大きなピークを持つことを考慮すれば、アルファ波固有の周波数域（10 Hz 前後と推定される）に近い周波数の刺激に対しては、引き込み後も刺激に対する位相同期状態をベースとする一方、それより低い周波数に対しては常にアルファ波の位相が進んだ状態で、逆に 10 Hz より低い周波数では常に遅れた状態で推移することがわかる。

さらに、図 5 から明らかなように、引き込み状態においても位相は動的にゆらぐ。図 7 には 7, 10, 12 Hz 刺激時のアルファ波の位相変動が示されており、図 7 a), c) ではのこぎり波状の特徴的なゆらぎが観測されている。10 Hz より低い周波数の刺激を与えた場合、アルファ波の位相は図 7 a) にみられるように刺激の位相に対して漸く進む方向に推移する（図中 I）。ところが、ある程度刺激との位相差が大きくなる（90° ～ 120°）と負方向への位相ジャンプが起こって再び刺激

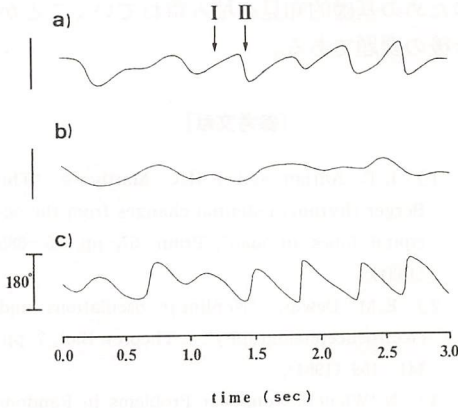


図7 a) 7 Hz, b) 10 Hz, c) 12 Hz 刺激時の位相変化

位相に同期する（図中II）。図7a)に示された位相ゆらぎは、このような緩やかな位相偏移と瞬時的な位相同期の反復によって形成されている。これに対して、12 Hzの刺激を与えた場合（図7c)）では、位相偏移と位相同期の方向がa)の場合と逆転し、図7a)とc)は時間軸に対してほぼ対称な曲線になっていることがわかる。ところが刺激周波数を（この被験者の安静時アルファ波の固有周波数と推定される）10 Hzにすると、位相ゆらぎはわずかに残るものの、際立った特徴を示さなくなってしまう（図7b)）。この結果は、上記の位相ベース値の周波数依存性と矛盾することなく、引き込み中のアルファ波が固有の周波数域への回帰、すなわち安静状態への復帰を試みていることを説明している。また位相ゆらぎのパワースペクトルには際立った周期性が観測されず（図は略）、位相ジャンプは不規則に起こっていることがわかった。

図8には位相ジャンプの間隔をパラメータとしたときのローレンツプロット⁶⁾による分析結果を示す。7 Hz, 9 Hz, 11 Hzのいずれ

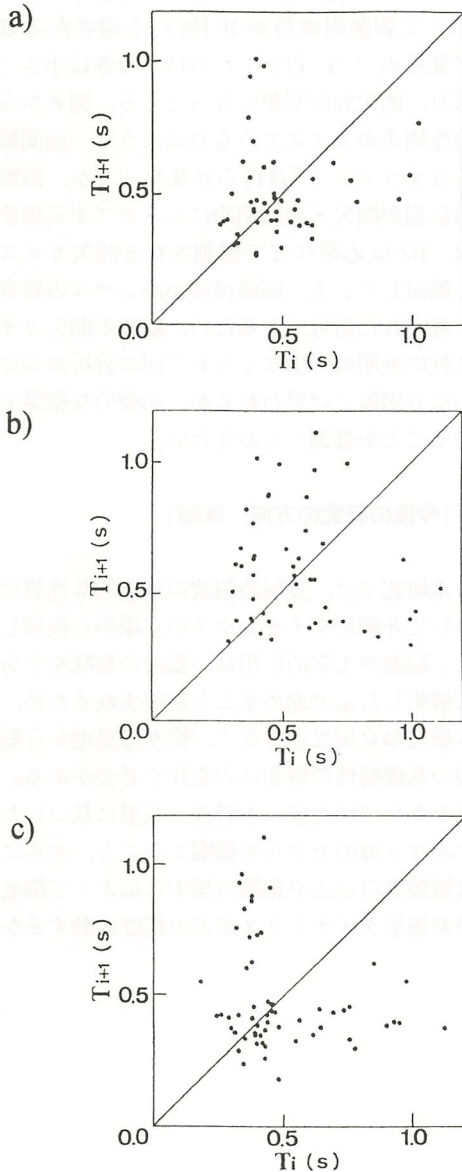


図8 a) 7 Hz, b) 10 Hz, c) 11 Hz 刺激時の位相ジャンプ間隔 T_i のローレンツプロット

の場合にもプロットはL字型となり、位相ジャンプが間欠的に起こることを示している。加えて刺激周波数が 10 Hz から遠ざかるほど要素点 (T_i , $T_i + 1$) のばらつきは小さくなり、間欠性が明瞭になってくる。図 8 から生物系のカオスでみられるような一価関数をなすプロット⁷⁾は得られなかったが、振動の位相が間欠・非周期的にジャンプする現象は、BZ 反応系などで観測される間欠カオスと酷似している。脳波自体が高レベルの雑音に埋もれた信号であるため、脳波の間欠カオス性の証明は、少なくとも今回の分析からはかなり困難とは思われるが、示唆的な結果であることを強調しておきたい。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では、覚醒時脳波の基礎的な性質について非線形ダイナミクスの立場から検討した。脳波の工学的応用は、脳波の意味を十分に解釈した上で進めることが望まれるため、本研究の立場だけでなく、様々な見地から脳波の基礎特性の解明に力を注ぐ必要がある。我々としては今後、本研究の成果に基づいたアルファ波のモデルを提案すること、さらには被験者の意志や意識の集中にによって脳波の非線形ダイナミクスがどの程度変動するか

を、定性および定量的に実証し、工学的応用のための基礎的知見を積み重ねていくことが今後の課題である。

[参考文献]

- 1) E. D. Adrian and B. H. C. Matthews: "The Berger rhythm: potential changes from the occipital lobes in man", *Brain*, 57, pp. 355-385 (1934).
- 2) E. M. Dewan: "Nonlinear oscillations and electroencephalography", *J. Theoret. Biol.*, 7, pp. 141-159 (1964).
- 3) N. Wiener: *Nonlinear Problems in Random Theory*, MIT Press & John Wiley & Sons, New York (1958).
- 4) 原田康平他: "Complex Demodulation 法による α 波の振幅および位相の解析とその空間マップ", *電子通信学会論文誌 C*, J 68-C, 9, pp. 737-744 (1985).
- 5) K. Harada et al.: "Dynamical behavior of brain alpha rhythms", in *Physics of Living State* (eds. T. Musha and Y. Sawada), pp. 223-239, Ohmsha and IOS Press (1994).
- 6) E. N. Lorenz: "Deterministic nonperiodic flow", *J. Atmos. Sci.*, 20, pp. 130-141 (1963).
- 7) H. Hayashi, M. Nakao and K. Hirakawa: "Chaos in the self-sustained oscillation of excitable biological membrane under sinusoidal stimulation", *Phys. Lett., A* 88, 5, pp. 265-266 (1982).

統計的逐次決定法を用いた認識率の設定可能な 発声内容独立型話者認識法の開発

Performance-controllable Text-independent Speaker
Recognition Using Sequential Decision

971014

研究代表者 九州工業大学工学部電気工学科 助教授 野田 秀樹

[研究の目的]

音声によって個人識別を行う話者認識はさまざまな適用分野が考えられるため、1960年代から研究が開始され、今日に至るまで国内外で研究が継続して行われている。しかし、これまでの話者認識の研究では、通常、実験に用いる全ての話者について共通の一定量の音声資料を用いた認識実験によって性能評価を行っていた。そのため、認識に用いる話者、音声資料の内容、音声の特徴パラメータ、認識方法等によって認識性能は自動的に決定され、認識システムの設計者が目的に応じて認識率を設定することは困難であった。

また、話者認識において、認識が容易な話者とそうでない話者があり、認識誤りの大部分は一部の認識が困難な話者に起因していることが経験的に知られている。これまでの話者認識研究では、認識対象の全ての話者について共通の一定量の音声資料を用いているため、一部の認識が困難な話者によって全体の認識率が下がり、十分な認識性能が得られない場合が多かった。このような話者に対してはより長い時間発声させることによって一定の認識率の確保が可能であると考えられるが、

従来このような話者に依存した適応的な処理は検討されていないようである。

本研究では、原理的に認識率の設定が可能で、話者に依存した適応的な処理が自然に実現される話者認識法について検討する。話者認識の中で発声内容独立型話者照合を取り上げ、統計的決定法の一つである逐次決定法を用いて、このような処理を実現する。逐次決定法は、一定の認識率が確保できるまでは判定を保留し、話者に対して更に発声を促す方法である。

[研究の内容、成果]

1. 統計的逐次決定法を用いた話者照合

統計的逐次決定法を用いた話者照合では、音声の特徴ベクトルの生起確率を表す確率密度関数 (probability density function; pdf) を用いて判定が行われる。音声の特徴ベクトルの系列を $x_i, i = 1, 2, \dots$ (i はフレーム番号) とし、照合対象のある話者の pdf を $p_s(x_i)$ 、その話者以外の別人全体の pdf を $p_o(x_i)$ とする。特徴ベクトルの系列が独立でない場合も統計的逐次決定法は適用可能であるが、ここでは簡単のために独立であると

する。特徴ベクトル系列 $x_i, i = 1, \dots, m, \dots$ が与えられたとき、ゆう度比

$$l_m(x_1, \dots, x_m) = \prod_{i=1}^m \frac{p_s(x_i)}{p_o(x_i)} \quad (1)$$

を用いて、判定は次のように行われる。

$$l_m(x_1, \dots, x_m) > A \text{ の場合は、同一人} \quad (2)$$

$$l_m(x_1, \dots, x_m) < B \text{ の場合は、別人} \quad (3)$$

上記以外の場合は入力特徴ベクトルの数を増やし、 $m = m + 1$ として上の判定を繰り返す。ここで、判定のしきい値 A, B は、話者照合における 2 種類の誤り率、即ち本人の音声をも別人と誤る本人棄却率 (False Rejection Rate; FR) ε_1 、及び別人を本人と誤る詐称者受率 (False Acceptance Rate; FA) ε_2 と次の関係があることが知られている。

$$A \leq \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (4)$$

$$B \geq \frac{\varepsilon_1}{1 - \varepsilon_2} \quad (5)$$

2. 確率密度関数のパラメータ推定

本研究では、照合対象の各話者について、その話者の音声の確率密度関数 (pdf) やその話者以外の別人全体の pdf を次式の混合ガウス分布でモデル化する。

$$p(x_i) = \sum_{k=1}^K a_k g_k(x_i; m_k, \Sigma_k) \quad (6)$$

$$\text{但し } \sum_{k=1}^K a_k = 1$$

$$g_k(x_i; m_k, \Sigma_k) = \frac{1}{(2\pi)^{L/2} |\Sigma_k|^{1/2}} \cdot$$

$$\exp\left\{-\frac{1}{2}(x_i - m_k)^T \Sigma_k^{-1}(x_i - m_k)\right\} \quad (7)$$

ここで、 x_i は i フレームの特徴ベクトル、 a_k

は k 番目のガウス分布 $g_k(x_i; m_k, \Sigma_k)$ に対する混合係数である。また、 L は特徴ベクトルの次元、 m_k, Σ_k はそれぞれ、 k 番目のガウス分布の平均ベクトルと共分散行列である。混合ガウス分布は、音声の特徴ベクトルの生起確率をモデル化するのに適しているため音声認識でよく用いられており、話者認識にも用いられている。

