光音刺激に対する知覚運動協応についての基礎的研究[†]

水戸部 一 孝*・高 橋 誠*・加 藤 徹*
木 村 真 弘*・伊福部 達*

The Basic Study of 'Sensory-Motor Coordination' to an Optic and Acoustic Stimulation

Kazutaka MITOBE*, Makoto TAKAHASHI*, Toru KATO*,
Masahiro KIMURA* and Tohru IFUKUBE*

Virtual reality technology provides an interface between man and computer. To make more real virtual environment, it is essential to investigate the 'Sensory-Motor Coordination.' In this paper, indicating movements and gazing movements were used as one of the 'Sensory-Motor Coordination.' The indicating movements, which were the response of normal subjects to optic and acoustic targets, were measured.

The measuring system was composed by a display unit, an eye and head measuring unit and an indicated point measuring unit. The display unit presents targets in a transverse plane of eyes. 19 targets (LEDs and speakers) were arranged from left to right, with separation of 10 degree. Targets were placed at 50 centimeter distance. Stimulation period of the target was 200 ms. This stimulation is the same period as the latency of the saccadic eye movements. The eye and head measuring unit was composed by two instruments. One is EOG (electro-oculography). The other is '3SPACE FASTRAK' (POLHEMUS Co.). Head movements were measured by '3SPACE FASTRAK' (POLHEMUS Co.) that uses electromagnetic search-coil technique. Indicating point measuring unit that used a touch panel measured azimuth and elevation of indicated points. The sampling frequency of this total experiment system is 40 Hz. Subjects continuously fixated an LED presented straight ahead (0 deg); proper fixation was monitored by an operator. Targets for pointing were presented on the display in a random sequence at eight positions. In a later data inspection, responses were discarded when the eyes had drifted or saccaded during the arm movement.

From the responses of each movement, A shift and S.D. of indicated points increased according to a target presenting angle. This outcome revealed that the response in the peripheral visual field is underestimated on the 'Sensory-Motor Coordination.'

Key Words: sensory-motor coordination, pointing movements, space perception, virtual reality

1. はじめに

飛んできたボールを受けとめたり、転がっているボールを蹴ったりするときに、身体運動が知覚情報に誘導され協応的に行われるような運動がある。このような運動を知覚運動協応 (sensory-motor coordination) という。

知覚運動協応を実現するには、視聴覚および体性感覚などの感覚器により感覚情報を知覚し、つぎにそれらの知覚情報から物体の空間的な位置を目標値として空間の概念を構成し、最後に目標値に対して、眼球、頭部および腕などの制御を行うことが要求される。つまり、知覚、認識、運動という全体的な処理が必要となる。

これまで、空間知覚に関する視聴覚系または運動系に関する断片的な神経生理学上の知見は多数報告されているが、感覚情報の統合および運動の関連についての研究は、その複雑さゆえにほとんど行われていない。そのため、知覚運動協応に障害をもつ微細脳機能障害 (MBD)

[†] 第3回バイオメカニクスカンファレンスで発表 (1993・1)

* 北海道大学電子科学研究所 札幌市北区北12条西6

* Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University, Sapporo

(Received April 18, 1994)

(Revised October 19, 1994)

Fig. 2 Pointing device

コイルに対するセンサコイルの相対的な位置および角度を算出している。算出されたデータはRS-232 C ケーブルを介してコンピュータに取り込まれる。なお、ソースコイルは木製支柱に取り付け(Photo. 1 参照)、センサコイルは被験者の頭部にヘッドギヤを介して装着した。このシステムにより被験者の頭部を自由な状態で計測することが可能となった。

眼球運動計測システムは電気眼球図記録法(electro-oculography: 以下 EOG と略す)を用いている。Ag-AgCl 血電極を右目の上下左右に貼り、これに生じる電位差をポリグラフ(日本電気三栄)においてフィルタリングおよび増幅し、A/D ボードを介してコンピュータに取り込んだ。また、各セッションの初めにキャリブレーションを行い、計測終了時に電圧から角度に変換している。

