

視覚性到達運動における両眼視と上肢位置感覚の統合[†]

前田太郎*・舘 暲**

Sensory Integration of Binocular Visual Space and Kinesthetic Space in Visual Reaching Experiments

Taro MAEDA* and Susumu TACHI**

It is known in psychology that the human visual space and kinesthetic space do not completely coincide. Human subject's response undershoots the hand reaching point in depth under the visual control of reaching movement without vision of his limb. In this paper, six neural network models of sensory integration of binocular view space and kinesthetic space using hand position are presented to find how the joint angles of the right arm and eye movements are integrated into the human space perception. Visual reaching experiments revealed that one of the presented models showed a characteristics which was similar to those of the human subjects. The structure of the model is equivalent to the structure of human sensory integration. In this sensory integration, the signal space for the perception of the positional coincidence is that of the arm joint angles. The signals of eye movements are transformed into the equivalent signals of the arm joint angles which are similar to the signals for the arm control. It suggests that such a structure is organized for the needs of the arm control in this type of sensory motion control.

Key Words : visual reaching experiment, sensory integration, neural network model, binocular vision, hand-eye system

1. はじめに

人間の各種感覚に基づく空間知覚の特性については心理学の分野において様々な研究がなされている。その多くは視空間に関するものであり、物理空間に対して一定の傾向をもって曲っていることが知られている¹⁾。その特性を示すものとしてはホロプロタ²⁾、平行アレイ³⁾・距離アレイ⁴⁾の現象が古くから知られている。一方、触空間についてもこれと同様の研究がなされており、視空間の場合と同様、上肢運動感覚に基づく主観的直線は物理的直線とは異なり、観察者に対して凹型の曲線を描く^{5)~7)}。

こうした各種感覚器からの感覚量に物理空間からのずれが発生している以上、これらの感覚量を統合した場合、同一の物理量に対しても感覚間の食い違いがでることが

予測される。実際にこの食い違いが発生する現象は心理学の分野においてよく知られており、視覚性の到達運動の際に手の運動を見えなくすることによって、手の到達位置に関するアンダーシュートが発生することが実験によって確かめられている^{8)~10)}。

ホロプロタや触空間の歪みの現象は主観的直線および平行という後天的に獲得したと考えられる直交座標系上の知覚概念に基づくものであり、その感覚量は各感覚器からの生得的な信号に基づいて後天的な学習によって生成されるようになったものと考えられる。われわれは以上の考え方にに基づき、これらの現象を学習によって感覚量を生成する人間の信号処理系の特性として捉え、神経回路網モデルを用いた学習によって人間と同様の空間知覚特性を示すような信号処理モデルの構造を求めることで人間の空間知覚における情報処理構造を構成的に考察してきた¹¹⁾。

これに対し、今回われわれが採り上げた視覚性到達運動の場合、その情報処理の本質は視覚と上肢運動感覚という異なる感覚間における位置情報の統合である。こうした感覚間統合で行われる信号処理は生得的に得られる

[†] 第5回生体・生理工学シンポジウムで一部発表(1990・11)

* 機械技術研究所 つくば市並木 1-2

** 東京大学先端科学技術研究センター 東京都目黒区駒場 4-6-1

* Mechanical Engineering Lab., MITI, Tsukuba

** RCAST, The University of Tokyo, Meguro-ku, Tokyo
(Received January 6, 1992)

(Revised July 10, 1992)

信号間の統合であって、それゆえに後天的に獲得された感覚量との関連は薄く、これまでのホロボタやアレイといった直交座標系上の感覚量に関する議論や実験がそのまま当てはまるものではない。しかし、生体が生得的な個体差や個体の成長に伴う生体の各種パラメータの変化に適応するためには何らかの学習の機構をもつ必要がある。こうした学習機能に関しては、反転眼鏡などによる適応実験に代表される残効現象などによって非常に多くの研究がなされており、その存在と可塑性については疑うべくもない。また、人間の神経系において後天的な試行錯誤によってこうしたハンドアイシステムの学習が可能であることについては、生理学的知見を反映した神経回路網モデルの立場から計算論的な研究が行われている^{12),13)}。よって、これら感覚間の食い違いの現象もまた学習によって感覚間の統合を実現する人間の信号処理系の特性と考えることができる。

従来の研究においては、これら人間の空間位置知覚における異種感覚間の統合の特性は心理現象として解析されてきたが、その感覚間の食い違いの発生の原因につい

ての議論はこれまでなされていなかった。本報告においては、これらの空間知覚実験において実際に人間が用いている生体内情報に注目し、人間の視覚性到達運動の際にみられる両眼視と上肢運動感覚の統合の特性について被験者を用いた測定と神経回路網的学習によるモデルを用いてシミュレーションを行い、比較・考察をくわえる。

2. 視覚性到達実験

まず、被験者を対象に視覚性到達実験を行い、到達位置のずれ量の測定を行った。ここで行ったのはビジュアルフィードバックを断った状態での視標に対する定位実験である。

従来この種の定位実験は多くの場合、測定の対象とする生体情報を明確に限定しておらず、また直交座標系に基づいて計測されることが多い^{8),10)}。このためわれわれは、本来生体と直接関係のない直交座標系よりも眼球運動や上肢運動にみられる生体本来のもつ情報形態に基づいた座標系において実験を行う必要があると考えた。

