

3次元指示入力の評価について

竹村治雄 伴野明 小林幸雄

ATR通信システム研究所

時分割両眼立体視で表示される画像を、同様に立体視表示されるカーソルを用いて指し示す3次元指示操作の操作性について報告する。本研究では、被験者に対して指示すべき目標を提示し、これをカーソルで指示する実験を行い、指示時間、指示精度などを測定した。カーソルを操作する入力装置には、自由度の異なるダイアルボックス、マウス、3次元デジタイザの3種類の装置を用いた。実験の結果、指示時間、誤り率ともに3次元デジタイザが最も優れている。また、ダイアルボックス、マウスを用いた指示では、指示に要する時間が指示の方向に依存する異方性がみられた。さらに、3次元デジタイザを用いた指示で、目標の大きさに対する指示時間が、2次元の指示時間予測モデルであるFittsの法則で予測可能なこと、入力装置の自由度と指示時間の関係についての考察について述べる。

AN EVALUATION OF 3-D CURSOR POSITIONING TASK

Haruo TAKEMURA Akira TOMONO Yukio KOBAYASHI

ATR Communication Systems Research Laboratories

Twin 21 Bldg. MID Tower 2-1-61 Shiromi

Higashi-ku Osaka 540 Japan

Experiments to measure user performance in 3-D cursor positioning using a field sequential stereoscopic display are described. The target for 3-D pointing and an arrow shaped 3-D cursor are in the form of wire frames and displayed stereoscopically. A dial-box, mouse and 3-D magnetic digitizer were used for cursor controlling input device. Cursor positioning time and positioning accuracy were measured. These experiments show that it is possible to locate a cursor on a stereoscopic display with relatively high accuracy. It is found that positioning time using 3-D digitizer can be predicted by the Fitts's law. However, when a mouse or a dial-box was used, the required pointing time heavily depends on the direction of positioning. This tendency is due to the difficulties of controlling the 3-D cursor using the device which does not have three degrees of freedom.

1. まえがき

両眼立体視（ステレオ視）による奥行きをとまなう画像表示は、立体映画などに見られるような娯楽目的だけでなく、最近ではCADや医療用電子機器などの分野でも使用されつつある。娯楽用途での立体画像表示の目的は奥行き感による臨場感の増加であったが、工業的に両眼立体視が利用される場合は、さらに表示の忠実度の増加を目的としたことが多い。例えば、ワイアフレーム画像の両眼立体視表示は、表示画像の奥行き感を増し、立体視によらないサーフェスモデル表示並の奥行き理解が可能なが知られている。また、分子構造のモデリングなどの場合も容易にその構造の理解を助ける。

しかしながら、立体表示手法を用いた端末での対話操作については、残された課題が多い。例えば、通常の視覚では観察者が頭を動かせばそれに応じて物体の見え方も変化するが、立体視の場合は左右の目に提示される画像はそのままのため、逆に物体が移動したり変形したように感じる。また、複数の観察者が同じ立体画像を見る場合に、視距離、両眼間隔の違いが観察者の受ける立体感を大きく左右する。この状態では、ある観察者が画像の一部を指先を用いて指し示しても、それは他の観察者にとってはまったく別の部位を指し示しているようにみえるという問題を引き起こす。また、画像が表示面より奥に見えている場合には指先をその奥行きまで差し伸べることができない。このような問題を解決するには、指示するための指先自身やカーソルも立体表示画像として提示し、これを観察者の意図によって操作できる構成にする必要がある。これによって、はじめて複数の観察者に対して同じ位置を指し示すことができる。このような操作は、一般に指示操作と呼ばれ通常の2次元ディスプレイでは、マウスなど種々の入力装置を用いた場合の操作特性が評価されている。立体視表示に於ける指示操作は、通常の2次元画面中での指示動作に、さらに奥行き方向の指示・調節が加わったもので、立体表示画像の指示以外に、立体視でのモデリング、高臨場感遠隔操作などの応用での基本操作である。

筆者らは、既にマウスを立体視表示での3次元指示（3Dポインティング）の入力装置として用いた場合の操作の特性について報告した[1]。しかし、マウスなど、2次元での指示を目的とした入力装置は、そのままでは指示のために同時に制御可能な座標軸は2軸に限られるため、指示操作に要する時間（指示時間）が指示の方向に大きく依存する結果となった。さらに、3次元デジタイ

