

体性感覚性注視運動における両眼視と上肢位置感覚の統合

正 員 前田 太郎[†] 非会員 館 瞳^{††}

Sensory Integration of Binocular Visual Space and Kinesthetic Space in Visual Fixation at Kinesthetic Targets

Taro MAEDA[†], *Member and* Susumu TACHI^{††}, *Nonmember*

あらまし 一般に人間の空間知覚は物理空間に対してしゅう曲しており、これは感覚間の統合においても同様である。なかでも視覚と体性感覚の統合機構においては反転眼鏡等の多くの研究がなされ学習による適応能力があることが知られているが、その感覚統合における感覚間の食違いの発生の理由についての議論は従来なされていなかった。本論文では視覚と上肢体性感覚による位置感覚の統合機構について、被験者を用いた体性感覚性注視実験を行い、位置の感覚統合における感覚間の食違いを計測した。この結果、主観的には同様の感覚統合が要求される視覚性到達実験の場合と異なる傾向が得られた。この現象を感覚量間の変換を学習する人間の信号処理の特徴としてとらえ、学習によって人間と同様の特性を示すような神経回路網モデルの構造を求めた。生理学的知見に基づき、信号処理構造の特徴を6種のモデルに分類しシミュレーションを行った結果、一つのモデルが人間と同様の傾向を示した。これらのモデルの構造について考察することにより人間の感覚統合の過程における信号処理の構造についていくつかの新たな知見が得られた。

キーワード 注視, 感覚統合, 両眼視, 上肢位置感覚, 生体モデル

1. ま え が き

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さまざま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が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タ⁽²⁾、平行アレー⁽³⁾・距離アレー⁽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に、上肢体性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違いがでることが予測される。実際にこの食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グ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⁾。

ホロプタや触空間のひず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。我々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とらえ、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⁾。

これに対して今回とり上げた感覚間の統合に関しては、後天的に獲得された感覚量との関連は薄く、それ故に従来の直交座標系上での議論や実験は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

[†] 機械技術研究所, つくば市
Mechanical Engineering Laboratory, Tsukuba-shi, 305 Japan
^{††} 東京大学先端科学技術研究センター, 東京都
Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, Tokyo, 153 Japan

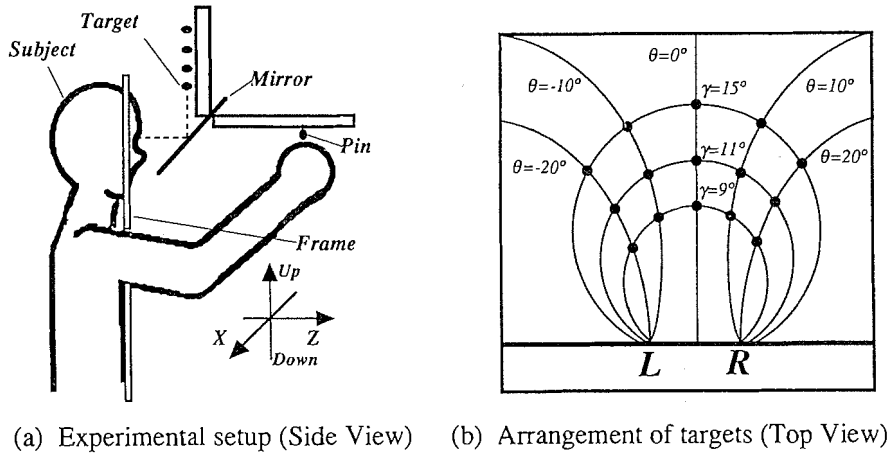


図1 視覚性到達実験
Fig. 1 Experimental setup for reaching movements to visual targets.

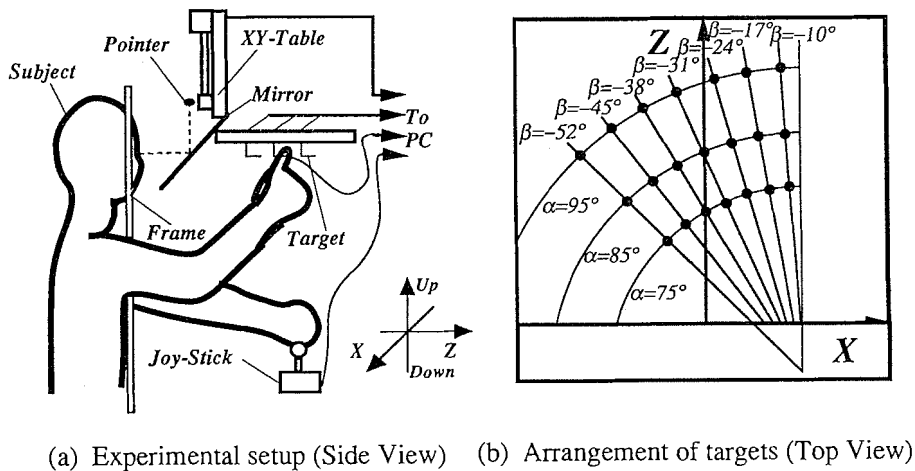


図2 上肢運動感覚性注視点定位実験
Fig. 2 Experimental setup for visual fixation to kinesthetic target.