Fig. 1(a)に実験装置の概略を示す。被験者は正面を

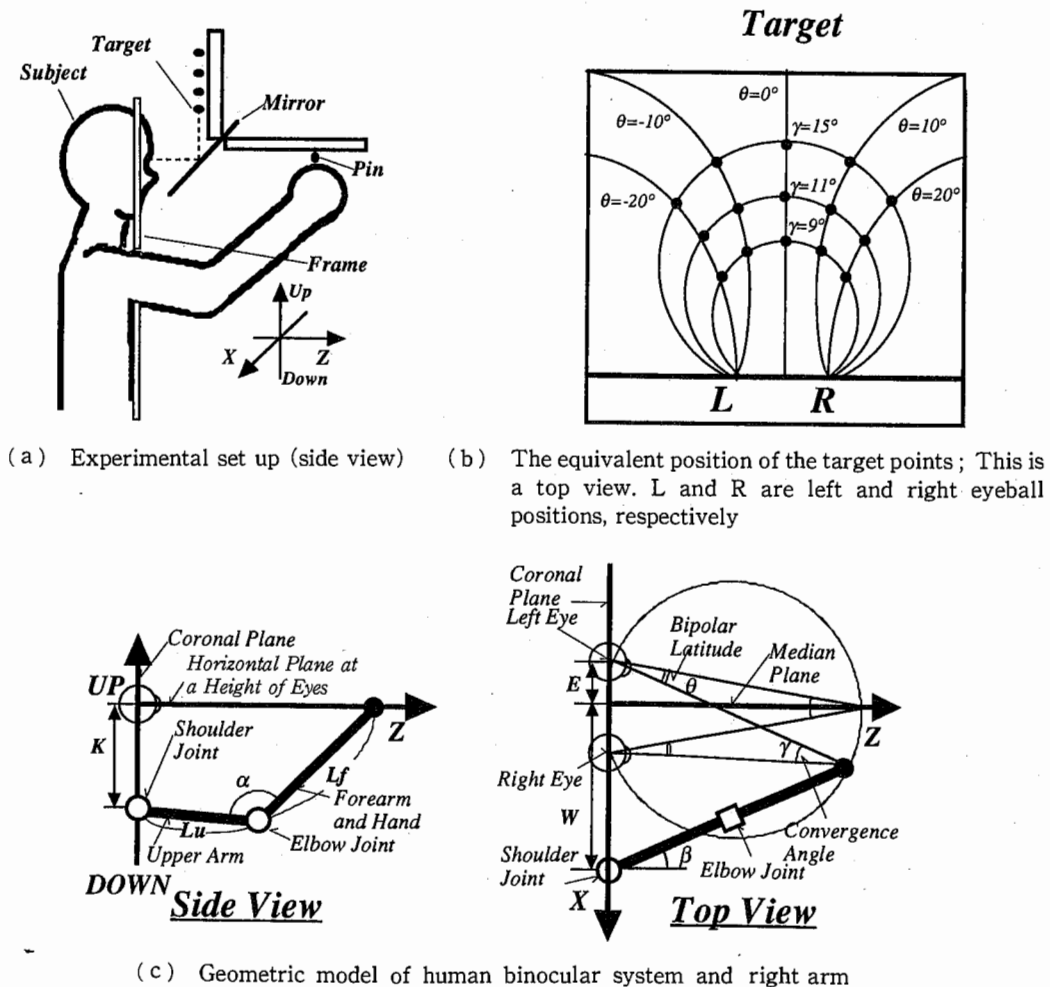


Fig. 1 Visual control experiment of reaching movement without vision of the limb

向いた状態で頭部を固定される。このとき、前方に固定されたミラーをとおして被験者はターゲットの虚像を視点の高さで前方に見ることになる。操作面をターゲット面の虚像の位置に重ねて配置し、この面に対して被験者は右手で操作を行う。作業中の上肢の姿勢は肘を下げた状態を保持するものとする。この構成によって実験の課題を目の高さの水平面内の定位に限定した。これによって議論すべき信号を2次元のものに限定することができる。

Fig. 1(b)にこの実験条件下で空間知覚に用いられている生体内情報を定義する。この種の定位実験条件下では、視覚によって注視点の空間位置を知覚する際に用いられる生理的な感覚信号としては、両眼注視によって注視点が見え方において融合像として成立している状態での眼球の位置感覚が支配的であり、その結果、本論文で論じる「視空間」は、全ての視覚要素によるものではなく、両眼による注視を行っている際の眼球の位置感覚である輻輳角 γ と視線方向角 θ に基づいているものと考えられる¹¹⁾。また、体肢の位置と運動に関する感覚は各関節の動き受容器の情報による各関節の曲げ量であると考えられる。本実験では上腕の姿勢を肘を下げた状態に限定したことにより、冗長自由度となる運動を拘束している。そこで上肢運動知覚は肘関節角 α と肩関節角 β の2自由度の運動感覚に基づくものと仮定する(Fig. 1(b))。

以上の定義に基づき、視覚に与えられる位置指令となるターゲットの配置は視線方向角および輻輳角一定のラインの交点に配置する。また同様のターゲットが配列することで誤った融像を起こすことのないように等輻輳角線ごとにターゲットの色を変更した。またターゲットの間隔は同時に複数のターゲットを注視できないように相互に各点を中心とした融合領域および注視領域の外になるように配置した。実験に用いたターゲットの視線方向角は正面方向を 0° として $-30^\circ \sim 30^\circ$ まで 10° 間隔、輻

輳角は $9^\circ, 11^\circ, 15^\circ$ である。よってターゲットは21点からなる。また眼間距離は66 mmとして設定した。

被験者は正面下方に置かれたピンを手に取り、ピンと同じ色のターゲットを注視しつつ上肢運動感覚に基づいてその点の主観的位置にピンを立てる定位作業を行う。作業中の上肢の姿勢は肘を下げた状態を保持するよう指示した。本来この条件下ではピンを刺すというタスクによって被験者は垂直上向きの力を出さねばならず、このとき、上肢の姿勢は自然に肘を下げた状態となり、自動的に実験条件を満たすことになる。ピンを手に取る際には必ず指先を直視で注視するものとし、長時間のビジュアルフィードバックの断絶による誤差要因を排除している¹⁰⁾。また、フィードフォワード制御要因および動特性的要因を排除するために作業目的に達成時間の短縮は含めていない⁸⁾。実験は6人の被験者について、各ターゲットをランダムな順序で1回ずつ全点について行う試行を12回繰り返し、各ターゲットに対する到達点の平均位置を求めた。いずれの被験者の場合も到達点の分散は、ターゲットからのずれ量に対して十分に少なく、到達点のずれは一定の傾向を示した。実験結果から3名の被験者による結果をFig. 2に示す。なおこれらの被験者は全員、利目・利腕は右であった。

Prablancらの実験⁹⁾と同様、奥行方向へのアンダーシュートおよび、上肢と同側方向(この場合右方向)へのアンダーシュートが見られる。この傾向は被験者E.Kを除く全ての被験者において明確に現れた。被験者E.Kの場合、奥行方向へのアンダーシュートは明確であるが、X軸については左半平面のオーバーシュートを示しているように見える。しかしこの被験者の傾向も本来生得的でない直交座標系上で評価していることによるものであって、生得的信号である輻輳角 γ と視線方向角 θ について観察すれば、ほかの被験者と同様の統一的な傾向として理解することが出来る。すなわち、これらの角度信