指示点計測システムにはタッチパネルを用いたポインティング・デバイス⁷⁾を用いている。ポインティング・デバイスの外観図を Fig. 2 に示す。直径 1000 [mm]、高さ 300 [mm] の円筒形であり、円筒の材質は厚さ 2 [mm] の透明塩化ビニール板である。ポインティング・デバイスはアナログ式であり、表面抵抗 450 [$\Omega/\square$] の 2 枚の透明導電性フィルム(帝人(株): T-COAT)を対抗させ構成している。指示点は上下・左右の抵抗値に従って生じる電圧に比例するため、A/D ボードを介して電圧の計測を行い、計測終了時に指示点を算出した。なお、計測前後でのポインティング・デバイスの特性に差異は見られなかった。

3. 実験方法

知覚運動協応で、まず刺激に対して眼球や頭部が動きその方向を注視するという動作が伴う。この現象を定量的に確認することは知覚運動協応の特性を調べる上で重要となる。そこで、注視運動を伴った自然な指示運動(Case 1)と、頭部と眼球は正面に固定したまま行う指示運動(Case 2a)の比較実験を行った。また、ヒトは空間の概念に関する知覚情報を長期記憶として、または、学習経験として保持している。これには頭頂連合野が関与していることが示唆されている⁹⁾。一方、ヒトは言語によっ

ても空間のイメージを想起することができる。PET を用いた計測では、頭頂連合野の血流量が、空間のイメージを想起する際に増加することが示されている⁹⁾。これまでに言語により構成される空間の概念を運動を用いて調べるといふ試みは行われておらず、定量的に計測することは今後の研究のための知見として意義のあることと考えられる。そこで、頭部と眼球は正面に固定したまま、実験者の言葉による角度提示に対する指示運動(Case 2b)の計測を行った。

計測の際に与えた教示条件を以下に示す。指示運動を行う際、右半面には右手で、左半面には左手で指示を行うように教示した。Case 1 では、すばやくターゲットに顔を向け、すばやく指示運動を行うように教示した。ただし、動作の順序についての指示は与えていない。Case 2a および Case 2b では、頭部および眼球は正面 0 [deg] 方向に固定し、すばやく指示運動を行うように教示した。また、これを確認するために、計測中は頭部および眼球運動をモニタした。Case 2b において、実験者から言葉による角度提示が行われる際、被験者は聞いた角度からターゲットの位置を思い浮かべ、その位置に向かってすばやく指示運動を行うように教示した。指示の精度をあげるには、被験者が十分に体性感覚を認識できるように時間的制約を課さずに行う実験手法¹⁰⁾が適していると考えられる。一方、すばやく指示運動を行う場合、指示の精度が低下し、標準偏差が増加する可能性がある。しかし、Case 2b の予備実験において、筋肉および関節の状態を参考にして指示を行う場合があり、目的である空間のイメージの導出が困難になった。そのため本実験では、指示動作をできるだけ速く行うようにと教示した。運動をできるだけすばやく行うという教示条件は、Biguer らの実験²⁾で用いられた手法であり、これにより首や腕の筋感覚を意識する前に指示運動を終了させることができると考えられる。

これまでの研究で光音刺激に対する運動の潜時および出力の標準偏差が、光または音刺激のみの場合に比べ、有意に小さいことを見いだした¹¹⁾。本実験では、結果のばらつきを少なくすることを目的として、光源と音源をターゲットに用いており、同期間、同位置に提示している。提示期間は 200 [ms] である。一般にサッケードの潜時が約 200 [ms] であるから、この提示時間だと目を向けたときにはターゲットは消失しており、注視運動後の視覚的フィードバックは得られない。また、提示角度は左右 20, 40, 60, 80 [deg] の計 8 点であり、順番はセッションごとに乱数を用いて決定した。各提示角に対して 2 点ずつ、計 16 点で 1 セッションとした。ターゲットの提示パターンを Fig. 3 に示す。なお、ポインティング・デバ

Stimulation pattern

Fig. 3 Stimulation pattern of targets

Fig. 4 Three-dimensional coordinate of experiment system

イスに対する指示運動が正確に行えるように、計測前に練習を3セッション(20 [min])行っている。また、ターゲットの提示位置および実験結果に関するフィードバックは与えていない。以上の実験は静かな暗室で行った。

Case 1の被験者は右利き手の男性5人, 右利き手の女性1人の計6人である。Case 2aおよびCase 2bでは、共通の被験者により計測を行っており、右利き手の男性3人である。