る。こうした学習機能に関しては、反転眼鏡等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明らかである。

従来これらの研究によって人間の空間知覚間の統合の特性は心理現象として解析されてきたが、その感覚の食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。我々はこれらの空間知覚の統合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見られる両眼視と上肢体性感覚の感覚統合のずれについて被験者を用いた実験と神経回路モデルを用いた学習機構のモデル化によって感覚統合処理系のモデル化を行った⁽¹²⁾。この際に主観的な感覚統合において同様の課題でありながら、視覚性到達運動とは制御する部位の異なる定位課題であ

る体性感覚性注視実験との違いについて考察する必要が生じた。そこで視覚性到達運動の際と同様の手法を用いて体性感覚性注視点定位について測定とモデル化を用い、双方の結果をもとに人間の感覚統合機構のあり方について考察を加える。

2. 体性感覚性注視実験

我々が文献(12)の報告で取り上げた実験課題は視覚性到達運動であった。これは、両眼視と上肢位置感覚の統合による感覚運動制御であり、課題提示刺激として固視による視覚的ターゲットの位置情報を用い、達成課題としては上肢運動による同位置への上肢先端の到達を用いる(図1)。

これに対し、同じ両眼視と上肢位置感覚の統合による感覚運動制御でありながら、信号の流れが異なる実

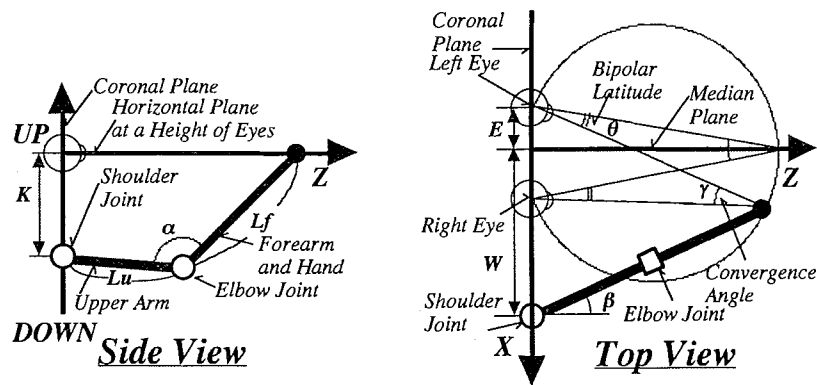


図3 眼球および右上肢運動モデル
Fig. 3 Models of eye movements and movements.

験課題として体性感覚性注視実験が考えられる。すなわち、課題提示刺激として固定された上肢先端位置を用い、達成課題としては同位置を注視することによる眼球運動系上の到達を用いる課題である(図2)。

従来、心理学における空間知覚の研究においては、両眼視覚と上肢体性感覚との感覚統合を論じる際には、常に前者の視覚性到達実験が用いられており、後者の体性感覚性注視実験との違いについては論じられることがなかった。しかし、前回の報告におけるモデル実験の結果、これらの実験では人間の感覚統合において異なる処理機構が働いている可能性が示唆されている。

本論文においては心理学的には同じ感覚統合過程をもつと考えられるこれら二つの実験課題における人間の空間知覚特性の違いについて検討する。

そこで視覚性到達実験の場合と同様の条件下において、被験者を対象に体性感覚性注視実験を行い、誤差の測定を行った。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右上肢指先位置に対する注視による定位実験である。視覚性実験と同様に、実験は生体本来のもつ情報形態に基づいた座標系において行われる。すなわちこの場合、位置入力系となる上肢体性感覚系[†]の空間知覚に用いられる生体内情報を肘関節と肩関節角であると仮定し(図3)、これらの信号について一定となるラインの交点に配置する。

図2(a)に実験装置の概略を示す。視覚性実験と同様に、被験者は暗室中において正面を向いた状態で頭部を固定され、ミラーを通してポインタである小光点(LED視標)の虚像を視線の高さで前方に見ることになる。眼球方向以外の奥行き手がかりを与えないため、LEDの輝度は光点位置が識別可能な範囲で最小限に押えてある。ターゲット操作面をポインタ面の虚像の位

置に重ねて配置した。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。ターゲット操作面にはかぎ状の金具が配置されており、この金具に右手の指を引っ掛けた状態で右上肢先端の位置を固定する。被験者は左手でジョイスティックと二つのボタンA・Bを操作して視標の移動を行い、視標の主観的位置を右上肢先端の主観的位置に合わせる。視標位置 (γ, θ) の移動はジョイスティックの前後操作で γ を、左右操作で θ を増減させることで行う。ジョイスティックはスイッチとして動作し、1回の操作による移動量を被験者が直接決めることはできなくなっている。移動量は移動方向の極性が反転するたびに減少し、ボタンAを押すことによって増加する。視標と右上肢先端の主観的位置の一致を確認後、ボタンBを押すことによって、その上肢位置での試行は終了し、課題は次の上肢位置ターゲットに移ることになる。また、被験者の作業中の上肢の姿勢はひじ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被験者は指を金具に掛けて上肢の力を抜いた状態であり、上肢の姿勢は自然にひじを下げた状態となるので、自動的にこの実験条件を満たすことになる。また、この姿勢は同時に文献(12)の視覚性到達実験の場合と同じ姿勢を維持するという条件も満たしている。

上肢位置ターゲットとなる金具は肩関節角一定のラインと肘関節角一定のラインの交点に配置する。この金具には電極が接続してあり、指先にも電極をもたせることにより、上肢先端が正しい金具に固定されてい

[†]ここで言う感覚系は厳密には体性感覚系の中でも固有受容性感覚系に分類されるものである。本論文では手先の空間内での位置をとらえる体性感覚としてこの固有受容性感覚について議論を進めた。

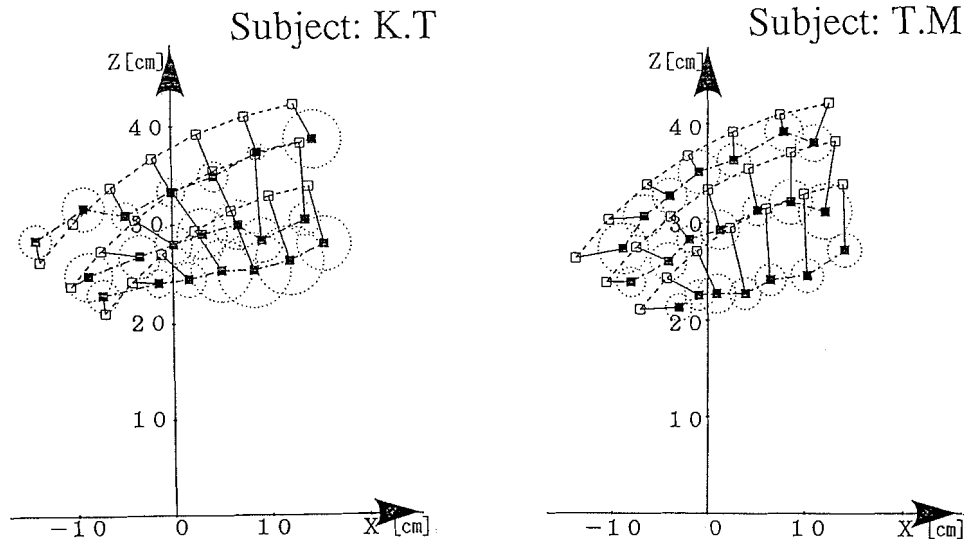


図4 被験者による上肢運動感覚性注視点定位実験結果
Fig. 4 Errors between the hand point and the gazing point by subjects.