本研究では混合ガウス分布を構成する個々のガウス分布は全ての話者について共通とする。すなわち、混合係数だけが話者毎に異なるとするモデル化を行う。これによって、各話者について、その話者以外の別人全体の pdf が混合係数の計算だけで簡単に求まる (後の式(17) 参照)。また、式(1)のゆう度比の計算において、 $p_s(x_i)$ と $p_o(x_i)$ を構成するガウス分布が共通であるため計算量が少なくて済む利点がある。

混合ガウス分布モデルのパラメータ推定は次のように行う。照合対象の全話者の学習用音声から得られる特徴ベクトル系列 $x_i, i = 1, \dots, N$ を用いて、各特徴ベクトルは pdf $p(x_i)$ からの独立なサンプルであると仮定し、ゆう度

$$L = \prod_{i=1}^N p(x_i) \\ = \prod_{i=1}^N \sum_{k=1}^K a_k g_k(x_i; m_k, \Sigma_k) \quad (8)$$

を最大化する最ゆう推定によってパラメータ推定を行う。最ゆう推定値は EM アルゴリズムを適用して次のような繰り返し計算で得られる。以下の式中で (p) は、 p 回の繰り返し時点での推定値を表す。

$$a_k^{(p+1)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_k^{(p)}(x_i) \quad (9)$$

$$m_k^{(p+1)} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_k^{(p)}(x_i) x_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_k^{(p)}(x_i)} \quad (10)$$

$$\Sigma_k^{(p+1)} = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_k^{(p)}(x_i) (x_i - m_k^{(p)}) (x_i - m_k^{(p)})^T}{\sum_{i=1}^N \alpha_k^{(p)}(x_i)} \quad (11)$$

但し、

$$\alpha_k^{(p)}(x_i) = \frac{a_k^{(p)} g_k(x_i; m_k^{(p)}, \Sigma_k^{(p)})}{\sum_{k'=1}^K a_{k'}^{(p)} g_{k'}(x_i; m_{k'}^{(p)}, \Sigma_{k'}^{(p)})} \quad (12)$$

繰り返し計算における初期値は、ベクトル量子化によって特徴ベクトル x_i , $i = 1, \dots, N$ をクラスタリングして求める。クラス k のサンプル (特徴ベクトル) 数を N_k として $a_k^{(0)} = N_k/N$, クラス k に属する特徴ベクトルの平均ベクトル, 共分散行列を, それぞれ $m_k^{(0)}$, $\Sigma_k^{(0)}$ として用いる。

得られたガウス分布 $g_k(x_i; m_k, \Sigma_k)$, $k = 1, \dots, K$ を用いて, 各話者 s , $s = 1, \dots, S$ の pdf を

$$p_s(x_i) = \sum_{k=1}^K a_{s,k} g_k(x_i; m_k, \Sigma_k) \quad (13)$$

$$\text{但し } \sum_{k=1}^K a_{s,k} = 1$$

でモデル化する。ここでは混合係数 $a_{s,k}$ のみの推定となり, 推定値は話者 s の学習サンプル x_i , $i = 1, \dots, N_s$ を用いて, 次の繰り返し計算で得られる。

$$a_{s,k}^{(p+1)} = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \alpha_{s,k}^{(p)}(x_i) \quad (14)$$

$$\alpha_{s,k}^{(p)}(x_i) = \frac{a_{s,k}^{(p)} g_k(x_i; m_k, \Sigma_k)}{\sum_{k'=1}^K a_{s,k'}^{(p)} g_{k'}(x_i; m_{k'}, \Sigma_{k'})} \quad (15)$$

混合係数の初期値 $a_{s,k}^{(0)}$ は, 学習サンプル x_i , $i = 1, \dots, N_s$ を

$$k = \arg \max_{k'} g_k(x_i; m_{k'}, \Sigma_{k'}) \quad (16)$$

でクラスタリングし, クラス k に属するサンプルの頻度を求めて用いる。各話者の混合係数が得られた後, 話者 s 以外の別人の pdf を表す混合係数 $a_{o,k}$ は,

$$a_{o,k} = \frac{1}{S-1} \sum_{t=1, t \neq s}^S a_{t,k} \quad (17)$$

で求める。

3. 話者照合実験

音声資料として, 成人男性 100 名が 3 ~ 4 ケ月の時期差をおいて各時期に 2 回, 電話を通して発声した単独発声 20 単語を用いた。音声資料は, 4.5 kHz の低域通過フィルタを通した後, 標本化周波数 10 kHz, 量子化精度 12 bit で A/D 変換を行い, エネルギーの情報をもとに音声区間の検出を行った。この音声区間について, 1 次の適応プリエンファシスをほどこした後, フレーム長 25.6 msec の区間にハミング窓をかけ, フレーム周期 12.8 msec で 12 次の LPC 分析を行った。但し, 電話音声であることを考慮して, 選択的 LPC 分析によって 4 kHz までの情報のみを用いている。こうして得られた 1 次から 12 次までの LPC ケプストラム係数を特徴ベクトルとして使用した。

本実験では, 各ガウス分布 $g_k(x_i; m_k, \Sigma_k)$ の共分散行列 Σ_k は対角行列であると仮定した。混合ガウス分布モデルのパラメータ推定のための学習用音声として, 表 4 の実験以外では時期 1 の 1 回目発声の 20 単語を, 表 4 の実験では時期 1 及び時期 2 の 1 回目発声の 20 単語を用いた。以下の全ての話者照合実験においては, 各話者について, 本人の音声及び詐称者の音声を, それぞれ 20 回づつ与えており, 全話者ではそれぞれ 2,000 回の実験を行って照合誤り率を求めている。テスト用のサンプルは, 20 単語の有音区間を分析

して得られる特徴ベクトルを連結した特徴ベクトル系列を用い、その中からランダムに次々に特徴ベクトルを選んで与えた（表2のSequentialの場合以外）。これは、式(1)のゆう度比の計算式が各フレームの特徴ベクトルの独立性を仮定していることを考慮したためである。テスト用音声の発声内容は学習用音声と同じであるため発声内容独立の実験とはなっていないが、特徴ベクトルをランダムに与えていることから実質的にはそれに近いと考えられる。詐称者は本人以外の99名の中からランダムに20名を選んでいる。

はじめに、適切な混合数を知るために、混合数16, 32, 64の場合について実験を行った。テスト用音声として、時期1の1回目発声の20単語を用いた。それぞれの場合について、式(2), (3)における判定のしきい値を変えて、本人棄却率(FR)と詐称者受率率(FA)を求めた結果を表1に示す。表には判定のしきい値の自然対数 $\ln A$, $\ln B$ を記している。例えば、表中の $\ln A = 2.2$, $\ln B = -2.2$ は、式(4), (5)の不等号を等号とし、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.1$ として求めた値である。これから混合数64の場合が最も性能が良いことがわかる。以下の実験では全て混合数64を用いている。

本実験では、逐次決定法を用いた発声内容独立型話者照合の原理的な動作確認を主目的としているため、前述のように、音声分析して得られる特徴ベクトル系列をランダム化して入力している。しかし、このようなサンプ

ルの入力方法は現実的でなく、発声された音声の特徴ベクトルをそのまま逐次的に入力するのが自然である。両者(RandomとSequential)による照合性能の違いを調べた結果を表2に示す。テスト用音声として、時期1の1回目発声の20単語を用いた。当然、Randomの場合の方が性能が良いが、判定のしきい値の大きさを大きくすることによってSequentialの場合もRandomの場合に近い性能が得られている。

次に、テスト用音声による照合性能の違いを調べた。表3は、時期1の1回目発声の20単語を学習用音声とし、テスト用音声として、時期1の1回目発声（表中の1-1）、時期1の2回目発声（1-2）、時期2の1回目発声（2-1）を用いた場合の結果である。詐称者受率率(FA)はあまり差がないが、本人棄却率(FR)は1-1, 1-2, 2-1の順に大きくなっている。2-1の場合のFRが特に大きいことは、発声時期差がある音声

表2 入力サンプルの提示方法による照合誤り率(%)の違い

$\ln A, \ln B$	Random		Sequential	
	FR	FA	FR	FA
2.2, -2.2	1.1	10.9	7.1	22.7
4.6, -4.6	0.1	6.3	2.1	17.4
6.9, -6.9	0.0	4.0	0.8	13.9
11.5, -11.5	0.0	3.9	0.2	9.7
23.0, -23.0	0.0	2.8	0.0	5.5
46.1, -46.1	0.0	2.9	0.0	3.6

表3 テスト用音声による照合誤り率(%)の違い(学習用音声: 1-1)

$\ln A, \ln B$	1-1		1-2		2-1	
	FR	FA	FR	FA	FR	FA
2.2, -2.2	1.1	10.9	13.2	10.8	29.8	10.6
4.6, -4.6	0.1	6.3	6.6	5.3	28.3	4.9
6.9, -6.9	0.0	4.0	5.3	4.0	26.0	3.7

表1 混合数による照合誤り率(%)の変化

$\ln A, \ln B$	Number of Components					
	16		32		64	
	FR	FA	FR	FA	FR	FA
2.2, -2.2	2.9	19.9	1.3	13.9	1.1	10.9
4.6, -4.6	0.1	14.3	0.1	8.5	0.1	6.3
6.9, -6.9	0.0	13.2	0.0	6.1	0.0	4.0

に対するモデル化が不十分であることを示している。表4は、時期1及び時期2の1回目発声の20単語を学習用音声とし、テスト用音声として、時期1及び時期2の1回目発声

表4 テスト用音声による照合誤り率(%)の違い(学習用音声: 1-1, 2-1)

$\ln A, \ln B$	1-1, 2-1		1-2, 2-2	
	FR	FA	FR	FA
2.2, -2.2	1.6	12.4	8.7	11.7
4.6, -4.6	0.1	6.2	4.0	6.7
6.9, -6.9	0.1	4.7	2.1	5.8

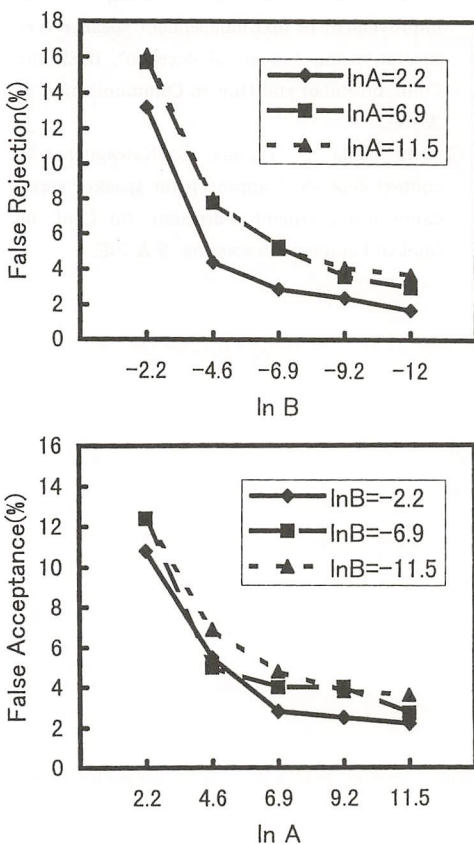


図1 判定のしきい値による照合誤り率(%)の変化

(1-1, 2-1), 時期1及び時期2の2回目発声(1-2, 2-2)を用いた場合の結果である。当然ながら、時期差がある音声を学習用に用いることによって性能が向上することがわかる。