ザを用いた場合の3次元指示入力特性の評価実験を行い、マウスを用いた場合の結果と比較考察した[2]。その結果、3軸同時制御による3次元指示入力がマウスによる2軸切り替えでの指示入力より指示時間、誤り率とも優れていることなどが示された。

本報告では、さらに研究をすすめるための2点について述べる。

- 1) 3次元デジタイザを入力装置とした場合の目標サイズと指示時間の関係を調べるため、異なる目標サイズについての実験を行い、従来の結果と併せて考察を行なう。
- 2) 入力装置として1自由度のダイヤルボックスを用いて、3軸を別々に制御する場合について同様に操作性評価実験を行い、入力装置の自由度と操作時間の関係について考察を行なう。

以下、2節では実験方法と結果について、3節では3次元デジタイザを用いた場合の目標サイズと指示時間の関係について、4節では入力装置の自由度と指示時間についてそれぞれ述べる。

2. 実験方法と結果

一連の実験に用いた機器の構成を図1に示す。立体表示手法には液晶シャッター眼鏡を用いた時分割立体表示（フィールド分割、左右切り替え周波数60Hz）を用いた。表示画像はワークステーション（IRIS-4D）により生成した。指示入力装置としては自由度の異なる入力装置として、1) ダイヤルボックス（1自由度）、2) 光学式マウス（3ボタン、2自由度）、3) 磁界を利用してセンサの空間中の位置と方向を検出する3次元デジタイザの3種類を用いた。ダイヤルボックスは複数の回転できるツマミで構成される入力装置である。被験者に対して、指示目標として仮想空間中に位置する立方体線図形とカーソルとして矢印をそれぞれ、19インチ高解像度CRT（1280×1024ドット）上に視距離

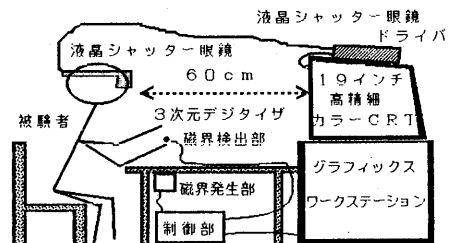


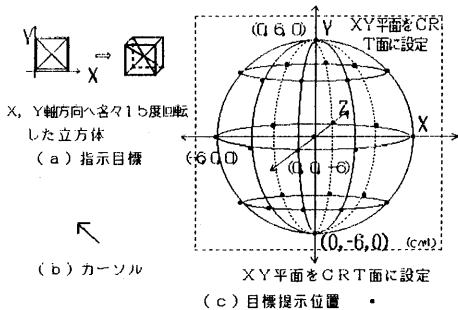
図1. 実験環境

60 cm, 両眼間隔6 cmの透視変換を用いて立体視表示した(図2)。このカーソルは、それぞれの入力装置によって、表1に示される手法で制御される。マウスを用いて3次元座標を入力する手法は、表1示した手法以外にもマウスの移動方向でカーソルの移動する座標軸を切り替える方法などがあるが、いずれにせよ同時に入力できる座標軸は2軸に限られる。被験者はそれぞれの入力装置を用いてカーソルを移動し目標である立方体の内部を指示する作業を行なった。実験の手順を以下に示す。

- 1) 目標は、最初、原点位置(ディスプレイ中心)に置かれ、被験者はカーソルを移動し目標内部を指示し、指示開始を示すスイッチを押す。
- 2) スイッチが押されると目標は、疑似乱数により決定される原点位置から等距離(6cm)の26カ所の候補点の一つに移動する(図2)。それぞれの候補点は等確率で選ばれる。目標の表示位置(原点回り6 cmの距離上)は、ワイアフレーム画像でも立体視が容易に可能な範囲である。
- 3) 被験者は、目標内部にカーソルを移動し、左手で指示完了を示すスイッチを押し一回の指示動作を終了する。

表1. 入力装置別カーソル制御方法

入力装置	制御方法
ダイヤルボックス	カーソルのX, Y, Zそれぞれの座標値を3つのダイヤルで指定する。
マウス	左右の動きでX座標を指定, Y座標は前後の動き, Zは右ボタンを押しながら前後に動かして指定する。
3Dデジタイザ	センサの動きと同方向, 同距離だけカーソルを移動させる。