るかどうかを確認することができる。実験に用いたターゲットの配置は、肩関節角について正面方向を 0° として $-10^\circ \sim -52^\circ$ まで 7° 間隔、肘関節角について 95° 、 85° 、 75° である。よってターゲットは21点からなる。また上腕を380 mm、前腕を250 mmとして設定した。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⁽¹²⁾。但し暗中での連続試行時間は最長15分とし、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⁾。この作業による計測を、8人の被験者について各点において20回行った。

測定の結果、いずれの被験者によっても同様の傾向が得られたが、このうちから典型的な傾向を示した2人の被験者による結果を図4に示す。なお被験者は全員利き目・利き腕は右であった。図中、白点が上肢に対して示されたターゲットの位置、これに対して実線で結ばれた黒点が同ターゲットに対して被験者が注視点の定位によって示した位置の平均である。各黒点を中心に点線で描かれた円の半径は注視点の平均位置からの距離の分散を示している。

この実験結果によれば、いずれの被験者の場合にも共通な傾向として、奥行き方向へのアンダシュートの傾向が見られる。また、上肢と同側方向(右方向)へはややオーバーシュートの傾向が見られる。この傾向はふくそう角 γ と視線方向角 θ について観察すると更に傾向が明確になる。すなわち、ターゲット (γ, θ) に対する到達点 $(\gamma + d\gamma, \theta + d\theta)$ が $d\gamma > C$ 、 $d\theta < 0$ (if $\theta > C$) or、 $d\theta > 0$ (if $\theta < C$)、($C > 0$)なる特徴が見られる。こ

こで重要なことは「眼球運動感覚→上肢運動」である視覚性到達実験と「上肢体性感覚→眼球運動」である今回の実験において、いずれの場合も奥行きに関するアンダシュート傾向がでたことである。これは人間の視覚と上肢体性感覚との統合機構が制御すべき対象ごとに異なる統合機構を用いている可能性を示唆する。なぜならば、この二つの実験において同一の感覚統合・制御機構が働いているとすれば視覚性到達実験における奥行きアンダシュート傾向の裏返しとしてのオーバーシュート傾向が今回の実験で現れなければならないからである。以上の結果をもとに、今回の実験をモデルに対して行った場合、奥行きアンダシュート傾向が伺えるものをより適切なモデルと考えることができる。

3. 体性感覚性注視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

まず、前述の体性感覚性注視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上肢運動と体性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。更に上腕の姿勢を肘を下げた状態に限定し、冗長自由度となる運動を拘束し、肩と肘の体性感覚による2自由度の上肢体性感覚モデルを想定する。

次に空間知覚に用いられている生体内情報を定義する。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ふくそう角 γ と視線方向角 θ に基

づいていると考えられる(図3)。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 によって次のように表される。

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

また、この逆関数は

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

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(図3)。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 によって次のように表される。

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

また、この逆関数は

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

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、 $(\gamma, \theta) \leftrightarrow (\alpha, \beta)$ 間の対応付けを学習によって獲得する必要がある。そこでこの対応付けを学習する系を人間の位置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等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。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の統合が、下頭頂小葉の破壊により視覚性の位置知覚の統合が、それぞれ阻害される傾向が知られている⁽¹³⁾。Stein⁽¹⁴⁾によるサルを用いた実験より、これらの各種位置知覚とその関連部位を整理すると次のようになる。

- (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、右上肢先端のターゲットの位置に注視点を到達させるという体性感覚性注視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)、(2)、(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体性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何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、この尺度における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、ターゲットとして与えられた上肢体性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)であると考えられる。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にくく、生体内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ずれがあり、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れば、その誤差の傾向を見ることができよう。また、こうした学習機能の限界は、先天的に決定された脳内の信号形態に由来する信号処理上の制約の現れであると考えられる。このことから、学習機構が信号処理を行っている信号形態がどのようなものであるのかがわかれば、神経生

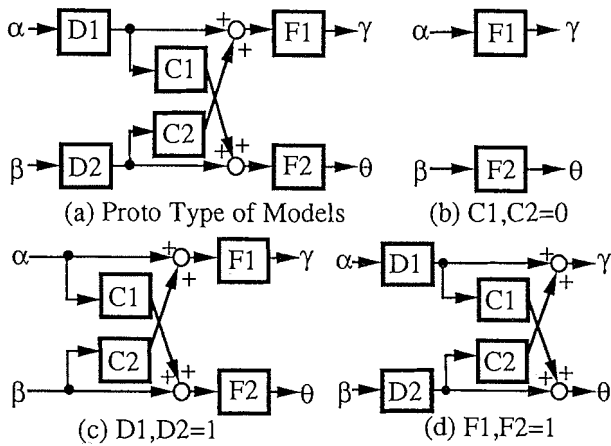


図5 感覚統合信号処理モデル(視覚性知覚信号タイプ)
Fig. 5 Blockdiagrams of sensory integration signal processing models in visual signal space.