最後に本実験の目的である、逐次決定法を用いることによって原理的に照合誤り率を設定できること、及び話者に依存した適応的な処理が実現できることを確認する。ここでは、時期1の1回目発声の20単語を学習用音声とし、時期1の2回目発声をテスト用音声とした。図1は、判定のしきい値 $\ln A, \ln B$ による本人棄却率(FR)と詐称者受率率(FA)の変化を示す。基本的にFRは $\ln B$ によって、FAは $\ln A$ によって変化することがわかる。このような変化図を事前に用意しておけば、限られた誤り率の範囲であれば、誤り率を自由に設定できることになる。表5は、ゆう度比が判定のしきい値を越えるまでに要したフレーム数を示す。本人の音声の場合と詐称者の音声の場合について、100名の話者についての平均±標準偏差を示す。特に本人の音声の場合に標準偏差が大きく、話者によって判定に要したフレーム数が大きく異なり、話者に依存した適応的な処理が行われていることがわかる。適応的な処理の効果を見るために、入力フレーム数を表5における本人の音声の平均フレーム数に固定する実験を行った。結果を表6に示す。表3の1-2欄の結果と比較して、適応的な処理の有効性がわかる。

表5 判定に必要としたフレーム数

$\ln A, \ln B$	True Speakers	Impostors
2.2, -2.2	3.6 ± 1.7	2.5 ± 1.0
6.9, -6.9	16.0 ± 10.5	10.2 ± 4.8
11.5, -11.5	28.5 ± 20.9	17.6 ± 9.4

表6 固定フレーム数での照合誤り率(%)

Number of Frames	FR	FA
4	17.1	14.6
16	8.8	6.2
29	5.3	4.6

[今後の研究の方向, 課題]

統計的決定法の一つである逐次決定法を用いて, 原理的に照合率の設定が可能で, 話者に依存した適応的な処理が自然に実現される発声内容独立型話者照合法を提案した。逐次決定法で用いられる音声の特徴ベクトルの確率密度関数は, 混合ガウス分布でモデル化した。話者照合実験によって基本的な動作を確認した。

逐次決定においては通常, 各フレームの特徴ベクトルの独立性が仮定されるが, 音声の場合は一般にこれが成立しない。特徴ベクトルを線形予測して得られる残差ベクトルは独立性を満たすと考えられることから, 今後, 残差ベクトルを用いた方法を検討する予定である。

[成果の発表, 論文等]

- 1) 原田勝也, 野田秀樹, 河口英二, “統計的逐次決定法を用いた発声内容独立型話者照合”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 97, No. 205, pp. 67-72 (1997).
- 2) 原田勝也, 末永善彦, 野田秀樹, 河口英二, “逐次決定法を用いた照合率の設定可能な話者照合”, 情報処理学会第55回全国大会講演論文集(2), pp. 2-22 ~ 2-23 (1997).
- 3) 末永善彦, 原田勝也, 野田秀樹, 河口英二, “統計的逐次決定法を用いた発声内容独立型話者照合”, 平成9年度電気関係学会九州支部連合大会講演論文集, p. 356 (1997).
- 4) H. Noda, K. Harada, E. Kawaguchi, “An improvement of text-independent speaker verification using sequential decision”, IEEE Int. Conf. on Robot and Human Communication 発表予定.
- 5) H. Noda, K. Harada, E. Kawaguchi, “A context-dependent approach for speaker verification using sequential decision”, Int. Conf. on Spoken Language Processing 発表予定.

まぶ 眩しさによる誤認識を防ぐ光学フィルタの開発

Development of Optical Filter Preventing Misconception owing to the Dazzle of the Light

971017

研究代表者

熊本電波工業高等専門学校 助教授

松田 豊 稔

[研究の目的]

生物の中には優れた光学機能を有するものがあり、金属光沢のある青色の発色で有名なモルフォ蝶の翅もその一つである。モルフォ蝶翅の表面は、誘電体薄板が光の波長程度の間隔で周期的に配列された微細構造であり、太陽光のうち青色だけを反射し他の波長の光は透過させてしまう。この発色は、色素によらないことから構造的発色と呼ばれ¹⁾、最近構造的発色を工学的に応用する研究が行われている²⁾。

筆者も、このモルフォ蝶翅の構造的発色を応用して、信号灯や標識に太陽光やヘッドライトが照射したときの眩しさを抑制する光学素子の開発を目指している。そのために、構造的発色のメカニズムを解明するとともに、構造的発色を人工的に再現する技術的方法について検討している。本研究では、モルフォ蝶翅表面の微細構造による光の回折現象を波動光学に基づく解法を用いて数値解析し、構造的発色の仕組みおよびその光学的機能を明らかにし、蝶翅表面の複雑な微細構造のなかで構造的発色に関わる本質的な形状を見出す。そして、構造的発色において、微細構造の形状を調整することにより反射する光の波長帯

域が制御できることを計算機シミュレーションにより示す。

[研究の内容、成果]

1. 構造的発色と解析モデル

図1は、モルフォ蝶翅表面の電子顕微鏡写真であり、次のような特徴を有する³⁾：

- (1) 蝶翅表面には、ridgeと呼ばれる線条が光の波長 ($0.6-0.7\mu\text{m}$) 程度の間隔で周期的に配置されている。
- (2) その線条は lamella と呼ばれる厚さ $0.1\mu\text{m}$ 程度の突起物の層構造である。
- (3) ridge や lamella など蝶翅表面の上片部はクチクラと呼ばれる等方性の媒質 (屈折率が1.5前後) で構成され、翅に青色の色素は存在しない。

このようにモルフォ蝶翅の発色は、その表面の微細構造による光の回折現象の一つである。従って、この構造的発色は、微細構造の分光特性からそのメカニズムを説明することができる。そこで、図1の微細構造の分光特性を計算機シミュレーションにより求めてみよう。ここでは、解析モデルとして、ridgeの周期構造と lamella の層構造に着目し、図2に示すような微細周期構造を考える。

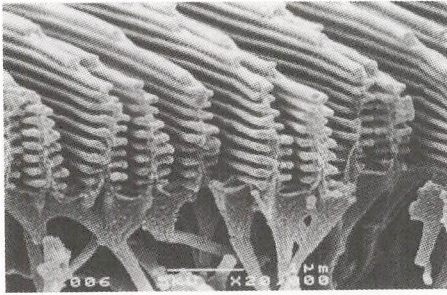


図1 モルフォ蝶翅の電子走査顕微鏡写真 (20,000倍)

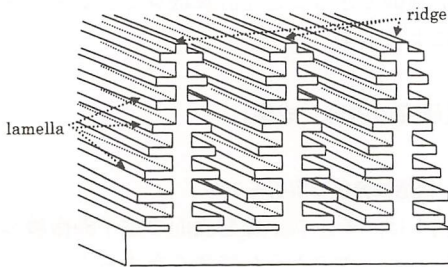


図2 構造的発色の解析モデル

2. 構造的発色の数値計算

(a) 問題の定式化

図2の周期構造に無偏光の平面光が垂直に入射したときの反射効率を求め、それから反射スペクトル特性を求める。なお、平面光(電磁波)が周期構造へ垂直入射する回折問題であることから、解析に必要な領域は、周期構造の断面の1周期に帰着させることができる。回折特性は、周期構造の断面と周期構造の材質により決定される。そこで、以降では、図3に示すように周期構造の断面のみを考察の対象とする。

なお、この周期構造の回折特性を決定するパラメータは、lamellaの層数 Q とその膜厚 e_H および屈折率 n_H 、そして間隙層の膜厚 e_L と屈折率 n_L 、さらにridgeの周期間隔 D で

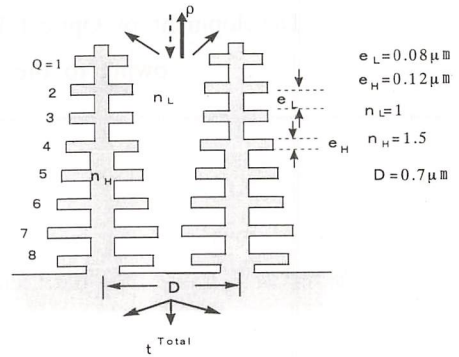


図3 周期構造の断面

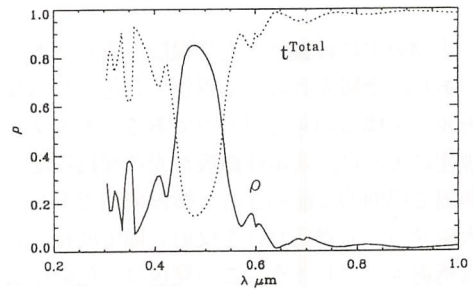


図4 反射スペクトル特性

ある。数値計算に用いたこれらのパラメータの値(図3参照)は、図1の表面観察から求めたものである。

図3の周期構造に単色の平面光が垂直入射すると、図に示すようにいくつかの反射波と透過波が発生する。これらの回折波は、周期構造による回折問題の数値解法の一つであるRCWA(Rigorous Coupled-Wave Analysis)法³⁾により求めることができる。

(b) 構造的発色の数値的実証

図3の周期構造に無偏光の平面光が垂直したときの入射波の到来方向に伝搬する0次の反射波の回折効率 ρ と透過波の回折効率の総和 t^{Total} について調べる。図4は、反射効率 ρ (実線)と t^{Total} (破線)の可視領域での

スペクトル特性を示したものである。この図から、 ρ は青色（波長 $0.48\ \mu\text{m}$ ）付近でピークとなり、逆に t^{Total} は青色付近以外の可視光でほぼ 1 となる。つまり、この反射スペクトル特性は、図 3 の周期構造が青色付近の光を反射し、青色以外の波長領域の可視光を透過させることを示しており、モルフォ蝶翅を真上から見たとき青色に見えることがこの特性により説明できる。図 4 の特性は、モルフォ蝶翅の反射スペクトルの測定値²⁾と良く一致している。

3. 構造的な発色のメカニズム

次に、構造的な発色に関わる微細構造の本質的な形状を調べることにする。

(a) $\lambda/4$ 繰り返し多層膜との比較

モルフォ蝶翅表面の微細構造における幾何学的特徴の一つは、lamella の層構造であり、その光学膜厚 ($n_H e_H$) は青色の波長 ($\lambda = 0.48\ \mu\text{m}$) の 4 分の 1 程度である。そこで、モルフォ蝶翅における構造的な発色は、lamella 層と空気層から成る $\lambda/4$ 繰り返し多層膜の構造に起因するものと考えられている^{1, 2)}。

図 5 は、この $\lambda/4$ 繰り返し多層膜モデル

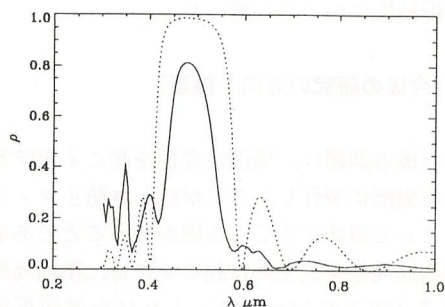


図 5 $\lambda/4$ 繰り返し多層膜の反射スペクトル特性との比較

と図 3 の周期構造モデルの反射スペクトル特性を比較したのものである。両者ともに青色付近 ($0.43 \sim 0.50\ \mu\text{m}$) で高い反射率を示すが、周期構造モデルでは高反射率となる波長帯域が狭くなっていることが分かる。つまり、 $\lambda/4$ 繰り返し多層膜を図 3 のように周期構造にすることにより、反射率は低下するが、高反射率となる波長帯域が狭帯域化される。

