

光と音に対する指示運動と知覚空間の構成に関する考察

水戸部一孝*、高橋誠*、加藤充孝*、永井謙芝*、泉隆*、

松島純一**、山本泰秀***、伊福部達*

*北海道大学電子科学研究所、**北海道大学医学部、***日産自動車(株)

人工現実感とは、人間とコンピュータの間に、空間的なインターフェイスを構成する技術である。仮想空間をより実空間に近付けるためには、人間の感覚統合、特に空間情報に関する統合を解明する必要がある。本報告では、視・聴覚空間で構成された知覚空間について述べる。知覚空間を調べるために、私達は指示運動と注視運動を用いた。さらに、体性感覚による指示点を調べた。その結果、視界周辺部においては、指示点が光・音刺激提示位置に対し、内側にシフトする傾向が確認された。

Consideration of the Indication Movements to Optic and Acoustic Stimulation and Construction of Spatial Perception

Kazutaka MITOBE*, Makoto TAKAHASHI*, Mitsutaka KATO*,

Norishige NAGAI*, Takashi IZUMI*, Jun'ich MATSUSIMA**, Yasuhide YAMAMOTO***

and Tohru IFUKUBE*

*Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University.

**School of medicine, Hokkaido University.

***Nissan motor company.

Virtual reality technology provides a spacial interface between man and computer. In order to be more friendly virtual environment, it is necessary to explicate human sensory integration which is concerned with the space. This paper describes spacial perception which is comprising of the visual space and the auditory space. In order to investigate the spacial perception, we use the indicating behavior and fixating movement. Moreover, we have investingated the indicating point by the somatic sensations. In the region of the horizontal peripheral axis, indicating point is contracting to the inner side from the audio-visual stimulatig points.

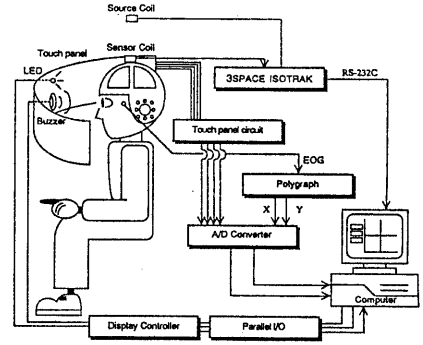
1. はじめに

視覚と聴覚は、空間を知覚するために最も重要な器官である。空間を認識するとき、そこには様々な聴覚情報や視覚情報が存在している。話声、車の音、風の音などにより聴覚空間は形成され、視界にはいる道路、建築物、人の姿などにより視覚空間は形成される。視空間は両眼視野により形成され、両目で一点を固視(fixation)している状態で見ることのできる範囲を計測すると両眼視野(binocular field)が求まる。しかし、視野内の広い範囲を一様の詳しさで見ることができるわけではない。視野の中心に対応する網膜上の中心窩(fovea)と呼ばれる範囲で視力が最もよく、離れるにしたがって視力は急激に低下することが知られている¹⁾。これは網膜の視細胞の受容野が網膜の中心部で小さく、網膜周辺になるほど大きくなっているといった網膜の細胞構造に起因している。したがって、固視点以外の視野にある物体を明瞭に見ようとするとき、視線を移すことになる。この視線移動には不随意的、受動的、能動的といった様々な運動があり、中枢神経の状態にも依存する。知覚空間の研究は、人工現実感などのヘッドマウントディスプレイの構成に、ヒューマンインターフェースの観点から示唆を与えるであろう。これまでに、私たちは光源と音源を指標とし、知覚方向に頭部と眼球を向ける運動を計測することで、注視運動に生じる眼球および頭部の協調運動について調べてきた²⁾。本研究は、視覚および聴覚の空間情報に着目し、ヒトの空間構成の機序を調べることを目的としている。以下、ヒトが脳に構成するであろう空間の内部モデルを内部空間と呼ぶ。今回の実験では、聴覚、視覚情報により形成される内部空間を外部に導出する手法として指による指示運動を考案し、妥当性を検討した。また、光・音刺激時の知覚空間およびヒトが長期記憶として保存している内部空間を指示運動を用いて調べた。