理学的な見地からどのような部位においてこうした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できる。

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)を構成する信号を知覚信号、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構成する信号を処理信号とする。次に、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

まず、知覚信号・処理信号としては視覚性信号 γ, θ および上肢体性感覚性信号 α, β をそのまま用いる。これは、これまでの研究において、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⁽¹⁵⁾も存在することによる。

まず知覚信号として視覚性信号を採用したモデルを図5(a)に表す。 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。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、さまざま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式(3 a)のように表される。

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

このモデルをもとに、学習に關与する非線形変換部($F1, F2, D1, D2, C1, C2$)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。この場合、モデルはその構造によって次の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、信号間の相互作用を行う処理信号空間の違いを生む(図5(b)~(d))。

式(3 b)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。よって式(3 a)より $D1, D2$ を1とし、相互作用項 $C1, C2$ を除く。

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

式(3 c)は処理信号として体性感覚性信号を用いたモデル、

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

式(3 d)は処理信号として視覚性信号を用いたモデル

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

である。

各非線形要素の実際の学習に際しては、各学習要素が任意の非線形関数を学習可能なため、信号間の相互作用を含まない複数の学習要素の直列項は一つの学習要素として計算可能である。よって以下の式(4 a)~(4 d)においても式(3 a)~(3 d)と等価な学習が可能である。実際のシミュレーション実験においては式(4 a)~(4 d)のモデルを用いる。

$$\begin{aligned} \gamma &= F1(C2(\beta) + D1(\alpha)) \\ \theta &= F2(C1(\alpha) + D2(\beta)) \end{aligned} \quad (4 a)$$

$$\begin{aligned} \gamma &= F1(\alpha) \\ \theta &= F2(\beta) \end{aligned} \quad (C1, C2=0 \text{ Type}) \quad (4 b)$$

$$\begin{aligned} \gamma &= F1(\alpha + C2(\beta)) \\ \theta &= F2(\beta + C1(\alpha)) \end{aligned} \quad (D1, D2=1 \text{ Type}) \quad (4 c)$$

$$\begin{aligned} \gamma &= C2(\beta) + D1(\alpha) \\ \theta &= C1(\alpha) + D2(\beta) \end{aligned} \quad (F1, F2=1 \text{ Type}) \quad (4 d)$$

同様に知覚信号として体性感覚性信号を採用したモデルについても式(4 a)~(4 d)と同様に定義できる(図6(a)~(d))。

$$\begin{aligned} \alpha &= F'1(C'2(\theta) + D'1(\gamma)) \\ \beta &= F'2(C'1(\gamma) + D'2(\theta)) \end{aligned} \quad (4 a')$$

$$\begin{aligned} \alpha &= F'1(\gamma) \\ \beta &= F'2(\theta) \end{aligned} \quad (C'1, C'2=0 \text{ Type}) \quad (4 b')$$

$$\alpha = F'1(\gamma + C'2(\theta))$$

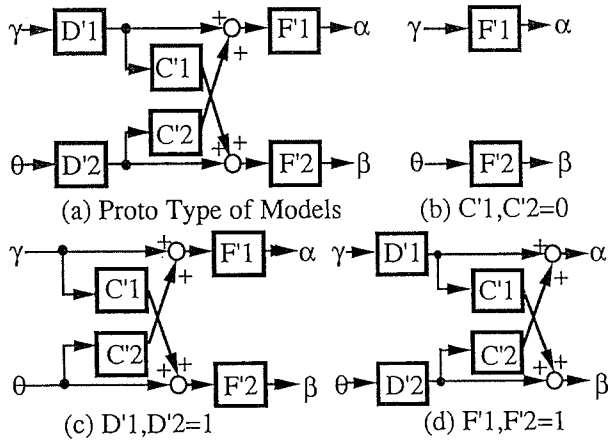


図6 感覚統合信号処理モデル (体性感覚性知覚信号タイプ)
Fig. 6 Blockdiagrams of sensory integration signal processing models in kinesthetic signal space.

$$\beta = F'2(\theta + C'1(\gamma)) \quad (D'1, D'2=1 \text{ Type}) \quad (4c')$$

$$\alpha = C'2(\theta) + D'1(\gamma)$$

$$\beta = C'1(\gamma) + D'2(\theta) \quad (F'1, F'2=1 \text{ Type}) \quad (4d')$$

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式(4b)~(4d)および式(4b')~(4d')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眼球の運動感覚信号(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。学習に際しては、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。更に物理的不変性から、実際の知覚信号が不変のとき、感覚信号が変化しても、信号加算による和が不変になるように補正を受ける($C1, C2$)⁽¹¹⁾。式(4b)~(4d)および式(4b')~(4d')における各学習要素の実際の学習において、我々はこれまで1入力1出力の任意の非線形連続スカラー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できる。

最初に、知覚信号として視覚性信号(γ, θ)を採用したモデルの場合を考える。

まず、式(1b), (2a)より、

$$\gamma = \Gamma(\alpha, \beta)$$

$$\theta = \Theta(\alpha, \beta)$$

(5)

なる関数を定義する。この関数は人間の学習系モデルが本来獲得すべき(α, β) \rightarrow (γ, θ)の数学的に完全な変換式である。我々のモデルではこれら2変数関数によって決定される値 γ および θ を構成するために、 α 若しくは β を入力とする1変数関数である各学習要素を学習させることになる。これは関数 Γ, Θ の入力の次元を落としたものを獲得することに相当する。実際には各要素は入力と無関係な出力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とから、数値積分によって α, β それぞれに一定のときの Γ, Θ の期待値を求め、これらをもって1変数の期待値関数を定義する。この関数が収束後の各学習要素の推定値となる。なお、このときの積分領域は α, β それぞれの定義域であり、この定義域は学習領域として定義された空間内の点を(α, β)によって表すことで決定される。