(b) lamella の幅の影響

$\lambda/4$ 繰り返し多層膜を図 3 のように周期構造にすることにより、lamella の幅を各層ごとに調整することができるようになり、各 lamella 層の幅を図 3 のようにテーパ状に変化させると、反射スペクトル特性が狭帯域化される。このことを詳しく調べるために、lamella の幅が異なる 3 種の周期構造の反射スペクトル特性を図 6 に示す。この図から、lamella の幅を各層ごとに変化させることにより、高反射率となる波長帯域幅が調整できることが分かる。モルフォ蝶翅の lamella の幅が層ごとにテーパ状に変化しているのは、うまく青色の発色を行うためのものであり、色感や色調に微妙な影響を及ぼしているものと考えられる。

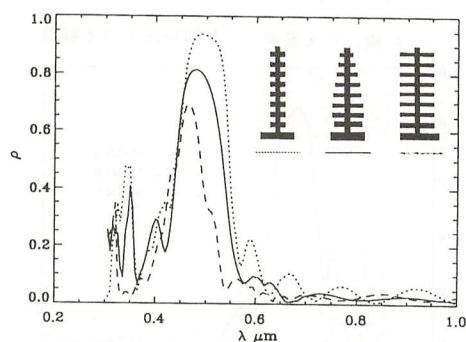
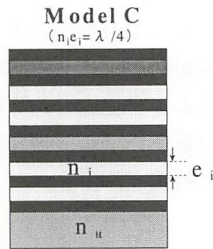
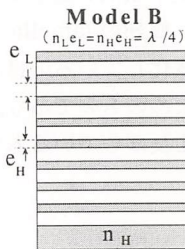
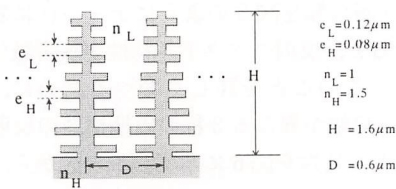


図 6 lamella の幅が反射スペクトル特性に及ぼす影響

4. 構造的な発色の誘電体薄膜による再現

lamella の幅がテーパー状に変化することによって、反射スペクトル特性の高反射率領域が狭帯域化することを定性的に考えてみよう。有限長の誘電体薄板を周期的に配置したものは、一定条件のもとでは一様な誘電体薄膜で置き換えることができる⁴⁾。この誘電体薄膜の屈折率（有効屈折率）を決定する主なパラメータは、薄板の幅と薄板の間隔である⁴⁾。従って、図3の周期構造は、各層ごとに屈折

Model A



λ/4 繰返し多層膜 有効屈折率の多層膜

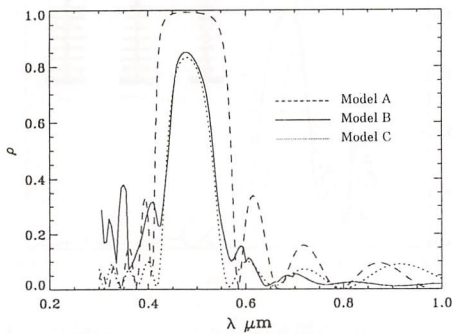


図7 構造的な発色の誘電体多層膜による再現

率の異なる誘電体多層膜で置換えられた積層構造と光学的には等価であると考えられる。

図7は、この有効屈折率の誘電体多層膜（Model C）の反射スペクトルを示したものであり、構造的な発色を起こす周期構造（Model A）の特性と可視領域ではほとんど等価であることが分かる。

5. まとめ

モルフォ蝶翅における構造的な発色を計算機シミュレーションし、次のことを明らかにした：

- (1) 構造的な発色に関わる微細構造は、幅の異なる lamella の層構造である；
- (2) lamella の光学膜厚が $\lambda/4$ となる波長 λ で反射率が最大となり、この波長の光が発色される；
- (3) lamella の幅を変化させることで、高反射率となる波長帯域を制御できる；
- (4) lamella の各層を有効屈折率で置換えた誘電体多層膜により構造的な発色が再現できる。

また、lamella の層構造のように、波長より十分小さい間隔で配置された誘電体薄板（超微細回折格子）は、人工的な異方性を示す。今回の研究では、この超微細回折格子の回折特性についても調べた。

[今後の研究の方向、課題]

今後の課題は、構造的な発色を起こす光学素子を実際に製作し、これが眩しき防止フィルタとして機能することを確認することである。構造的な発色を人工的に起こすには、微細周期構造（図7の Model A）または有効屈折率による誘電体多層膜（Model C）を製作すればよい。ただし、Model A を実際に可視領

域で製作するには $0.1\mu\text{m}$ 以下の超微細加工が必要であり、技術的に難しい。そこで、Model C の誘電体多層膜の製作を現在検討している。また、Model A についても、波長が数センチの所では機械加工で比較的容易に製作できるので、マイクロ波の領域での構造的発色も検討している。

[参考文献]

- 1) A. F. Huxley: J. Exp. Biol., 48, 227-245 (1968).
- 2) 田畑 他: 光学, 22, 618-624 (1993).
- 3) M. G. Moharam & T. K. Gayload: J. Opt. Soc. Am. 72, 1385-1392 (1982).
- 4) ボルン, ウォルフ (草川, 横田訳): 光学の原理 III, 1030-1032 (東海大学出版会).

[結果の発表, 論文等]

- 1) T. Matsuda, Y. Okuno and M. Fujimoto:

Diffraction of electromagnetic waves by Polarization-selective gratings with sub-wavelength structures, Proc. of Int. Symp. on Electromagnetic Theory, 4, 8-6 (1998).

- 2) 松田豊稔: 誘電体薄板が積層された回折格子の反射スペクトル特性, 1998 年電子情報通信学会全国大会講演論文集, C-1-50 (1998).
- 3) 藤本正行, 奥野洋一, 松田豊稔: 構造性複屈折を利用した偏光素子の数値解析, 1998 年電子情報通信学会全国大会講演論文集, C-3-95 (1998).
- 4) 藤本正行, 奥野洋一, 松田豊稔: 超微細回折格子の回折特性算出とその応用, 電気学会電磁界理論研究会資料, EMT-97-10 (1997).
- 5) 藤本正行, 奥野洋一, 松田豊稔: 超微細回折格子の回折特性算出, 平成 9 年度電気関係学会九州支部連合会大会, 722 (1997).
- 6) 藤本正行, 奥野洋一, 松田豊稔: 超微細回折格子の回折特性算出, Optics Japan '97 in Sendai, 30 pD 04 (1997).
- 7) 松田豊稔: モルフォ蝶翅における構造的発色の理論的解明, Optics Japan '97 in Sendai, 1 pP 09 (1997).

エレクトロニクス産業に用いられているレアメタル類の ヒト培養細胞を用いての毒性の検討

Cytotoxicity of rare earth compounds to cultured human cells

971020

研究代表者 島根県衛生公害研究所 主任研究員 持 田 恭
共同研究者 島根県衛生公害研究所 所 長 五明田 孝
近畿大学農学部農芸化学科 教 授 藤 田 藤樹夫

[研究の目的]

先端科学技術，特にエレクトロニクス産業では，ヒトの健康に及ぼす影響が十分に知られていない金属元素（レアメタル類）が多数利用されている。特に，半導体，磁性体の材料として広く利用され，職場環境での曝露だけでなく，廃棄により自然環境中に放出されることにより一般公衆が曝露される可能性が指摘されているが，その影響に関しては不明な点が多い。そこで我々は主としてヒト由来の培養細胞（KB細胞），サル由来の培養細胞（Vero），イヌ由来の培養細胞（MDCK）を用いてレアメタルの毒性評価を行う。

[研究の内容と成果]

1) 培養細胞の増殖

ヒト由来の培養細胞（KB），サル由来の培養細胞（Vero），イヌ由来の培養細胞（MDCK）のいずれの細胞に対しても，個々のレアメタル類（ガドリニウム（Gd），イッテルビウム（Yb），イットリウム（Y），ユウロピウム（Eu），ジスプロシウム（Dy），エルビウム（Er），ランタン（La），ホルミウム（Ho）等）による増殖の阻害が認められた。その増殖はレアメタルの濃度が増すにつれ増殖率（％）は低い傾向を示した（図1，2）。

表1は，供試レアメタル類によって得た培

表1 各種の培養細胞におけるレアメタル類の72 h-ID 50 値の比較

培養細胞	72 h-ID 50 値 (μg/ml)							
	Gd	Dy	Yb	Eu	Ho	La	Y	Er
KB	> 250	> 250	> 250	190	210	> 250	> 250	> 250
Vero	> 250	> 250	> 250	200	230	> 250	> 250	> 250
MDCK	> 250	> 250	> 250	200	230	> 250	> 250	> 250

養細胞 (KB, Vero, MDCK) の 50% 細胞増殖阻害濃度 (培養温度 37°C における 72 h-ID 50 値) を示している。いずれの細胞に対しても Eu が Gd, Yb, Y, Dy, Er, La, Ho より低い ID 50 値を示した。このことは, Eu が他のレアメタルより強い細胞毒性を持っていることを示唆している。また, 供試レアメタルは KB 細胞, Vero 細胞, MDCK 細胞の培養細胞に同じような ID 50 値を示したことから, これら細胞に対する感受性の著しい違いがないことが示唆された。

実験動物の急性毒性が報告されている Yb, Cl₃, DyCl₃, EuCl₃, ErCl₃, HoCl₃ の中で, マウスの経口 LD 50 値より生体レベルの毒性

をみると EuCl₃ が YbCl₃, DyCl₃, ErCl₃, HoCl₃ よりも強い毒性を示している。われわれの細胞レベルにおける実験結果と一致した。この結果, 毒性試験として培養細胞を用いる毒性試験の有効性が示唆された。

2) 細胞毒性と曝露温度

イメの腎臓由来の培養細胞 (MDCK 細胞) を用いてレアメタル類の毒性と曝露温度 (33°C, 35°C, 37°C, 39°C) との関係を検討した。その結果, レアメタル類は, 曝露している時の培養温度が高いほど低い毒性があらわれ, レアメタル類の毒性は曝露温度が大きく関与していることが示唆された。

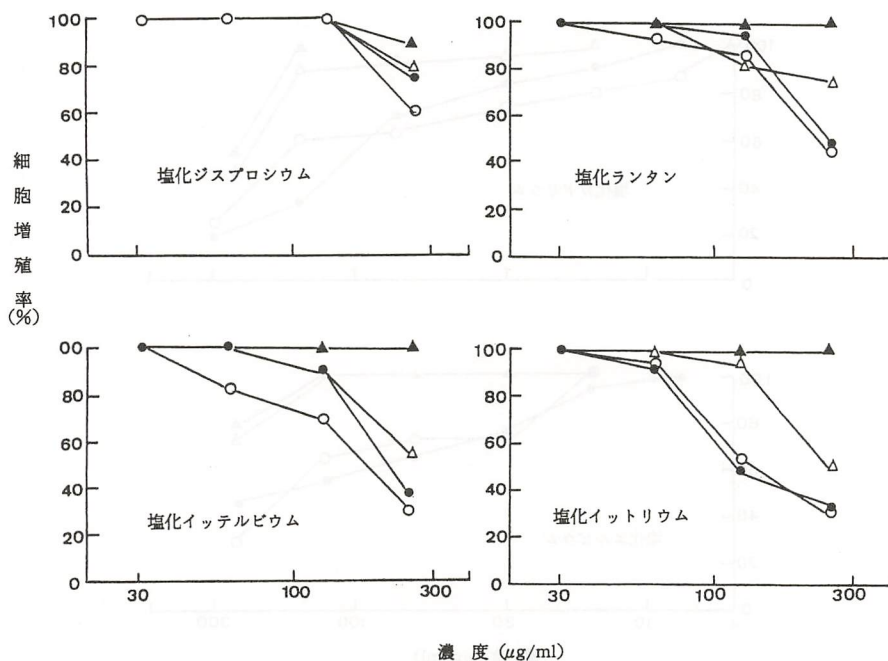


図1 MDCK 細胞におけるレアメタルの曝露温度の違いによる増殖阻害
(○; 33°C, ●; 35°C, △; 37°C, ▲; 39°C)

