

空間知覚における視覚と体性感覚の認識誤差特性

安田星季、井野秀一、和田親宗、奈良博之、伊福部達

北海道大学 電子科学研究所 感覚情報研究室
(〒060 札幌市北区北12条西6丁目, yasuda@sense.hokudai.ac.jp)

あらまし： 近年、ヒューマンインタフェースのマルチモーダル化を目的として、様々な研究が盛んに行われている。我々は、そのマルチモーダル化の一例として大きな可能性が期待される力触覚ディスプレイ技術に着目している。力触覚ディスプレイにより仮想的に構築された三次元空間での作業では、従来の二次元空間を中心としたインタフェースよりもさらに多くの情報のやりとりが可能となる。しかし、このような仮想的空間においてヒトがストレスなく接触作業を行うためには、ヒトの持つ感覚特性を十分考慮した上で、力触覚呈示システムを構築する必要がある。そこで本研究では、ヒトに違和感なく力触覚を呈示するシステムに必要な一設計指標を与えるべく、実空間での接触動作の解析を行い、ヒトが弁別可能な接触位置誤差量および認識誤差特性を心理物理実験により求めた。

The characteristics of disparity between visual and haptic sense on spatial perception.

Seiki YASUDA, Shuichi INO, Chikamune WADA, Hiroyuki NARA and Tohru IFUKUBE

Sensory Information Lab, Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University
(Kitaku kita12jyo nishi6chome, Sapporo, Japan, 060; yasuda@sense.hokudai.ac.jp)

Abstract: Recently, there are increasing some expectations that the haptic display technology will be the new technology for human interface. The haptic display technology extracts the workspace of operation from 2 to 3-dimension, and operates more information than 2-dimension workspace at the same time. Some haptic display systems have already existed, but these systems have not designed based upon the characteristics of human sensory information processing. In this study we quantified an allowable error of human spatial perception attended with touch sense and gave the necessary and sufficient accuracy for designing haptic display systems. Consequently, we focused on simple haptic task and carried out psychophysical experiments to quantify the allowable error on human spatial perception.

1. はじめに

近年、ヒューマンインタフェースの研究分野において、複数の入出力手段で同時に情報をやりとりすることが可能なマルチモーダルインタフェースの研究が盛んになっている。そのような研究の一つとして力触覚ディスプレイに関する研究がある。力触覚ディスプレイは仮想的に三次元の作業空間を構築することにより、従来の二次元空間を中心としたインタフェースよりもさらに多くの情報を同時にやりとりすることを可能にする。そして現在、人工現実感技術の発達と共に、いくつかの力触覚呈示システムが実際に提案されている。[1][2]

しかし、このような現在ある力触覚呈示システムはヒトが使用するものであるにもかかわらず、ヒトが認識する感覚特性を十分に考慮して製作されていないために、ヒトが認識不可能なオーダーでの位置決め精度を実現し、その結果、システムを制御しているコンピューターに必要な以上の演算を負担させている可能性がある。また今後、力触覚と同時に呈示される画像などの視覚情報を含めて、より違和感のない情報を呈示するためには、これらの制御に必要な演算量がさらに肥大化することが予想される。

そこで本研究では、ヒトが接触作業を行う際に弁別しうる接触位置の誤差を定量化すると共に、その誤差認識の特性を調べ、前述の力触覚呈示システムに必要かつ十分な位置決め精度を求めることを目的とした。[3]

つまりここで得られた結果は、ヒトが違和感を感じない力触覚を呈示できるシステムの一設計指標であると同時に、システムに必要な以上の精度を求めないことで制御に必要な演算量を抑えた、効率的なシステム構築のための一設計指標ともなるのである。

今回は、ヒトが作業空間に対して能動的に作用を行う最も単純な動作の一つとして「ボタン押し」のような指先を効果器とした課題を行った。ここでは特に、奥行き方向への接触動作に着目した。また、接触位置の判断に大きく寄与していると考えられる視覚情報を単純化することにより、体性感覚の特性を対象として、その弁別閾値および誤差認識の特性を調べた。

2. 接触位置誤差に関する実験 (1)

実験システムの模式図をFig.1に、システムの外観をFig.2に示す。前方に配置されている平面を指先で押す動作を想定し、ヒトは接触動作時にどの程度の接触位置誤差を弁別することが可能か求める実験を行った。接触位置誤差は接触対象に向かう奥行き方向に沿って基準面の手前及び奥に生じさせ、弁別閾は恒常法による心理物理実験により求めた。

