

# ヒトの視空間定位に関するトップ・ダウン的研究

## Top-down analysis of visual localization

○水戸部一孝      小嶋幹人      寺田裕樹      吉村昇

Kazutaka MITOBE, Mikihiro KOJIMA, Yuhki TERATA and Noboru YOSHIMURA

秋田大学工学資源学部  
Faculty of Engineering and Resource Science, AKITA UNIV.,

キーワード：空間知覚，奥行き知覚，知覚運動協応，人工現実感，定位

連絡先：〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学工学資源学部電気電子工学科  
水戸部一孝，Tel: 018-889-2339, E-mail: mitobe@ipc.akita-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は当たり前のように物を見て定位することができる。日常の生活環境下では、絵画的手がかり、相対的大きさ、重なり、陰影などの視覚経験に基づく空間認識、また、運動視差との身体運動に伴う視覚的フィードバックなど様々なストラテジー (strategy) により、定位の精度を高めている[1]。そのため、視覚的手がかりが少ない環境下、例えば暗所に光点が一点しか存在しない環境では、掴もうとして手を伸ばしても掴みそこなうなど定位にズレが生じる場合がある[2]。人工現実感および3次元空間を使ったマシ・インタフェースには、物理空間とヒトが知覚する空間との対応関係の理解が重要となる。特に、手が届かない遠方にある視覚目標を(仮想的に)掴んで操作するとの仮想的作業環境を構築する場合には、物理空間と両眼視空間に基づき行われるヒトの運動との対応関係の理解が必要不可欠なものとなる。

過去に行われたヒトの視空間定位に関する

多くの研究より、両眼視空間がユークリッド空間と一致しない[3]ことは明らかである。

1950年代にはLuneburg-Blankモデルにより物理空間と両眼視空間の対応付けが試みられたが[4]、見えの視角が客観的な視角よりも過大視される[5]、心理物理実験では視空間の曲率の恒常性がたもたれないとする検証結果もあり[6]、未だ結論に至っていないのが現状である。

近年、生体内の位置感覚情報の流れおよび視誘導性指示運動を神経回路網型の数理モデルにより説明するボトム・アップ型のアプローチが進み [7~9]、ヒトの空間情報処理過程の一部が明らかになりつつある。一方、我々はトップ・ダウン型のアプローチにより、両眼視空間に基づき行われる指示運動、特に指示点と物理空間との対応関係を調べてきた[10]。その過程で、視覚目標(以後、ターゲットと呼ぶ)が手の届く範囲内(手作業空間内)に位置する場合と手の届かない距離(手作業空間外)に位置する場合とで、被験者の定位

がシフトする現象 (以後, 定位シフトと呼ぶ) が表れることを報告した[11].

本論文では, これまでに報告された手作業空間内外での定位シフトが「眼球の光学的特性」によるものなのか「視覚情報処理の過程で生じる現象」なのかを, 3種類の異なる実験タスクの結果と神経生理学上の知見を基にトップ・ダウン的に調べていく.

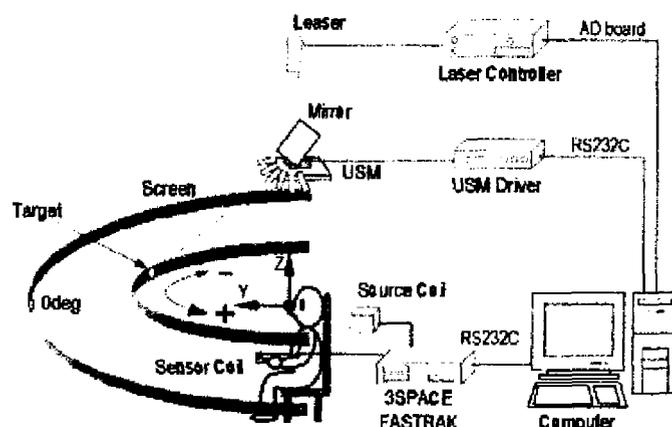
## 2. 計測装置および実験方法

本論文では, 3種類の実験タスクを設定し, ヒトの視空間定位の特性を調べている. 各計測装置の構成を図1に示す.

図1(a)は, 異なる奥行き距離に呈示されたターゲットに対して手で知覚位置を指し示す, 指示運動の精度を調べる実験系である. 以後, この実験系でのタスクを SPT(somatic pointing task)とよぶ.