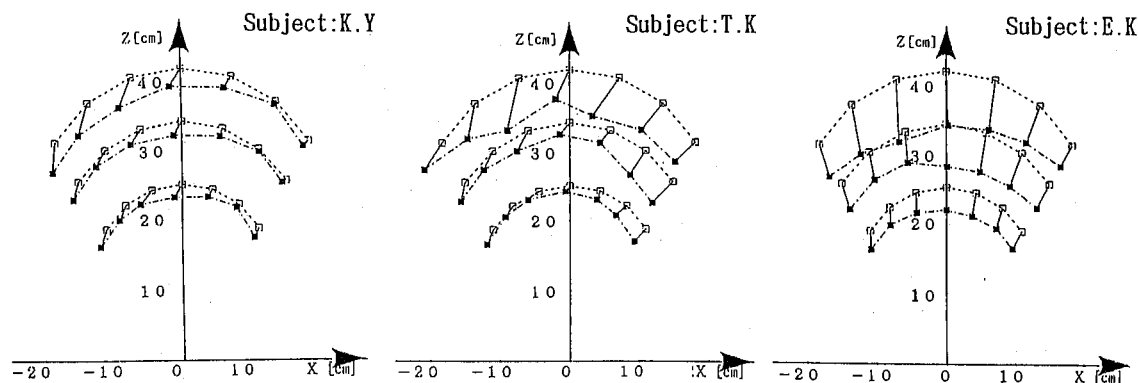


Fig. 2 Errors between the gaze point and the hand pointing by subjects; Each white square is the gaze point. Each black square is the hand pointing by subjects

号によれば、いずれの被験者の場合もターゲット(γ, θ)に対し、到達点($\gamma + d\gamma, \theta + d\theta$)は、 $d\gamma > 0, d\theta < 0$ なる特徴を示していることがわかる。

以上の結果から、これと同様の視覚性到達実験を行った場合、 $d\gamma, d\theta$ について本実験と同様の傾向が得られる信号処理モデルを、人間の信号処理のモデルとして、より適切なモデルと考えることが出来る。

3. 視覚性到達運動における空間知覚モデル

3.1 人間の視空間・触空間知覚モデル

前述の視覚性到達実験において定義した生体内情報に基づいて人間の視空間知覚、触空間知覚をモデル化する。

実験が観察者の眼の高さにある水平面上において行われることから、モデルの注視点および眼球運動、上肢運動と運動感覚の知覚系を眼の高さの水平面内に関するものに限定する。さらに上肢については、姿勢を肘を下げた状態に限定することで冗長自由度となる運動を拘束し、肩と肘の運動感覚による2自由度の上肢運動感覚モデルを想定する(Fig. 1(b))。

まず視覚による空間位置の知覚は、両眼による注視を行っている際の輻輳角 γ と視線方向角 θ に基づいていると考えられる(Fig. 1(b))。このとき、先の平面上で奥行距離 z の点 $P=(x, z)$ は両眼間の距離が $2E$ のとき γ と θ によってつぎのように表わされる。

$$\begin{aligned} x &= E \sin(2\theta) / \sin(\gamma) \\ z &= E \{ \cos(\gamma) + \cos(2\theta) \} / \sin(\gamma) \end{aligned} \quad (1.a)$$

また、この逆関数は

$$\begin{aligned} \gamma &= \tan^{-1}((x+E)/z) - \tan^{-1}((x-E)/z) \\ \theta &= \{ \tan^{-1}((x+E)/z) + \tan^{-1}((x-E)/z) \} / 2 \end{aligned} \quad (1.b)$$

である。

体肢の位置と運動に関する感覚は各関節の動き受容器の情報による各関節の曲げ量であると考えられる。上記の上肢モデルに基づき空間知覚に用いられる生体内情報を肘関節角 α と肩関節角 β であると仮定する(Fig. 1(b))。このとき、先の平面上で奥行距離 z の点 $P=(x, z)$ は両肩間の距離が $2W$ 、肩から眼の高さまでが K 、上腕・前腕の長さがそれぞれ L_u, L_f のとき α と β によってつぎのように表わされる。

$$\begin{aligned} x &= \sin(\beta)(L_f^2 + L_u^2 + 2L_f L_u \cos(\alpha) - K^2)^{1/2} + W \\ z &= \cos(\beta)(L_f^2 + L_u^2 + 2L_f L_u \cos(\alpha) - K^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (2.a)$$

また、この逆関数は

$$\begin{aligned} \alpha &= \cos^{-1}(((x-W)^2 + z^2 - L_f^2 - L_u^2) / 2L_f L_u) \\ \beta &= \tan^{-1}(z / (x-W)) \end{aligned} \quad (2.b)$$

である。

このような複数の感覚器からの空間知覚情報を統合し

て物理空間内において一貫性のある感覚運動制御を行うためには、 $(\gamma, \theta) \leftrightarrow (\alpha, \beta)$ 間の対応づけを学習によって獲得する必要がある。そこでこの対応づけを学習する系を人間の感覚統合のモデルと考え、神経回路網モデルを設定することにする。

3.2 生理学的背景

感覚統合における学習機能に関しては、心理学において反転眼鏡などによる適応実験に代表される残効現象などによって非常に多くの研究がなされている。その効果には長期的かつ運動的な要素と短期的かつ感覚的な要素とが見られ、前者が小脳、後者が大脳皮質における学習効果を反映しているものと考えられる。

本来、空間の知覚とは両眼視覚や上肢の運動感覚のみならず自分自身の位置や姿勢といったものを常時反映させることによって成立するものであり、脳内において多種多様な感覚器からの入力がかつ統合されている必要がある。このような総合的な空間知覚に関係する部位としては大脳皮質の頭頂連合野が挙げられており、視覚性到達運動において上頭頂小葉の破壊により運動性の位置知覚、下頭頂小葉の破壊により視覚性の位置知覚の統合が阻害される傾向が知られている。またPG野においては視覚性到達運動(ビジュアルフィードバック有り)に反応する細胞や細かい操作運動に反応する細胞がみつかり、運動の視覚的制御に深く関係していると考えられている¹⁴⁾。

Stein¹⁵⁾はサルの上頭頂小葉、下頭頂小葉を冷却し、視覚ターゲットへの到達実験における到達時間を計測している。なお、この実験に用いられたターゲットはサルを中心とした水平面内の円弧上で左右方向に移動するもので、奥行方向の変化はない。また、ビジュアルフィードバックも断たれてはいない。