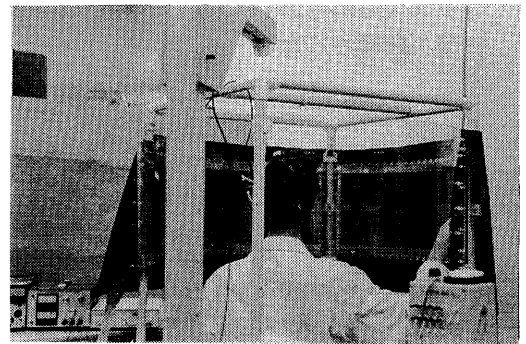
2. 実験装置

図1(a)および(b)にそれぞれ実験システムのブロック図および実験システムの写真を示す。実験システムは大きく分けて被験者にターゲットを提示する視聴覚刺激システム、頭部運動を計測する3SPACE(McDONNELL DOUGLAS : ISOTRAK)、眼球運動を計測するEOG、指示座標を検出するタッチパネルから構成される。

視聴覚刺激システムは、19個の発光ダイオード(LED)と圧電ブザー(Buzzer)を直径1.1[m]の半円形の板に水平列に据え付



(a) ブロック図



(b) 全景

図1 実験システム

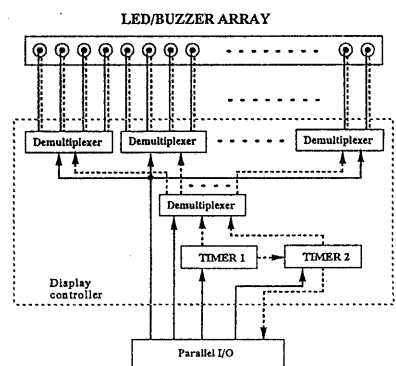


図2 ディスプレイコントローラのブロック図

けたディスプレイとディスプレイ・コントローラからなる。LEDとBuzzerは左右対象に中心から90°まで、10°ごとに配置した。LEDは赤色(700[nm])、配向半値角が70°、光度1.5[mcd]の特性を有する。Buzzer音の周波数は544[Hz]である。実験前にディスプレイは被験者の眼の高さと同じになるように調節した。LEDおよびBuzzerの制御はディスプレイ・コントローラで行われた。ディスプレイ・コントローラのブロック図を図2に示す。コンピュータ(NEC:PC9801RA)からパラレルI/Oを介してLED/BuzzerのON-OFF、指標位置、指標が駆動するまでの時間、駆動期間のパラメータが入力される。TIMER1は指標が駆動するまでの時間、TIMER2は指標の駆動期間の制御を行い、指標駆動のタイミングは再びパラレルI/Oを介しコンピュータに送信される。また、TIMER1、TIMER2の設定値の組み合わせによりLED/BuzzerのON-OFFを行う。指標位置の操作のために、下層にLED/BUZZER切り替え用のデマルチプレクサを並列に接続し、上層に下層の切り替えを行うためのデマルチプレクサを配置した。

頭部運動の計測には、3SPACEを用いた。3SPACEでは、被験者の頭部の3軸のオイラー角(方位角:Azimuth, 横転角:Roll, 上下角:Elevation)および三次元座標(X, Y, Z)が算出される。オイラー角および三次元座標の定義図を図3(a)に示す。算出されたデータはRS-232Cを介してコンピュータに送信される。3SPACEは約16[msec]ごとに位置、角度情報を出力することができる³⁾。3SPACEのソースコイルを木製支柱に取り付け(図1(b)参照)、センサコイルを頭部にヘッドギヤを用いて装着した。これを使用することで被験者の頭部の動きを束縛することなしに計測することができた。

眼球運動はEOGを用いて計測した。Ag-AgCl皿電極を右目の上下、左右に装着した。EOGはポリグラフ(日本電気三栄)においてフィルタリング、電圧増幅が行われ、A/Dボードを介してコンピュータに取り込まれた。図3(b)に示すように、眼球的横方向の回転を方位角、上下方向の回転を上下角と定義した。また、EOG[V]から角度[deg]への変換のために測定時にキャリブレーションを行った。EOGの外部ノイズからの影響は見られなかった。