指示開始のスイッチ押下から完了のスイッチ押下までを指示時間として測定し、その間のカーソルの軌跡とともに記録した。実験は、それぞれの入力装置について、目標に1辺1 cmの立方体を用いて、それぞれ6名の男性被験者に対して100回ずつの指示作業について行った。さらに、3Dデジタイザに関しては1辺2 cmおよび0.5 cmの立方体についても実験を行なった。実験に先だって入力装置の操作法を説明し被験者が操作法に習熟するまで練習を許したが、ダイヤルボックスでは多少操作に戸惑いが残った。

各入力装置の作業時間の平均, 標準偏差, 指示誤り率(目標内部を指示できなかった割合)を表2に示す。指示時間, 指示誤り率は3Dデジタイザが最もよく、つぎにマウス, ダイヤルボックスの順であった。また, 標準偏差も3Dデジタイザ, マウス, ダイヤルボックスの順に増加し, 3Dデジタイザでの指示時間のばらつきが少ないことを示している。さらに, 3Dデジタイザでは目標サイズが小さくなると指示時間が増加し, 誤り率が増加することがわかる。

3. 目標サイズと指示時間に関する考察

本節では、3次元デジタイザを用いた場合の指示時間予測モデルについて考察する。2次元の指示モデルではFittsの法則とよばれるモデルを用いて、マウスなどの多くのポインティングデバイスでの指示時間が説明できることが知られている。このモデルでは、

- S : 目標の大きさ(目標を覆う正方形の1辺の長さ)
- D : 目標中心までの距離 (さ)
- T_{pos} : 指示時間
- C : 指示動作開始, 終了のための時間(定数)
- I_n : 指示動作が複数の認識-移動-修正サイクルによって構成されると仮定した場合の1サイクル当りの所用時間

表2. 平均指示時間と誤り率

入力装置	目標サイズ	指示時間	標準偏差	誤り率%
ダイヤル	1 cm	6.5 sec	2.6 sec	9.0
マウス	1 cm	3.0 sec	1.1 sec	12.3
3Dデジタイザ	2 cm	2.0 sec	0.5 sec	3.5
	1 cm	2.4 sec	0.6 sec	6.17
	0.5cm	2.9 sec	0.8 sec	7.0

の間に

$$T_{\text{pos}} = C + I_n \log_2 (D/S + 0.5) \text{ 秒} \quad (1)$$

なる関係が成立する。

指示開始のための時間には目標の発見、認識などの時間、終了のための時間にはボタンを押すための時間などが含まれる。また、 I_n は本タスクでの被験者のメンタルな情報処理速度を表わしていると考えられる。

(1)式に3Dデジタイザを用いた本実験の結果を適用し、1次回帰でC、 I_n を決定すると、

$$C = 1.10 \text{ 秒}$$

$$I_n = 0.49 \text{ 秒} \quad (\text{相関係数 } 0.998)$$

であり従って

$$T_{\text{pos}} = 1.10 + 0.49 \log_2 (D/S + 0.5) \text{ 秒} \quad (2)$$

となる。

また、これを $\log_2 (D/S + 0.5)$ と指示時間の関係として示したものが図3である。図中には従来のマウスを用いた2次元のポインティングの結果も示した[4]。本実験では距離Dは一定で目標サイズSのみ変化させている。また目標サイズは3種類のみであるが、この範囲内においてはCの値は文献1の結果とほぼ同じである。

しかし、 I_n は文献1の場合の約0.1前後と比べると大きく増加している。本モデルでは I_n の値は、指示動作が腕の移動、誤差の知覚、誤差の修正の繰り返しで行なわれるとして、腕の移動の1回の修正にかかる知覚から判断、応答までの時間を表わしている。従って、 I_n の増加は立体視による奥行き判断が奥行きを含まないポインティングに比してより時間を要していることを示すものと考えられる。また、マウスと異なり空中で指先を移動

(秒)