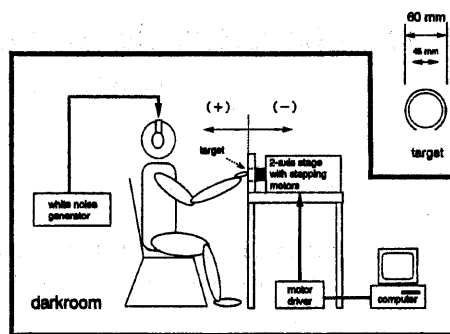


Fig.1 実験システムとターゲット

実験は、次の2条件で行った。

①体性感覚のみで弁別可能な誤差を求めるために、被験者自身の指先の位置情報が視覚フィードバックされない条件 (without visual

feedback)。

②視覚に対して接触対象面と指先の位置が与えられた場合での弁別可能な誤差を求めるために、被験者自身の指先の位置情報が視覚フィードバックされる条件 (with visual feedback) である。



Fig.2 実験システム外観

2.1 実験方法

被験者には暗室内において椅子に着座し、右手を大腿部にのせた姿勢から前方のターゲットを指先で押す事を要求した。ターゲットは直径60mmの円盤であるが、被験者に与えられる視覚情報はターゲットの縁 (円環の一部の欠けたもの) のみである (Fig.1, 2)。これにより接触動作中全般にわたって被験者自身の指先の位置に

関する視覚情報はなくなる。一方、視覚フィードバックを与えない条件では指先に光るマークを付けた。

ターゲットの中心部分 (直径45mm) の接触面はステッピングモーター制御により手前及び奥に精度 $1\mu\text{m}$ で動かすことができる。これにより視覚情報のターゲット位置は変化させずに、指先の接触位置のみを変化させることができる。この中心部分の大きさ (直径45mm) は視覚フィードバックがない条件で予備実験を行い、円盤に対するヒット率が95%以上になるような大きさとして決定した。またターゲットの直径60mmは、中心部分が手前へ最大変位した際に、被験者から見て遮蔽されない大きさとして決定した。

ターゲットの位置は、初期姿勢から利き手で接触動作を無理なく行える上肢作業域内の各点に設定した。なお、その際、被験者毎の上肢の寸法差を考慮し、各被験者毎に全腕長で規格化した空間座標でターゲット位置を指定した。(Fig.3)

弁別閾を求める心理物理実験は以下の手順で行った。被験者に標準刺激を呈示後、比較刺激を呈示し、標準刺激と比較して“奥”、“手前”のいずれと感じたかを回答させた。標準刺

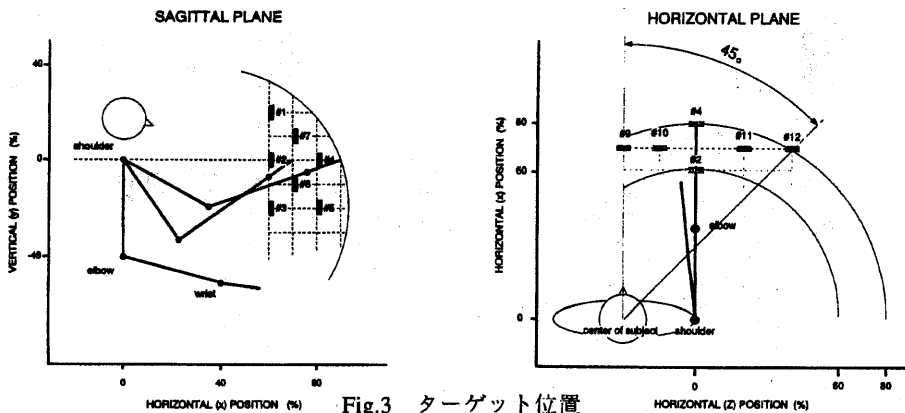


Fig.3 ターゲット位置

激は常にターゲットと同一平面上にある面とし、比較刺激は「手前」と「奥」にずれた場合を含めて8種類の面の位置を用意した。

一回の試行では標準刺激とダミーを加えた9種類の比較刺激をランダムに一対ずつ呈示し、45試行を1セットとして、十分な休憩をはさんで、4セット、計180試行を行った。被験者は22才～31才の右利き男性4名、女性1名である。

2.2 弁別閾の推定方法

弁別閾の推定に、最小二乗法を利用した。判断の正答率が近似的に累積正規密度分布曲線に当てはまると仮定し、その誤差量（標準刺激と比較刺激の差）を横軸にして、正答率を縦軸の累積正規確率分布軸にプロットし、回帰直線を求めた。（Fig.4）

求めた回帰直線から、正答率0.75に対応した上弁別閾（ Δu ）、正答率0.25に対応した下弁別閾（ Δl ）を求めることができる。この平均値（ $(\Delta u + \Delta l)/2$ ）を弁別閾とした。[4]