この報告によれば下頭頂小葉(7野)の冷却により早い動きの視覚性到達実験において違いがでており、これはビジュアルフィードバックなしのフィードフォワード動作に違いがでていられると考えられる。観察される現象は、

- 1) 冷却側と反対側の上肢による反対側のターゲットへの到達時間の増大(外側ほど増大幅が大)。
- 2) 同時に反対側のターゲットを無視しがちになる。
- 3) 反対側のターゲットへの到達運動は、まずターゲットより中央よりの位置にミスリーチしてから補正が始まる。

これらの現象は7野が視覚性の位置知覚機能(目→手、意識)に関わっており、これが阻害されているものと考えられる。また、この部位の視覚性の位置知覚が反対側の半側空間の知覚のみを処理していることが考えられる。

また上頭頂小葉(5野)の冷却により

- 1) 冷却側と反対側の上肢による到達運動が両側のターゲットに対して不器用になる。
- 2) ビジュアルフィードバックなしでは反対側の上肢の手の位置がわからなくなっている様子。

これらの現象は5野が運動性の位置知覚機能(手→目, 意識)に関わっており, これが阻害されているものと考えられる。また, この部位の運動性の位置知覚が反対側の上肢の位置知覚を両側空間に関して処理していることが考えられる。

以上の各種位置知覚とその関連部位を整理するとつぎのようになる。

- 1) 左下頭頂小葉：右半側視空間知覚
- 2) 右下頭頂小葉：左半側視空間知覚
- 3) 左上頭頂小葉：右上肢運動空間知覚
- 4) 右上頭頂小葉：左上肢運動空間知覚

こうした知見に基づき, 視覚上のターゲットの位置に右上肢を到達させるという視覚性到達実験における情報の流れをモデル化した場合, 関連部位は1)~3)である。その場合, 感覚信号の統合・評価の過程を行う部位として, 上頭頂小葉(部位3))を用いるモデルと, 下頭頂小葉(部位1), 2))を用いるモデルとを考えることができる。すなわち, 前者は主観的感覚量としての位置の一致を上肢運動感覚性の信号空間上において行うモデル, 後者は眼球運動感覚性の信号空間上において行うモデルに相当する。

3.3 知覚信号空間と処理信号空間

生体内において異なる感覚器官からの情報を統合する場合, それらが定量的な情報であるならば, これを統一的に知覚するためにはなんらかの共通の尺度のもとで評価する必要がある。よって主観的感覚量とは, この尺度において各種感覚信号の評価を反映したものであると考えられる。今回の定位実験を例に挙げるなら, 到達運動の際の上肢運動感覚による位置情報と注視による視覚的位置情報が, この共通尺度において表現された信号空間上に投写された際に, これらの信号間の距離が0になった状態を感覚量の主観的な一致(この場合位置感覚の一致)であると捉えることができる。このような主観的感覚量の生成機構は個体の成長への適応や反転眼鏡への適応などの実験事実からも先天的に決定されているとは考え難く, 生体における各感覚器からの信号を主観的感覚量の信号空間へ投写する機構には学習機能が存在していると考えられる。

しかし, 一般に人間の感覚量と物理量との間にはズレがあり, しかも特定の傾向を示す場合が多い。これは学習機能の限界を示すものであり, 先天的な制約の現れであると考えられる。

現在, 神経回路網モデルにおいて人間の脳内における学習機構のモデルとして最も自然であると考えられている学習の効果はパーセプトロンに代表される信号空間内における誤差最小化であり, その誤差の傾向は学習機構がどのような信号空間内で信号処理を行っているかを反映している。

そこで, 神経回路網モデルを用いて特定の信号空間内で学習させ, その誤差の傾向をみることによって構成的に人間の学習機構の特性を知ることができる。

また, 学習機能の限界は, 先天的な制約の現れであると考えられることから, 学習機構が信号処理を行っている信号空間がどのようなものであるのかがわかれば, 生理学的な見地からどのような部位において学習を含む信号処理が行われているのかを構成的に推測することが出来る。

以上の考え方から, 主観的知覚を発生する信号空間(感覚統合においては共通尺度を与える信号空間)を知覚信号空間, これを構成する信号を知覚信号と定義する。同様に, 学習によって信号間のインタラクションを構成し信号処理を行っている信号空間を処理信号空間, これを構成する信号を処理信号と定義する。つぎに, それぞれに対して各感覚器からの信号を対応させたモデルを構成する。

3.4 神経回路網における生体内信号の表現方式

前節において定義した知覚信号および処理信号として, それぞれ (γ, θ) と (α, β) の2組の信号のいずれかを用いたモデルを想定する。これは, これまでの報告において, 人間が空間知覚において感覚間の統合を行う際の情報処理にグローバルな空間表現としてのより抽象的な信号形態を用いているという考え方には否定的な結論がでており¹¹⁾, 生理学的な傍証¹⁰⁾も存在することによる。

まず知覚信号空間として視覚性信号空間を採用したモデルをFig. 3(a)に表わす。 γ, θ は独立な細胞群の発火頻度によって表現されるものとし, 信号間の相互作用は加算的であるとする。これは神経回路における信号処理はMaCulloch-Pittsの神経細胞モデル以来, 基本的に荷重付き加算によるものとされ, 様々な生理学的傍証もあるためモデルとしてより自然であると考えたためである¹¹⁾。このモデルの構造は(3.a)式のように表わされる。

$$\begin{aligned}\gamma &= F1(C2(\beta) + D1(\alpha)) \\ \theta &= F2(C1(\alpha) + D2(\beta))\end{aligned}\quad (3.a)$$

このモデルをもとに, 学習に関与する非線形連続スカラー関数部($F1, F2, D1, D2, C1, C2$)を限定することによって処理信号の異なるモデルを設定する¹¹⁾。この場合, モデルはその構造によってつぎの3種のサブモデルに分類される。各モデルの構造の違いは, 信号間の相互作用

