

自然な遠隔操作の実現に向けた3次元表示対象の視覚的知覚位置の推定に関する研究

Prediction of Visually Perceived Depth of Virtual Objects from Observer's Actions



上平 員丈 (Kazutake UEHIRA Dr. Eng.)
神奈川工科大学 情報学部 教授
(Professor, Faculty of Information Technology, Kanagawa
Institute of Technology)

IEEE 電子情報通信学会 映像情報メディア学会 画像電子学会
電気学会

受賞：画像電子学会技術賞, 2010 IEEE Industry Applications Society
Committee Prize Paper Award, 2011 IEEE Industry Applications
Society Committee Prize Paper Award, 2012

著書：「デジタル画像入力的基础」(共著) コロナ社, 1998 「情報メディア
へのディスプレイの応用」(共著) 共立出版, 2001

研究専門分野：画像工学 3次元画像 ヒューマンインタフェース

あらまし 本研究は、3次元表示された対象に、ユーザが直接自らの手などの身体を使って操作を加えるインタラクティブなシステムにおいて、対象との自然なインタラクションを実現することを目的とする。自然なインタラクションのためには、ユーザの手が対象に触れると同時に対象が反応することが必要であるが、従来はシステムが取得する対象の3次元位置と、ユーザが自身の視覚で知覚する3次元位置とが一致しないことが原因となり、自然なインタラクションが困難であった。本研究では、ユーザが対象に触れようとして手を伸ばすときの手の運動特性からユーザが知覚する対象の3次元位置を推定し、この推定値に基づいて対象を反応させるタイミングを決定することにより上記問題を解決する方法を研究した。実験により本方法の推定精度を評価し、視覚で知覚される位置に近い位置を推定できることを示した。さらに、本方法により自然なインタラクションが可能となって3次元表示された対象への操作が容易になることを示した。

1. はじめに

最近、3次元ディスプレイの研究開発が盛んであり、多方面から高い関心が寄せられている。3次元ディスプレイは、単に3次元映像の鑑賞に用いられるだけでなく、ユーザが3次元映像中の仮想対象とインタラクションが可能なシステムなどにも使用され、その用途は多方面にわたっている。特に、ユーザが自らの手など身体の一部を使って直接仮想対象に操作を加えることができるインタラクティブなシステムは、3次元ディスプレイならではの特徴を生かすことができるため、今後、様々な分野での応用が期待される。例えば、ネットワークを用いた遠隔操作システムでは、遠隔地に存在する実際の対象を3次元カメラで撮像し、ユーザ側にリアルタイム伝送して3次元表示し、ユーザが自分の手によって3次元表示された仮想対象に操作を加えると、遠隔地のロボットのハンドがユーザの手と同じ動作をして実際の対象に操作を加えるようなシステムが可能となる。このようなシステムは、遠隔医療や、危険な環境での極限作業を遠隔操作で行う技術分野などで応用が期待される。

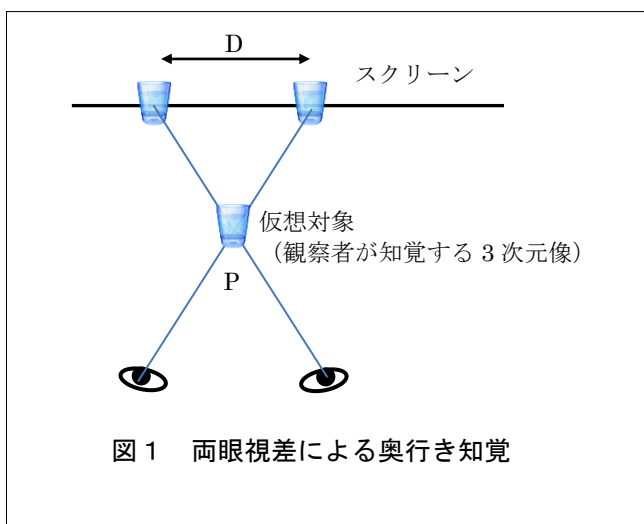
このようなユーザが自分の身体を使って仮想対象に操作を加えるシステムにおいては、実空間において実際の対象を操作する場合と同様に自然な操作ができることが大切である。3次元表示された仮想対象に対して、この「自然な操作」を実現するためにはいくつかの技術課題がある。例えば、仮想対象に手が触れたときは、実際の対象に触れた場合と同様に手に適切な触角や力覚が提示されなければならない。このような「自然さ」を実現するには視覚以外の感覚提示も必要であるが、本研究では特に視覚に限定し、そのなかでも特に重要課題と考えられる仮想対象の視覚的な知覚位置の取得を可能にする技術の実現に取り組んだ。