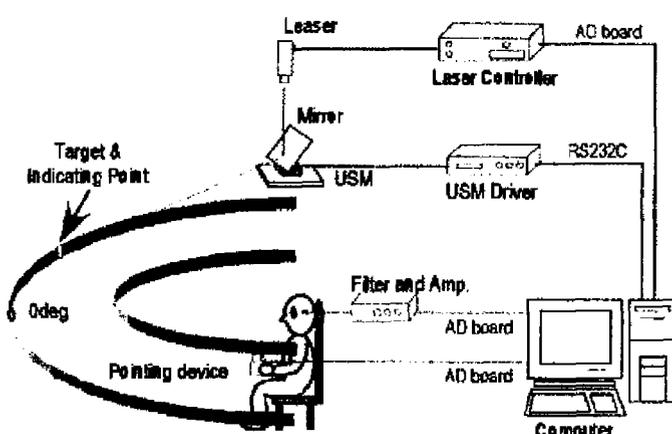
図1(b)は, 異なる奥行き距離に呈示されたターゲットの位置を, ターゲットと同じ奥行き距離に呈示された光点で指し示す実験系である. SPTと異なり, この実験系では指示運動などの身体運動は不要となる. 以後, この実験系でのタスクを VPT-S (visual pointing task in same depth: VPT-S)とよぶ.

図1(c)は, 1.5m の奥行き距離にターゲットを呈示し, 0.5m の奥行き距離にある光点を移動させて指示を行う実験系である. 以後, この実験系でのタスクを VPT-D (Visual pointing task in different depth)とよぶ.



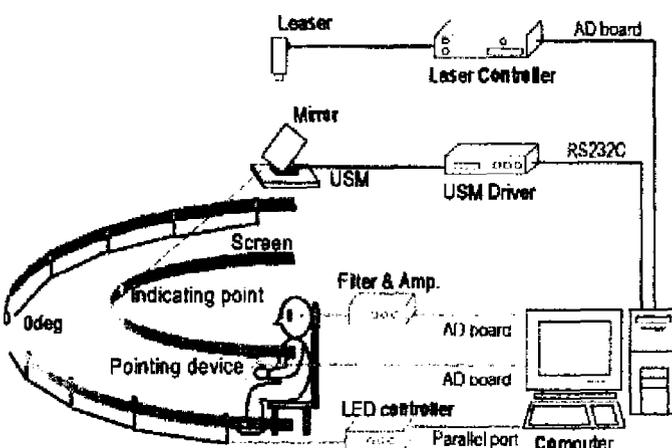
(a) 体性感覚による指示  
(a) Somatic pointing task: SPT

Targets were appeared on the screen placed on each distance from the subject.



(b) 等奥行き距離での視覚的指示  
(b) Visual pointing task in same depth: VPT-S

Targets were appeared on the screen at the distance of 1.5m or 0.5m. A visual pointer that was controlled by the subject was moved on the screen at the same distance of targets.



(c) 異なる奥行き距離での視覚的指示  
(c) Visual pointing task in different depth: VPT-D

Targets were appeared on the screen at the distance of 1.5m. A visual pointer was moved on the screen at the distance of 0.5m.

図1 計測装置  
Fig.1 Experiment systems

## 2.1 SPT

計測装置は、ターゲットを呈示する「視覚刺激システム」および指示運動を計測する「運動計測システム」から成る [12]. 視覚刺激システムは、2枚のスクリーン、レーザーポインタ、超音波モータ(Canon TR-36)およびミラーで構築した。スクリーンは短冊状であり、被験者の鼻骨位置を中心とした半径 0.5m および 1.5m の円周上に半円形で設置している。なお、手前のスクリーンで奥のターゲットが隠れることのないよう、半径 0.5m のスクリーンが半径 1.5m のスクリーンより高くなるように、高さを調整した。スクリーンに呈示されるターゲットは、被験者の耳眼平面 (auriculo-infraorbital plane) から 0.5m の位置で上下角 +2deg, 1.5m で -2deg 以内であった。レーザーポインタからは波長 650nm の赤色光を照射しており、超音波モータの回転軸に固定した金蒸着ミラーおよび超音波モータ周辺に配置したミラーで2回反射させることで、任意の奥行き距離のスクリーンにターゲットを呈示している。スクリーン上の光点 (ターゲット) の輝度は  $580 \text{ cd/m}^2$  である。なお、レーザー光の乱反射・散乱の影響を減らすため、スクリーンは黒色の厚紙とした。ターゲットは奥行き距離 0.5m または 1.5m の左右 20, 40, 60, 80 deg のいずれか一点にランダムに呈示した。