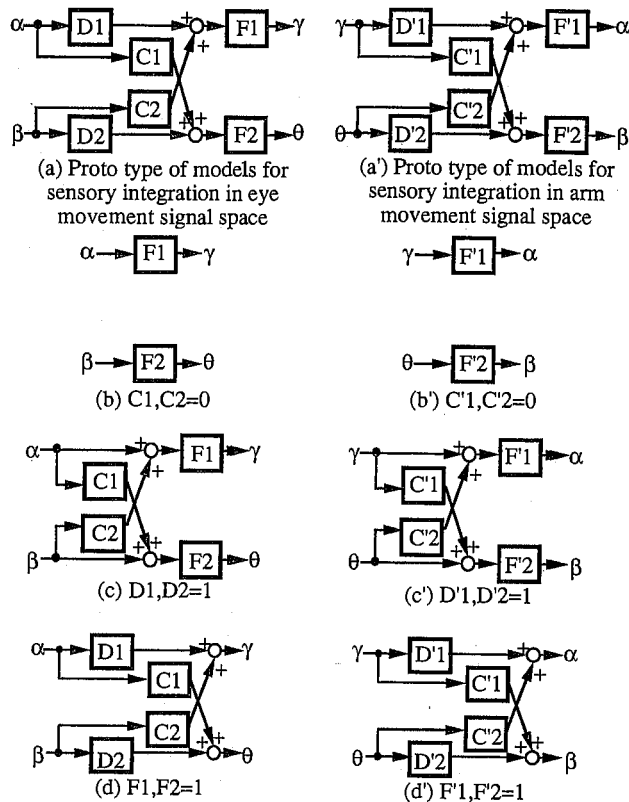


Fig. 3 Block diagram of sensory integration signal processing models. (a), (b), (c), and (d) are models which transform arm movement signals into equivalent eye movement signals. (a'), (b'), (c'), and (d') are models which transform eye movement signals into equivalent arm movement signals; (a) and (a') are the prototype of models. (b) and (b') have no interaction between signals. (c) and (c') have the interaction in the input signal space. (d) and (d') have the interaction in the output signal space

を行う処理信号空間の違いを生む (Fig. 3 (b~d)).

(3.b)式は信号間の相互作用がない場合のモデルである。このモデルにおいては処理信号空間そのものがなく、F1とD1、F2とD2の違いは無意味になる。よって(3.a)式よりD1、D2を1とし、相互作用項C1、C2を除く。

$$\begin{aligned} \gamma &= F1(\alpha) \\ \theta &= F2(\beta) \end{aligned} \quad (C1, C2=0 \text{ Type}) \quad (3.b)$$

(3.c)式は処理信号空間として運動感覚性信号空間を用いたモデル、

$$\begin{aligned} \gamma &= F1(\alpha + C2(\beta)) \\ \theta &= F2(\beta + C1(\alpha)) \end{aligned} \quad (D1, D2=1 \text{ Type}) \quad (3.c)$$

(3.d)式は処理信号空間として視覚性信号空間を用いたモデル

$$\begin{aligned} \gamma &= C2(\beta) + D1(\alpha) \\ \theta &= C1(\alpha) + D2(\beta) \end{aligned} \quad (F1, F2=1 \text{ Type}) \quad (3.d)$$

である。

同様に知覚信号空間として運動感覚性信号空間を採用

したモデルについても(3.a~d)式と同様に定義できる (Fig. 3(a'~d'))。

$$\begin{aligned} \alpha &= F'1(C'2(\theta) + D'1(\gamma)) \\ \beta &= F'2(C'1(\gamma) + D'2(\theta)) \end{aligned} \quad (3.a')$$

$$\begin{aligned} \alpha &= F'1(\gamma) \\ \beta &= F'2(\theta) \end{aligned} \quad (C'1, C'2=0 \text{ Type}) \quad (3.b')$$

$$\begin{aligned} \alpha &= F'1(C'2(\theta) + \gamma) \\ \beta &= F'2(C'1(\gamma) + \theta) \end{aligned} \quad (D'1, D'2=1 \text{ Type}) \quad (3.c')$$

$$\begin{aligned} \alpha &= C'2(\theta) + D'1(\gamma) \\ \beta &= C'1(\gamma) + D'2(\theta) \end{aligned} \quad (F'1, F'2=1 \text{ Type}) \quad (3.d')$$

これらのモデルにおいて、処理信号空間の違いは、各モデルにおける信号間相互作用による信号処理の違いを生む。また、知覚信号空間の違いは信号処理の違いが生む効果が物理空間とのずれにどのように反映されるかの違いを生む。

以下のシミュレーション実験においては(3.b~d)および(3.b'~d')式の計6個のモデルについて学習を行い、視覚性到達実験によって人間の場合との比較を行う。

3.5 神経回路網モデルと数値積分モデル

前節で定義した各モデルは、手先位置と注視点が物理的に正確に一致しているときの視覚性信号(γ, θ)と上肢運動感覚信号(α, β)との関係を入出力間に構成することを目標に学習を行う。各学習要素(F1, F2, D1, D2)はその際にモデルの出力が実際の知覚信号に一致するように補正を受ける。さらに物理的不変性から、実際の知覚信号が不変のとき、信号加算による和もまた不変であるように補正を受ける(C1, C2)¹⁴⁾。(4.b~d)および(4.b'~d')式における各学習要素の実際の学習において、われわれはこれまで1入力1出力の任意の非線形連続スカラ関数を学習可能な神経回路網モデルを用いてきた。それぞれの学習要素は直交学習と同様の学習法によって出力における誤差が最小となるように出力を学習する(文献11)参照)。すなわち、各学習要素において入力側と無関係な出力側の変動に関してはこれを誤差成分とみなし、学習による収束後はその期待値を出力するようになる。この性質に基づいて神経回路網モデルによる各学習要素の学習終了後の収束値を、数値積分による期待値計算を用いて推定することが出来る。

最初に、知覚信号空間として視覚性信号空間を採用したモデルの場合を考える。まず、

$$\begin{aligned} \gamma &= \Gamma(\alpha, \beta) \\ \theta &= \Theta(\alpha, \beta) \end{aligned} \quad (4)$$

なる関数を定義する。さらに、数値積分によって

$$\begin{aligned} E(\alpha)[F(\alpha, \beta)] &= \int F(\alpha, \beta) d\beta / \int d\beta \\ E(\beta)[F(\alpha, \beta)] &= \int F(\alpha, \beta) d\alpha / \int d\alpha \end{aligned} \quad (5)$$

なる期待値を定義し、これによって各学習要素の収束値を推定する。このとき、従来のモデルにおける学習領域は、期待値計算の際の積分領域として定義される。

(3.b)式の場合、

$$\begin{aligned} F1(\alpha) &= E(\alpha)[\Gamma(\alpha, \beta)] \\ F2(\beta) &= E(\beta)[\Theta(\alpha, \beta)] \end{aligned} \quad (6.a)$$

