

〔非公開〕

TR-C-0004

空間利用によるユーザインタ
フェースに関する研究について

竹村 治雄

秋山 健二

小林 幸雄

HARUO TAKEMURA

KENJI AKIYAMA

YUKIO KOBAYASHI

1987. 7. 10

ATR通信システム研究所

空間利用によるユーザインタフェースに関する研究について

目次

1. まえがき	-----	1
2. ユーザインタフェース研究の現状	-----	1
3. 空間利用による基本的インタフェースに関する研究	-----	5
3. 1 本研究の背景技術	-----	5
3. 2 3次元ポインティングデバイスの比較	-----	7
3. 3 研究計画	-----	7
4. むすび	-----	9
付録1 第1回実験計画	-----	10
付録2 ステレオ立体視画像における奥行き知覚と 解像度の関係についての	-----	14
参考文献	-----	16

空間利用によるユーザインタフェースに関する研究について

竹村治雄 秋山健二 小林幸雄
(ATR通信システム研究所)

あらまし

高臨場感通信におけるユーザインタフェースの手法としての空間知覚の利用について現状を分析検討し、今後の研究方針について述べる。また、空間知覚を利用した画像表示での双方向通信などに於けるユーザインタフェースの研究の重要性を指摘し、さらに将来的に空間中における人間の体動作の認識などをユーザインタフェースの手段として利用するために解決すべき問題についてまとめる。

1. まえがき

将来の通信システムの姿を考える場合、その方向の一つとして高臨場感通信が考えられる。臨場感を高める要因の一つとして空間知覚がある。現状では、空間知覚を利用した、通信システムは実用段階のものは存在しない。しかし、空間知覚を利用した画像表示手法は各種の研究がなされ実用化されているものも多い。たとえば、ホログラフィーによる3次元画像表示、両眼視差による立体画像表示などがある。一方、表示技術の発達とは反対に、これらの表示装置を用いたシステムのユーザインタフェースに関する基礎的な技術は確立しておらず、設計者本位の試行錯誤的な開発に頼っているのが現状である。高臨場感通信技術を完成させるには、空間知覚を利用した表示におけるユーザインタフェース技術の基礎を確立することが必要不可欠であると考えられる。さらに、通信が高度化するにつれてユーザインタフェースもより高度なものが要求されるようになると考えられる。ここで言う高度なユーザインタフェースとは利用者の意図を積極的に理解する機能を備えたものを考える。本報告では、空間知覚を利用したシステムにおけるインタフェース技術の研究を原点とし、3次元ポインティング、利用者の指先の動きによるインタフェースなど空間を利用したインタフェースに関する研究を長期的視野に立って行う際に解決すべき諸問題を、この分野での研究の現状を調査することで明確にし、これらの研究の方向づけをし、今後の研究の指針としてまとめる。以下、2節ではユーザインタフェース研究の現状と空間知覚を利用した通信システムでの研究課題について述べ、3節で課題のうち空間利用による基本的インタフェースに関する研究について述べる。

2. ユーザインタフェース研究の現状

コンピュータシステム、通信システムなどの利用者とシステムの接点であるユーザインタフェースに関しての研究は、研究自体が学際的であり、心理学、人間工学、コンピュータサイエンスなどの分野にわたっての研究がなされている。こ