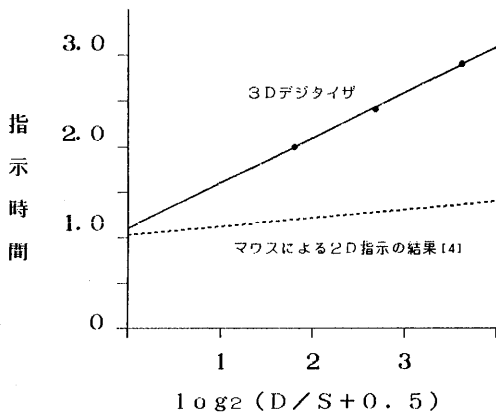


図3. 目標サイズと指示時間の関係

するという入力装置固有の難しさの影響もあると考えられる。

4. 入力装置の自由度と指示時間に関する考察

3次元指示のためにはカーソルのX、Y、Z3座標値を指定する必要がある。従って入力装置が3自由度を持たない場合は、本実験で行なったように座標軸を切り替える手法が必要となる。ダイヤルボックスも座標軸を操作するダイヤルを替えることで切り替えていると見なせる。このような場合、指示時間は指示の方向に依存すると考えるのが自然である。図4は、原点位置から図2の各目標を指示するまでの所要時間を方向別に平均したものである。図に示されるように、ダイヤルボックスを用いた場合、2軸以上の移動を必要とする方向への指示では指示時間が極端に増加している。マウスを用いた場合、奥行き方向への指示は、マウスボタンでカーソルの移動軸を切り替える必要があり、奥行き方向の移動を含む指示でより多くの時間を必要としている。一方、3Dデジタイザでは、この方向依存性が少ないことがわかる。3Dデジタイザにおいて、奥行き方向の指示時間が減少する理由については、図5の指示軌跡例が示すように、3軸同時にカーソルの移動、調節が行われているためと考えられる。しかしながら、奥行き方向を含まない指示に要する時間は、マウスに比べ、ほぼ同等から0.3秒程度の増加となった。これは、カーソルが3軸同時に移動できるため、奥行き方向の移動を伴わない方向への指示に関しても、奥行きの一一致を行なう必要があることによると考えられる。また、指示のために移動すべき軸数が増加するにしたがってわずかながら指示時間も増加しているのがわかる。

表3はそれぞれの入力装置の指示時間を、目標を指示するのに最低必要なカーソルの移動軸数ごとに平均したものである。1軸移動で到達できる目標はX、Y、Zいずれかの軸上に存在する。2軸移動で到達できる目標は、XY、YZ、ZXいずれかの平面上に存在する。3軸移動の場合XYZすべての座標値を目標に合わせる必要がある。従って、1軸移動で目標に到達できる場合、操作を誤らなければダイヤルボックスの場合1つのダイヤルの操作のみで指示可能である。また、2軸移動で目標に到達できる場合は2つのダイヤルを順番に操作すればよい。3軸の場合も同様である。従って、理想的にはn軸移動で到達できる目標を1自由度の入力装置で指示するのに必要な時間 $T_{\text{pos}_n}(1)$ は、 $T_{\text{pos}_1}(1)$ を用いて

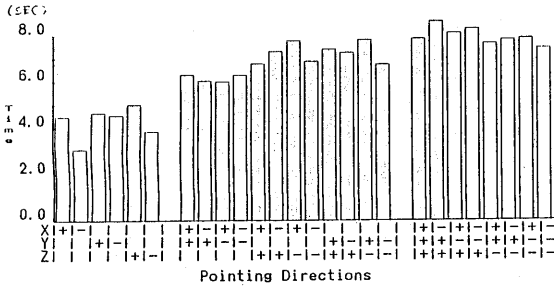
$$T_{pos_n}(1) = n(T_{pos_1}(1) - C) + C \quad (3)$$

と表わされる。ただし、Cは目標の認識、どのダイヤルを操作するか(戦略)の決定、指示完了のための動作に必要な時間であり、移動軸数に関わらず一定であると仮定する。

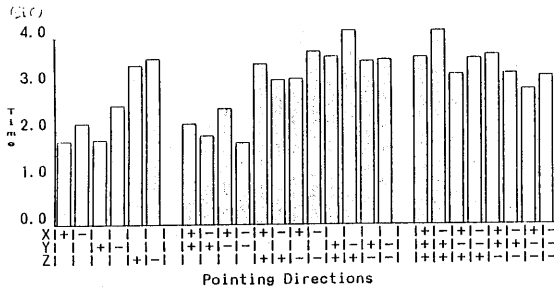
表3のダイヤルボックスの結果を式(3)で回帰すると、相関係数0.975で

表3. 移動軸別平均指示時間(ターゲット:1cm)