人間の視覚系が空間や空間中の対象の3次元位置、特に奥行き方向の位置を知覚する要因として、両眼視差^{*1)}、輻輳、ピント調節、運動視差などの生理的要因がある。これまで広く実用に供されている3次元ディスプレイでは両眼視差方式^{*2)}とよばれる方式が用いられており、上記要因のうち主に両眼視差を利用して観察者に表示対象の奥行きを知覚させている。図1に両眼視差方式の基本原則を示す。同じ対象をスクリーン

自然な遠隔操作の実現に向けた3次元表示対象の視覚的知覚位置の推定に関する研究

Prediction of Visually Perceived Depth of Virtual Objects from Observer's Actions

上で水平方向に距離 D だけ離れた二つの位置に表示し、特殊なメガネなどを用いて、この二つの対象を左右の眼に別々に提示する。すると、スクリーン上の 2 つの対象は、対応する各々の眼を結ぶ直線の交点 P において、1 つの像に融合して知覚される。この位置は、スクリーン上での 2 つの対象の間隔 D に依存し、簡単な幾何学的計算から求めることができる。従来、3 次元ディスプレイの応用において、表示された仮想対象の奥行きデータを必要とする場合は、この両眼視差に基づいて計算される上記交点 P の座標値が用いられてきた。

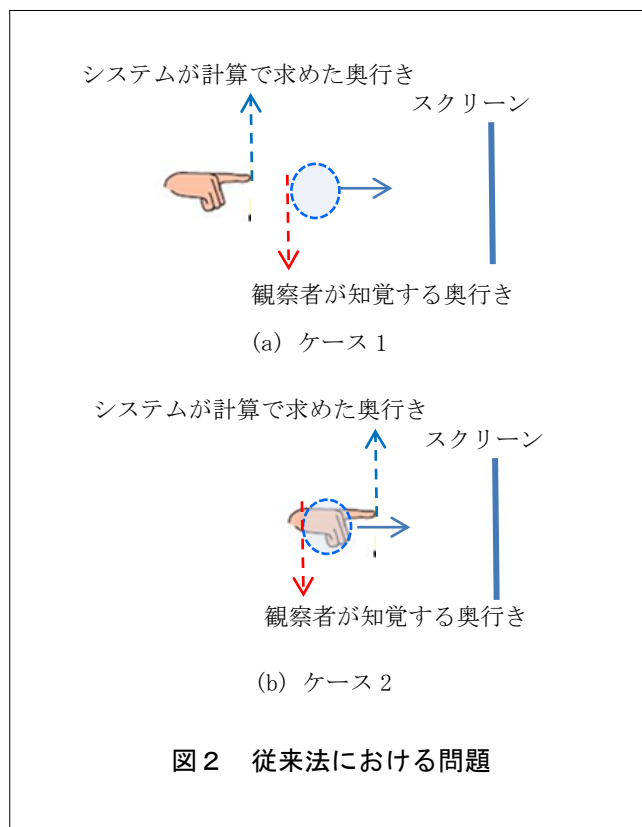


しかし、両眼視差方式といえども 3 次元表示された仮想対象の奥行き知覚にはピント調節など両眼視差以外の要因も影響を及ぼす。このため、実際の奥行き知覚は両眼視差から求まる奥行きとは必ずしも一致しない[1]-[4]。また、同一人物でも状況によって異なるとされている[2]。このため、これまで 3 次元表示された仮想対象の視覚的に知覚される奥行き（以下、単に「視知覚奥行き」とよぶ）を取得することは困難であった。

観察者の仮想対象に対する視知覚奥行きをシステムが正しく把握できないと以下の問題が生じる。まず、図 2 に示すケース 1 のように、システムが両眼視差に基づいた計算から求めた奥行きが、観察者の視知覚奥行きよりも手前にある場合、観察者にとっては、自分の手がまだ仮想対象に届いていないのに仮想対象が反

応して動き始めることになる。また、これとは逆のケース 2 では、観察者が仮想対象に手が触れたと思っても、仮想対象は反応を示さず、手が仮想対象を貫いたのちに反応を示す。また、視覚と同時に触覚や力覚を提示するシステムでは、ユーザが仮想対象に触れたと知覚する位置で触覚や力覚を同時に提示することができない。このような状況においては、仮想対象に対して自然な操作を行うことが困難となる。特に、精密作業が要求される応用ではこの問題は深刻となる。