指示座標の検出には自作のタッチパネルを用いて計測した。タッチパネルの原理図を図4に示す⁴⁾。回路には定電流源を接続しており、二枚の透明導電性フィルムが接触すると、10[mA]一定の電流が供給される。タッチパネルはアナログ式であり、表面抵抗450[Ω/□]の二枚の透明導電性フィルム(帝

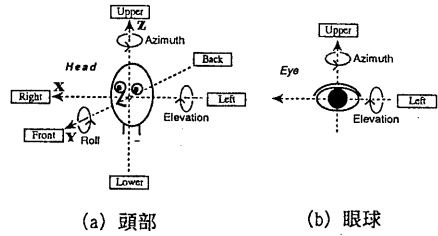


図3 三次元座標の定義図

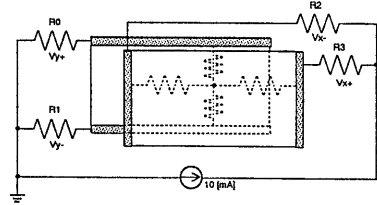


図4 タッチパネルの原理図

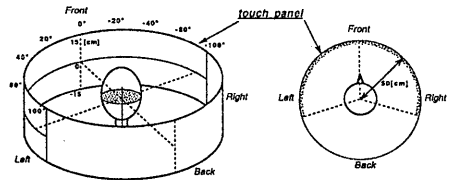


図5 タッチパネルの外観図

人:T-COAT)を対向させ構成している。二枚の透明導電性フィルムはそれぞれX座標、Y座標に対応している。電流は接触点に応じて分離して流れるため、透明導電性フィルムの左右/上下両端に接続した抵抗に生じる電圧を比較することにより接触位置を算出することができる(電流・電圧分割方式)⁴⁾。以下に示す計算式により電圧から指示座標の比を算出することができる。

$$(x, y) = \left(\frac{V_{x^*}}{V_{x^*} + V_{x^-}}, \frac{V_{y^*}}{V_{y^*} + V_{y^-}} \right)$$

作製したタッチパネルは縦270[mm]、横900[mm]である。これを直径1000[mm]の円筒中に左右2枚配置した。タッチパネ

ルの外観図を図5に示す。円筒形のパネルは厚さ2[mm]の透明塩化ビニール板を使用しており、アクリルネジで木製支柱に固定した。導電性フィルムに対する電極はステンレスフィルムにアクリル性合成ゴムを塗布し作製した。タッチパネルの指示座標比-電圧比の特性を測定したところ、タッチパネルは線形特性を有することが認められ、以下に示す計算式により電圧比から指示座標を算出した。

$$\begin{aligned} \text{Right touch panel} \\ X[\text{deg}] &= 114.39x - 3.317 \\ Y[\text{deg}] &= 685.35y - 344.27 \\ \text{Left touch panel} \\ X[\text{deg}] &= 118.33x - 6.324 \\ Y[\text{deg}] &= 700.41y - 349.74 \end{aligned}$$

なお、実験後に再度特性を調べたが、差異は認められなかった。

3. 実験方法

はじめに内部空間を導出するための手法として、指示運動が妥当であるかを確認する実験を行った。一般に、知覚位置を運動により外部に導出する手法として、眼球の注視運動が用いられている。そこで、光および音をターゲットとして提示し、指示点と注視点の関係を調べた(Case A1)。また、頭部および眼球を固定した際の、光および音のターゲットに対する指示点を調べた(Case A2)。次に、頭部および眼球を固定した際の、内部空間に基づく指示点を調べた(Case B)。

3.1 実験条件

被験者は、Ag-AgCl皿電極およびヘッドギヤを装着しディスプレイ前の椅子に座る。知覚方向の指示は両手を用いて行い、右方向からの刺激には右手で指示し、左方向からの刺激には左手で指示を行った。左右の人差し指にはタッチパネル保護のためのスポンジ入りのサックを装着した。両手は膝の上に置き、ディスプレイにターゲットが提示されたらできるだけ速く知覚方向を指示するよう教示した。また、指示運動を行う際の頭部および眼球の運動には、以下の二種類の教示を交互に与えた。