(3.d)式の場合、 $D1, D2$ は同様で、さらに $C1, C2$ が

$$\begin{aligned} D1(\alpha) &= E(\alpha)[\Gamma(\alpha, \beta)] \\ D2(\beta) &= E(\beta)[\Theta(\alpha, \beta)] \\ C1(\alpha) &= E(\alpha)[\Theta(\alpha, \beta) - D2(\beta)] \\ C2(\beta) &= E(\beta)[\Gamma(\alpha, \beta) - D1(\alpha)] \end{aligned} \quad (6.b)$$

(3.c)式の場合、 $F1, F2$ は同様で、さらに $C1, C2$ が

$$\begin{aligned} F1(\alpha) &= E(\alpha)[\Gamma(\alpha, \beta)] \\ F2(\beta) &= E(\beta)[\Theta(\alpha, \beta)] \\ C1(\alpha) &= E(\alpha)[F2^{-1}(\Theta(\alpha, \beta)) - \beta] \\ C2(\beta) &= E(\beta)[F1^{-1}(\Gamma(\alpha, \beta)) - \alpha] \end{aligned} \quad (6.c)$$

で表わされる。

同様にして知覚信号空間として上肢運動感覚性信号空間を採用したモデルについても(3.b'~d')式に対して学習結果の収束値を推定した解が得られる。

$$\begin{aligned} \alpha &= A(\gamma, \theta) \\ \beta &= B(\gamma, \theta) \end{aligned} \quad (4')$$

$$\begin{aligned} F'1(\gamma) &= E(\gamma)[A(\gamma, \theta)] \\ F'2(\theta) &= E(\theta)[B(\gamma, \theta)] \end{aligned} \quad (6'.a)$$

$$\begin{aligned} D'1(\gamma) &= E(\gamma)[A(\gamma, \theta)] \\ D'2(\theta) &= E(\theta)[B(\gamma, \theta)] \\ C'1(\gamma) &= E(\gamma)[B(\gamma, \theta) - D'2(\theta)] \\ C'2(\theta) &= E(\theta)[A(\gamma, \theta) - D'1(\gamma)] \end{aligned} \quad (6'.b)$$

$$\begin{aligned} F'1(\gamma) &= E(\gamma)[A(\gamma, \theta)] \\ F'2(\theta) &= E(\theta)[B(\gamma, \theta)] \\ C'1(\gamma) &= E(\gamma)[F'2^{-1}(B(\gamma, \theta)) - \theta] \\ C'2(\theta) &= E(\theta)[F'1^{-1}(A(\gamma, \theta)) - \gamma] \end{aligned} \quad (6'.c)$$

4. シミュレーション実験および結果

シミュレーションの際に用いた各パラメータは

$$\begin{aligned} E &= 33 \text{ mm}, \quad K = 200 \text{ mm}, \quad W = 200 \text{ mm} \\ L_f &= 380 \text{ mm}, \quad L_u = 250 \text{ mm} \end{aligned} \quad (7)$$

学習領域 S_i は、

$$S_v = \{(\gamma, \theta) | 0^\circ \leq \gamma \leq 18^\circ, -45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ\} \quad (8)$$

なる両眼視が可能な領域 S_v と

$$\begin{aligned} (x, z) : x &= r \sin(\beta) + W, \quad z = r \cos(\beta) \\ S_a &= \{(r, \beta) | 0 \text{ mm} \leq r \leq \{(L_f + L_u)^2 - K^2\}^{0.5}, \\ &\quad -65^\circ \leq \beta \leq 180^\circ\} \end{aligned} \quad (9)$$

なる上肢が到達可能な領域 S_a の積として表わされる。

各モデルについて得られた学習の結果の推定値に対し、人間と同様の視覚性到達実験を行った結果を Fig. 4

に示す。これらの図は各モデルに対し人間と同様に調整法を用いて測定した。

先の被験者を用いた実験から、人間の視覚と上肢運動感覚の統合における一般的な特徴としてはターゲット (γ, θ) に対し、到達点 $(\gamma + d\gamma, \theta + d\theta)$ が、 $d\gamma > 0, d\theta < 0$ なる傾向を採用する。

Fig. 4(a), (a')は信号間の相互作用がない場合のモデルであり、いずれの信号空間を知覚信号空間として採用したモデルにおいても到達点はほぼ、 $\alpha = \text{const.}, \beta = \text{const.}$ の格子点上にある。これはこのモデルが α と γ, β と θ との対応にのみ頼っているためにターゲットの配置が $\gamma = \text{const.}, \theta = \text{const.}$ の格子点上であることが反映された結果であり、予想された結果であるといえる。この結果においては、 $d\theta < 0$ の傾向、 $d\gamma > 0$ の傾向ともに部分的にみられるのみであり、人間の場合と異なる。

知覚信号空間に視覚性信号空間を用いたほかのモデル Fig. 4(b), (c)ではいずれも全域にわたって奥行方向のオーバーシュートが見られ、 $d\gamma > 0$ の傾向は見られない。また $d\theta > 0$ の傾向も多くの領域にわたって見られ、この点でも人間の場合とは異なっている。

知覚信号空間に運動感覚性信号空間を用いたほかのモデル Fig. 4(b'), (c')ではいずれも全域にわたって奥行方向のアンダーシュートが見られ、 $d\gamma > 0$ の傾向を示している。しかし、処理信号空間に視覚性信号空間を用いたモデル Fig. 4(b')においては、 $d\theta > 0$ の傾向が全域で見られ、人間の場合とは異なっている。一方、処理信号空間に運動感覚性信号空間を用いたモデル Fig. 4(c')においては、 $d\theta < 0$ の傾向が全域で見られ、以上のモデルの中では人間の場合にもっとも近い傾向を示している。

5. 考 察

以上のシミュレーション実験の結果より人間の両眼視覚と上肢運動感覚の統合を行う処理系の構造について考察する。今回用いたモデルにおいては知覚信号空間および処理信号空間として運動感覚性の信号空間を用いたモデルがもっとも人間に近い傾向を示した。

この実験結果は人間の両眼視覚と上肢運動感覚の統合において、運動感覚性の信号空間においてその処理および評価が行われていることを示唆している。

運動感覚性の信号空間において信号間のインタラクション処理が行われていることは、第3章で述べた生理学的な構造に起因していると考えられる。視覚性信号処理を行う第7野が左右の半球にわかれて存在し、それぞれ反対側の半空間を処理しているのに対し、運動性信号を処理する第5野は各側で反対側の上肢の全空間の信号を処理している構造から、視覚性信号空間内では左右各