なお、回帰直線の傾きは判断の困難さを示している。

2.3 実験結果

結果の一例としてFig.5に全被験者の弁別閾の平均及び標準偏差を示す。ターゲット位置は#4である。視覚フィードバックがない場合、弁別

閾値は平均約4mmであった。一方、視覚フィードバックがある場合、弁別閾値は平均約2mmであった。また、作業域内の各点においても同様の結果が得られたが、特にターゲット位置による有意差は見られなかった（ $p>0.1$ ）。（Fig.6）しかし、ここで全被験者から”奥の誤差よりも、手前の誤差の方が認識しにくいと感じた”という内観報告が得られた。そこで、次に弁別閾値を手前と奥とで分離して求める実験を、同

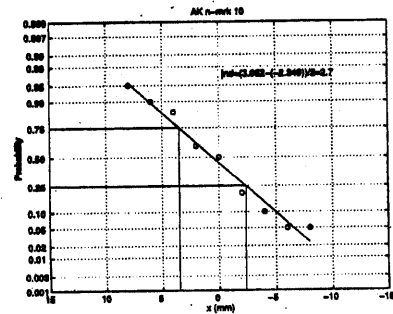


Fig.4 弁別閾の推定方法

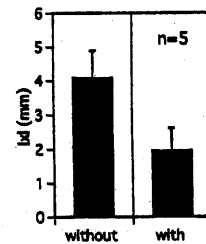


Fig.5 実験結果 (#4)

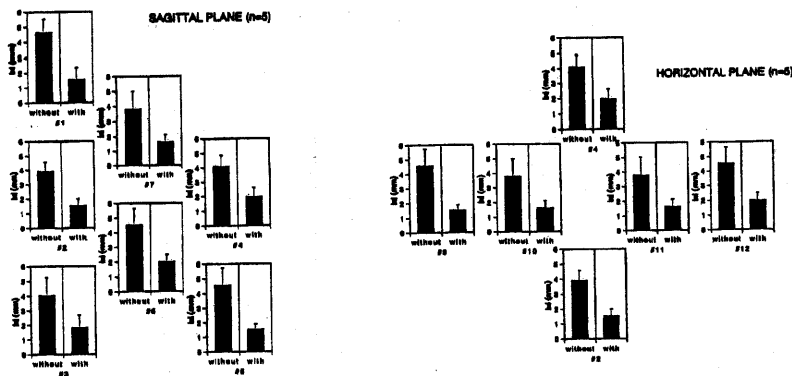


Fig.6 作業域各点における実験結果

じ実験システムを用い、心理物理実験の条件を変えて行った。

3. 接触位置誤差に関する実験 (2)

3.1 実験方法

弁別閾を求める心理物理実験を以下の手順で行った。被験者に標準刺激を呈示後、比較刺激を呈示し、標準刺激と比較して“奥”、“同じ”、“手前”のいずれと感じたかを回答させた。標準刺激は常にターゲットと同一平面上にある面とし、比較刺激は「手前」、「奥」にずれた9種類の面を用意した。

一回の試行では標準刺激とダミーを加えた9種類の比較刺激をランダムに一つずつ呈示し、50試行を1セットとして十分な休憩をはさんで4セット、計200試行を行った。被験者は22才~31才の右利き男性4名、女性1名である。

なお、実験システムは前述のシステムと同様である。

3.2 弁別閾の推定方法

弁別閾の推定は、前述の実験と同じ方法で行った。しかし、本実験では、手前と奥で別々に弁別閾を求めるため、正答率が0.5に対応した誤差量から弁別閾を求めた。(Fig.7)

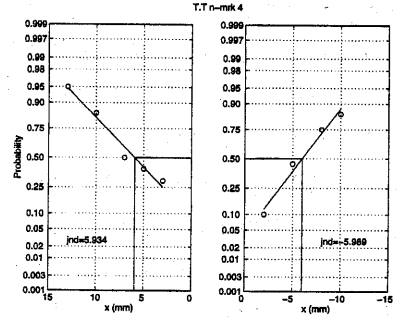


Fig.7 弁別閾の推定方法

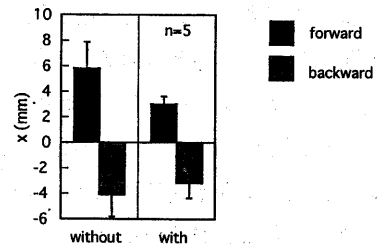


Fig.8 実験結果 (#4)