Fig. 4に実験系で定義した座標系を示す。以下に示す結果では、方位角(azimuth)にのみ着目して述べる。

4. 計測結果

4.1 注視点および指示点(Case 1)

Fig. 5にCase 1でのターゲットの提示位置に対する指示点および注視点の方位角の関係を示す。Fig. 5(a)に指示点, Fig. 5(b)に注視点, Fig. 5(c)に指示点に対する注視点のズレを示す。Fig. 5(a)および同図(b)に

(a) Indicated points

(b) View points

(c) Subtraction view point from indicated point

Fig. 5 Azimuth of view points and indicated points to targets in Case 1 ($n=6$). Each dot represents the mean response to a target; each bar represents the standard deviation. Each dotted line presents a target

において、点線はターゲットの提示位置を示し、実線は被験者の指示点または注視点を示す。また、扇形の円周上にある円弧はそれぞれの標準偏差を示す。Fig. 5(a)および同図(b)から、注視点よりも指示点のほうが正確にターゲットをとらえていることが確認できる。また、ターゲットの提示位置が周辺部に移るほど、指示点および注視点の正面(0 [deg])方向へのズレおよび標準偏差が増加する傾向が確認できる。Fig. 5(c)のグラフは、指示点と注視点の差を示す。横軸はターゲットの提示位置を示し、縦軸は注視点と指示点の差を示す。左右20 [deg]のターゲットを除いて、常に注視点が指示点に対して約4 [deg] 正面方向にずれていることが確認できる。

Fig. 6 Indicating performance when head and eye were fixed in Case 2a ($n=3$). Each dot represents the mean pointing response to a target; each bar represents the standard deviation. Each dotted line presents a target

Fig. 7 Indicating performance when head and eye were fixed in Case 2b ($n=3$). Each dot represents the mean pointing response to a suggestion by an experimenter; each bar represents the standard deviation. Each dotted line presents a suggestion

4.2 頭部および眼球固定時の指示運動 (Case 2)

Fig. 6に Case 2aでのターゲットに対する指示結果を示す。Fig. 6より周辺部ほど、正面方向への指示点のズレおよび標準偏差が増加する傾向が認められる。この傾向は Fig. 5(a)および同図(b)にも見られたが、ズレは Fig. 6のほうがより大きくなっている。

Fig. 7に Case 2bでの言葉による角度提示に対する指示結果を示す。ターゲットを提示した場合に比べ標準偏差が大きいたことが確認できる。

5. 考 察

5.1 注視および指示の協調運動

一般に指示運動を行う際、指し示す対象を注視するという運動が伴う。その際の指示点と注視点の関係において、40, 60, 80 [deg]のターゲットに対しては、注視点が指示点に対して約4 [deg]正面方向に位置する傾向が明らかになった (Fig. 5(c))。この傾向は、過去の学習経験により構築された協調運動の特性であると考えられる。同時に、提示角の増加に関わらず注視点と指示点の差が約4 [deg]一定であることから、両者は同傾向を示すことが考えられる。Straumann⁹⁾らは、左右25 [deg]の範囲で追従運動の計測を行い、注視および指示運動に相関があることから同一のパラメータによる制御機構の存在を示唆している。今回得られた結果は、その制御機構が周辺部においても満足されることを示唆している。また、注視点を固定して指示運動のみ行う場合、注視運動を同時に行う場合に比べ、より正面方向にずれる傾向が現れた (Fig. 5(a)および Fig. 6)。指示運動におよぼす注視運動の影響を調べるために、Fig. 5(a)と Fig. 6に対して、提示位置ごとに有意差の検定を行った。本論文では独立二群の二標本t検定 (two sample t test) を用いており、危険率 $P < 0.05$ でF検定 (test for equal variance) を行

い、等分散とみなせたものについてはパラメトリック法、そうでないものには Welch 法を用いた。t検定の結果、左右40, 60, 80 [deg]のターゲットに対する指示点に有意差 ($P < 0.05$) が認められ、特に左右40 [deg]のターゲットに対して最も顕著な有意差 ($P < 0.002$) が見られた。Prablanc ら¹²⁾による頭と眼の動きを制限した実験でも指示誤差が大きくなることを指摘している。これは注視運動を行わないことで、協調運動に障害が生じ、正面方向にズレる傾向がより強く現れた可能性がある。