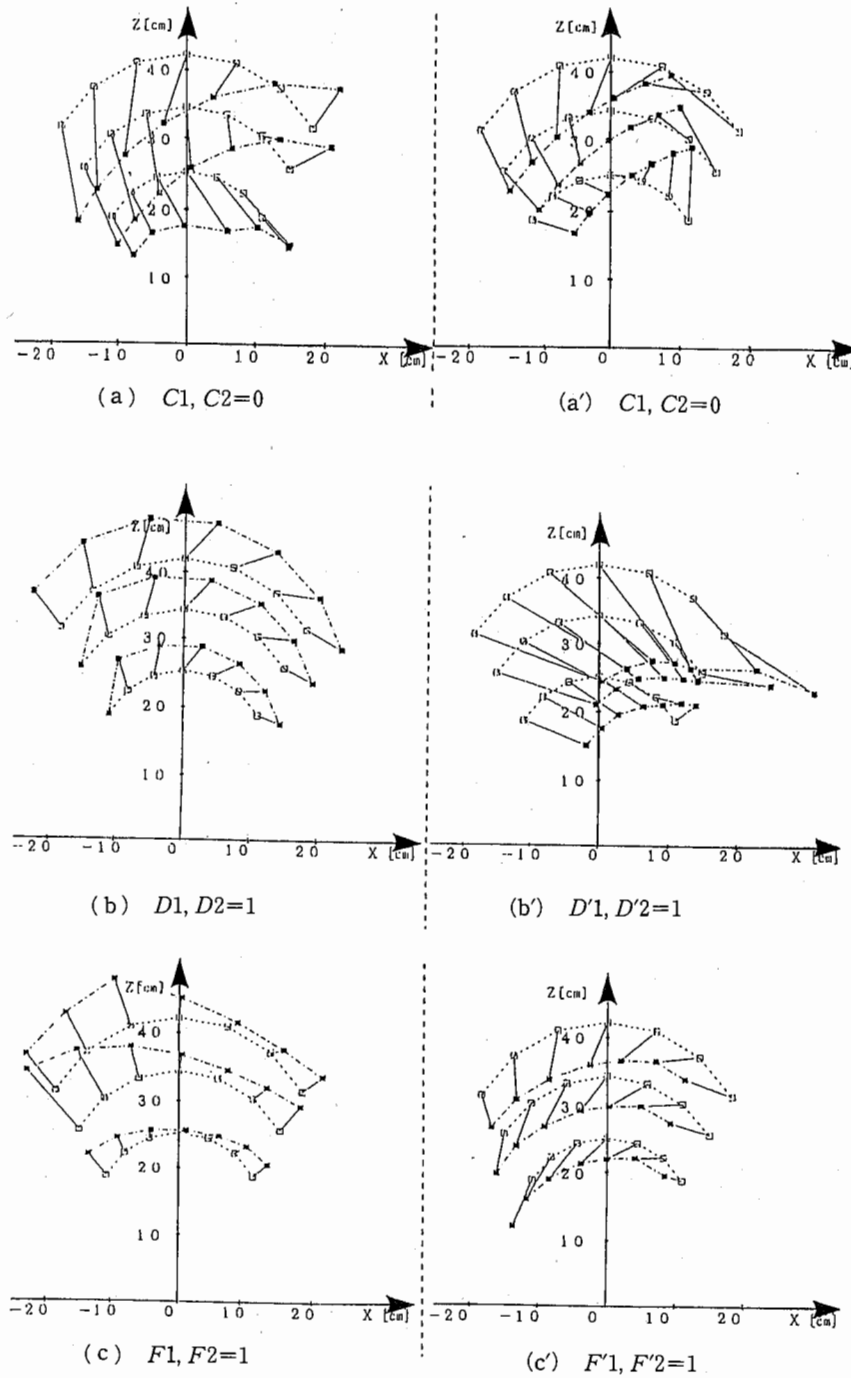


Fig. 4 Errors between the gaze point and the hand pointing by models; Each white square is the gaze point. Each black square is the hand pointing by models. (a), (b), (c) are the errors by the models which transform arm movement signals into equivalent eye movement signals. (a'), (b'), (c') are the errors by the models which transform eye movement signals into equivalent arm movement signals

半空間の信号の統合がなされず、独立に第 5 野に投写され運動性信号に変換された後にインタラクションを起こす構造をとっているものと考えられる。この構造によって輻輳性の信号と眼球方向性の信号のインタラクションをも同様に運動性信号空間上で行う構造となっているも

のと思われる。

さらに、眼球運動系の空間自由度が 3 自由度であるのに対し、上肢運動系がかなりの冗長自由度をもっていることも一因と考えられる。すなわち、3次元の眼球運動情報から上肢運動指令を生成する際に不足する冗長自由

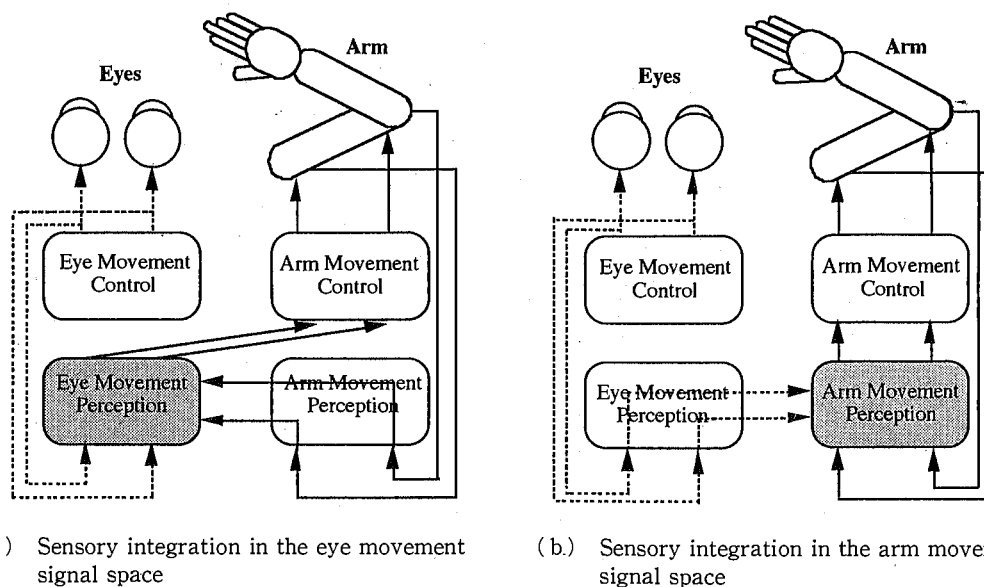


Fig. 5 The schemata of signal flow for sensory integration in visual reaching experiment