- Case A1 頭部および眼球を自由に動かし光源方向を指示、
- Case A2 頭部および眼球を中心方向(0°)に固定し光源方向を指示、
- Case B 頭部および眼球を中心方向(0°)に固定し内部空間に基づき指示、

また、運動中の体性感覚によるフィードバックを無くすた

Stimulation pattern

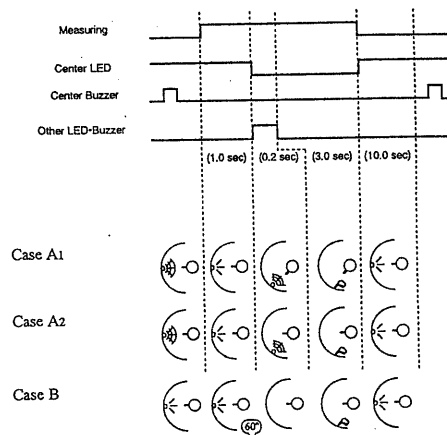


図6 刺激パターンのタイムチャート

めに、「できるだけ速く光源方向を指示する」様に教示した。以上の教示条件に対し、次節に示す刺激パターンを提示した。

3.2 刺激パターン

図6に刺激パターンのタイムチャートを示す。Case A1およびCase A2では、ターゲットに全て光・音刺激を用いており、同位置に提示している。光刺激の提示位置は左右20, 40, 60, 80[°]の計8点である。これを二回繰り返す、計16点計測して一試行とした。なお、一回の実験に要する時間は約5[min]である。指標提示時間は0.2[sec]であり、LEDによる光刺激とBuzzerによる音刺激を同時期に提示している。本実験に用いた提示時間では顔を向けた時、すでに指標は消失しているため視聴覚によるフィードバックは与えられない。刺激の手順は以下の通りである。

- (1) 指標の駆動位置の順序を乱数で決定する。
- (2) 中心0°のLEDを1秒間駆動する。
- (3) ±20, 40, 60, 80[°]の中の一つのLED・Buzzerを200msec駆動する。
- (4) 10秒間の無刺激期間をおく。
- (5) (2)に戻る。

被験者は健康な男性5人、知覚方向を正確に指示できるように練習を3試行(計54点, 30[min])行った。Case A1およびCase A2の実験は全て暗所で行った。

Case 2では、オペレータから被験者に、言葉により指示座標(左右20, 40, 60, 80[°])を伝える。被験者は自分の内部

空間に従い指示運動を行う。なお、頭部および眼球は中心0°方向に固定しており、視界を制限するためのゴーグルを装着した。したがって、視覚情報は中心0°のターゲットのみであり、指示座標、運動中の腕などの視覚的フィードバックは存在しない。

4. 実験結果

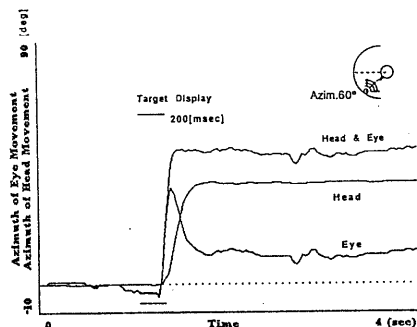
4.1 頭部と眼球の運動について

以下に頭部・眼球解放時の指示運動における代表的な頭部と眼球の方位角の記録を示す。頭部の方位角は0°の指標を注視したときの3SPACEのソースコイルに対する頭部の座標を基準点とした。眼球の方位角は0°の指標を注視した時の頭部に対する変位角を基準点とした。図7は光・音刺激時の眼球と頭部の方位角を表している。また図7(a)は刺激に対する時間特性を表している。なだらかなS字を描く曲線は頭部の方位角である。急峻な立ち上がりを示し、指数状の減衰を示す曲線は眼球の方位角である。これらの上方にある曲線は、頭部と眼球の方位角を合計した値であり、すなわち視線の変位を示す。また、図中の上下の直線は光源および音源が駆動している期間を示す。図7(b)は、図7(a)を眼球の方位角を横軸に頭部の方位角を縦軸に、再プロットしたものである。原点(0,0)は刺激前の眼球と頭部の座標を示している。また、横軸および縦軸60°の切片を通り傾きが-1の点線では、注視点(眼球と頭部の方位角の合計)が60°を向いていることを示す。