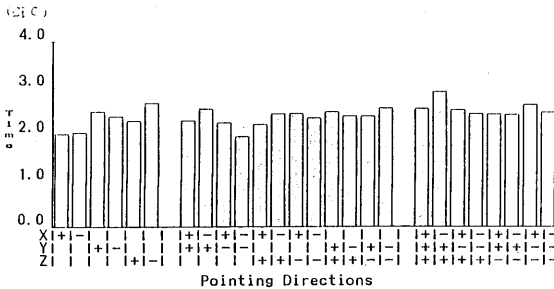
入力装置	自由度	目標までの移動軸数		
		1軸	2軸	3軸
ダイヤルボックス	1	4.3 sec	6.8 sec	7.9 sec
マウス	2	2.4 sec	3.0 sec	3.3 sec
3Dデジタルタイザ	3	2.3 sec	2.4 sec	2.6 sec



(a) ダイヤルボックス



(b) マウス



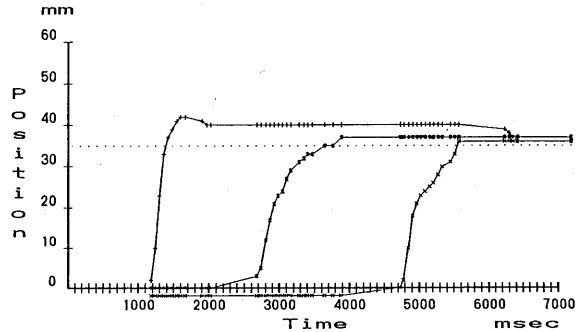
(c) 3Dデジタルタイザ

図4. 指示方向別指示時間

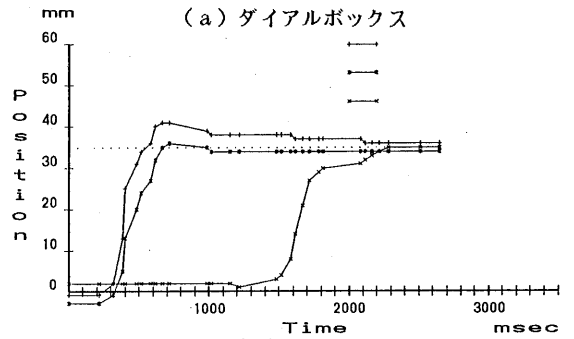
$$T_{pos_n}(1) = 2.73 + 1.8 n \text{ 秒} \quad (4)$$

と表わされる。ダイヤルボックスを用いた指示の場合、目標を認識してからどのダイヤルを操作するか決定する必要がある。また、本実験で用いたダイヤルはすべて同一形状であり、操作軸を示す印などを特に表示しなかったためCの値が大きくなったと考えられる。また、2軸以上の指示は、実際にはそれぞれの軸を何度か交互に調節するためのオーバーヘッドが生じていると考えられる。

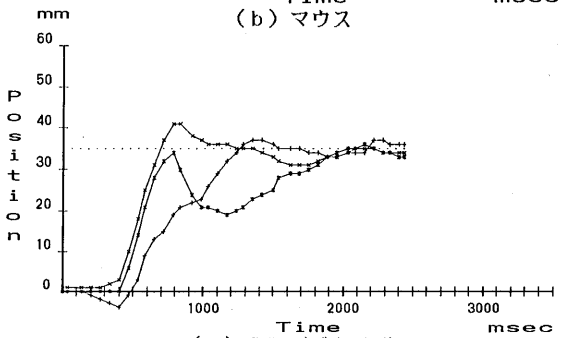
次に、マウスの場合について考察する。本実験での入力方法は、マウスの右ボタンを押さない場合にカーソルがXY平面上で移動し、右ボタンを押した場合にカーソルがXZ平面上を移動することとした。まず、1軸移動で目標を指示できる場合は、目標がX、Y軸上にある場合はXY平面上での1回の指示操作で指示が可能である