これらの分野での関連する学会，定期刊行物をまとめたものを表1に示す。また，研究対象も固有のシステムにおけるユーザのパフォーマンスの評価[1-3]から，入出力機器[4-6]，インタフェース手法[7-11]，ユーザモデル[12-16]などの多岐にわたっている。また，ユーザインタフェース改善のための様々な提案[17,18]もみられる。通信，コンピュータ分野における，これらの研究は，通常，CRTディスプレイ，マウス，タッチパネルなど2次元ディスプレイや2次元ポインティングデバイスに関連したものが多い。これらの研究の成果は高臨場感通信システムにおいても適用可能ではあるが，3次元画像通信特有のインタフェース技術の開発も必要である。例えば，3次元画像データベースから表示される立体商品見本を提示しながら商品説明を行う場合，説明者は3次元画像の一部を指し示しながら説明を行うことが容易に予想できる。また，画像データベースを立体視しながら編集することも考えられる。したがって，これらの用途では従来2次元画像処理システムで利用されてきたような，ポインティング，セレクションなどの作業がそのまま3次元で行えるかどうかを検討し，その手法を確立する必要がある。そのため，空間位置の検出のための手法，ポインティングなどの各種インタフェース手法の確立など解決されるべき問題が存在する。次にこれらの技術が確立できれば，空間内での利用者の体の動きなどをより高度なインタフェースとしてこれを利用することが考えられる。人間同士のコミュニケーションに身振りや手振りが重要な意味を持つことは良く知られているが，これを通信システムなどに応用することで更に自然で使いやすいユーザインタフェースが構築できる。

従って，将来の高臨場感通信におけるユーザインタフェース技術として解決すべき課題としては，

- (1) 空間位置検出技術などの3次元ポインティングデバイス技術の確立
 - (2) 3次元入出力装置を用いた基本的インタフェース技術の確立。
 - (3) 身振りなどの空間中の体動作による高度インタフェース技術の確立
- の3つが上げられる。

本研究では，これらの技術の確立を目指して次の5段階に分けて研究を進める予定である。

各研究はオーバーラップして進めることが可能である。

[1] 3次元入力機器に関する研究

既に，磁気や超音波を利用した3次元座標入力装置が実用化されている。

画像認識技術を用いたステレオカメラなどによる指先のトラッキング等の手法は検討する価値があると考えられる。

[2] 3次元ポインティングなどの基本的インタフェース

立体画像ディスプレイを用いたシステムでの3次元ポインティングなどの基本的なインタフェース手法の分類とモデル化。実験による作業効率等の把握。新しい手法の提案と評価などを行う。

[3] 3次元双方向通信などへの基本的インタフェースの応用

2で得られた結果を実際に双方向3次元画像通信システム，3次元画像データベースの操作，検索に応用し評価する。

[4] 身振り，手振りなどの高度インタフェースの研究

空間利用のインタフェースを高度化したものとして身振り，手振りによるインタフェース実現に関する研究を行う。身振りや手振りの検出技術の研究，体動作からの意味の抽出，これらのインタフェースのモデル化などの研究を行う。

[5] 各種システムへの高度インタフェースの応用

4で得られた結果を実際のシステムへの応用を行い，従来手法との比較により評価を行う。

研究予定の概要を図1に示す。また，次節では3次元ポインティングなどの基本的インタフェースについて，具体的な研究内容について述べる。

研究内容	87		88		89		90	
	4	*	4	*	4	*	4	*
入力機器	_____							
基本 I F	_____							
基本 I F 応用	_____							
高度 I F	_____							
高度 I F 応用	_____							

図1. 研究スケジュールの概要

表 1. ユーザインタフェース関係の学会，定期刊行物の主なもの

学会	定期刊行物
Human Factors Society	Human Factors
ACM SIGCHI (special interest group on computer and human interaction)	SIGCHI Bulletin
Ergonomics Society	Ergonomics
そのほか	International Journal of Man-Machine Studies Human-Computer Interaction
計測自動制御学会 ヒューマンインタフェース部会	シンポジウム論文集
電子情報通信学会 オフィスシステム研究会	学会誌，論文誌 信学技報
情報処理学会 文書処理とヒューマンインタフェース 研究会	学会誌，論文誌 研究報告
日本人間工学会	人間工学