指示運動計測システムには 3SPACE FASTRCK(Polhemus)を用いており、ソースコイルに対するセンサコイルの相対的な位置を 0.8 mm の精度で計測することができる [13]. なお、センサコイルは指示棒に固定し、被験者の人差し指の指腹面 (palmar surface

of fingers) がセンサコイルに重なるように把持させた。被験者には「ターゲットが呈示された位置を人差し指の指腹面で隠すように指示する」ように教示した。なお、「右半面に呈示されたターゲットには右手で、左半面に呈示されたターゲットには左手で指示する」ように教示した。

計測は一人あたり、各ターゲットについて2試行の計 32 試行で1セッションとし、休憩を挟み計 3 セッション行った。なお、全ての試行はコンピュータにて自動的に計測される。

## 2.2 VPT-S

レーザーポインタからの赤色光は、超音波モータに固定されたミラーで1回だけ反射し、スクリーン上の任意の角度にターゲットとして呈示される。ターゲットが呈示された後は、レーザー光が常時点灯した状態になり、被験者の正面 0 deg に光点 (以後、指示光点とよぶ) が現れる。なお、指示光点を動かすための入力装置には、ポテンシオメータ (Cobalpot M2210) およびプッシュ・スイッチを内蔵した自作のポインティング・デバイスを用いた。被験者には、指示光点をターゲットが呈示された位置まで移動させ、スイッチを押すように教示した。ポテンシオメータの抵抗値およびスイッチの ON/OFF は、A/D ボード (National Instruments AT-MIO-E-16E) を介してパソコンに取り込んでおり、抵抗値に連動して超音波モータの角度を制御した。なお、実験中、「指示光点を合わせにくい」等の内観報告はなかった。

被験者には「セッションが終了するまで眼を動かさない」ように教示している。そのた

め、眼球運動を EOG (Electro- oculogram) 計測システムによりモニターし、眼球が動いた試行は再度計測を行った。EOG 計測システムは、両眼の目尻に配置した Ag/AgCl 電極 (日本光電工業 P-150)、差動アンプ (NF Electronic instruments P-61) およびフィルタ (NF Electronic instruments FV-628A) で構成し、EOG は電圧増幅、フィルタリングされた後、A/D ボードを介してコンピュータに取り込まれる。

計測は奥行き距離 0.5m にターゲットを呈示し、同じく 0.5m に呈示した指示光点で応答する実験 (VPTS 0.5m) を左右 20, 40, 60, 80 deg のターゲットについて 2 試行ずつ行い、計 16 点で 1 セッションとし、これを 3 セッション行った。休息を挟み、ターゲットおよび指示光点の奥行き距離を 1.5m に変えて同様の実験を 3 セッション行った (VPTS 1.5m)。なお、呈示位置の学習をさけるため、5 回に 1 回の確率で、左右 10°, 30°, 50°, 70° のいずれか 1 点にダミーターゲットを呈示している。

### 2.3 VPT-D

ターゲットは 1.5m の距離にあるスクリーンの左右 20, 40, 60, 80deg に呈示される。被験者には、VPTS と同様に、ポインティング・デバイスを用いて 0.5m の奥行き距離に呈示される指示光点をターゲットが見えた位置に合わせるように教示した。ターゲットとしてスクリーンに配置した LED の点灯・消灯は、自作の LED コントローラを介して、パソコンで制御している。なお、VPTS, VPT-D のいずれの実験でも時間的制約は課していない。

### 2.4 被験者

事前に予備実験を行い、注意力の低下、疲労等の原因で指示点の変動が大きい被験者を除外した。本実験は変動の小さい、1.0 以上の視力を有する 20 代の男性 7 名で行った (4 名はコンタクトレンズにより矯正)。全ての被験者は右利きであり、利き眼は 1 名を除き右眼であった。なお、被験者は全ての実験で同一であり、実験結果に関するフィードバックは一切行っていない。