Fig. 7より、言葉による角度提示に対する指示点の標準偏差が、ターゲットを提示した場合に比べ、大きいことが確認できる。これについては被験者の内観報告から、角度の概念と運動を直接結びつける学習経験に乏しいことが報告されており、経験不足が曖昧さに関与しているものと考えている。また、左右80 [deg]を除いて、右半面ではほぼ正確に、左半面でやや大きめに指示が行われているように見える。しかし、Fig. 7について左右差の検定を行った結果、20 [deg]に対する運動を除いて有意な左右差が認められなかった。

5.2 運動の左右差

以上の実験の被験者はすべて右利きであるが、計測された指示点および注視点に左右差が存在するだろうか。そこで、Fig. 5(a), Fig. 5(b), Fig. 6および Fig. 7で得られた結果から、左右差の検定を行った。その結果、20 [deg]の方向への全ての運動に左右差 ($P < 0.05$) が認められた。左右の優劣性の影響が運動特性に反映していると考えられる。

5.3 知覚運動協応における位置情報処理

指示点と注視点に共通した特性として、周辺部のターゲットに対する運動ほど、正面方向へのズレおよび標準偏差が増加する傾向 (Fig. 5(a)および同図(b))が見られた。同様に Fuller¹³⁾は、左右40 [deg]内の視標に対す

る頭部運動の特性を調べ、正面方向に引き寄せられる傾向(midline attraction)があることを報告している。これは、周辺部において知覚運動協応にズレが生じており、周辺視(peripheral vision)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、正面方向にズレが生じ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および頭部運動により両眼視野内に捉えようとする。そのため、周辺視で物を見えるといった学習経験が乏しいことが考えられる。その結果、周辺視野にターゲットが提示された場合に、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たと推測される。では、この周辺部でのズレは、ヒトのどの処理過程において生じたのであろうか。

空間に関する認識が行われている空間地図というものを仮定し、ヒトの視覚伝導路および大脳皮質に関する知見から、空間地図が存在する領野を考えてみる。視覚性の空間定位に関与する領野は頭頂連合野のPG野(7a野)であると考えられており、聴覚性の空間定位に関与する領野は側頭頭頂域(Tpt)であると報告されている¹⁴⁾。側頭頭頂域は位置的に頭頂葉に隣接しており、細胞構築学的にも非常にPG野に類似している。また、頭頂連合野では周囲の空間認識、視覚・触覚的イメージを伴った身体像の形成が成され、頭部および眼球の運動に影響されない空間地図の形成が行われていると考えられている¹⁵⁾。

以上の知見から、われわれは空間地図が頭頂連合野および側頭頭頂域周辺に存在すると推測しており、Fig. 5(a), Fig. 5(b)およびFig. 6で見られ、Fig. 7で見られなかった正面方向へのズレは、空間地図に至る視覚系において生じているのではないかと推測している。今後、実験的にこれを検証していく予定である。

6. おわりに

本稿では、知覚運動協応の一つである注視運動および指示運動に着目し、これらの運動を計測するための同時計測装置の開発を行った。さらに、本装置の評価を行い、健常者における作業空間内での知覚運動協応の特性を計測した。その結果、指示点および注視点に共通した特性として、周辺部のターゲットに対する運動ほど、正面方向へのズレおよび標準偏差が増加することを見いだした。さらに、周辺部におけるズレは、注視運動が伴わないと、より正面方向にずれることが明らかになった。また、視覚情報の有無に関わらず、左右20[deg]方向への運動に、左右差が出やすいことを見いだした。

以上の知見は、作業空間内でのヒトの知覚運動特性と

して新たに問題を提起しただけでなく、周辺視に対して視覚情報を提示するような仮想空間(virtual reality)を構築する場合に必要なものと考えられる。

今後は、ズレの要因を解明していくとともに、MBDおよび半側無視患者における知覚運動特性の計測を行い、今回得られた健常者の特性と比較していくことで、定量的な診断および訓練方法の確立に寄与していきたいと考えている。