本研究は、上記問題を解決して 3 次元表示された仮想対象と自然なインタラクションを可能にする技術の実現を目的とし、3 次元表示された仮想対象の視知覚奥行きを正しく推定する方法を研究した。この推定方法として、人間の手が対象に触れようとして、対象に向けて手を伸ばすときの手の運動特性に着目し、この運動特性から仮想対象の視知覚奥行きを推定を試みた。さらに、この方法で取得した仮想対象の視知覚奥行きを用いることにより、仮想対象とのインタラクションが円滑に実行できるかを簡単なタスクを用いて検証した。



2. 研究の方法と結果

2. 1 手の運動特性に基づく視知覚奥行き推定の推定

人間が仮想対象とインタラクションをしようとして、仮想対象に向けて手を伸ばすときの手の運動は、仮想対象の視知覚奥行きに依存すると考えられる。そこで、我々は逆に手の運動を解析することにより、仮想対象の視知覚奥行きを推定できると考えた。

先行研究によれば、人間の腕の運動軌道には普遍的な特徴があることがわかっており、水平面内で対象に向けて手を伸ばすときの手の軌道は、ほぼ直線であり、速度の時間推移の形状はベル型になることが知られている[5],[6]。本研究では、この手の速度特性は3次元表示された仮想対象に対して手を伸ばす場合も同様の特性を示すと仮定した。そして、ベル型の関数として(1)式に示すガウス関数を選んだ。

$$v(t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_E}{P_2} e^{-\frac{(t-P_1)^2}{P_2^2}} \quad (1)$$

ここで、 P_1 、 P_2 、 P_E は定数であり、手の速度データを用いて最小二乗法によりこれらの定数を求めればガウス関数を決定できる。ここで、 P_E は図3に示すように手の運動開始時刻($t=0$)から再び速度が0になる時刻($T=T_E$)までの積分値であり、したがってこの値 P_E が運動終了時の手の位置、すなわち手を伸ばす人にとっての仮想対象の視知覚奥行きである。

ここで、手が運動を開始してから、 P_E に達する十分前までの時刻 t_m までの速度データから関数を決定できれば、手が仮想対象に達する前に仮想対象の視知覚奥行きを求めることができるので、手が仮想対象に触れると同時に仮想対象を反応させることができる。この結果、仮想対象への自然な操作が可能となる。

本方法では、以上のように仮想対象との自然な操作を可能にするという特徴のほかにも、操作前のキャリブレーションが不要になるというシステム運用上の特徴もある。すなわち、図1からわかるように、両眼視差から計算される仮想対象の奥行きは、観察者の両眼の間隔および観察者とスクリーン間の距離にも依存するので、観察者ごと、操作ごとにこれらの値を用いた