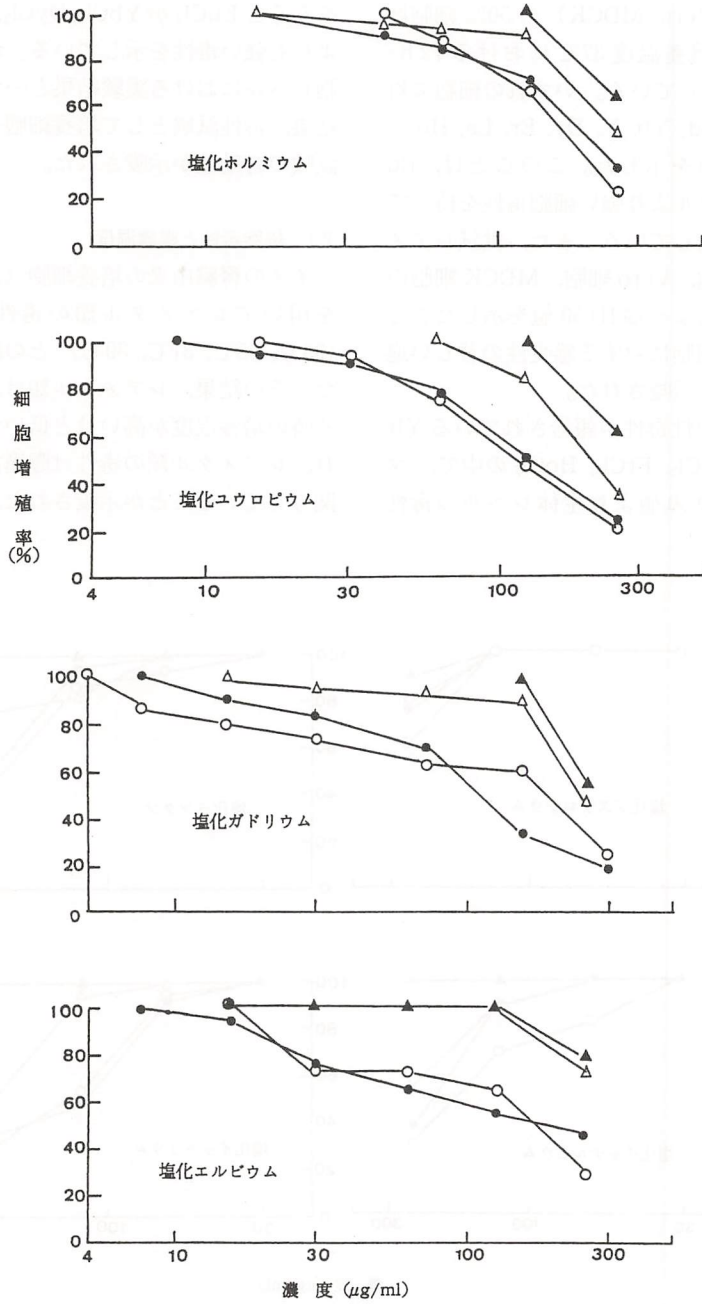


図2 MDCK細胞におけるレアメタルの曝露温度の違いによる増殖阻害
(○; 33°C, ●; 35°C, △; 37°C, ▲; 39°C)

3) アポトーシスの誘導

供試レアメタル類の毒性による培養細胞の細胞死の過程を培養細胞の DNA を用い解析した。

図 3 は、塩化ユウロピウムによる MDCK 細胞の DNA ラダーを示している。明らかに、アポトーシスの生化学的指標である DNA ラダーが認められた。

本実験の結果、供試レアメタルの毒性による細胞の死は、アポトーシスの過程を経ていることが DNA 解析により判明した。



図 3 塩化ユウロピウム (200 ug/ml) に、33℃ で 72 時間曝露後の MDCK 細胞の DNA ラダー

まとめ

- ① ヒト由来の培養細胞 (KB) に対するレアメタルの毒性は Eu が Gd, Yb, Y, Dy, Er, La, Ho より強い細胞毒性を持っていた。サル (Vero), イヌ (MDCK) 由来の培養細胞でも同様の結果を得た。
- ② レアメタルが曝露される温度が低いほどレアメタルの毒性は強く現われ傾向を示した。
- ③ レアメタルの毒性による細胞の死はアポトーシスの過程を経て迎えることが本研究により世界で初めて解明された。

[今後の研究の方向, 課題]

今後はレアメタル類が環境ホルモンとして我々の生体に作用するのか, その研究が急がれる。

[成果の発表, 論文など]

- 1) Kyo Mochida et al.: Cytotoxicity of rare earth compounds to cultured cells. (Bull. Environ. Contam. Toxicol. (アメリカ, 投稿中))
- 2) 持田 恭 他.: レアメタルの細胞毒性, 日本環境化学会第 7 回環境討論会, 1998 年

国際交流報告の抄録一覧

(平成9年度)

〔派遣〕

- ◆ 1997年 IEEE アンテナ伝播国際シンポジウム国際電波科学会議 (972001) 94
新井 宏之 横浜国立大学工学部 助教授
- ◆ 知的技術とソフトコンピューティングに関する第5回ヨーロッパ会議 (972002) 94
内野 英治 山口大学理学部 教授
- ◆ 1997年 IEEE ロボティクスとオートメーションカンファレンス (972003) 95
郭 書 祥 香川大学工学部 助教授
- ◆ 第17回アメリカ生化学会および分子生物学会国際会議 (972004) 95
掛谷 秀昭 理化学研究所 抗生物質研究室 研究員
- ◆ 第5回コンピュータを用いた構造物最適設計に関する国際会議 (972005) 96
北 栄 輔 名古屋大学大学院工学研究科 講師
- ◆ 第9回層間化合物に関する国際会議 (972006) 96
佐々木 高義 科学技術庁 無機材質研究所 主任研究官
- ◆ 第7回人間-コンピュータ・インタラクションに関する国際会議 (972007) 97
渋谷 雄 京都工芸繊維大学工学部 講師
- ◆ 第10回 Florida 人工知能国際会議 (972008) 97
鐘 寧 山口大学工学部 助教授
- ◆ 第11回国際複合材料会議 (972009) 98
濱口 泰正 科学技術庁航空宇宙技術研究所 主任研究官
- ◆ 第6回アメリカ電気電子学会ファジィシステム国際会議 (972010) 98
村田 忠彦 足利工業大学 助手

〔招聘〕

- ◆ 「第29回 国際加工者会議生産システムセミナー」に、スロベニア リュブリアナ大学
J. ペクレニク教授を招聘 (973001) 99
荒井 栄司 大阪大学工学部 教授
- ◆ 「第11回 同定理論シンポジウム」に、スウェーデン ランド大学
カール J. オストロム教授を招聘 (973002) 99
古田 勝久 東京工業大学情報理工学研究科 教授
- ◆ 「1997年音響学の研究と教育のためのシミュレーション及び可視化・可聴化に
関する国際シンポジウム」に、ドイツ連邦共和国 ルール大学
イェンス P. ブラウエル教授を招聘 (973003) 100
森本 政之 神戸大学工学部 教授

〔派遣〕

派遣研究者	横浜国立大学工学部 助教授 新井 宏之	972001
研究集会名	1997 年 IEEE アンテナ伝播国際シンポジウム国際電波科学会議 (1997 IEEE AP-S INTERNATIONAL SYMPOSIUM & URSI RADIO SCIENCE MEETING)	
期間・場所	平成 9 年 7 月 14 日～18 日, カナダ・モントリオール	
発表論文	基地局の偏波と特性を利用したカバーエリアの制御方法	

概要：

平成 9 年 7 月 14 日～18 日開催の派遣先において論文発表を行うため、7 月 12 日に成田を出発しミネアポリス経由でモントリオールに到着、20 日に日本に帰国した。

本研究集会は世界的に有名で、各国からの研究者が集り活発な討論が行われた。論文の発表は最終日の午後であるにもかかわらず会場が満員になるほど盛況であり、移動体通信分野の研究が盛んなことが実感された。発表に対する質問も基礎的な点や効果についてなどであり他の研究者と有意義な討論を行うことができた。

研究集会の内容は多岐に渡っていたが、移動体通信関係やミリ波応用など今後の研究の参考になる分野の研究動向を理解することができ非常に有意義であった。また旧知の研究者とも再会でき実り多い研究集会であった。

派遣研究者	山口大学理学部 教授 内野 英治 (元 九州工業大学情報工学部 助教授)	972002
研究集会名	知的技術とソフトコンピューティングに関する第 5 回ヨーロッパ会議 (The Fifth European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing: EUFIT'97)	
期間・場所	平成 9 年 9 月 7 日～19 日, ドイツ連邦共和国・アーヘン	
発表論文	ウェーブレットニューラルネットワークの微分方程式への応用	

概要：

平成 9 年 9 月 8 日～11 日開催の上記会議に出席し、招待講演、座長及びパターン認識と画像処理分野のプログラム委員長としての職務を遂行するとともに、本研究集会後、ドイツ・フライブルグ大学医学部にて共同研究の打ち合わせを行った。

本研究集会では、6 件のチュートリアルに引き続き、当該分野で世界的に著名な研究者による 11 件の招待講演と約 500 件の一般講演が行われた。研究集会では、ファジィ工学、ニューラルネットワーク、ジェネティックアルゴリズムと言った、いわゆるソフトコンピューティング分野の基礎研究と応用研究に関する活発な議論が行われた。また、関連ある分野の会議も同時期に同じ場所で開催されるなど、よく企画された研究集会であった。

受領者は、本研究集会においてパターン認識と画像処理分野のプログラム委員長としての職務を遂行するとともに、招待セッション「ウェーブレットニューラルネットワーク」を企画した。当該セッションでは座長を務めるとともに、招待講演を行った。

派遣研究者	香川大学工学部 助教授 郭 書祥 (元 三重大学工学部 助手)	972003
研究集会名	1997 年 IEEE ロボテイクスとオートメーションカンファレンス (1997 IEEE International Conference on Robotics and Automeation)	
期間・場所	平成9年4月19日～28日, アメリカ・ニューメキシコ州アルバカーキ市	
発表論文	ICPF アクチュエータを用いたマイクロポンプの試作と動作機構	

概 要:

平成9年4月19日～28日まで派遣先会議に出席し、論文発表を行った。その前後、UCLA（カリフォルニア大学ロサンゼルス校）の Dr. Chih-MingHo とニューメキシコ大学の Dr. Mohsen Shahinpoor を訪問し、研究討論を行った。

研究集会は、世界37か国から600人ぐらいの参加があった。広い研究分野にわたり二つのチュートリアル（Tutorial）と10のワークショップが行なわれた。また、12のテクニカルセッション、並行して各国から540篇の論文が発表された。ロボテイクスとオートメーションの基礎理論及びその応用について、活発な議論や情報交換が行われた。

今回筆者が行った研究発表は、幸いにも多数の参加者から大きな注目と評価を受け、有意義な討論を行い、いろいろな立場からご指摘とコメントを受けることができた。

派遣研究者	理化学研究所 抗生物質研究室 研究員 掛谷 秀昭	972004
研究集会名	第17回アメリカ生化学会および分子生物学会国際会議 (17 th International Congress of Biochemistry and Molecular Biology)	
期間・場所	平成9年8月23日～9月4日, アメリカ・サンフランシスコ	
発表論文	エボラクタエン類縁体の高親和性 NGF レセプターを発現していないヒト神経芽腫細胞における神経分化作用	