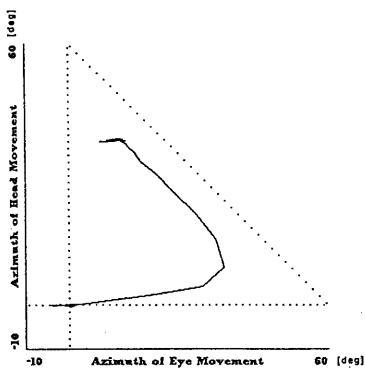
4.2 提示位置に対する指示位置・注視点の関係

以下に示す結果は一つの光源の提示角度に対し3人の被験者による計18点の測定値により作成した。

図8に頭部・眼球解放時(以下は解放時と呼ぶ)における光源の提示位置に対する指示位置、注視点の水平成分を示す。図8(a)に指示位置、図8(b)に注視点、図8(c)に注視点に対する指示点のズレを示す。図8(a),(b)において、点線は提示した光源の角度を示し、実線は被験者の指示した角度を示す。また、扇型の外にある円弧は標準偏差を示す。図8(c)の横軸は提示した光源の角度を示し、縦軸はターゲットの提示角度に対する被験者の指示した角度の差を示す。図8(a),(b)から中心方向より周辺方向の標準偏差が増加していることが認められる。また、提示位置が左右20°の際には外側に、提示位置が左右80°の際には内側を指示している傾向が認められる。また、図8(c)より、指示座標と提示座標は同一の傾向を持ち、



(a) 時間特性



(b) 相関図

図7 頭部眼球の方位角

ほぼ一致していることが確認できる。図9に頭部・眼球固定時(以下は固定時と呼ぶ)における光源の提示位置に対する指示位置の関係を示す。図9(a)は指示点の水平成分、図9(b)は指示の垂直成分を示す。解放時における関係と同様な傾向が確認でき、標準偏差は固定時の方が増加していることが認められる。図9(b)横軸は光源の提示位置を示し、縦軸は光源からの縦方向のズレを示す。これより、光源に対して指示位置が下方にずれる傾向が認められる。図10に言葉による角度提示(Case 2)に対する指示結果を示す。各提示座標に対し、3人の被験者により計測された18点データで作成した。右側が大きめに、左側が60°方向に圧縮され指示されていることが確認できる。図11にターゲットの提示位置に対するサッケードの半値潜時を示す。ここでは潜時として、刺激開始後サッケードが最大値の1/2に達するまでの時間を用いており、半値潜時と呼ぶ。横軸は光源の提示位置を示し、縦軸は応答時間を示す。

5. 考察

5.1 眼と頭の協調運動について

図7(a)に示すように、全ての場合に眼球の急峻な動きを示すサッケード、そして頭部の動きに対し眼球を逆方向へ補正する前庭動眼反射(VOR)が認められた。図7(b)より眼球と頭部の協調運動について説明する。光源が提示されると、サッケードにより眼球が急峻に指標方向へ移動する。次に頭部が動き出し、頭部の運動と反対方向にVORの働きにより緩やかな眼球運動が生じる。眼球の方位角がピーク点から減衰する際、曲線の傾きが-1に近いほど、眼球の動きが頭部の動きを打ち消していることが確認できる。この機構は運動状態での視線の安定化に重要である。また、注視運動が終了した後にタッチパネルが押されていた。