キャリブレーションが必要となる。これに対し、本方法では操作時の手の運動特性によって、仮想対象の奥行きを求めるので、これらのキャリブレーションが不要となる。

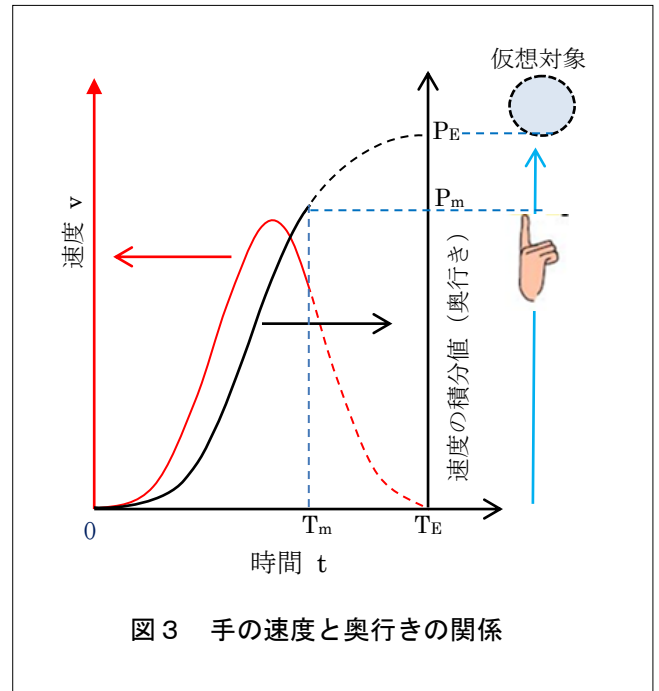


図3 手の速度と奥行きの関係

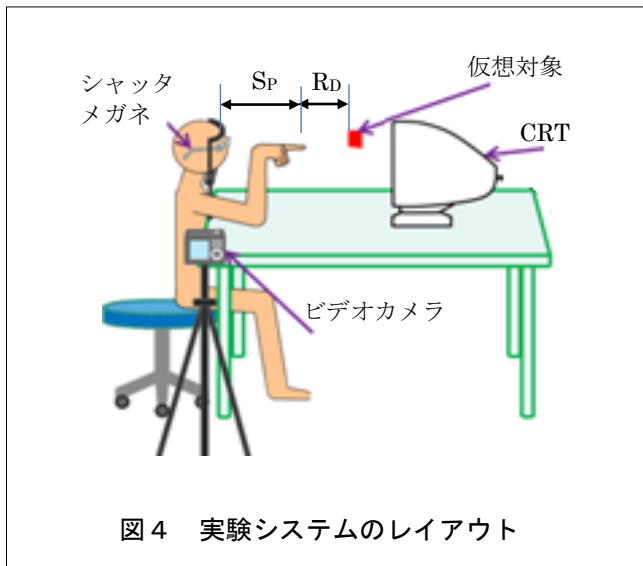
2. 2 手の速度プロファイルの評価

本研究では、まず人間が3次元表示された仮想対象に触れようとして手を伸ばす際の手の速度プロファイルが、実際の対象の場合と同様にベル型を示すか確認した。

(1) 方法

図4に評価に使用した実験システムのレイアウトを示す。仮想対象を3次元表示するためCRTモニタと液晶シャッターメガネを用いた。仮想対象の表示位置は両眼視差から計算される値で、被験者から40cmの奥行きに設定した。被験者は、手を伸ばして仮想対象に手を触れるように指示されるとともに、手が触れた位置で手を2,3秒間静止させるように指示された。ここで、被験者には視覚情報しか与えられないので、手が触れた位置とは正確には「手が触れたと見える位置」のことである。

自然な遠隔操作の実現に向けた3次元表示対象の視覚的知覚位置の推定に関する研究 Prediction of Visually Perceived Depth of Virtual Objects from Observer's Actions



手の動きをフレームレート 30 枚/秒のデジタルカメラで撮影し、連続する 2 枚のフレーム画像間での手の移動距離を求めることにより手の速度データを取得した。図 4 に S_P で示す手のスタート位置を変えることにより、仮想対象までの手の移動距離 R_D を実験パラメータとして速度プロファイルを測定した。

(2) 結果

手の速度プロファイルの測定結果の一例を図 5 に示す。図 5 に示すように、速度プロファイルは概ねベル型を示す。また、図 5 からわかるように手のスタート地点、すなわち手の移動距離には関係なく同様なベル型を示すこともわかる。本実験の条件では手が運動を開始してから、仮想対象に達するまでの時間は、概ね 1 秒程度であった。

図 5 に示す例はいずれもピーク速度を中心とした対称性が良い例である。しかし、図 6 に青い点線で囲まれたデータが示すように、後半側のすそ野が広がって対称とならない速度プロファイルも一部の例で見られた。このような運動終了付近で見られる対称性からのずれは以下の理由によると考えられる。

人が目標に向かって手を伸ばすときの運動は、脳内で運動前に計画された弾道運動と、計画と実際との誤差を修正する修正運動からなるとされている[7]。修正運動は対象に近づくにしたがって生じ、修正運動が大きくなると図 6 のように後半部のすそ野が広がる特性