(a) ダイヤルボックス



(b) マウス



(c) 3Dデジタルタイザ

図5. 指示軌跡例

と考える。しかし、Z軸上にある場合は、指示時間が極端に増加している。これは、まずXY平面での一致を確認して、ついでXZ平面で奥行き方向に指示を行なうためと考える。次に2軸移動では、目標がYZ平面上に存在する場合はのぞいて、理想的な操作を行なえばマウスの一度の操作で指示できる。しかし、実際の操作履歴を見ると目標がXY平面上に無い場合には、まずXY平面でカーソルを移動させ、ついで奥行きを調節している。従って2軸移動の場合、目標がXY平面にある時をのぞいては、XY平面での指示を行い、次にボタンを押してXZ平面での指示を行なっていると仮定する。マウスによる、1平面上での指示は方向依存性がなく一定であると仮定しこの時間を T_0+C とする。このとき、1軸の指示時間を $T_{pos_1}(2)$ は目標がZ軸上にある場合を除いて1回の指示、Z軸上にある場合は2回の指示動作を行なうため、

$$T_{pos_1}(2) = \frac{2}{3} (T_0+C) + \frac{1}{3} (2T_0+C) \quad (5)$$

と表わせる。2軸および3軸のの指示時間は、2軸は $1/3$ の確率で1回の操作、 $2/3$ の確率で2回の操作が必要であり、3軸は常に2回の操作を必要とすることから

$$T_{pos_2}(2) = \frac{1}{3} (T_0+C) + \frac{2}{3} (2T_0+C) \quad (6)$$

$$T_{pos_3}(2) = 2T_0 + C \quad (7)$$

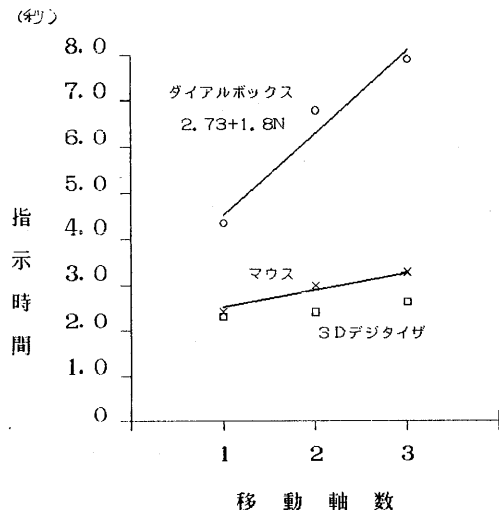


図6. 移動軸数と指示時間の関係

これらの式を実際のデータに適用し回帰すると、

$$T_0 = 1.35 \text{ 秒}$$

$$C = 0.65 \text{ 秒} \quad (\text{相関係数 } 0.981)$$

を得る。

移動軸数と指示時間の関係をグラフにしたものを図6に示す。

3Dデジタイザの場合はすべての場合において同じ操作で指示が可能であり、移動軸数の変化による指示時間の増加はごく僅かである。

5. むすび

本実験の結果から、3軸同時制御による3次元指示入力力がマウス、ダイアルボックスによる指示入力より指示時間、誤り率とも優れていることが示された。また、指示方向による指示時間のばらつき(異方性)の観点からもマウスの場合より有利なことが示された。また、3Dデジタイザによる異なる大きさの目標に対しての指示時間がFittsの法則により予測可能なことを示した。しかし、指示する距離についての関係はデータが得られていないので、今後検討する必要がある。入力装置の自由度と指示時間については、入力装置の自由度が増加すれば指示時間が減少している。しかし、より小さい目標については3Dデジタイザでの指示では空間で指先を微調整する必要があり、必ずしも3自由度をもつ入力装置が有効であるとは限らず検討を要する。今後は、実際に3次元指示を用いたアプリケーションでの操作性を検討するとともに立体視表示での指示動作以外の基本的な対話動作の可能性についても検討する予定である。

参考文献

- [1]Takemura et al., "An evaluation of 3-D object pointing with stereoscopic display and mouse", 信学技報, Vol.87, NO.334, PRU87-82(1988-01).
- [2]竹村, 伴野, 小林, "3次元指示入力についての一考察", 情報処理学会第36回全国大会, 3Z-8(1988-03).
- [3]F.H.Rabb et al., "Magnetic position and orientation tracking system", IEEE Trans. Aerosp. & Electron. Syst., Vol.AES-15, NO.5(Sep. 1979).
- [4]Card et al., "The Psychology of Human-Computer Interaction", Lawrence Erlbaum Associates(1983)