3. 空間利用による基本的インタフェースに関する研究

立体画像ディスプレイ，3次元画像ディスプレイを用いた装置用のポインティングデバイスは各種考案されており，実際に利用されているものもある．例えば空間座標を検出可能な装置としては，磁界を利用したもの，超音波を利用したもの等が存在する．また，従来の二次元座標を検出する装置を応用して3次元座標を指定する方法も考えられる（3軸を個別に選択する手法など）．しかし，これらを用いた場合の，作業時間，エラー率，疲労度などへの影響は，評価実験が行われておらず知られていない．そこで，本研究では，各種3次元ポインティングデバイス及びこれを用いたユーザインタフェースの整理分類を行い，その結果をもとにいくつかの装置，手法を実際に試用して，効率評価実験を行う．その結果をもとに個々の装置，手法の特性を明らかにし，目的に応じたポインティングを用いたユーザインタフェースの手法を決定する．効率の良い3次元ポインティングデバイスを用いることで，立体画像ディスプレイを用いてのワイアフレーム画像などの直接編集，作図などが容易にできると考えられる．また，本研究の結果をもとに新しい空間利用のユーザインタフェース構築が可能である．

従来の対話的ユーザインタフェースに関する研究は，対話における諸機能の実現に重点を置いたものが多くみられる．従来見られている，対話システムのインタフェースの分類法は，インタフェースを実現するための物理的な入力機器によって分類するものと，インターフェースの機能に着目して論理的に分類するものがある．後者はユーザインタフェースのモデル化の基礎となるものである．物理的な分類としてBuxtonらによるポインティングデバイスの分類[25]を表2に示す．また，現状では対話の文脈における意味を考慮して，インタフェースを分類したり，評価を行っている研究は少ない．しかし，高度インタフェース実現のためにはこの角度からの研究の重要性が大である．

3. 1 本研究の背景技術

3次元ポインティングを構成する背景技術としては，入力装置技術と出力装置技術，そしてこれらを結び付けるフィードバック技術がある．

これらの例を以下に示すと，

- ・ 入力技術 センサー技術など，
 3Dデジタイザ，3トラックボール
- ・ 出力技術 立体画像表示装置
 時分割液晶シャッター方式など
- ・ フィードバック技術
 カーソル表示手法など，
 立体画像表示技術（両眼視差，輻輳角など）

等である．

表 2. ポインティングデバイスの物理的な分類

次の項目での分類が可能

◎ 通称名

◎ 離散の入力 連続の入力

◎ 次元数 (1, 2, 3, . . .)

◎ 検出対象 (位置, 動き, 圧力, 割合, . . .)

通常のポインティングデバイスは, これらを組み合わせた構成になっている。

検出対象	次元数			検出タイプ
	1	2	3	
位置	回転 pot. スライド pot.	タブレット ライトペン ジョイスティック	D ジョイスティック 3D デジタイザ	M
		タッチタブレット タッチスクリーン		T
動き	連続回転 pot. trademill thumbwheel	マウス トラックボール	3D トラックボール	M
	Tasa Ferinsat	Tasa X-Y pad		T
圧力	トルク検出	圧力型 ジョイスティック		M
	圧力パッド			T