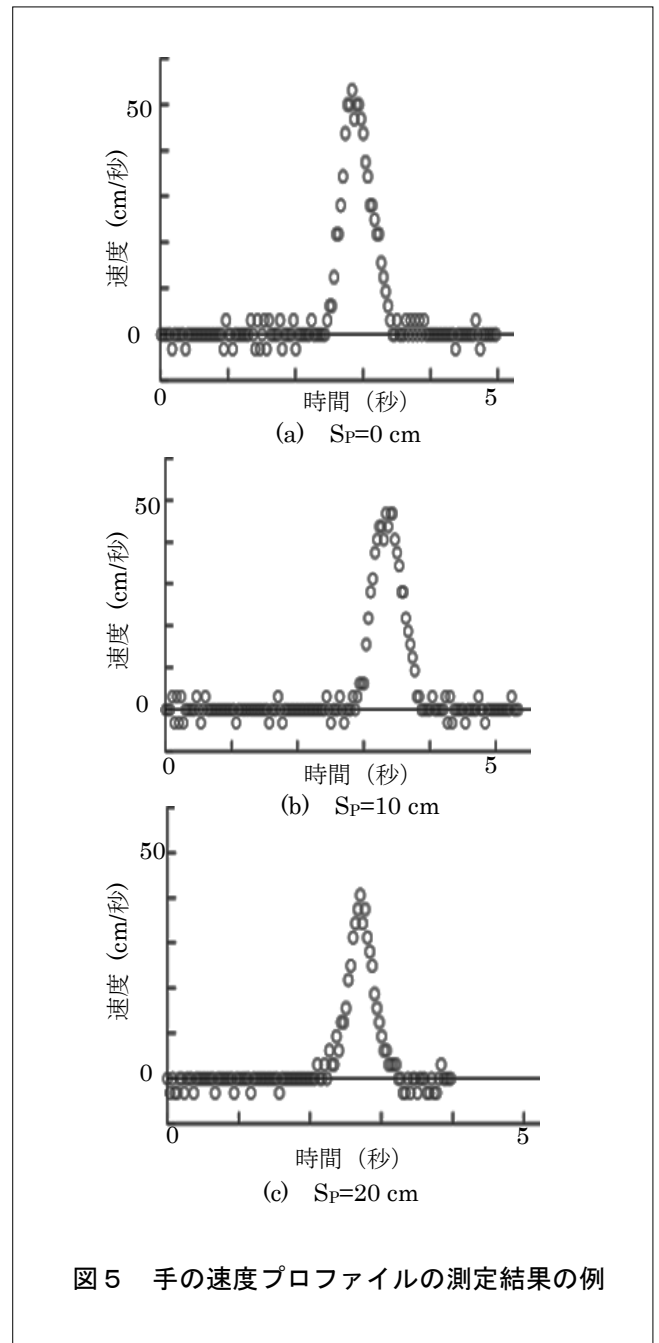
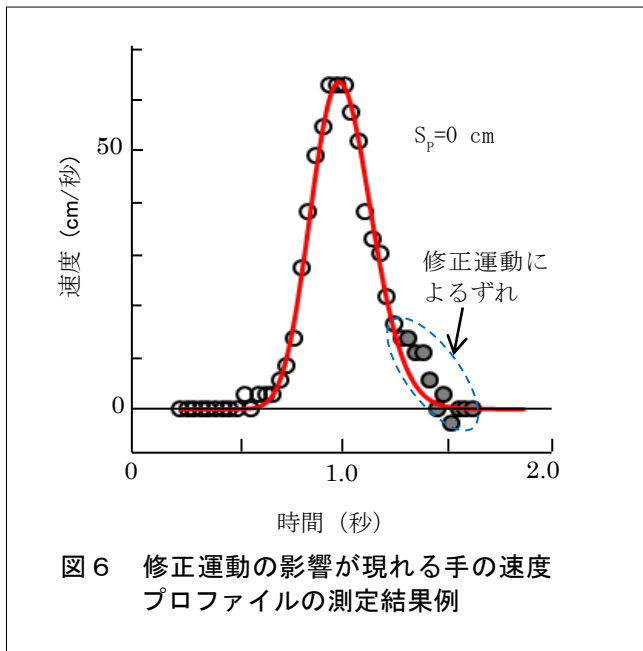


図5 手の速度プロファイルの測定結果の例

を示すといわれている。この修正運動の影響が現れると上述のガウス関数で正確な近似が行えなくなる。しかし、修正運動は手が仮想対象に近づいてから顕著に現れること、また、弾道運動が仮想対象の視知覚奥行きに基づいて設計されていることを考えれば、修正運動が現れる前の弾道運動の部分のデータからガウス関数を決定すれば仮想対象の視知覚奥行きを修正運動の影響を受けることなく推定できると考えられる。

自然な遠隔操作の実現に向けた3次元表示対象の視覚的知覚位置の推定に関する研究

Prediction of Visually Perceived Depth of Virtual Objects from Observer's Actions



2.3 視覚的知覚位置推定精度の評価

(1) 方法

本研究で提案した仮想対象の視知覚奥行き推定法(以下、本方法とよぶ)について、推定精度を主観評価実験により評価した。

本評価でも図4に示す実験システムを使用し、被験者には、右手を伸ばして仮想対象に人差し指で触れるように指示した。さらに、仮想対象に指が触れたと見える位置で手を2,3秒間静止させるように指示した。この指の静止位置を被験者の仮想対象に対する実際の視知覚奥行きとした。被験者は21~22才の男性13名で、全員が矯正も含め正常な視力、正常な立体視を有する。利き腕は全員右手であった。