3.3 実験結果

結果の一例としてFig.8に全被験者の弁別閾の平均及び標準偏差を示す。ターゲットの位置は#4である。視覚フィードバックがない場合、被験者の手前方向の弁別閾値は、奥方向の値の1.5倍程度であった。このことから手前方向の接触位置誤差は認識しにくいという体性感覚の誤差

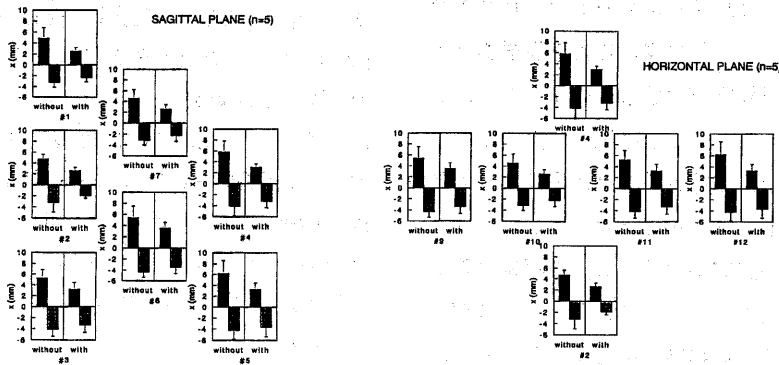


Fig.9 作業域各点における実験結果

認識特性が求められた。一方、視覚フィードバックがある場合、手前と奥に弁別閾値の有意差はなく ($p>0.1$) 弁別閾値は前後共に約3mmであった。しかし、この場合も視覚フィードバックがない場合で認められた誤差認識の特性は、被験者の応答に対する正規確率密度曲線の特徴、つまり回帰直線の傾きが奥よりも手前の方が緩やかであったという特徴から認められた。

作業域の各点において得られた結果をFig.9にまとめて示す。

以上の実験結果から、力触覚呈示システムに必要な位置決め精度は力触覚の呈示位置に依存し、少なくとも2mm以下の精度が必要であることが分かった。また、ヒトの接触位置誤差認識特性には、視覚や誤差の生じる方向に対する依存性のあることが分かった。

4. 考察

実験(1)、(2)を通じて、視覚フィードバックがある場合とない場合とでは、ある場合の方が弁別閾は小さくなる結果が得られた。これは、視覚情報と体性感覚情報が中枢神経系において感覚統合[5]されたことにより、誤差認識の精度が上がったからであると考えられる。

また実験(2)において、ヒトは奥よりも手前の接触位置誤差を認識しにくいという特性がわかった。これは、ヒトの視覚による距離感と体性感覚による距離感が一致していないことによるものと考えられる。ヒトは視覚で捉えた対象物までの距離を、体性感覚では過小評価してしまう傾向がある。[6]このことにより、ターゲットの手前で接触感覚が生じて、中枢神経系では視覚で捉えたターゲットの位置と整合性がとれているために、違和感が生じず、その結果、手前の誤差を認識しにくくなると考えられる。

5. まとめと課題

今回は、ヒトに違和感なく力触覚を呈示するシステムに必要な一設計指針を与えるべく、実空間での接触動作の解析を行い、ヒトが弁別可能な接触位置誤差量及び、認識誤差特性を心理物理実験により求めた。そして、視覚情報を単純化した実験条件下で力触覚呈示システムに必要な十分な位置決め精度を、定量化することができた。また、ヒトは手前よりも奥の接触位置誤差を認識しやすいという特性がわかった。

今後は、接触対象の特性が異なる場合、例えば接触対象が弾性をもつような場合に、ヒトの弁別可能な接触位置誤差量及び、認識誤差特性がどのように変化するかをMIT AI Lab. で開発された力触覚ディスプレイPHANToM[3]を利用して探って行きたいと考えている。

参考文献

- [1]平田、星野、前田、館：人工現実感システムにおける物体形状を提示する力触覚ディスプレイ、日本バーチャルリアリティー学会論文集 Vol.1, No.1, pp23-32, 1996
- [2]"PHANToM Haptic Interface Installation & Technical Manual", SensAble Devices Inc., 1994
- [3]安田、井野、伊福部：仮想空間における接触覚呈示のための生体工学的研究、日本バーチャルリアリティー学会第2回大会論文集、pp33-34, 1997
- [4]大山、今井、和氣：感覚・知覚 心理学ハンドブック、誠心書房、pp19-80, 1994
- [5]赤松、笠井：生体における感覚情報の統合、日本ロボット学会誌、Vol12, No5, pp12-19, 1994
- [6]Prablanc, C. Echallier, J.F, Kamilis, E, Jeannerad, M: Opticmal Response of Eye and Hand Motor System in Pointing at a Visual Target, Bio. Cybern., 35, pp113-124, 1979