質疑応答 竹村

出澤 今回の三次元デジタイザというのは、マウスと同じように情報が入ってくるのですか。

竹村 マウスは相対的な移動量が入って来ますが、三次元デジタイザの場合は絶対座標が入ってきます。

出澤 絶対値情報ですと眼を移動した場合にずれが生じる可能性がありますね。

竹村 カーソルは画像中に出ているのですが手はスタイラスを持って手元で操作します。人間はカーソルしか見ていないので視差によるずれはありません。三次元デジタイザを持っている手を移動すれば、画面上のカーソルも移動します。

出澤 自分の手と頭が分離されているみたいな感じになっていますね。どちらかと言うと、手の方の位置と連動していない気がしますが。

竹村 そうですね、どうしても手は直接そこにもっていけないですから。やはり視差の関係で頭を動かすと駄目ですから、カーソルを出さざるを得ません。

出澤 それから二次元的の場合の入力ですが、画面と言うのは単純な2次元なのですけど、例えば傾けた面を設定してその上で動かすというのはどうなのですか。拘束条件を与えてそこで動かすとおもしろい結果が出そうな気がしますが。

竹村 私は立体視で奥行方向と水平方向の2軸で二次元的に入力する方法で試してみました。こういう方向で指示してみますと水平、垂直方向の組合せでやっている場合に較べてどうしても時間が余分にかかってしまう。どうしてかと言いますと、奥行方向の情報が視差量であるためにそれを頭の中で理解するので若干の時間がかかっている。ですから多分カーソルを斜めの平面上に固定して使っても従来の縦型の二次元ディスプレイでポインティングするよりは操作性が落ちるのではないかと思います。

出澤 ただ物を描く場合、斜にして描いているので、逆に操作性が上がる可能性もある。

竹村 何も平面が与えられていないときと較べるとそうでしょうね。

守屋 実際に動く手の距離と画面に動く距離の比というのはどれくらいですか。

竹村 今回の実験では1:1ですので手の動いている空間がそのまま1:1になっていますから、手を1cm動かすとカーソルも1cm動くと言う具合です。

吉田 三次元のカーソルの場合、手を実際にそこへもって行きたいと思うのではないかという気がするのですが、手前の方で動かして満足できるものですか。

竹村 カーソルが連動しているという事が解りますから、指示するという事自体に関しては困難なことではないと思います。むしろマウスを使ってボタンを押したらどの方向に動くのだろうかとか、ダイヤルボックスのどのダイヤルでどちらに動くのだろうか、という事で混乱する事の方が多いようです。

吉田 具体的な応用というのが思い付かないのですが、たとえば三次元CADの入力に使うということであれば、キーボードで正確な数値を入れた方がいいと思うのですが。

竹村 もちろんそうですね。こういう入力にはCAD等の精密な図面を描くものには向かないと思います。

吉田 三次元のお絵かきプログラムの入力という感じですね。

竹村 まあ絵を描くということ言えば、粘土細工、陶芸などはいきなり立体で作りますので、そう言った方向に応用できます。

吉田 視点間距離が6cmとなっていますね。現実との調整がとれにくくてもいいということからだと思うのですが、通常これでお書きになったものは小さめに見えると思うのですが。

竹村 若干偏平に見えるのですが今回の実験のようにある場所にもっていくというのは、見えているものと合せる訳ですから少々偏平であっても2つとも同じように偏平になっている訳で、きっちり合せることはできますね。

渡部 学習効果と言うのは、各デバイスによって違いがあると思うのですが、習熟すればよくなるものや最初からある程度使えるものなどがあると思いますが、その辺はどうですか。

竹村 今回の被験者はマウスになれた方々で、右ボタンの操作も何回か練習しまして誤操作がないようにしてからデータを取っています。100回の内1, 2回は誤操作をするのですが、そういったデータは除外してデータを取っています。マウスに関しては非常に習熟しやすかつ習熟している人とそうでない人の差があまりないようです。一番困ったのはダイヤルボックスで、どのダイヤルを回したらよいかを完璧に習熟していない被験者もいました。特に今回のダイヤルボックスはダイヤルが3つ同じように並んでおりまして、どのダイヤルが何であるのかというのが非常に判りにくい。我々が考えている臨場感通信というものは、専門家が使うのではなく一般の人が使えるようになっていまして、そういう意味でもダイヤルボックスというのは不利ではないかと思えます。その意味でもデジタイザは問題なく使えるようです。