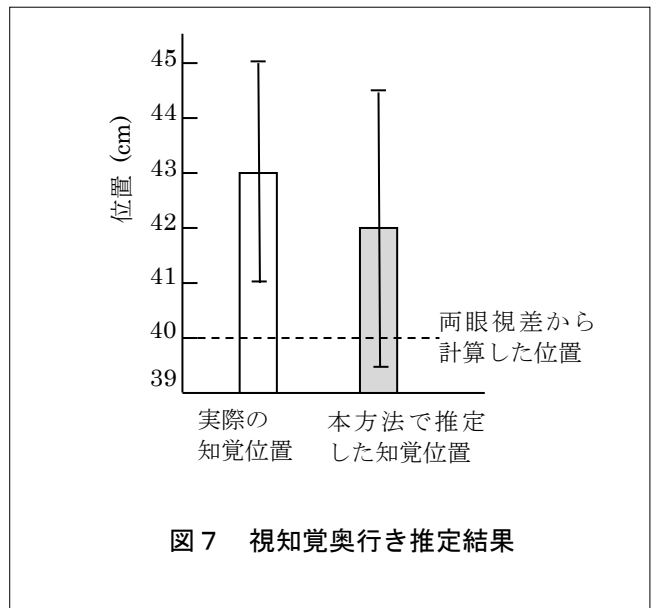
本実験でも仮想対象の表示位置は両眼視差から計算される値で被験者から40cmの奥行きに設定した。手が運動を開始してから、速度がピークを過ぎたのち、ピーク速度の1/2になる時刻までの速度データを用いて(1)式のガウス関数を最小二乗法により決定した。

(2) 結果

図7に実験結果を示す。被験者13名の実際の仮想対象の視知覚奥行きは、41cmから45cmの範囲で被験者ごとに異なった。いずれの被験者も両眼視差によ

り設定した値40cmとは異なっている。

本方法を用いて推定した奥行きは、平均で42cmとなり、実際に知覚された奥行きと1cmの誤差はあるが、両眼視差から計算される奥行きとの差より小さいことが確認された。



2.4 仮想対象操作の自然さの評価

仮想対象に簡単な操作を加えるタスクを被験者に実行させて操作の自然さを評価し、本方法の有効性を検証した。

(1) 方法

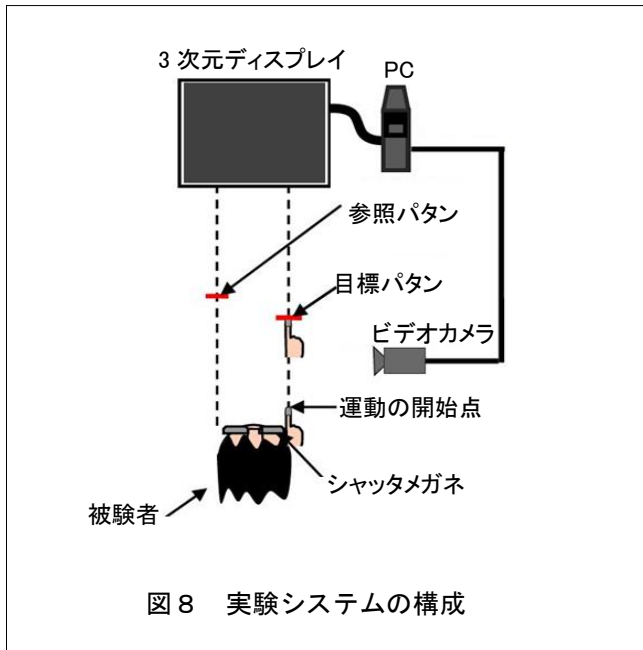
図8に評価に使用した実験システムの構成を示す。機器の構成は前述の図4に示す構成と同じである。本実験では、奥行き40cmの位置に参照パターンを、そしてその参照パターンより1cm、または2cm手前に目標パターンをそれぞれ3次元表示した。

被験者に与えられたタスクは、目標パターンを右手の人差し指で押して、参照パターンと同じ奥行きまで移動させることである。被験者には、まず、手を伸ばして右手の人差し指で目標パターンに触れ、次に指を前方に移動して目標パターンを参照パターンのすぐ右隣の位置、すなわち参照パターンと同じ奥行きまで押す。そして、目標パターンが参照パターンと同じ奥行き位置に達したら、

自然な遠隔操作の実現に向けた3次元表示対象の視覚的知覚位置の推定に関する研究

Prediction of Visually Perceived Depth of Virtual Objects from Observer's Actions

タスクの終了を示すため指を上方にあげるようにとの指示が与えられた。



目標パタンがあたかも指に押されて移動しているように表示するため、ビデオカメラで指の位置をリアルタイムで計測し、指の先端が目標パタンの奥行きに達したら、目標パタンに指の移動と同じ移動をさせる。そして、指が上方に移動した位置でタスクが終了したと判定する。