### 3. 実験条件および教示条件

ヒトは様々なストラテジーにより両眼視空間のズレを無意識に補正している。多様なストラテジーは個人差の原因となり、実験の再現性の低下に直結する。そのため、実験条件および教示条件の設定はトップ・ダウン研究を進める際に最も重要な作業の一つとなる。以下に、3 種のタスクに共通する実験条件・教示条件を示す。

被験者の正面 0 deg, 1.5m の奥行き距離には注視点用の LED が配置してあり、実験では頭部を固定し、「眼球は動かさずに LED を注視し続ける」ように教示した。試行が始まると、正面 0deg の LED が消灯し、任意の角度にターゲットが呈示される。なお、エクスプレスサッケード (express saccade) に伴う注意の変動 [14] を抑えるため、LED が消灯すると同時にターゲットを呈示している。ターゲットの呈示時間は 0.2s である。この呈示時間では、仮に不随意的に眼が動いたとしても運動が終了するときには既にターゲットが消失しており、視覚的フィードバックは得られない。また、全

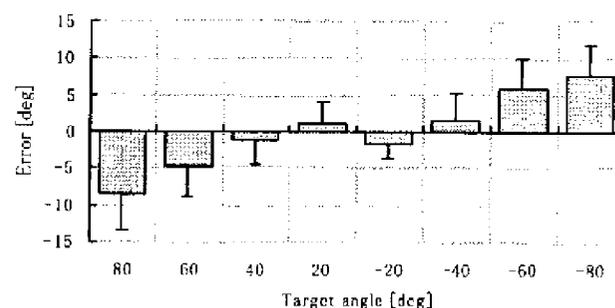
ての実験は暗室で行っており、正面の LED、ターゲットおよび指示光点以外の視覚情報は存在しない。ターゲットに対するズレに関する視覚的フィードバックが存在しないため、また、被験者に実験結果に関するフィードバックを行っていないため、本実験条件では指示精度を向上させるための学習ができないことになる。

#### 4. 実験結果

以下では、被験者の鼻骨位置を中心として正面 0 deg と指示点が成す角を指示角と定義し、被験者 7 人による「ターゲットの呈示角に対する指示角のズレ」の平均値を用いて結果を示す。

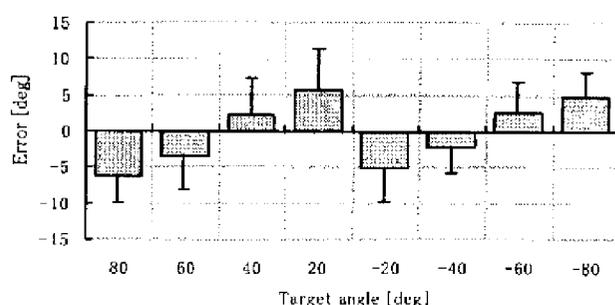
図 2 に任意の奥行き距離に呈示されたターゲットに対する指示角のズレを示す。図 2 (a) は被験者からターゲットまでの奥行き距離が 0.5m (SPT 0.5m)、同図(b)は奥行き距離が 1.5m(SPT 1.5m)での結果を示す。横軸はターゲットの呈示角、縦軸はターゲットに対する指示角のズレを表す。図 2 (a)において 60 deg のターゲットに対する指示点のズレは-5deg となっているが、これは左 60 deg のターゲットに対して指示点が左 55 deg を指し示していたことを示す。図 2 より、奥行き距離が 0.5m の条件では、正面付近でのズレは小さいが、視野周辺部では正面 (0 deg) 方向へのズレが増加することが見て取れる。また、奥行き距離が 1.5m に増加すると、指示点のズレが視野周辺部へシフトする傾向 (定位シフト) が見て取れる。以上の傾向は、過去の報告 [11]に一致した。

図 3 に、ポインティング・デバイスを用い



(a) 奥行き距離 0.5 [m]

(a) Targets were presented at the distance of 0.5 [m]



(b) 奥行き距離 1.5 [m]

(b) Targets were presented at the distance of 1.5 [m]

図 2 各奥行き距離のターゲットに対する指示点のズレ  
Fig.2 Error of pointing angle from target angle when the distance of targets were changed. (SPT)