式(4b)の場合、

$$F1(\alpha) = \int \Gamma(\alpha, \beta) d\beta / \int d\beta$$

$$F2(\beta) = \int \Theta(\alpha, \beta) d\alpha / \int d\alpha \quad (6a)$$

式(4d)の場合、 $D1, D2$ は $F1, F2$ 同様で、更に $C1, C2$ が

$$D1(\alpha) = \int \Gamma(\alpha, \beta) d\beta / \int d\beta$$

$$D2(\beta) = \int \Theta(\alpha, \beta) d\alpha / \int d\alpha$$

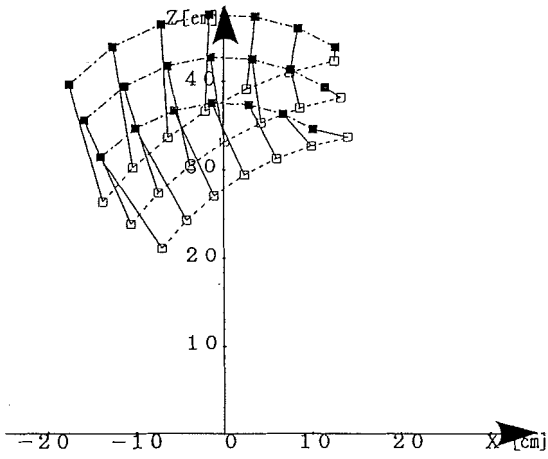
$$C1(\alpha) = \int [\Theta(\alpha, \beta) - D2(\beta)] d\beta / \int d\beta$$

$$C2(\beta) = \int [\Gamma(\alpha, \beta) - D1(\alpha)] d\alpha / \int d\alpha \quad (6b)$$

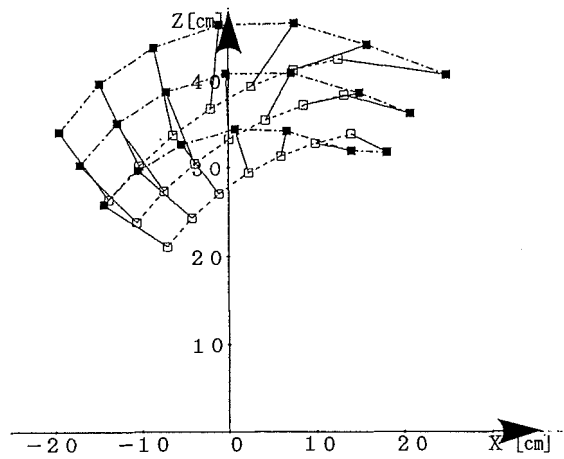
式(4c)の場合、 $F1, F2$ は同様で、更に $C1, C2$ が

$$F1(\alpha) = \int \Gamma(\alpha, \beta) d\beta / \int d\beta$$

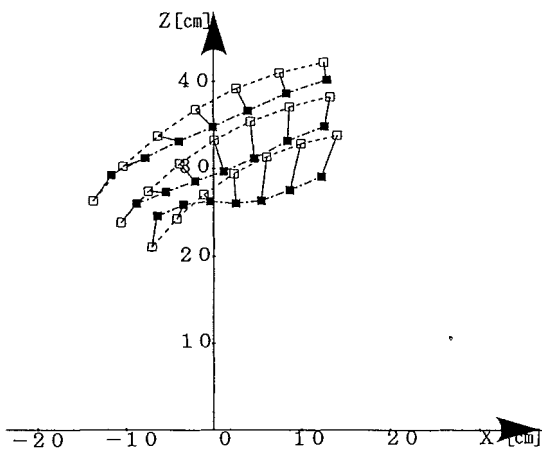
$$F2(\beta) = \int \Theta(\alpha, \beta) d\alpha / \int d\alpha$$



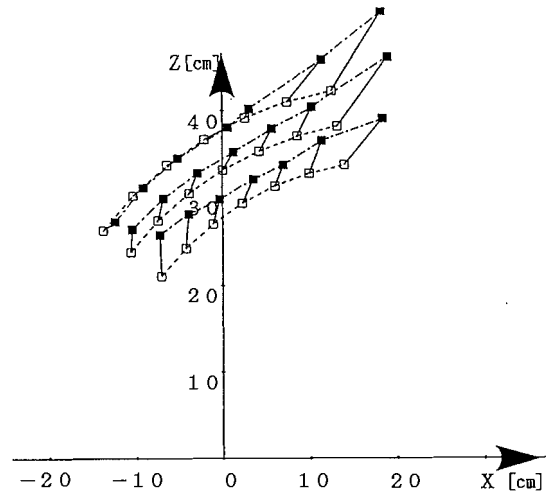
(a) $C1, C2=0$
(From Arm to Visual)



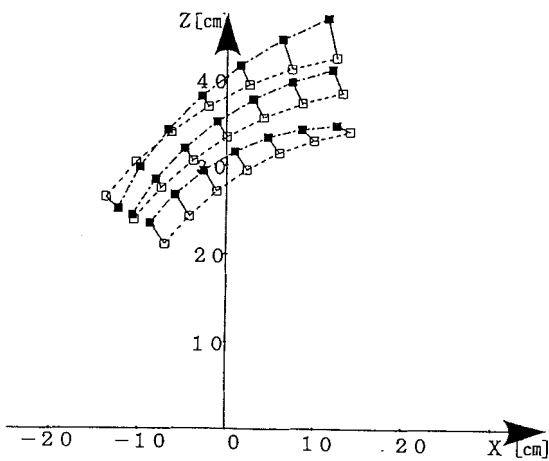
(a') $C'1, C'2=0$
(From Arm to Visual)



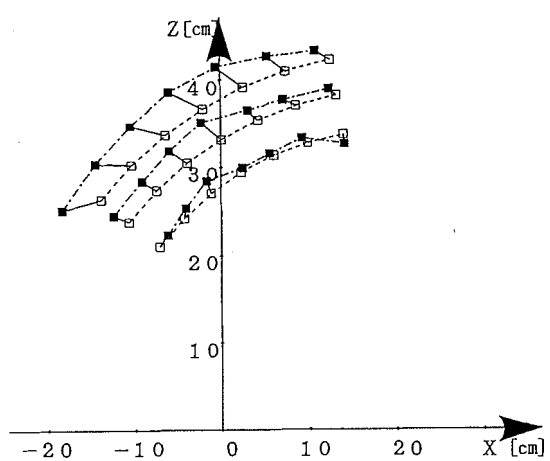
(b) $D1, D2=1$
(From Arm to Visual)



(b') $D'1, D'2=1$
(From Arm to Visual)



(c) $F1, F2=1$
(From Arm to Visual)