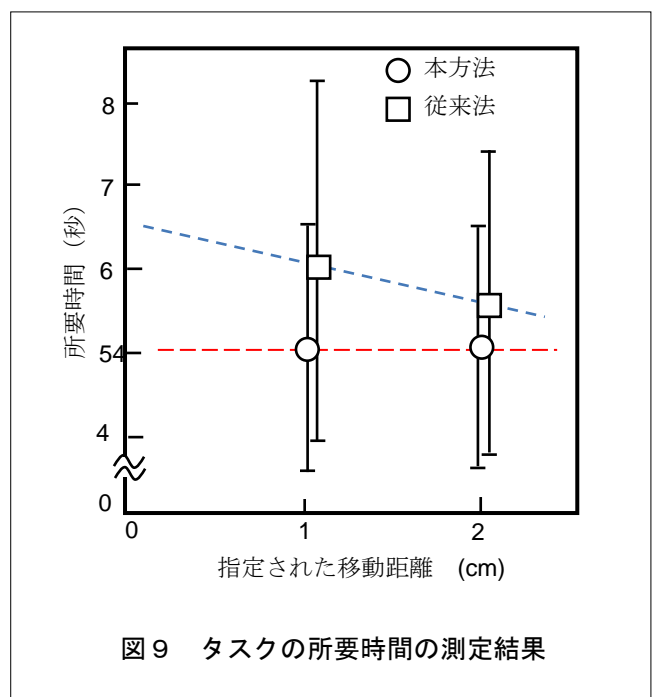
本実験では手が運動を開始してから、手の速度がピークを過ぎてピーク速度の1/4になる時刻 $t_{1/4}$ までのデータを用いてガウス関数を決定した。手の速度データはリアルタイムに取得し、時刻 $t_{1/4}$ に達すると最小二乗法によるガウス関数決定のための計算を開始した。計算に要した時間は10msec以内であり、また、時刻 $t_{1/4}$ から手が目標パタンに達するまでには200msecぐらいの時間があるので、手が目標パタンに達する十分に前に計算を終了させることができ、手が目標パタンに達すると同時に目標パタンを手と一緒に移動させる処理を実行することが可能であった。なお、比較のため、両眼視差から求めた目標パタンの奥行きを用いる方法（以下、従来法とよぶ）についても同様の実験を行った。

本実験には16人の被験者が参加した。全員21~22才の男性で、矯正を含め正常な視力、正常な立体視を有していた。利き腕は全員右手であった。

操作の自然さとして、タスクの所要時間と精度を評価項目とした。精度は、タスク終了時の目標パタンと参照パタンの奥行き之差で評価した。各被験者がそれぞれ5回試行し、その平均を求めた。なお、所定の時間を経過してもタスクが終了しない場合は失敗とみなし、そのデータは平均値の算出には用いなかった。

(2) 結果

図9にタスクの所要時間の測定結果を示す。図9において、横軸はタスクで指定された目標パタンの移動距離を示す。エラーバーは測定データの標準偏差を示す。図9から、3次元表示された目標パタンの奥行きとして、本方法で推定した視知覚奥行きを用いることにより、従来法で計算した奥行きを用いるよりもタスクの所要時間の平均値は短なることがわかる。また、本方法、従来法ともにデータのばらつきは大きい。被験者ごとでは、図9からは明確ではないが、常に本方法のほうが従来法よりもタスクの所要時間は短くなっていた。



自然な遠隔操作の実現に向けた3次元表示対象の視覚的知覚位置の推定に関する研究

Prediction of Visually Perceived Depth of Virtual Objects from Observer's Actions

上記結果の理由は以下のように考えられる。すなわち、従来法で求めた奥行きを用いた場合、被験者が自分の指が目標パターンに触れたと思っても、パターンが反応しないので、指を前後しながらパターンが反応する場所を探す。このため所要時間が増す。本方法を用いる場合でも、完全に計算値が実際の視覚的奥行きと一致しなければ、パターンが反応する位置を探すことになるが、従来法によって求められる奥行きよりも誤差が少ないので容易にその位置を探し出すことができるためと考えられる。

また、図9に示すように、いずれの場合も測定値の標準偏差が大きくなるのは、上記のように適切な位置を探す探索行為が含まれるのが原因と考えられる。

図10にタスクの精度の測定結果を示す。図10より、被験者全員の平均値において、本方法のほうが従来法より精度が高いことがわかる。この結果もテータのばらつきは大きいですが、各被験者において常に本方法のほうが従来法よりもタスクの精度は高くなっていった。

図9および図10に示す結果から、移動距離が短いほうが、本方法の優位性がより高くなることがわかる。このことは、精密作業においては、本方法がより有効であることを示している。