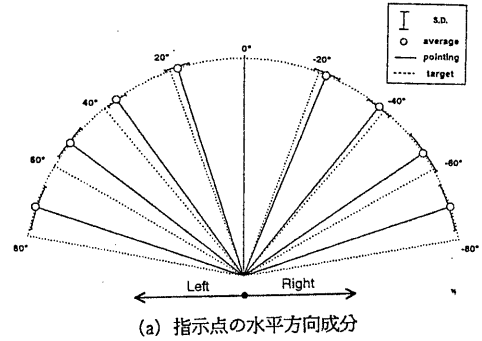
5.2 水平方向の指示について

図8(a)および図8(b)より提示角度が大きくなるに従い指示座標は内側を示し、標準偏差が増加する傾向が認められる。また、図8(c)から指示点に比べ注視点が内側に狭まっていることが確認できる。しかし、指示点は注視点よりも正確にターゲットを捕らえている。これより、ターゲットを指示する際、周辺方向のターゲットに対しては、眼球の中心高が指示点に対し約4 [deg]内側を注視していることが認められる。また、注視点および指示点のいずれも、周辺方向のターゲットに対して、内側を指示する傾向が認められる。これは、周辺視に入る情報が、ヒトの処理過程(感覚系, 認識系, 運動系)のいずれかにおいて、内側に圧縮されているためと考えられる。日常、周辺視に視覚情報が存在した場合、随意的なサッケードにより両眼視野内にとらえようとする。そのため、周辺視でものを見るという学習経験が乏しいことが考えられる。したがって、周辺視野においては外部空間と脳を介して出力された指示点の位置関係にズレが生じているのではないかと考えられる。そこで、次節5.5において、ヒトの空間情報に関する処理プロセスのモデルを提唱し、考察を行う。

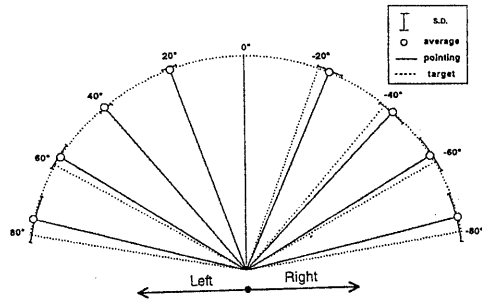
5.3 垂直方向の指示について

図9(b)より、垂直方向のズレが光源提示位置より下方向に移動し、そして標準偏差が増加する傾向が認められる。また、頭部固定時、解放時の共通の傾向として、左方向40°, 60°の指示位置が下方向にずれる傾向がみられる。これは被験者が全て右利きであることに起因しているのではないかと考えられる。

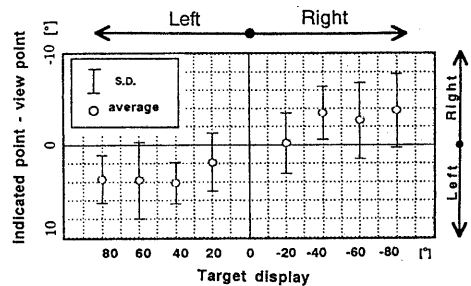
5.4 指示運動時のサッケードの潜時について



(a) 指示点の水平方向成分



(b) 注視点の水平方向成分



(c) 注視点に対する指示点のズレ

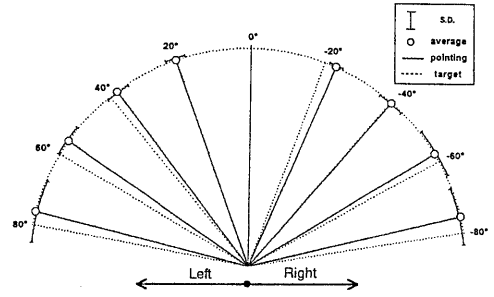
図8 音源・光源提示位置に対する注視点と指示位置の関係

図11より、光源提示角度に依存せず平坦な特性であることが認められる。この値は、以前計測した注視運動のみによる潜時よりも大きいことが確認されており、指示運動の付加により潜時が増加していることが確認できる²⁾。したがって、潜時は指示運動と注視運動を合わせた協調運動の学習効果の指標になるのではないかと考えられる。