(c') $F'1, F'2=1$
(From Arm to Visual)

図7 モデルによる上肢運動感覚性注視点定位実験結果
Fig. 7 Errors between the hand point and the gazing point by models.

$$C1(\alpha) = \int [F2^{-1}(\Theta(\alpha, \beta)) - \beta] d\beta / \int d\beta$$

$$C2(\beta) = \int [F1^{-1}(\Gamma(\alpha, \beta)) - \alpha] d\alpha / \int d\alpha \quad (6c)$$

で表される。

同様に知覚信号として体性感覚信号を採用したモデルについても、式(1a), (2b)より、

$$\alpha = A(\gamma, \theta)$$

$$\beta = B(\gamma, \theta) \quad (5')$$

なる $(\gamma, \theta) \rightarrow (\alpha, \beta)$ の変換式を定義することによって、学習結果の収束値を推定した解が得られる。

式(4b')の場合、

$$F'1(\gamma) = \int A(\gamma, \theta) d\theta / \int d\theta$$

$$F'2(\theta) = \int B(\gamma, \theta) d\gamma / \int d\gamma \quad (6'a)$$

式(4d')の場合、

$$D'1(\gamma) = \int A(\gamma, \theta) d\theta / \int d\theta$$

$$D'2(\theta) = \int B(\gamma, \theta) d\gamma / \int d\gamma$$

$$C'1(\gamma) = \int [B(\gamma, \theta) - D'2(\theta)] d\theta / \int d\theta$$

$$C'2(\theta) = \int [A(\gamma, \theta) - D'1(\gamma)] d\gamma / \int d\gamma \quad (6'b)$$

式(4c')の場合、

$$F'1(\gamma) = \int A(\gamma, \theta) d\theta / \int d\theta$$

$$F'2(\theta) = \int B(\gamma, \theta) d\gamma / \int d\gamma$$

$$C'1(\gamma) = \int [F'2^{-1}(B(\gamma, \theta)) - \theta] d\theta / \int d\theta$$

$$C'2(\theta) = \int [F'1^{-1}(A(\gamma, \theta)) - \gamma] d\gamma / \int d\gamma \quad (6'c)$$

となる。

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両眼および上肢モデルにおける各定数は式(7)のとおりであり、これは人間の標準的な値に合わせたものである。

$$E = 33 \text{ mm}, K = 200 \text{ mm}, W = 200 \text{ mm}$$

$$L_f = 380 \text{ mm}, L_u = 250 \text{ mm} \quad (7)$$

一方、学習領域 S_1 もまた、

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

なる両眼視が可能な領域 S_v と

$$(x, z) : x = r \sin(\beta) + W, z = r \cos(\beta)$$

$$S_a = \{(r, \beta) \mid 0 \text{ mm} \leq r \leq \sqrt{(L_f + L_u)^2 - K^2}, -65^\circ \leq \beta \leq 180^\circ\} \quad (9)$$

なる上肢が到達可能な領域 S_a の積として表される。

この学習領域における学習結果として得られた各モデルを用いて、手先位置 (α, β) と、注視点の位置 (γ, θ) を入力として与えたとき、入力された二つの点の位置が空間的に一致しているかどうかを判断し、これらが一致するように注視点の位置を調整する操作を行う系を構成することができる。従って、2.において人間の被験者に対して行った体性感覚性注視実験を上記の操作系を設定することでモデルに対しても同様に行うことができる。すなわち、各モデルを用いた作業系には図2に相当する手先ターゲットの位置 (α_t, β_t) が与えられ、その際、各モデルが獲得した (α, β) と (γ, θ) の関係において、これに対応する視標の位置 (γ_p, θ_p) が出力される。

この結果得られた (γ_p, θ_p) の物理空間上での対応位置を測定結果として図7に示す。以下、これらの結果と、2.の実験結果より求めた人間の視覚と上肢体性感覚の統合における一般的な特徴、すなわち[ターゲット (γ, θ) に対し、到達点 $(\gamma + d\gamma, \theta + d\theta)$ が、 $d\gamma > C, d\theta < 0$ (if $\theta > C$) or, $d\theta > 0$ (if $\theta < C$), ($C > 0$)]とを比較し検討する。

図7(a), (a')は信号情報間の相互作用がない場合のモデルの実験結果であり、いずれの知覚信号を採用したモデルにおいても到達点はほぼ $\gamma = \text{const.}, \theta = \text{const.}$ 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 $\alpha = \text{const.}, \beta = \text{const.}$ 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言える。この結果においては、 $d\gamma, d\theta$ に関する前述の傾向は部分的に見られるのみであり、人間の場合と異なる。

知覚信号に体性感覚性信号を用いた他のモデルの場合、いずれも全域にわたって奥行き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(図7(b'), (c'))。これらのモデルはこの点で人間の場合とは異なっている。

知覚信号に視覚性信号を用いた他のモデルでは、処理信号に視覚性信号を用いたモデル(図7(c))の場合奥行き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。結果的には、知覚信号に視覚性信号を処理信号に体性感覚性信号を用いたモデル(図7(b))に

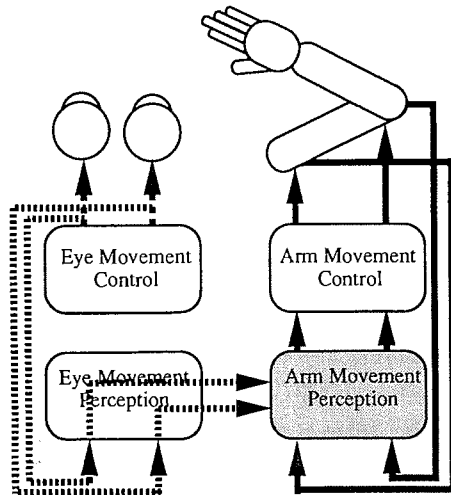


図8 視覚性到達実験における位置情報の統合過程
Fig. 8 Sensory integration process of positional information in the visual reaching experiment.