pot. ポテンシオメータ

M

機械式検出タイプ

T

接触式検出タイプ

圧力型ジョイスティック: スティックにかかる圧力を検出するタイプのジョイスティック (isometric joystick) ティック。

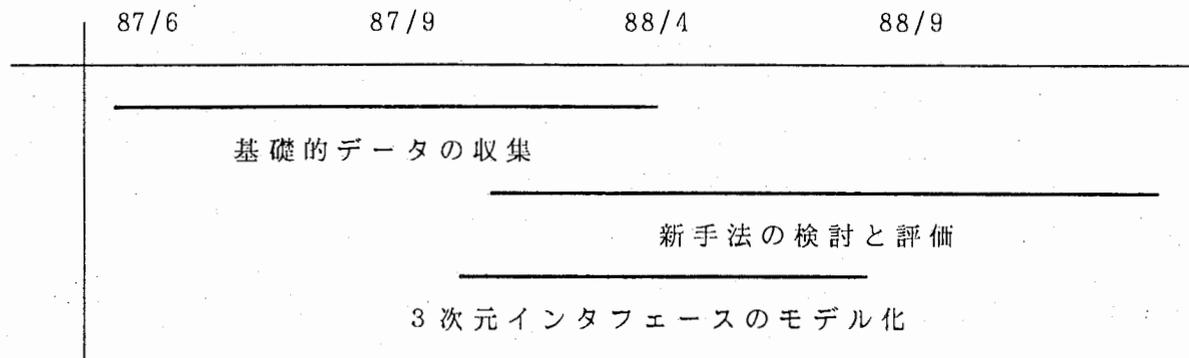
注) この他にも 6D トラックカーなどがある。

3. 2 3次元ポインティングデバイスの比較

3次元ポインティングデバイスの比較を表3に示す。現状では、非接触で3次元位置を検出する実用的な手法は確立されていないが、画像認識の技術を用いて位置を検出する方法が将来的には有望であると考えられる。また、用途を限れば2Dポインティングデバイスを用いる手法も有効であると考えられる。

3. 3 研究計画

本研究のスケジュールを以下に示す。



◎基礎的データの収集

現状で考えられる入力デバイスを用いてポインティングに必要な表示手法等の基礎的な事項に付いてのデータを収集する（数回の実験を行う予定。第1回目の実験については付録1を参照）。また、データの収集手法自体についても検討を加え、より客観的かつ不偏的な評価手法を考え、データを収集する。

◎新手法の検討と評価

基礎的なデータをもとに、従来の手法の欠点を補うための手法を見だし、評価する。さらに、カメラを用いた非接触での計測を中心とした新しい手法の実現をめざす。

◎3次元インタフェースのモデル化

空間利用のインタフェースの分類、モデル化を行なう。

表 3. 3次元ポインティングデバイスの比較

絶対座標検出型のデバイス

名称	原理	特徴
3 D デジタイザ	磁界検出	x y z 3方向の磁界発生機とセンサを用いて位置を検出する。3次元位置だけでなくyaw, pitch, rollも検出可能なタイプもある。 精度は1mm程度。磁性体の影響を受ける。
	超音波	超音波スピーカとマイクにより3点以上からの距離を計り3次元位置を計算する。 精度はスピーカ・マイク間の距離で0.1mm程度音を反射、遮断する物体の影響を受ける。
	機械式	原理は簡単だがアームの形状によっては動かしにくい方向がある（異方性がある）。精度は？
	画像認識	画像認識の技術を利用して複数のカメラで見たポインタの映像をから3次元位置を求める。 カメラの死角による影響がある。 精度はカメラの解像度や画像の認識精度などで決まる。しかし、ポインタがワイアレスにできたり手や指で代用できる可能性がある。 この方法での検出装置の実例はまだない。

相対ポインティング（移動量検出型）デバイス

3 D マウス	機械式3Dデジタイザと同様の構造を持つ。異方性がある。
3 D ジョイスティック	通常の2Dジョイスティック+スティックの回転を検出。(2+1)D異方性を持つ
3 D トラックボール	通常のトラックボールにボールのひねりを検出するもの。(2+1)D異方性を持つ。
3 D 絶対位置検出装置による方法	絶対位置データをもとに移動量を検出する。

そのほかの手法

2Dポインティングデバイスによる方法

2Dのポインティングデバイスを用いて3軸の内の1ないし2軸を入力する手法。自由度が制限される。

4. むすび

本報告では、高臨場感通信システムにおける空間知覚利用ユーザインタフェースの可能性について、ユーザインタフェース技術の現状分析などの面から検討した。その結果、基礎的データの収集の必要性、将来の空間利用のユーザインタフェースのための画像処理技術の確立の必要性などが指摘できた。今後は、本報告で述べた研究の指針に従って研究を進めることで、空間知覚を利用したユーザインタフェースの実現が図れ、より高機能な高臨場感通信システムを実現する予定である。