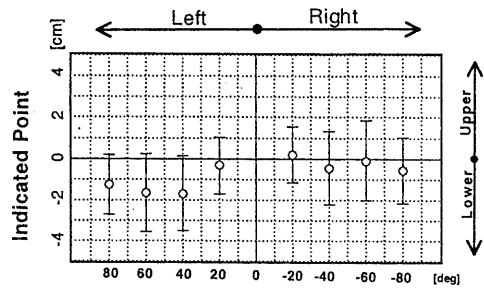
5.5 ヒトの空間地図に関する処理過程のモデル

以上の実験より、ヒトの空間情報が視聴覚による入力と運動を介した出力とで差異がある傾向が認められた。ここではこれまでの結果を整理し、数学的モデルを提唱し、これに基づいて考察を行う。モデルを構成するに際し、ヒトの視聴覚伝導路および大脳皮質の機能的構成について述べる。図12に視覚入力の情報処理過程を示す。網膜上の像の位置と視覚野の間にはトポジカルな写像関係が存在し、視覚野では特徴抽出の働きに基づいて各ニューロンが円筒モジュールを形成して整然と配列している⁸⁾。聴覚性および視覚性の空間定位に関与する領域は、頭頂連合野の7 (PG)野に関係すると言われている⁹⁾。頭頂連合野は運動の開始を指令または運動を制御するうえで、空間的要素の情報を処理する過程に関与しているといわれている。図13に大脳皮質の運動関連領域を示す⁷⁾。連合野・運動前野・補足運動野・大脳基底核・小脳外側部を中心とする上位で運動の企画・プログラムが、運動野・小脳中間部・脊髄を中心とする下位で運動の具体的な遂行・制御が行われていると考えられている^{8,9,10,11)}。ここでは、ヒトに提示した視聴覚情報を入力、指示運動を介し指示された点を出力、脳の各領域はブラックボックスとしてモデルを構成した。モデルを図14に示す。 x_1 は視覚入力、 x_2 は聴覚入力、 x_3 は言葉による座標の指示である。 $e_1(\cdot)$ は網膜から視覚野に至る視覚伝導路、 $e_2(\cdot)$ は内耳から聴覚野に至る聴覚伝導路、 $e_3(\cdot)$ は言語野から頭頂連合野に至る伝導路である。 $h_1(\cdot)$ 、 $h_2(\cdot)$ は視覚野、聴覚野からの出力であり、これらに重みである a 、 b がかかり、加算され頭頂連合野に至る。これを $h(\cdot)$ とした。ここで a 、 b は注意レベルにより変わる重みであり、 $a+b=1$ とした。頭頂連合野から運動野、筋肉を介し、出力が行われる。この過程を $m(\cdot)$ とする。また、指示運動中の体性感覚によるフィードバックを $f_s(\cdot)$ 、指示座標の視覚的フィードバックを $f_v(\cdot)$ とする。 $f_s(\cdot)$ および $f_v(\cdot)$ は教示条件および実験条件により遮断することが可能である。ここでは、暗所で行うことにより $f_v(\cdot)$ を遮断した。また、素早く指示を行うことで、指示運動をオープンループにし、 $f_s(\cdot)$ の過程を遮断している。また、 $e_1 \sim e_3$ は恒等写像であると仮定した。

この図14のモデルに従い、 $h(\cdot)$ および $m(\cdot)$ を求め、どの段階で写像が歪むのかを考察する。これまでに行ったターゲットに対する知覚位置の指示点の実験を、情報の流れとして捉え、上記の写像で表現すると以下ようになる。