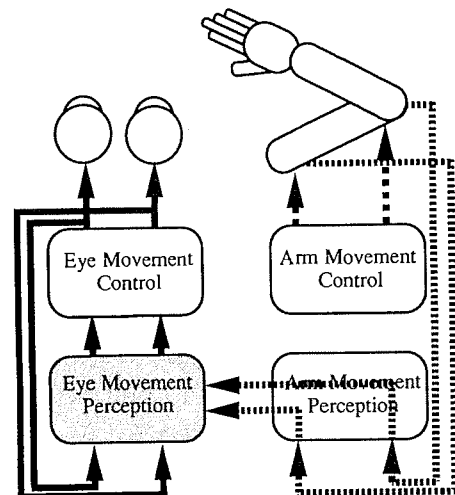


図9 上肢運動感覚性注視点定位実験における位置情報の到達過程
Fig. 9 Sensory integration process of positional information in the kinesthetic visual fixation experiment.

おいてのみ奥行き方向にアングシュートが見られ、ほぼ全域において $dy > 0$ の傾向が見られる。よって、このモデルが人間の場合に最も近い傾向を示していることになる。また、同モデルにおいては $d\theta$ についても $d\theta < 0$ (if $\theta > C$) or, $d\theta > 0$ (if $\theta < C$), ($C > 0$) なる傾向も見られ、この点でも人間の場合に近い傾向を示していると言える。

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体性感覚の統合を行う処理系の構造について考察する。今回取り上げた体性感覚に基づく注視点の到達実験における感覚統合モデルにおいては、知覚信号として眼球運動感覚性の信号を用い、処理信号として上肢体性感覚性の信号を用いたモデルが最も人間に近い傾向を示した。

一方、視覚性到達実験における感覚統合のモデルにおいては、人間に最も近い傾向を示したモデルの構造が知覚信号・処理信号ともに上肢体性感覚性の信号を用いたものであった。体性感覚に基づく注視点の到達実験と視覚性到達実験は、感覚統合による制御部位は異なるものの、本来同質の感覚統合を要求されている実験である。

すなわち、これらの実験結果によれ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、異なる信号処理系において異なる評価尺度を用いた評価機構が機能していることになり、これは人間の被験者による実験結果と合致する。この

結果から予測される現象として「注視位置→上肢運動」性の到達運動障害と「上肢位置→注視点移動」性の運動位置予測障害が独立に発生することが考えられる。これらの症状は頭頂連合野における下頭頂小葉、上頭頂小葉の障害によってそれぞれ独立に発生することが知られており⁽¹⁵⁾、感覚統合におけるこれらの学習を行う信号処理系が、運動を起こす部位の違いによって、信号変換の方向別にそれぞれの部位に独立に存在していると考えられる。また、被験者による視覚性到達実験と体性感覚性注視実験における実験結果について、これらを同一の空間認識過程として考えると位置知覚に関するずれの方向はちょうど反転するはずであるのに、実際にはいずれの実験においても奥行きのアングシュートが見られる。この傾向の食違いは独立な信号処理系間の違いが知覚特性の違いとなって現れたと考えることで本モデルで説明することができる。すなわちこれは、主観的に同じ感覚統合過程であると考えられてきたこれら二つの実験課題において、人間の空間知覚のための情報処理は実際には全く独立した信号処理系によって行われていたことを意味する。

次に、体性感覚性注視実験において、最も人間に近い知覚特性を示したモデルの信号処理の構造の特徴について考察する。まず、知覚信号に関しては、体性感覚性注視実験の場合、知覚信号として眼球運動感覚性の信号を用いていることは、この実験課題における人間の両眼視覚と上肢体性感覚の統合によって得られる情報が眼球運動指令に用いられていることから、視覚

性到達運動実験の場合(図8)⁽¹²⁾と同様、運動指令により直結した信号空間内で評価することによって情報の処理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運動制御系の構造(図9)を示唆するものである。全く同様の感覚情報と統合目的によりながら運動部位の異なる二つの感覚運動制御において支持されたことにより、同仮説はかなりの確度で検証されたと言える。

一方、処理信号に関しては、二つの実験結果のいずれにおいても信号の処理は上肢体性感覚信号空間上で行われており、感覚統合の際の信号間の相互作用を学習する部位においては同感覚信号が用いられていると考えられる。これは逆に言えば同感覚信号が現れる部位に感覚統合学習機構が存在していることを示唆するものである。

このような非対称性が学習機構の構造において現れる理由としては冗長自由度の存在が挙げられる。すなわち、本来、位置情報において眼球運動信号系の自由度が冗長性をもち、上肢体性感覚性の信号系の自由度には冗長性があるため、上肢体性感覚性信号系上で、冗長性自由度の処理をする必要があるためだと考えられる。すなわちホロプロタ等の処理構造に見られた「誤差評価をするために最も直接的な信号空間」が処理信号空間として用いられる」という法則⁽¹¹⁾がここでも見られる。この観点から二つの実験結果に適合したモデルの構造について以下のように考察する。

まず体性感覚性注視実験に見られる上肢体性感覚系→眼球運動系の変換においては、目標信号である眼球運動信号系の自由度が冗長性をもち、入力信号である上肢体性感覚性の信号系の自由度には冗長性がある。この場合、信号処理系は冗長性のない目標信号系の信号間の直交性をもとに学習によって冗長自由度の処理を行うことができる。更に、処理信号空間は上肢体性感覚性の信号で構成され、冗長性の信号情報も同信号空間上で排除される構成が、最も直接的な信号を処理信号空間として用いた構成と言える。すなわち、冗長性を上肢体性感覚性信号の信号空間上で統合し、3次元位置の情報とする際に用いる直交性の基準として眼球運動性信号系の直交性を用いているものと考えられる。

一方、視覚性到達実験に見られる、眼球運動系→上肢運動系の変換においては目標信号である上肢体性感覚性の信号系の自由度には冗長性があり、入力信号である眼球運動信号系の自由度が冗長性をもちないため、目標信号系の冗長性の信号情報を加えない限り目標信