概 要:

平成9年8月24日～29日に開催された上記国際会議に参加し、研究発表を行った。近年、脳疾患系の予防・治療薬の開発のための神経細胞の分化機構の解明、リード化合物の発見が切望されているが、我々は、予後不良の神経芽腫細胞を良性な分化細胞へと分化誘導させる化合物（エボラクタエンと命名）を微生物二次代謝産物から発見し、さらに、数多くのエボラクタエン類縁体の生物活性を検討した結果、非常に、興味深い化合物と生物活性を見出したので、これらの成果を上記国際会議で発表した。

本国際会議は、関連分野の著名な研究者が一同に会するため最先端の情報交換の場ともなり非常に有意義な国際会議であった。

会議終了後、ダイオキシン関連物質が培養細胞及び実験動物に与える影響とその対策に関する共同研究のためにカリフォルニア大学デービス校を訪問し協議した。

派遣研究者	名古屋大学大学院工学研究科 講師 北 栄輔	972005
研究集会名	第5回コンピュータを用いた構造物最適設計に関する国際会議 (Computer Aided Optimum Design of Structures V)	
期間・場所	平成9年9月6日～14日, イタリア・ローマ	
発表論文	GA と BEM を用いた形状最適設計	

概要:

平成9年9月8日～10日の間、ローマ大学工学部“La Sapienza”で開催された上記国際会議に参加して研究発表を行い、研究調査・意見交換を行った。また、同じ場所で同時に(9～12日)開催された国際会議“Boundary Element Methods 19”にも参加し、研究発表を行った。2つの国際会議を併せると発表件数は120件ほどとなり、大規模な会議であった。

受領者は、8日午後に“Computer Aided Optimum Design of Structures V”で、9日午前に“Boundary Element Methods 19”で研究発表を行った。また、10日午前には“Boundary Element Methods 19”で座長を務めた。

派遣研究者	科学技術庁 無機材質研究所 主任研究官 佐々木 高義	972006
研究集会名	第9回層間化合物に関する国際会議 (9th International Symposium on Intercalation Compounds)	
期間・場所	平成9年5月24日～31日, フランス・アーカション	
発表論文	層状チタン酸化物の結晶性および浸透圧膨潤に関するX線回折法による研究	

概要:

標記国際会議は、平成9年5月26日～29日まで開催された。当該分野では最高クラスの会議で、今回は23カ国から240人の研究者が参集し、盛会であった。日本からの参加者は30人を数え、地元のフランスに次に多かった。

会議では、70件の口頭発表および160件のポスター発表が行われたが、全体としては、リチウム2次電池の正極材料の合成や電気化学特性についての研究発表および討論が非常に活発であった。私は会議1日目に層状化合物が膨潤から剥離に到る反応プロセスについて発表し、かなりの反響を得た。

会議の合間をぬって、ボルドー大学及び附属の固体化学研究所を訪問し、お互いの研究内容の紹介・討論を行い、施設を見学した。

今回の出張では自分の最新の成果を国際的な場で発表できたうえに、多くの世界の研究者と知りあいになり様々な有用な情報や教示を得ることができた。

派遣研究者	京都工芸繊維大学工学学部 講師 渋谷 雄	972007
研究集会名	第7回人間-コンピュータ・インタラクションに関する国際会議 (7th International Conference on Human-Computer Interaction)	
期間・場所	平成9年8月23日～8月31日, アメリカ・サンフランシスコ	
発表論文	理工系大学における WWW を利用した情報教育	

概 要：

本研究集会は、2年に1度開催され、ヒューマン・コンピュータ・インタラクション研究の国際的発表の場として最も権威のある会議の一つである。研究発表に先立ち、本研究ならびにこれからの研究に関連するであろう2件のチュートリアルに参加した。

研究発表は、27日から29日の3日間行なわれ、発表件数は、パラレルセッション453件、ポスターセッション169件であった。

私は、「Information Visualization (情報の可視化)」のセッションで発表した。やや、セッションテーマと発表内容に食い違いはあったが、数十名の聴衆が熱心に発表を聞いてくれた。また、インターネット上に研究成果などの情報を公開し、そのアクセス方法などを会場で紹介したので、今後新たな交流があるものと期待される。

派遣研究者	山口大学工学部 助教授 鐘 寧	972008
研究集会名	第10回 Florida 人工知能国際会議 (10th Florida AI International Conference) (FLAIRS-97)	
期間・場所	平成9年5月8日～18日	
発表論文	見えない事例の予測を含む強度を持つルールの発見	

概 要：

FLAIRS-97 国際会議は、人工知能研究分野において、国際的に重要な会議である。

特に Uncertainty in AI という Special Track は、曖昧性処理、曖昧性に基づく推論 (Uncertain Reasoning) に関する研究分野で世界トップレベルの研究者が集まり、重要な会議である。私たちの論文はこのセッションで第1名発表者として発表した。発表した後、ほかの研究者と、いろいろな討議や意見交換を行った。

この会議の前、分散人工知能及び Petri Net に関する研究を調査するため、Boston 大学の R. F. Vidale 教授の研究室を訪問した。この会議後、「Expert Systems Techniques and Applications」という本を編集している California 大学 Los Angeles 校の C. T. Leondes 教授を訪問した。

派遣研究者	科学技術庁航空宇宙技術研究所 主任研究官 濱口 泰正	972009
研究集会名	第11回国際複合材料会議 (Eleventh International Conference on Composite Materials)	
期間・場所	平成9年7月12日～19日、オーストラリア・ゴールドコースト	
発表論文	耐熱複合材料 T 800 H/PMR-15 カーボン / ポリイミドの Hot/Wet 圧縮強度に及ぼす吸湿量の影響	

概要：

標記研究集会は、7月14日～18日に開催され、29ヶ国、547名の参加があった。発表論文については、初日の最初であった事もあり、Specialist Session 1 (Environmental Effects) のセッション会場には多数の聴講者があり、多くの質問およびコメントを受けることができた。

また、報告者の研究に関連する特別講演の聴講、環境効果・継手・航空宇宙輸送機用材料関連の Specialist Session の聴講、およびポスターセッションの見学などを行なった。

ならびに Conference Dinner などにも参加し、会議参加者との交流を図った。

派遣研究者	足利工業大学 助手 村田 忠彦	972010
研究集会名	第6回アメリカ電気電子学会ファジィシステム国際会議 (The Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems)	
期間・場所	平成9年6月30日～7月25日	
発表論文	ファジィ納期による様々なスケジューリング問題の再定式化	

概要：

(日程)

7月1～5日 第6回アメリカ電気電子学会ファジィシステム国際会議 (スペイン)

7月13～16日 第2回遺伝的プログラミングに関する国際会議 (アメリカ スタンフォード大学)

7月19～23日 第7回遺伝的アルゴリズムに関する国際会議 (アメリカ ミシガン州立大学)

(内容)

スペインの国際会議では、ファジィシステムに関する強化学習などのチュートリアルにも参加し、最先端の技術を学ぶことができた。研究発表に関してもディスカッションを通して、研究推進につながるテーマを得ることができた。

米国では、スタンフォード大学にて、国際会議主催者であり、遺伝的プログラミングの創始者として知られる Koza 教授とディスカッションすることができた。また、移動日を用いて、カリフォルニア大学バークレー校の研究者とのディスカッションも行った。米国での国際会議参加については、ファジィ学会誌 1997 年 10 月号 pp. 686-689 に報告させていただいた。

〔招 聘〕

招 聘 者	大阪大学工学部 教授 荒井 栄司	973001
会 議 名	第 29 回 国際加工者会議生産システムセミナー (CIRP, MS セミナー)	
期 間 ・ 場 所	平成 9 年 5 月 10 日～ 15 日, 大阪府吹田市 大阪大学 銀杏会館	
被 招 聘 者	スロベニア国リュブリアナ大学 J. ペクレニク教授	

集会の概要：

CIRP・MS セミナーは、生産システムの領域で毎年開催されている国際会議で、本年 5 月 11 日～ 13 日、大阪大学で開催された。J. ペクレニク教授は約 30 年前に設立された本セミナーの設立者のひとりであり、国際的にも生産システムに関する権威者のひとりである。

今回のセミナーでは 5 月 12 日に J. ペクレニクス教授にキーノート・スピーチをして頂いた。題目は“Structural and Operational Complexity of Future Manufacturing System”であり、将来の生産システムの持つべき機能と、これを満足する技術動向について講演が行なわれた。特に、自律分散機能の重要性が強調され、その実現に向けた国際共同研究に対する提案も行なわれた点は、本研究助成の趣旨としても高く評価できる。

招 聘 者	東京工業大学情報理工学研究科 教授 古田 勝久	973002
会 議 名	第 11 回 同定理論シンポジウム (SYSID'97) / 国際自動制御連盟 (IFAC)	
期 間 ・ 場 所	平成 9 年 7 月 9 日～ 17 日, 福岡県 北九州市	
被 招 聘 者	スウェーデン国ランド工科大学 カール J. オストロム教授	

集会の概要：

カール J. オストロム教授は、制御における同定理論の草分けであり、適応制御の先駆者として知られている。今回の国際自動制御連盟 (IFAC) の第 11 回同定理論シンポジウム (SYSID) は IFAC の創設 40 周年、SYSID の 30 周年の記念すべき会議であり、オストロム教授にパネリストとして今後の制御を考えるセッションへの参加を要請するとともにこれまでの貢献に対して感謝状が贈られることになった。

平成 9 年 7 月 9 日小倉において、第 11 回同定理論シンポジウム (SYSID) の Official Banquet が開催され、教授に大会会長の榎木義一教授から感謝状が贈られた。7 月 10 日、教授は IFAC の Award Committee 委員長として委員会に出席。7 月 11 日 “What are challenges in System Identification?” と題するパネルセッションが開催され、大きな database の様なものを利用したシステムの同定を含む新しい可能性に言及した。7 月 14 日～ 16 日、東京工業大学を訪問し、申請者と共著の倒立振子の振り上げの制御に関する論文を二人で書き上げた。

Astrom 教授の来日により、学会がより活発な議論と、学術的なレベルを上げることが出来たとともに、申請者個人としても、これまでの共同研究に関する打ち合わせをする事ができた。

招 聘 者	神戸大学工学部 教授 森本 政之	973003
会 議 名	1997 年音響学の研究と教育のためのシミュレーション及び可視化・可聴化に関する国際シンポジウム	
期 間 ・ 場 所	平成 9 年 4 月 2 日～ 4 日，東京・早稲田大学 国際会議場	
被 招 聘 者	ドイツ連邦共和国ルール大学 イェンス P. ブラウエル教授	

集会の概要：

被招聘者のドイツ連邦共和国ルール大学 Jens P. Blauert 教授は，平成 9 年 4 月 2 日から 4 日に早稲田大学国際会議場（東京）で開催された，「1997 年音響学の研究と教育のためのシミュレーションおよび可視化・可聴化に関する国際シンポジウム（ASVA 97）」において，招待講演者の一人として，「Acoustical simulation and auralization for VR and other applications」と題する講演を行った。

本国際シンポジウムは，音に関するシミュレーション手法，可聴化，可視化技術の基礎的研究と，これらの技術の工学的応用，並びに教育への応用に関する実際的研究の双方について，関連の研究者が一同に会して議論を行い，視覚・聴覚を通したマルチメディア技術の研究への応用の可能性を探ることを目的として開催されたものである。