(a) 水平方向成分



(b) 垂直方向成分

図9 頭部・眼球固定時の光源・音源提示位置に対する指示位置

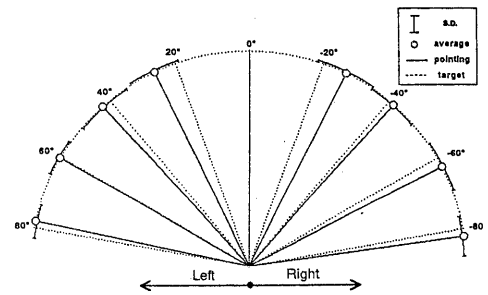


図10 内部空間に基づく指示運動

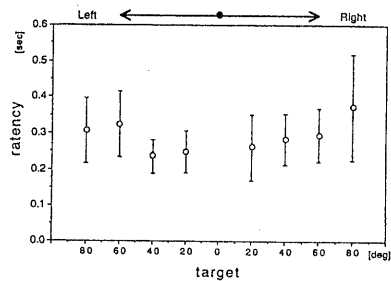


図11 サッケードの潜時

$$y = m \cdot h(x_1, x_2) \dots\dots\dots (1)$$

ここでは光源と音源を同位置に提示しているため
 $x_1 = x_2 = x$ となり、

$$y = m \cdot h(x) \dots\dots\dots (1)'$$

と表現できる。同様にCase 2における実験を上記の写像に従い表現すると次のようになる。

$$y = m(x_3) \dots\dots\dots (2)$$

(1)' および(2)式より h, m を求めることができる。図10より、周辺部が内側に圧縮される原因は $h(\cdot)$ にあると予想される。

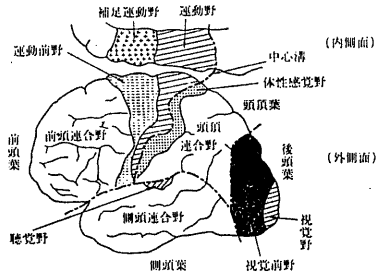


図13 大脳皮質の運動関連連野⁷⁾

6.まとめ

今回の実験ではヒトが構成する内部空間を外部に導出する手法として指による指示運動を考案し、妥当性を検討した。その結果、注視点と指示点が同じ傾向を示すことが認められた。また、指示点から視覚周辺部においては中心方向に圧縮されて指示されることが判明した。この原因を調べるために、実験を行い、数学的モデルを作成した。その結果、感覚野から頭頂連合野に至る過程において圧縮が生じると予想された。今後一人の被験者に絞ってデータを収集し、モデルの妥当性および左右差について考察していく予定である。

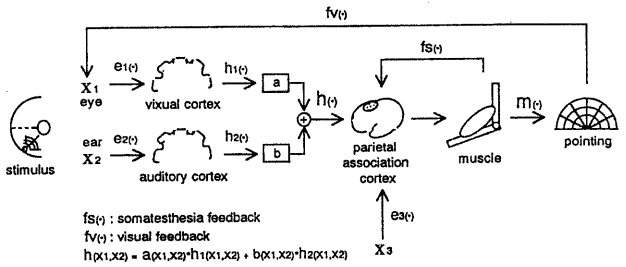


図14 空間知覚—運動モデル

本研究を進めるにあたって協力して下さった部門の方々に感謝の意を表す。

本研究は一部文部省科学研究費(課題番号: 02650290)によって行われた。

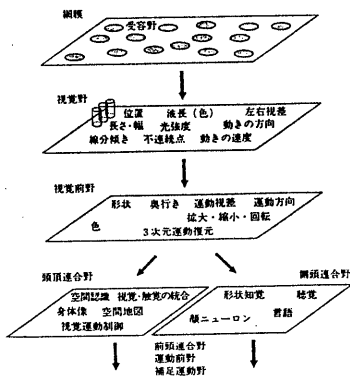


図12 視覚入力の情報処理過程⁵⁾

[参考文献]

1. 田崎京二, 小川哲朗: 新生理学体系, 感覚の生理学, 228/229, 医学書院(1989).
2. 水戸部一孝, 高橋誠, 加藤充孝, 泉隆, 伊福部達: 光と音に対する頭と眼の協調運動に関する考察, 電子情報通信学会, BME91-118, 81/88(1992)
3. 高橋誠, 加藤充孝, 水戸部一孝, 永井謙芝, 伊福部達, 松島純一, 山本泰秀: めまい患者における頭部および眼球の動きの同時計測, 信学技報, BME91-29, 79/83(1991).
4. 二枚の抵抗シートを使った静電結合方式のタブレット, 日経エレクトロニクス, no. 216, 48/51(1979).
5. 外山敬介: 視覚野と視覚前野の分業体制, 科学, 53, 221/228(1983).
6. 鈴木寿夫, 酒田英夫: 新生理学体系, 高次脳機能の生理学, 284/293, 医学書院(1988).
7. E. R. Kandel and J. H. Schwartz: Principles of Neural Science (2nd.), Elsevier(1985)
8. G. I. Allen and N. Tsukahara: Cerebro-Cerebellar Communication Systems, Physiol. Rev., 54, 957/1006(1974)
9. 丹次順: 運動前野の働き, 科学, 53, 248/250(1983)
10. 丹次順: 運動意志の発現, 伊藤正男, 佐伯胖編: 認識し行動する脳, 東京大学出版会, 91/111(1988)
11. B. Biguer, M. Jeannerod, and C. Prablanc: The coordination of eye, head and arm movements during reaching at a single visual target, Exp. Brain Res., 46, 301/304(1982)