付録 1 第 1 回実験計画書

1. 目的

立体表示における空間ポイントの可能性を確かめ、基礎的なデータを収集する。立体表示装置上に自由に移動することのできる立体カーソルを表示し、どのような条件のもとでこのカーソルの立体視が可能かを調べる。そして、各々のカーソルで画面上のターゲットを指し示す場合の効率を測定する。

入力方法としては、二次元デバイスによる手法、3次元デバイスによる手法の両方を考える。効率等に影響を与える要因としては、

透視方法 ——— 目の輻輳角など

カーソル形状 — 十字、矢印など

補助表示 ——— 立体格子表示など

入力デバイス — 2次元マウス、3次元デジタイザなど

が考えられる。

2. 実験方法

被験者数

予備実験 2, 3人 本実験 10人程度を予定

測定手法

◎カーソルの立体視可能域

(1) カーソルを遠方から手前へ順に移動し立体視可能域にカーソルが入った時点と出た時点で押しボタンを押してもらうことにより調べる。

(2) ランダムに次々と表示されるカーソルが立体視可能ならば、押しボタンを押してもらい調べる。

(3) 被験者自身がカーソルを移動させて立体視可能域をワイヤフレームで示す。

◎ターゲット選択の効率の測定

(1) 図1に示すような画面の立体表示を行い、ターゲットが表示されてからその位置にカーソルを移動するまでの時間、カーソルの動きなどを記録する。

(2) 同様にして複数のターゲットが表示されている中その中の特定の一つを選択する場合も調べる。

分析手法

計測値の統計手法による分析 質問表による主観評価

カーソル形状例

(1) ポイントカーソルに属するもの

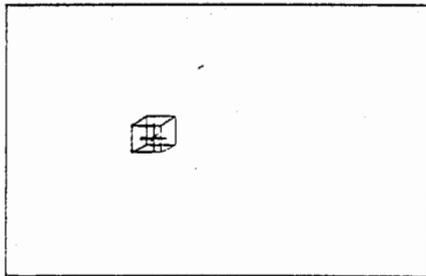
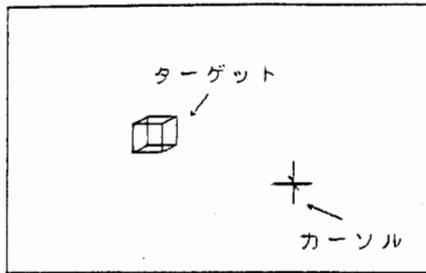
矢印型 十字型 アイコン型

(2) クロスカーソルに属するもの

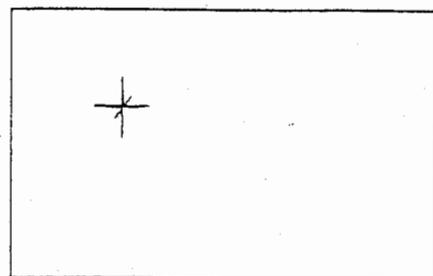
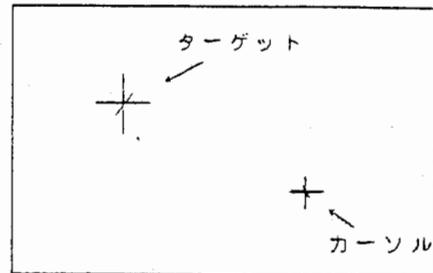
クロスカーソル 斜めクロスカーソル 四角錘カーソル