また，シンポジウム終了後，理研（名古屋）を訪問し上記研究テーマに関する研究交流を行った。

受領者投稿

若手研究者への研究助成の意義

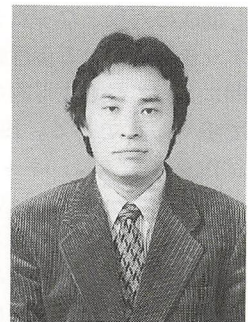
京都大学大学院工学研究科精密工学専攻 助教授 榎 木 哲 夫

(第1回 受領者)

研究者にとってかけがえのないもの、それは自らを導いて頂いた良き恩師の存在であり、研究環境であり、経験であろう。8年前、幸運にも本財団の第一回研究助成金（平成2年度）を頂く機会を得た。まとまった額の研究費の助成は、当時初めて研究者として独り立ちしていく資格を与えて頂いたような喜びを感じたことを今でも憶えている。筆者の場合、恩師の助言により、思い切って海外に一年間身をおき、研究以外の雑用から解放され、自由に進めたい研究についてじっくりと考えてみることにした。そして頂いた助成金はそのための滞在資金の一部として活用させて頂くことで本財団事務局にご了解を頂き、13ヵ月に渡って米国スタンフォード大学での客員研究員としての滞在が可能になった。有り余る自由な時間、それまで文献で何度も見てきた著名な学者達の頻々たる講演、活気溢れる教官予備軍のポスドクや博士課程学生とのセミナー、どれを取り上げても今となっては得難い貴重な研究環境であり経験であった。そして何より若い時期にこの助成を頂けたことをいま心から感謝している。同じ助成金が仮に現在得られていたとしてそれはまた違った用途になっていたに違いない。

当時わが国での各種知能化技術のブーム的な盛り上がりによそに、向こうでは人間を系に取り込んだシステム全般に渡る設計論について、マネジメント・組織論や人文系の学者

を取り込んだ学際的な土俵の上で議論されていることに懐の深さを感じたものだった。今日我々を取り巻く巨大化した人工システム、そしてこのシステムに様々な人間がかかわり、さらに環境が陽に陰に作用する。いまや利便性を提供する側とされる側のインタフェースが、そしてテクノロジーと人間とのインタラクションの有り様が問い直される時期に来ている。米国滞在時に議論されていた内容は、確かにテクノロジー主導の工学から人間・環境との調和を目指した工学へのシフトを見通した議論であったことが思い起こされる。かような貴重な研究環境と経験を得る機会を与えていただいた本財団に改めて感謝申し上げるとともに、今後も末長く若手研究者への支援にご尽力賜わることを期待してやまない。



受領者投稿

研究助成のその後

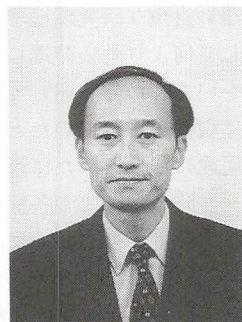
筑波大学構造工学系 助教授 岩田 洋 夫
(第2回 受領者)

私が所属する筑波大学構造工学系では名実ともに講座制を廃し、研究組織をどうするかはすべて各教官の自由になっている。グループを組んでも良いし、一人でやってもよく、またそれも固定的ではない。私が筑波大学に赴任したのは博士号取得直後の1986年であり、私の専門分野であったヒューマン・インターフェイスは他にやっている人がいなかったため、裸一貫から研究室を立ちあげることになった。構造工学系では大学院を卒業したばかりの若手教官にも一つの実験室を与えてくれるため、これが研究の重要な出発点になった。独自の研究を始めるためにはゼロからスタートするのが一番である。しかし、何もない実験室に機材をそろえるためには研究費が必要である。駆け出しの若手教官がとれる科研費は奨励研究くらいであり、額も限られている。その苦しい時期に立石科学技術振興財団から助成金を得ることができたのは大変有意義であった。

助成の対象となったテーマはバーチャルリアリティにおける歩行感覚の合成である。人間にとって最も生得的な移動手段は自分の足で歩くことである。1989年に作った最初の試作システムは、キャスターを取り付けたローラースケートをはいてパラシュートのようなハーネスで体をつるすものであった。その後、色々な方法を試みてきたが、最新のものはどの方向にも無限に動く床を作り、本人

の動作に合わせて床が元の位置に戻すように動くものができている。これは12個のベルトコンベアを数珠つなぎにすることによって、前後左右に動ける床を構成している。この方式は平面の床に対してはほぼ完璧な歩行感覚を呈示することができる。また、このような装置の実用的な応用として、災害時の非難のシミュレータとして用いるプロジェクトが進行中である。

私の研究テーマは、上記のものも含めて体で感じる情報メディアの構築である。今日ではマルチメディアといえばまだ視聴覚であるが、将来は手足で感じるものも当然必要になる。この課題に関する10年来の研究成果に対し、本年東京テクノフォーラム21からゴールドメダル賞をいただいた。この場を借りて感謝したいと思う。



-
- 平成 9 年度活動報告
 - 平成 10 年度助成報告
 - 第 9 回（平成 10 年度）助成課題一覧
 - 平成 11 年度助成候補募集案内

平成9年度活動報告

(1) 主要業務日程

平成9年 5月13日	第8回(平成9年度)助成金贈呈式及び懇親交流会を開催
6月24日	第17回理事会・第17回評議員会開催 ・平成8年度事業報告及び決算報告の承認 ・平成10年度助成課題応募方法の承認
8月1日	「平成10年度助成候補募集案内」発送
9月1日	「平成10年度助成課題」の応募受付開始
9月19日	助成研究成果集(第6号)を発行
10月31日	「平成10年度助成課題」の応募締切
12月末日	選考委員による応募課題の書面審査完
平成10年 1月20日	第10回選考委員会開催 ・平成10年度助成課題候補選考
2月27日	オムロン(株)より運用財産3,000万円の寄付金受領
3月18日	第18回理事会・第18回評議員会開催 ・平成10年度事業計画及び収支予算案の承認 ・平成10年度助成課題の承認

(2) 会計報告

収支計算書

(自 平成9年4月1日 至 平成10年3月31日)
(単位:千円)

収入の部	
基本財産運用収入	43,651
寄附金収入	30,000
雑収入	355
前期繰越額	84,870
合 計	158,876
支出の部	
事業費	61,477
管理費	13,632
合 計	75,109
次期繰越額	83,766

貸借対照表

(平成10年3月31日)

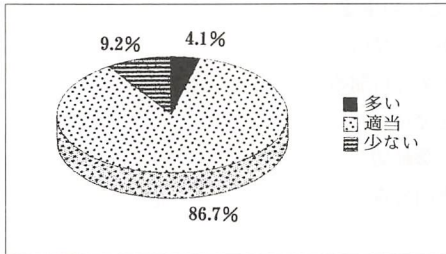
(単位:千円)

資産の部	
流動資産	現金 210
	普通預金 3,556
	定期預金 80,000
固定資産(基本財産)	
	定期預金 1,000,000
	投資有価証券 131,250
その他固定資産	150
資産合計	1,215,166
負債の部	負債合計 0
正味財産の部	正味財産 1,215,166
負債及び正味財産合計	1,215,166

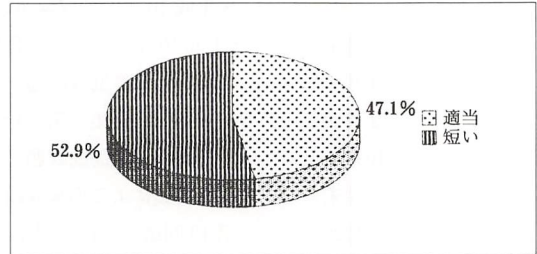
(3) 事務局報告 — アンケート調査のまとめ —

事務局では、平成9年度活動の一環として、第1回から第7回までの研究助成受領者130名を対象に、当財団の研究助成事業に関するアンケート調査を実施し、81%の方々から回答をいただきました。以下にアンケート調査結果の概要を報告します。

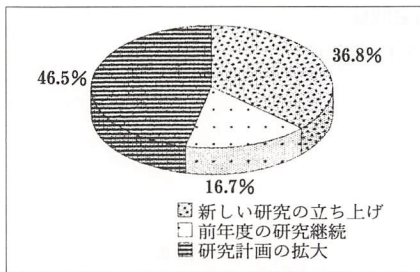
① 当財団の研究助成金額・助成期間について研究助成金額（最大250万円）は、



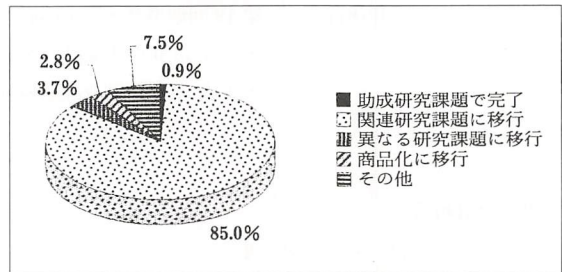
助成期間（原則1年）は、



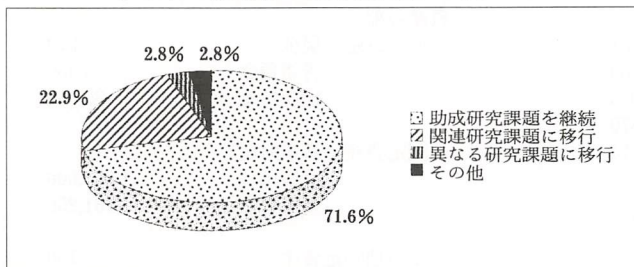
② 助成金は、貴研究活動にどのように役立ちましたか



③ 助成研究課題終了後、次のステップは、



④ 現在の研究課題と助成研究課題の関連は、



謝 意

アンケート調査にご協力いただいた研究助成受領者各位に対し、本紙面をお借りして謝意を表します。いただいた貴重なご意見は、今後の財団運営の参考にさせていただきます。

平成 10 年度助成報告

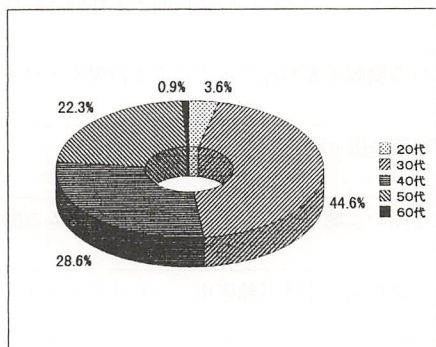
本年は、第 9 回目の助成となる平成 10 年度助成課題に対し、平成 10 年 5 月 7 日、第 9 回助成金贈呈式を開催し、次の助成を行った。

研究助成	21 件	4,991 万円
国際交流助成		
研究者海外派遣助成	8 件	350 万円
外国人研究者招聘助成	1 件	50 万円
合 計	30 件	5,391 万円

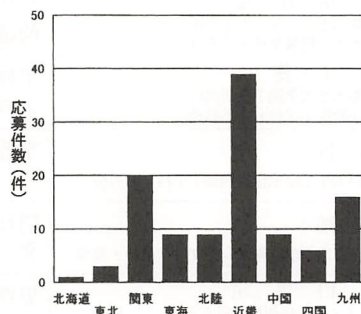
この結果、財団設立以来の助成事業は、研究助成 183 件、国際交流助成 90 件、助成総額約 4 億 8 千 5 百万円に達した。

● 平成 10 年度研究助成の応募状況

(1) 年令別



(2) 地域別



● 第 9 回助成金贈呈式

日 時：平成 10 年 5 月 7 日 (木)