て視覚的に指示を行う実験系 (VPT-S) でのターゲットに対する指示光点のズレを示す。図 3 (a)は奥行き距離 0.5m に位置するターゲットに対し、同奥行き距離に呈示された指示光点を用いて応答(VPT-S 0.5m)した際のズレを示す。同図(b)は奥行き距離 1.5m のターゲット(VPT-S 1.5m)に対するズレを示す。横軸はターゲットの呈示角、縦軸はターゲットからの指示光点による指示角のズレを示す。0.5m および 1.5m に共通の傾向として、正面でのズレは小さく、周辺部ほど正面 (0 deg) 方向へのズレが増加している。いずれにせよ、両結果とも図 2 (a) の SPT 0.5m の応答に類似しており、SPT 1.5m の結果と異なっている。

図4に、奥行き距離 1.5m に呈示されたターゲットに対して、0.5m に呈示された指示光点で指し示す実験 (VPT-D) の結果を示す。横軸、縦軸は図3と同様である。図3とは異なり、正面付近でのズレが大きいことがわかる。この結果は、VPT-S 1.5m と大きく異なり、SPT 1.5m と同様の傾向を示している。

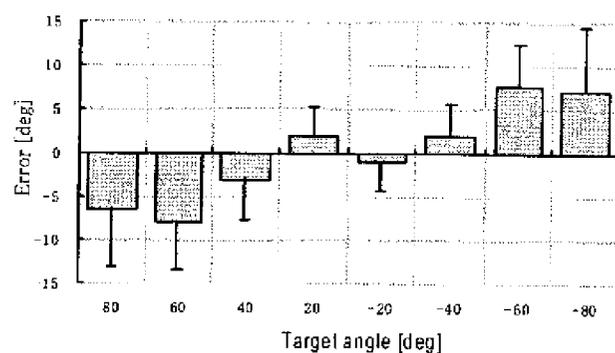
## 5. 考察

### 5.1 各実験系の有意差について

二標本 t 検定(two sample t-test) [15]を用いて、各呈示角度における各種タスクおよび奥行き距離による有意差を調べた。表1に検定結果を示す。表の第1カラムはターゲットの呈示角、第2カラム以降は第1行および第2行の実験条件でのズレの有意差を示す。なお、危険率 0.05 以下で有意差が生じたセルは網掛けして表示した。

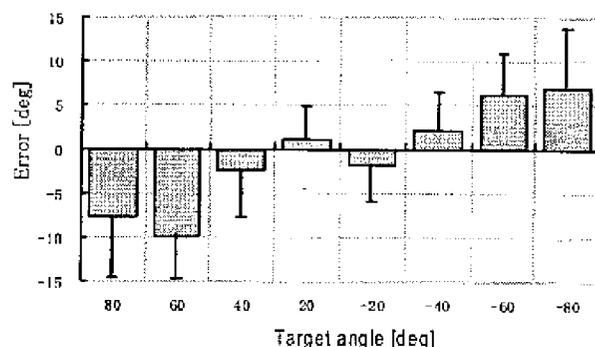
表1より、SPT 0.5m と SPT 1.5m には 60deg を除いて有意差が現れており、両眼視野内の±40deg に限ると 100%の確率で有意差が現れている。

VPT-S 0.5m と VPT-S 1.5m、VPT-S 0.5m と SPT 0.5m、VPT-S 1.5m と SPT 1.5m の有意差を表1の3から5カラムに示す。VPT-S では奥行き距離が 0.5m から 1.5m へ変わっても有意差が生じていない。また、VPT-S 0.5m と SPT 0.5m でも左 60deg を除いて有意差が生じていない。一方、VPT-S 1.5m と SPT 1.5m では左右 80deg を除いて有意差が生じていた。なお、VPTの実験系では、左右 80deg でズレが減少するとの共通した特徴があった。VPTは指示光点を用いて応



(a) 奥行き距離 0.5[m]

(a) Targets were presented at the distance of 0.5[m]



(b) 奥行き距離 1.5[m]

(b) Targets were presented at the distance of 1.5[m]

図3 VPT-S 条件での視覚的指示のズレ  
Fig.3 Error of visual pointing angle when the distance of targets were changed (VPT-S).