(3) それ以外のカーソル

廊下型カーソル

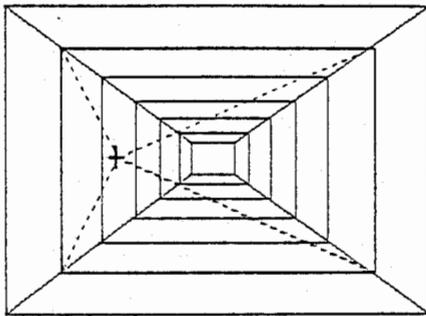


a) 空間領域の選択

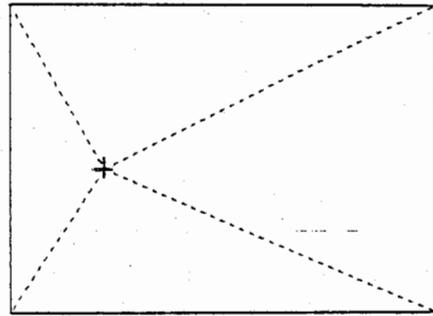


b) 空間中の1点の選択

図1. 空間ポインティングの例



a) 廊下型カーソル

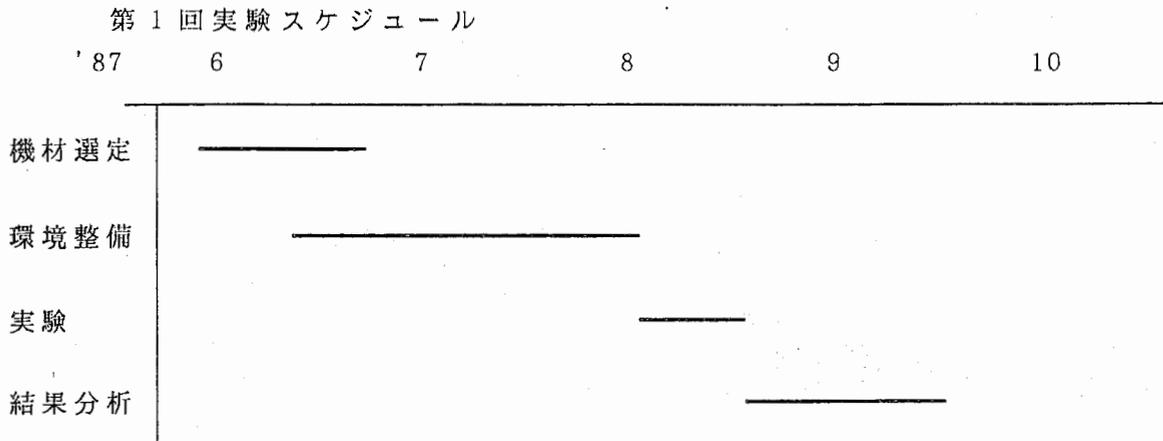


b) 四角錐型カーソル

図2. カーソル形状の例

3. スケジュール

実験スケジュールを以下に示す。



4. 実験の着目点

- ポインティングデバイスにより効率にどの程度の差異が見られるか？
- ポインティング対象までの距離と作業時間の間に不偏的な法則があるか？
- 立体画像表示のみで十分な精度のポインティングが可能か？
- どのようなフィードバックが必要か？

◎ 2次元ポインティングデバイスを用いた3次元座標の入力の案

1) マウス

x, y, z軸のうち2軸は従来の方法で入力可能である。残りの1軸はマウス本体上に次の何れかの検出機構を付加して入力する。

- (1)絶対位置指定可能な装置（スライドボリューム、ポテンシオメータなど）
- (2)相対移動量を検出可能な装置（ロータリエンコーダなど）。
- (3)移動方向のみを指定可能な装置（押しボタンなど）。

2) ジョイスティック

x, y, z軸のうち2軸は従来どおりに入力する、残りの1軸は、

- (1)ジョイスティックの回転角度で指定する。
- (2)ジョイスティックの長さを変化させて指定する。

5. 実験機材について

a) 画像表示装置及び処理装置

条件 実用的な解像度で立体表示が行えること。
各種ポインティングデバイスが接続可能なこと。

候補

SUN3 IRIS PC9801 X1turbo

ワークステーションを用いた場合は、接続できるデバイスに制限が生じる可能性がある。パソコンを用いた場合は、表示解像度に限界がある。処理能力的には、ポインティングに必要なカーソルを実時間で移動する程度であれば何れの装置を用いても問題ない。ただし、視点をリアルタイムで変化させる場合には、PC9801以上の処理能力が必要である。立体表示の手法は何れの場合も外部同期型の時分割液晶シャッターを用いることができる。X1の場合は、オプションの立体表示セットを利用できる。