場 所：京都宝が池プリンスホテル

助成金贈呈式は、来賓に科学技術庁長官官房審議官 大熊健司様、京都府商工部次長 小嶋龍吉様ほか受領者、財団関係者等約 80 名の出席のもとに開催し、引き続き懇親交流会を行った。



第9回（平成10年度）助成課題一覧

〔研究助成〕

（五十音）

研究代表者氏名・所属機関・職名	研 究 課 題 名
一 川 誠 山口大学工学部感性デザイン工学科・講師	観察者及び対象の運動が複数の情報源からの奥行知覚とその感性要因に与える効果
乾 正 知 茨城大学工学部システム工学科・助教授	機械製品の概念設計を支援するシミュレーションシステムの開発
宇佐川 毅 熊本大学工学部数理情報システム工学科・助教授	ヘッドセットによる特定調波成分のアクティブ制御に関する研究
江 頭 直 義 広島県立大学生物資源学部・教授	二重認識能を有する電解発光に基づく新規においセンサの開発
大 石 潔 長岡技術科学大学工学部電気系・助教授	ロボスト加速度制御系と外乱オブザーバによる高速インテリジェントモーション制御
岡 田 徳 次 新潟大学工学部情報工学科・教授	無軸変位角抽出による全作用力方向と全方位の検出
片 寄 晴 弘 和歌山大学システム工学部デザイン情報学科・助教授	パフォーミングアートにおける意図伝達の物理的・生理的・心理的研究
川 上 養 一 京都大学大学院工学研究科電子物性工学教室・助教授	半導体ナノ構造における励起子光物性の創出による新規光デバイスの開発
小 谷 学 神戸大学工学部情報知能工学科・助教授	学習能力を持つ音響診断装置の開発
木 幡 稔 千葉工業大学情報ネットワーク学科・教授	隠れマルコフモデルを用いた聴覚障害者用発話訓練システムの開発
坂 口 貴 司 （財）イメージ情報科学研究所 井口研究グループ・主任研究員	患者の負荷モニタリングに基づく構音障害用リハビリテーション支援システムの開発
島 田 伸 敬 大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻・助手	単眼視動画像を用いた人体の三次元形状と動作の推定に関する研究
菅 野 重 樹 早稲田大学理工学部機械工学科・教授	人間共存ロボットにおける視覚を用いた協調作業者の意図理解
田 口 正 美 秋田大学工学部資源学部材料工学科・助教授	PbO ₂ /PbO/Pb 薄膜固体電池の充放電特性
内 匠 透 神戸大学医学部・講師	時計遺伝子からチャネル分子に至る生体リズムのシグナル伝達機構の解明
田 中 弘 美 立命館大学理工学部情報学科・教授	ハプティック（触覚）インターフェイスを実現する実世界ベース仮想空間シミュレータ構築の研究
田 中 豊 岡山大学工学部システム工学科・教授	盲人用視覚補助装置の開発研究

研究代表者氏名・所属機関・職名	研 究 課 題 名
土 田 亮 岐阜大学工学部応用精密化学科・助教授	コロイド結晶を用いたカラー表示素子の開発
西 壽 巳 大阪工業大学工学部電子工学科・助教授	回帰性微小プリズムアレイを用いた光インターコネクション用デバイスの基礎的研究
本 郷 哲 宮城工業高等専門学校 情報デザイン学科・講師	エバネッセント音波を用いた近接センサの研究
山 田 正 良 京都工芸繊維大学工学部 電子情報工学科・教授	一次元プロセッサアレイを用いた新生児頭部超音波エコー動画像の即時並列処理

研究助成総額 4,991 万円

〔国際交流助成〕

(五十音)

受領者氏名・所属機関名・職名	派遣先研究集会／主催者名
青 山 尚 之 電気通信大学電気通信学部 機械制御工学科・助教授	第 13 回アメリカ精密工学会 総会
田 中 英 夫 大阪府立大学工学部・教授	ファジィシステムに関する 1998 年度 IEEE 国際会議 主催：IEEE ニューラルネットワーク会議，国際ニューラルネットワーク協会，IEEE アラスカ支部
陳 延 偉 琉球大学工学部 電気電子工学科・助教授	IEEE 計測と測定技術に関する国際会議 主催：米国電気技術者協会
陳 新 開 三重大学工学部電気電子工学科・助手	第 37 回 IEEE 決定と制御に関する国際会議 主催：米国電気電子学会，制御システム部会
馬 場 則 夫 大阪教育大学教育学部教養学科・教授	第 2 回知識に基づいた知的電子システムに関する国際会議 主催：ジェイン，南オーストラリア大学知識に基づいた知的工学システム長
福 本 文 代 山梨大学工学部電子情報工学科・助手	ニューヨーク大学数理科学コンピュータサイエンス学部において Prof. R. Grishman らとコーパスに基づく自然言語処理における共同研究をおこなう
古 川 保 典 科学技術庁無機材質研究所 第 13 研究グループ・主任研究官	1998 年度レーザーとエレクトロ-optics に関する国際会議 主催：IEEE レーザーとエレクトロ-optics 協会
村 岡 浩 治 科学技術庁航空宇宙技術研究所 飛行実験部・研究員	米国自動車工業会世界航空会議 主催：米国自動車工業会
福 島 邦 彦 大阪大学大学院基礎工学研究科 システム人間系専攻・教授	ICONIP '98 (第 5 回国際神経情報処理会議) に，ドイツ ボン大学 R. エックミラー教授を招聘

国際交流助成総額 400 万円
平成 10 年度助成総額 5,391 万円

財団法人 立石科学技術振興財団 平成 11 年度 助成候補募集案内

財団法人立石科学技術振興財団においては、下記の通り平成 11 年度の研究助成及び国際交流助成の候補募集を行なっておりますので、お知らせいたします。

記

(1) 助成対象

助成金の交付対象は、次に掲げるものとします。

① 研究助成

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

② 国際交流助成（派遣と招聘）

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

人間と機械の調和を促進するということは、必ずしも、マンマシーン・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 | 1 件 250 万円以下、20 件程度 |
| ② 国際交流助成金（派遣と招聘） | 1 件 50 万円以下、10 件程度 |

(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 当財団に、成果報告書と収支報告書の提出が可能な方。
- ③ 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、ご遠慮下さい。

(4) 募集期間

平成 10 年 9 月 1 日～平成 10 年 10 月 31 日（郵便局消印有効）
当財団の所定用紙に記入して応募して下さい。

(5) 助成金交付の時期

平成 11 年 5 月の予定（選考委員会と理事会で決定後）

(6) 申請書類請求及び問い合わせ先

〒 616-8025 京都市右京区花園土堂町 10 番地 財団法人 立石科学技術振興財団 事務局
TEL (075) 461-4771 FAX (075) 465-3697

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

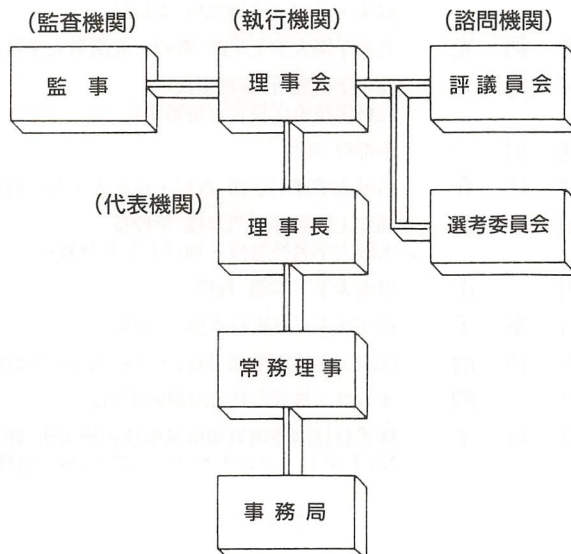
以上

■ 財 団 の 概 要

■ 役 員・評 議 員

財 団 の 概 要

- 名 称 財団法人 立石科学技術振興財団
(英文名 Tateisi Science and Technology Foundation)
- 所 在 地 京都市右京区花園土堂町 10 番地
TEL. (075) 461-4771 FAX. (075) 465-3697
- 理 事 長 立石 信雄
- 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。(研究費助成 20 件程度 / 年, 250 万円以下 / 件)
 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。
(研究者の海外派遣及び外国人研究者の招聘, 助成 10 件程度 / 年, 50 万円以下 / 件)
 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。(助成した研究結果を年間 1 回発行)
 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

(1998-4-1 現在)

役員

理事長	立石 信雄	オムロン株式会社 取締役会長
常務理事	小野田 裕一	オムロン株式会社 参与
理事	伊夫伎 一雄	株式会社東京三菱銀行 相談役
理事	大澤 弘之	宇宙開発事業団 顧問・元科学技術庁事務次官
理事	大野 豊	京都大学名誉教授・立命館大学客員教授
理事	尾佐竹 洵	東京大学名誉教授
理事	熊谷 信昭	科学技術会議議員・大阪大学名誉教授
理事	黒田 眞	財団法人 2005 年日本国際博覧会協会 事務総長 元通商産業審議官
理事	巽 外夫	株式会社住友銀行 相談役
理事	立石 義雄	オムロン株式会社 取締役社長
理事	三笠 薫	オムロン株式会社 顧問
理事	諸井 虔	秩父小野田株式会社 取締役相談役
監事	辻 敢	公認会計士
監事	戸倉 晴美	弁護士

評議員

評議員	相澤 益男	東京工業大学生命理工学部 教授・学部長
評議員	相磯 秀夫	慶応義塾大学大学院 教授 政策・メディア研究科 委員長
評議員	朝倉 利光	北海学園大学工学部 教授・北海道大学名誉教授
評議員	雨村 博光	理化学研究所 副理事長 元科学技術庁長官官房審議官
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	高知工業高等専門学校 学校長 大阪大学名誉教授・神戸大学名誉教授
評議員	未田 正	摂南大学工学部 教授
評議員	立石 峯子	社団法人 CISV 日本協会 理事
評議員	長谷川 利治	南山大学経営学部 教授・京都大学名誉教授
評議員	秦野 勲	オムロン株式会社 取締役副社長
評議員	葉原 耕平	株式会社国際電気通信基礎技術研究所 顧問 NTT アドバンステクノロジー株式会社 特別嘱託

(50 音順)

編 集 後 記

昨年に引き続き、お蔭様で今年も助成研究成果集（第7号）を発行することができました。ご寄稿いただきました熊谷理事様はじめ研究者の皆様、また編集にご協力くださいました関係各位に紙面をお借りして御礼申し上げます。

第7号は主として、当財団が第6回目（平成7年度）～第8回目（平成9年度）に研究助成いたしました研究課題の中で、研究計画の終了したものを集録しています。

国際交流助成（派遣、招聘）につきましては、本号より報告書の抄録を集録いたしました。今回は第8回（平成9年度）助成が対象です。

また、本号より新たに当財団の活動状況、事業状況等をご紹介する年報的な内容や、これまで助成した皆様からのご意見、ご感想等を掲載するコラム的な投稿欄を設けました。今回投稿いただきました第1回研究助成の京都大学大学院榎木助教授、第2回研究助成の筑波大学岩田助教授には、ご協力感謝いたします。皆様のご意見、ご感想等ご投稿をお待ちしております。

本助成研究成果集は、当財団の助成研究成果普及事業の一環として毎年9月に継続発行し、助成研究者の皆様、国立国会図書館、全国主要大学・研究機関並びに同図書館等約400ヵ所に拝送させていただいております。ご活用お願いいたします。

(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7号
平成10年9月(1998)

発行 財団法人 立石科学技術振興財団
〒616-8025 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
〒604-8832 京都市中京区西新道通松原上ル東側
TEL (075) 314-6161

(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。)