度分の運動を決定するための情報は別な感覚情報，この実験の場合は冗長性のある運動感覚情報自体から決定することになり，このために上肢運動感覚性信号の信号空間上で信号を統合・評価する必要性があったものと思われる。

また，運動感覚性の信号空間において評価が行われていることは，視覚と運動感覚の統合による情報が運動指令に用いられていることから，運動指令により直結した信号空間内で処理・評価することによって情報の加工を最小手順で構成するように合理化および高速化された構造を想像させる (Fig. 5(b))。もしこの傾向が一般的であるならば，主観的には普遍的な感覚の統合において，その結果をどの運動に反映するかによって異なる評価尺度において評価機構が機能していることになる。

これを確認するには，同様の感覚情報の統合条件において，異なる運動をさせてその違いを調べることが考えられる。上肢運動感覚において固定されたターゲットに対し，ビジュアルフィードバックなしの注視点定位を行い，積極的な眼球運動制御を行わせた場合がこの条件に適合するであろう。

6. おわりに

視覚性到達実験においてみられる，人間の空間位置知覚における視空間と運動感覚的触空間の統合の特性を，信号空間の変換を学習する処理系の特性として捉え，神経回路網モデルに基づく学習のモデルを適用することで人間と同様の特性を生じる空間知覚統合のモデルを得た。

得られたモデルを生理学的知見から検討することに

よって，人間の感覚統合過程における信号処理の構造を明確にすることができた。その結果，主観的には普遍的な感覚の統合において，その統合による結果をどの運動に反映するかによって異なる評価尺度に基づく評価機構が機能している可能性が考えられる。今後の実験においては，これを確認するために，同様の感覚情報の統合条件において，異なる運動をさせてその違いを調べることが考えられる。

また本論においては視覚性信号空間について左右半側空間の信号が連続的に扱われるものとして議論を進めたが，視覚性信号を左右半側空間について独立に扱うモデルをたてることも可能であり，このモデルの精密化は今後の課題である。

参考文献

- 1) R. K. Luneburg : The Metric of Binocular Visual Space, Journal of the Optical Society of America, 40-10, 627/642(1950)
- 2) H. V. Helmholtz : Treatise on Psychological Optics, Optical Society of America, 3, 482(1925)
- 3) F. Hillebrand : Denkschr. Akad. Wiss. Wien, math.-nat. Kl., 72, 255(1902)
- 4) W. Blumenfeld : Zeits. f. Pysiol. d. Sinnersorgane, 65, 241(1913)
- 5) E. Rubin : HAPTISCHE UNTERSUCHUNGEN, Acta Psychologica, 1, 285/380(1936)
- 6) G. Siemsen : Experimentelle Untersuchungen uber die taktil-motorische, Psychologische Foreschung, 19, 61/101(1934)
- 7) W. Blumenfeld : The Relationship between the Optical and Haptic Construction of Space, Acta Psychologica, 2, 125/174(1937)
- 8) C. Prablanc et al. : Optimal Response of Eye and Hand Motor System in Pointing at a Visual Target, Biol. Cybern., 35, 113/124(1979)

- 9) O. Bock and R. Eckmiller : Goal-directed arm movements in absence of visual guidance: Evidence for Amplitude Rather than Positiocontrol, *Exp. Brain Res.*, **62**, 451/458(1986)
- 10) 樋口, 山崎, 笠井: 視覚系と運動系の3次元位置の対応づけ, *信学技報*, **MBE-86-82**, 33/40(1986)
- 11) 前田, 館: ホロプタを生じる空間知覚モデル, *計測自動制御学会論文集*, **25-10**, 1111/1118(1989)
- 12) M. Kurperstein : Adaptive Visual-Motor Coordination in Multijoint Robots Using Parallel Architecture, *Proceedings 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, CH2413-3/87/0000, 1595/1602(1987)
- 13) 阪口, 前田: 感覚系と運動系の協調システム(I), 第26回 SICE 学術講演会予稿集(1987)
- 14) V. B. Mountcastle, J. C. Lynch, A. Georgopoulos, H. Sakata, and C. Acuna : Posterior Parietal Association Cortex of the Monkey : Command Functions for Operations Within Extrapersonal Space, *J. Neurophysiol.*, **38**, 871/908(1975)
- 15) J. Stein : Effects of Parietal Lobe Cooling on Manipulative Behaviour in the Conscious monkey, *Active Touchm*, 79/90(1978) Pergamon Press
- 16) D. N. Levine, K. J. Kaufman, and J. P. Mohr : Inaccurate Reaching Associated with a Superior Parietal Lobe Tumor, *Neurology* **28**, 556/561(1978)

[著者紹介]

前田 太郎 (正会員)



1987年, 東京大学工学部計数工学科卒業。同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所。ロボット工学部バイオロボティクス課研究員を経て, 92年9月より東京大学先端科学技術研究センター助手。人間の知覚特性とそのモデル化, 神経回路網モデル, マンマシンインターフェイス, テレグジスタンスなどの研究に従事。電子情報通信学会, IEEE, 日本ロボット学会, 神経回路学会などの会員。

館 暲 (正会員)



1968年, 東京大学工学部計数工学科卒業。73年同大学院博士課程修了(工学博士)。同年東京大学助手。75年通産省工業技術院機械技術研究所研究員, 主任研究官, 遠隔制御課長, ロボット工学部バイオロボティクス課長を経て, 89年より東京大学助教授, 92年同大学先端科学技術研究センター教授, 現在に至る。79~80年マサチューセッツ工科大学(MIT)客員研究員。パースペクトルを用いる信号処理, 盲導犬ロボット, テレグジスタンスなどの研究を行う。IEEE/EMBS学会賞, 通商産業大臣賞研究業務優秀者表彰などを受賞。現在, IMEKO(国際計測連合学会)TC17(Robotics)議長, SICEフェロー。