号である上肢体性感覚性の信号系上の情報に変換不可能である。このため、誤差評価もまた変換の済んだ上肢体性感覚性の信号系上で行わざるを得ず、処理信号空間は上肢体性感覚性の信号で構成されることになるものと考えられる。

また、上肢体性感覚系→眼球運動系の変換において、上肢体性感覚性の信号空間上で信号間のインタラクション処理が行われている今一つの原因として、3.で述べた生理学的な構造が関係していると考えられる。視覚性信号処理を行う領野(下頭頂小葉)が左右の半球に分かれて存在し、それぞれ反対側の半空間を処理している。それに対し、体性感覚性信号を処理する領野(上頭頂小葉)は各側で反対側の上肢の全空間の信号を処理している。この構造から、視覚性信号空間内では全空間性の信号を処理できず上肢体性感覚性信号系上でインタラクションを起こした後に視覚性信号に変換される構造をとっている可能性が考えられる。この構造によって肩関節性の信号と肘関節性の信号間のインタラクションをも同様に上肢体性感覚性信号系上で行う構造となっているものと考えられる。

6. むすび

本論文では、まず、被験者を用いた体性感覚性注視実験を行い、同様の感覚統合を要求される視覚性到達実験との比較から、人間の空間知覚における視空間と体性感覚的触空間の統合過程の特性を明確にし、主観的には同じ判断を要求されるこれらの課題が異なった信号処理機構によって処理されていることを示した。次にその特性の機序を、信号空間の変換を学習する処理系の特性としてとらえ、信号間のインタラクションに神経回路特有の制約をもった学習モデルを適用することによって、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。同モデルの構造から、人間の感覚運動制御系においては、異種感覚からの情報を運動指令により直結した信号空間内で評価することによって情報処理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運動制御系の構造をもつことや、処理に用いられる信号系の特徴など、人間の感覚統合の過程における信号処理の構造についていくつかの新たな知見が得られた。また本論文においては信号空間を2次元としたが、同様の構造で3次元以上への対応も論じることが可能であると考えられる。今後の課題としては、アレー実験モデルにおいて重要な役割を果たした視覚情報の処理における半空間性⁽¹⁶⁾との整合をとることが考

えられ、これらの情報を加味した上で感覚運動制御における感覚統合の構成法則の一般化を図る所存である。

謝辞 本研究の推進にあたって多大な御支援を頂いた機械技術研究所大山尚武ロボット工学部長と谷江和雄バイオロボティクス課長に謝意を表す。

文 献

- (1) Luneburg R. K. : "The Metric of Binocular Visual Space", *Journal of the Optical Society of America*, **40**, 10, pp. 627-642 (1950).
- (2) Helmholtz H. V. : "Treatise on Psychological Optics", *Optical Society of America*, **3**, p. 482 (1925).
- (3) Hillebrand F. : "Denkschr. Akad. Wiss. Wien", *math.-nat. Kl.* **72**, p. 255 (1902).
- (4) Blumenfeld W. : "Zeits. f.", *Pysiol. d. Sinnersorgane*, **65**, p. 241 (1913).
- (5) Rubin E. : "HAPTISCHE UNTERSUCHUNGEN", *Acta Psychologica*, **1**, pp. 285-380 (1936).
- (6) Siemsen G. : "Experimentelle Untersuchungen uber die taktil-motorische", *Psychologische Foreschung*, **19**, pp. 61-101 (1934).
- (7) Blumenfeld W. : "The Relationship between the Optical and haptic construction of space", *Acta Psychologica*, **2**, pp. 125-174 (1937).
- (8) Prablanc C., Echalliar J. F., Komilis E., and Jeannerod M. : "Optimal Response of Eye and Hand Motor System in Pointing at a Visual Target", *Biol. Cybern.*, **35**, pp. 113-124 (1979).
- (9) Bock O. and Eckmiller R. : "Goal-directed arm movements in absence of visual guidance : evidence for amplitude rather than positiocontrol", *Exp. Brain Res.*, **62**, pp. 451-458 (1986).
- (10) 樋口正浩, 山崎興八州, 笠井 健 : "視覚系と運動系の3次元位置の対応づけ, 信学技報, **MBE86-82** (1986).
- (11) 前田太郎, 舘 暉 : "ホロプラ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, pp. 1111-1118 (1989).
- (12) 前田太郎, 舘 暉 : "視覚性到達運動における両眼視と上肢位置感覚の統合", 計測自動制御学会論文集, **29**, 2, pp. 201-210 (1993).
- (13) Mountcastle V. B., Lynch J. C., Georgopoulos A., Sakata H., and Acuna C. : "Posterior parietal association cortex of the monkey : command functions for operations within extrapersonal space", *J. Neurophysiol.*, **38**, pp. 871-908 (1975).
- (14) Stein J. : "Effects of parietal lobe cooling on manipulative behaviour in the conscious monkey", *Active touchm*, pp. 79-90 Pergamon Press (1978).
- (15) Levine D. N., Kaufman K. J. and Mohr J. P. : "Inaccurate Reaching Associated with a Superior Parietal Lobe Tumor", *Neurology* **28**, pp. 556-561 (1978).
- (16) 前田太郎, 舘 暉 : "両眼立体視による感覚運動制御(IV)—平行/距離アレイを生じる空間知覚モデル", 第30回計測自動制御学会全国大会予稿集, pp. 839-840 (1991). (平成4年5月25日受付, 10月13日再受付)

前田 太郎



昭62東大・工・計数卒。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、平4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・マシンインタフェース、テレグジスタンスなどの研究に従事。計測自動制御学会、IEEE、日本ロボット学会、神経回路学会各会員。

舘 暉



昭43東大・工・計数卒。昭48同大大学院工学系研究科博士課程了。工博。昭48より東京大学助手、通産省機械技術研究所研究員、同所主任研究官、遠隔制御課長、バイオロボティクス課長、東京大学助教授を経て、平4東京大学先端科学技術研究センター教授に就任、現在に至る。1979年から1980年米国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、通産省大臣賞研究業務優秀者表彰などを受賞。IMEKO TC17(Robotics)議長。SICEフェロー。