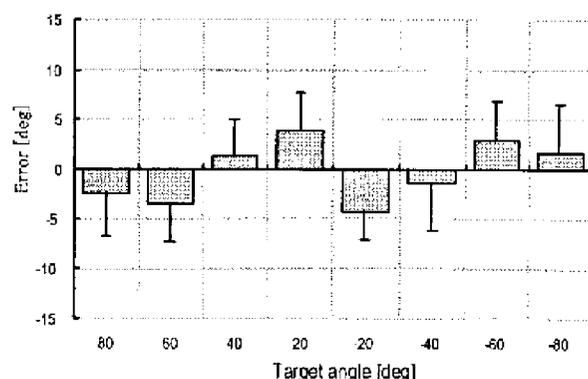


図4 VPT-D 条件での視覚性指示のズレ

Fig.4 Error of visual pointing angle when the distance of targets were changed (VPT-D).

答するため、左右 90deg 付近では視野外となり指示光点が消失する。その結果、左右 90deg の位置を被験者に認識され、視野周辺部の応答は補正されている可能性もある。そのため、VPT と SPT を比較する際には、左右 80deg の結果を除外して考察すべきかもしれない。

表1の6から9カラムに、VPT-Dに対するVPTS 0.5m, VPTS 1.5m, SPT 0.5m およびSPT 1.5mの有意差を示す。VPT-Dに対し、VPTS 0.5m, VPTS 1.5m およびSPT 0.5mでは24セル中23セルに有意差があらわれた。一方、左右 80degを除いて、VPT-DとSPT1.5mに有意差は生じなかった。

## 5.2 定位シフトについて

手作業空間内に位置するターゲットに対する指示運動(SPT 0.5m)および手作業空間内外に位置するターゲットと同じ奥行き距離に呈示された指示光点による指示(VPTS 0.5m, VPTS 1.5m)は、同じ傾向を示していた。仮に、定位シフトが眼球の光学的特性により生じているならば、VPTS 0.5mとVPTS 1.5mは異なる傾向を示すはずである。したがって、定位シフトは「視覚の光学的特性によるものではない」といえる。一方、手作業空間外に位置するターゲットに対する指示運動(SPT 1.5m)および手作業空間外に位置するターゲットに対して手作業空間内に呈示された指示光点による指示(VPT-D)は同傾向を示した。以上の結果から、ターゲットが手作業空間外に位置する条件では、定位方法の違いにより応答が異なることがわかる。

各タスクに対する検査結果を有意差で整理し、考察すると以下のことが考え得る。

- (I) 手作業空間内外に関わらず、ターゲットの奥行き距離と指示時の奥行き距離が等しい条件では、同じ応答を示す。
- (II) ターゲットの奥行き距離と指示時の奥行き距離が異なる条件では、定位シフトが生じる。
- (III) SPT0.5m および VPT-S0.5m, SPT1.5m および VPT-D がそれぞれ同傾向を示すことから、本実験で得られた傾向が指示運動に固有の現象ではない。

以上より、ターゲットの呈示距離に応じて定位シフトが生じるとの現象は、手作業空間外に位置する視覚目標に対して手作業空間内で定位する際に必要となる座標変換の過程で発生していると考えざるを得ない。

SPT 1.5m および VPT-D の条件では、ターゲットの呈示距離と指示する際の奥行き距離が異なるため、入力情報と出力の間に座標変換が必要となる。この条件に限り定位シフトが発生したことから、定位シフトは座標変換に関与する頭頂連合野にて生じていると考えるのが妥当だろう。しかし、現時点では空間の位置情報に関する座標変換がどのような

表1 各種実験系でのズレの有意差

Table 1. Significant difference of individual pointing error.

Target [deg]	SPT 0.5m	VPT-S 0.5m		VPT-S 1.5m	VPT-D			
	SPT 1.5m	VPT-S 1.5m	SPT 0.5m	SPT 1.5m	VPT-S 0.5m	VPT-S 1.5m	SPT 0.5m	SPT 1.5m
80	<0.05	>0.05	>0.05	>0.05	<0.05	<0.005	<0.001	<0.05
60	>0.05	>0.05	<0.05	<0.001	<0.001	<0.001	>0.05	>0.05
40	<0.05	>0.05	>0.05	<0.005	<0.001	<0.005	<0.05	>0.05
20	<0.001	>0.05	>0.05	<0.001	<0.05	<0.01	<0.01	>0.05
-20	<0.005	>0.05	>0.05	<0.05	<0.001	<0.01	<0.001	>0.05
-40	<0.005	>0.05	>0.05	<0.001	<0.005	<0.05	<0.005	>0.05
-60	<0.05	>0.05	>0.05	<0.05	<0.001	<0.01	<0.01	>0.05
-80	<0.005	>0.05	>0.05	>0.05	<0.005	<0.005	<0.001	<0.05