本研究を推進するにあたり、貴重な御助言を頂いた生命工学工業技術研究所の関喜一氏、B. U. G., Inc.の加藤充孝氏および秋田大学の吉村昇教授に深く感謝致します。また、本研究の一部は特別研究員奨励費および文部省科学研究費補助金(06680195)により行われた。ここに心よりの謝意を表します。

参考文献

- 1) M. A. アービブ著、金子訳：ニューラルネットと脳理論、サイエンス社、2/10 (1992)
- 2) 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)
- 3) D. Straumann, Th. Haslwanter, M., C. Hepp-Reymond and K. Hepp: Listing's Law for Eye, Head and Arm Movements and Their Synergistic Control, *Exp. Brain Res.*, **86**, 209/215 (1991)
- 4) 樋口, 山崎, 笠井: 視覚系と運動系の3次元位置の対応付け機構, *信学技報*, **MBE-86-82**, 33/40 (1986)
- 5) 前田, 館: 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**, 201/210 (1993)
- 6) 高橋, 加藤, 水戸部, 永井, 伊福部, 松島, 山本: 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)
- 7) 水戸部, 高橋, 加藤, 永井, 泉, 伊福部: 光と音に対する指示運動と内部空間の構成に関する考察, *信学技報*, **BME92-27**, 25/32 (1992)
- 8) M. Mishkin and T. Appenzeller: The Anatomy of Memory, *Sci. American*, June, 62/71 (1987)
- 9) P. E. Rolland and L. Friberg: Localization of Cortical Areas Activated by Thinking, *J. Neurophysiol.*, **53**, 1219/1243 (1985)
- 10) O. Bock: Contribution of Retinal Versus Extraretinal Signals Towards Visual Localization in Goal-directed Movements, *Exp. Brain Res.*, **64**, 476/482 (1986)
- 11) 水戸部, 高橋, 加藤, 泉, 伊福部: 光と音に対する頭と眼の協調運動に関する考察, *信学技報*, **BME91-118**, 81/88 (1992)
- 12) C. Prablanc, JF. Echallier, E. Komilis and M. Jeannerod: Optimal Response of Eye and Hand Motor Systems in Pointing at a Visual Target, *Biol. Cybern.*, **35**, 113/124 (1979)
- 13) H. Fuller: Head Movement Propensity, *Exp. Brain Res.*, **92**, 152/164 (1992)
- 14) 鈴木, 酒田: 新生理学体系, 高次脳機能の生理学, 医学書院, 284/293 (1988)
- 15) 酒田英夫: 頭頂連合野の機能分化, *科学*, **53**, 238/247 (1983)

[著者紹介]

水戸部 一 孝

1990年、秋田大学鉱山学部電気工学科卒業。92年北海道大学大学院生体工学修士課程修了。現在、同大学博士後期課程在学中(電子科学研究所)。同時運動計測装置の開発、運動機能の解析、ヒトの空間情報に関する感覚統合の研究に従事、生体の運動機能に興味をもっている。

高 橋 誠

1972年、東北大学工学部電子工学科卒業。75年同大学大学院修士課程修了。79年北海道大学大学院単位修得退学。81年東京医科歯科大学助手。89年北海道大学応用電気研究所助教授。93年同大学電子科学研究所に改組、現在に至る。呼吸循環および運動系の分野の研究に従事(工学博士)。

加 藤 徹

1993年、北海道大学工学部電子工学科卒業。同年同大学大学院生体工学専攻修士課程入学。ヒトの空間知覚と運動に関する研究に従事。人工現実感技術における臨場感および操作性の向上に興味をもっている。

木 村 真 弘

1993年、北海道大学工学部精密工学科卒業、同大学大学院工学研究科生体工学専攻修士課程在学中。日本ロボット学会の会員、学習機械およびヒトの平衡感覚と視聴覚情報の研究に従事。次世代のヒューマンインタフェースの開発に興味をもっている。

伊福部 達 (正会員)

1969年、北海道大学工学部電子工学科卒業。71年同大学大学院修士課程修了。同年同大学応用電気研究所助手。以来、感覚代行システムに関する福祉工学の研究に従事。84年スタンフォード大学客員助教授。現在、同大学電子科学研究所教授(工学博士)。著者「音声タイプライタの設計」など。