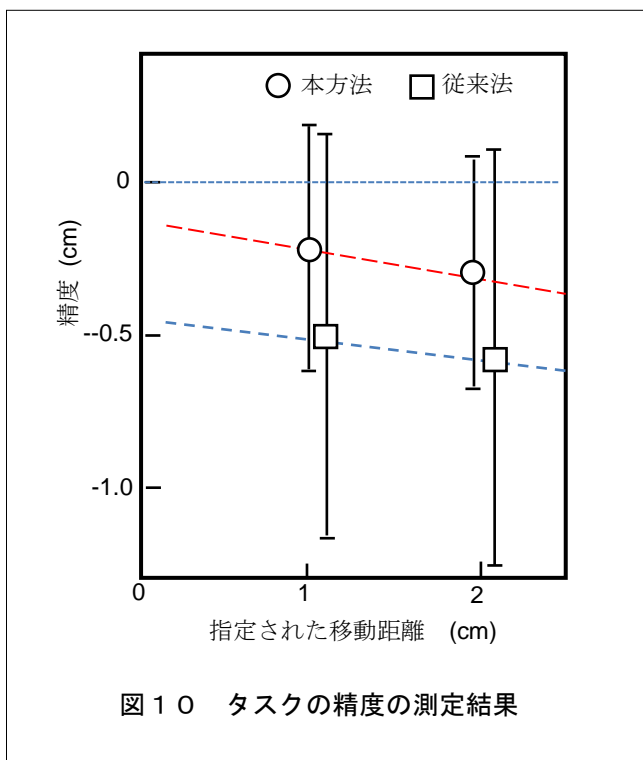


図10 タスクの精度の測定結果

3. 将来展望

本研究では、3次元表示された仮想対象とのインタラクションを自然に行うことを目的に、仮想対象の視覚的奥行きを手の運動特性から推測する方法を研究し、簡単なタスクによりその有効性を確認した。今回のタスクは、手が仮想対象に触れるとき、手は静止するようなタスクを選んだが、実際には、仮想対象を打つ、叩くなど、操作開始時点において手の速度がゼロにならない操作も多く、このような操作についても本方法の適用を検討し、本方法の適用範囲の拡大を図っていく。また、今回の研究では本方法は精密作業で特に有効であることを示したが、精密作業では小さな道具を用いる場合が多いので、手の延長として道具を用いて仮想対象に操作を加える場合も本方法が適用できるか検討する。

本研究の最終的な目標はネットワークを介した遠隔作業において、本方法を適用することであり、今後、遠隔操作システムを用いて本方法の有効性を示していきたい。

用語解説

*1. 両眼視差と両眼視差方式の3次元ディスプレイ：人間の眼は左右に離れてついているので、一つの対象は左右の目の網膜には少しずつれて投影される。このずれを両眼視差と呼ぶ。対象の奥行きの違いでこのずれの大小が異なるので、脳内の処理によりこのずれから対象の奥行きを知覚する。このメカニズムを逆に利用し、スクリーン上で離して表示した同一対象の像を別々の眼に提示し奥行きを知覚させる3次元ディスプレイを両眼視差方式とよぶ。スクリーン上での距離を変えることにより視覚的奥行きを変えることができる。

参考文献

- [1] M.F. Bradshaw, A. Glennerster, and B.J. Rogers, "The effect of display size on disparity scaling from differential perspective and vergence cues", Vision Research, pp. 1255-1264, 1996.

自然な遠隔操作の実現に向けた3次元表示対象の視覚的知覚位置の推定に関する研究 Prediction of Visually Perceived Depth of Virtual Objects from Observer's Actions

- [2] W. Richards, "Anomalous stereoscopic depth perception", *Journal of the Optical Society of America*, pp. 410-414, 1971.
- [3] M. Ritter, "Effect of disparity and viewing distance of perceived depth", *Perception and Psychophysics*, pp. 400-407, 1977.
- [4] H. Wallach, and C. Zuckerman, "The constancy of stereoscopic depth", *American Journal of psychology*, pp. 404-412, 1963.
- [5] P. Morasso, "Spatial control of arm movements," *Experimental Brain Research*, vol.42, pp.223-227, 1981.
- [6] W. Abend, E. Bizzi, and P. Marasso, "Human arm Trajectory Formation," *Brain*, vol. 105, pp. 331-348, 1982.
- [7] K. Flowers, "Ballistic and corrective movements on an aiming task," *Neurology*, vol.25, pp. 413-421, 1975.

この研究は、平成21年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成22～24年度に実施されたものです。