神経回路で実現されているかは不明であり、今後の神経生理学上の研究が待たれる。今後、ボトム・アップ的アプローチである神経生理学上の知見に基づく処理モデルの解明が進むと、トップ・ダウン的アプローチによる実験タスクを容易に最適化することができ、脳機能のパフォーマンスを安価に検査できるかもしれない。一方、手作業空間外に位置する視覚目標を手作業空間内で定位する場合に指示点がシフトしてしまうとの知見は、工学においても、特に人工現実感技術による仮想環境の設計や HMD (Head Mounted Display) を使った三次元的なコンピュータ・インタフェースを設計する上で有用な知見となる。

## 6. おわりに

手作業空間内外に呈示されたターゲットに対する定位を3種の異なるタスクで行い、ヒトの手作業空間内外における定位シフトについてトップ・ダウン的に検討した。その結果、手作業空間外に位置するターゲットに対して手作業空間内で応答するよう教示した実験タスクでのみ定位シフトが発生したことから、定位シフトは座標変換の過程で発生するエラーであると結論した。なお、神経生理学上の知見から、座標変換のエラーは頭頂連合野において生じていると考えた。

現在、定位シフトが発生する奥行き距離を明らかにすると共に、視空間定位におよぼす加齢の影響に関する研究を進めている。

## 文献

- [1] 大山正, 今井省吾, 和気典二 "感覚知覚心理ハンドブック", 誠心書房, 1994.
- [2] 加藤徹, 高橋誠, 水戸部一孝, 木村真弘, 石田雄一, 奈良博之, 伊福部達 "付加的視覚刺激が視覚と上肢の協調運動に与える影響", 計測自動制御学会論文誌, Vol.32, No.6, pp.795-801, 1996.
- [3] Luneburg, R.K., "The metric of binocular visual space", J. Opt. Soc. Am., Vol.40, pp.627-642, 1950.
- [4] Blank, A.A., "The Luneburg theory of binocular visual space", J. Opt. Soc. Am., Vol.43, pp.717-727, 1953.
- [5] Higashiyama, A., "Variation of curvature in binocular visual space estimated by the triangle method", Vision Res., Vol.21, pp.925-933, 1981.
- [6] Higashiyama, A., "Curvature of binocular visual space: A modified method of right triangle", Vision Res., Vol.24, pp.1713-1718, 1984.
- [7] 前田太郎, 館すすむ, "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, Vol.25, No.10, pp.1111-1118, 1989.
- [8] 前田太郎, 館すすむ, "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, Vol.32, No.2, pp.201-210, 1993.
- [9] 前田太郎, 館すすむ, "ホロプタ現象における視空間幾何学の機序に関する一考察", 信学論D-II, Vol.J81-D-II, No.1, pp.162-173, 1998.
- [10] K., MITOBE, T., AKIYAMA, N., YOSHIMURA and M., TAKAHASHI "Improvement in optic target detection and reaction time by acoustic stimulation", 20th Proc. IEEE EMB, pp.1970-1972, 1998.
- [11] 水戸部一孝, 高橋誠, 加藤徹, 木村真弘, 伊福部達 "手作業空間内外における方向知覚運動協応", 電学論, Vol.115-C, pp.296-301, 1995.
- [12] 水戸部一孝, 秋山勉, 吉村昇, 高橋誠 "聴覚刺激が視覚目標の検出と反応時間におよぼす改善効果", 電学論, Vol.118-A, No.3, pp.245-250, 1998.
- [13] 水戸部一孝, 秋山勉, 吉村昇, 高橋誠, 伊福部達 "聴覚刺激による空間的注意の誘導効果", 映情学会誌, Vol.51, No.6, pp.850-856, 1997.
- [14] 安西祐一郎, 荻阪直行, 前田敏博, 彦坂興秀, "認知科学9: 注意と意識", 岩波書店, 1996.
- [15] 市原清志 "バイオサイエンスの統計学", 南江堂, 1994.