b) 入力装置

現在入手可能と思われる入力装置は、

- ・ 通常の2次元ポインティングデバイス 各種あり
- ・ 3D超音波デジタイザ 米SAC社製 国内代理店あり
- ・ 3D磁気デジタイザ 米ダグラス社製 国内代理店あり
- ・ 6D磁気トラッカー 米Polhemus Navigational Sciences社製
米ダグラス社製 国内代理店あり
- ・ 3Dトラックボール 米ディスクインスツルメント社製 国内代理店あり
- ・ 3D機械式デジタイザ 米Micro Control Systems社製

国産の3D入力装置に関する情報は少ない。

上記装置のほとんどがインタフェースとしてRS-232Cを用いている。

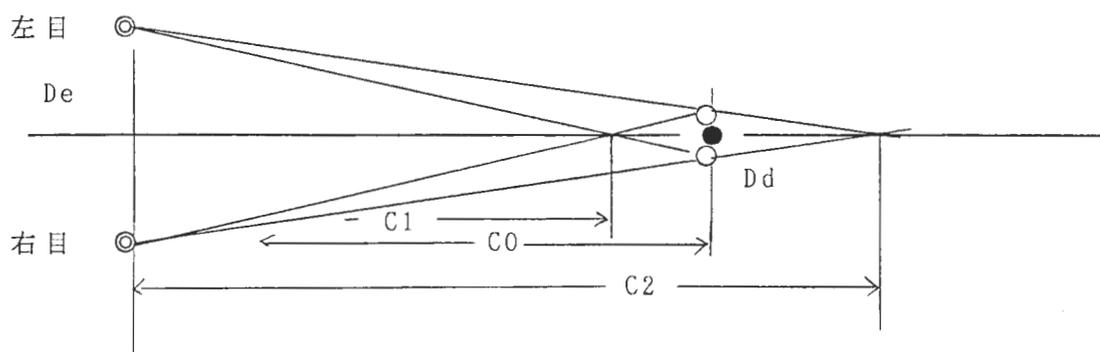
現在6D磁気トラッカーについて評価を検討している。

付録2 ステレオ立体視画像における奥行き知覚と解像度の関係について

このメモでは、視差を利用した立体表示における奥行き知覚と画像表示装置の解像度との関係について考察する。

◎原理

解像度の限られている画像再生装置での立体視を図式化すると下図のようになる。



ここで

- De: 両眼間距離
- Dd: ドット間距離
- C0: 目から画面までの距離 輻輳角 θ_0
- C1: 目から前方最小識別点までの距離 輻輳角 θ_1
- C2: 目から後方最小識別点までの距離 輻輳角 θ_2

このとき最小前方奥行き知覚距離 M_f は、 $M_f = C_0 - C_1$ で表され、
また、 $De/2Dd = C_1/(C_0 - C_1)$ より、 $C_1 = DeC_0/(2Dd + De)$

したがって、 $M_f = 2DdC_0 / (2Dd + De)$

同様に、後方最小奥行き知覚距離 M_b は、 $M_b = C_2 - C_0$ で表され、

$$M_b = 2DdC_0 / (De - 2Dd) \text{ となる。}$$

さらに、 $\theta_0 \cong De/C_0$,

$$\theta_1 \cong De/C_1 = (De + 2Dd)/C_0,$$

$$\theta_2 \cong De/C_2 = (De - 2Dd)/C_0$$

である。

◎考察

前述の式にいくつかの画像表示装置での実際の値をあてはめてみる。

例1 14型CRT (640 * 400ドット) を用いて50cmの距離から画面を見る場合

画面の大きさは、縦210mm、横280mmとすると $Dd=280/640=0.44\text{mm}$
 $De=60(\text{mm})$, $C0=500(\text{mm})$ より,
 $Mf=7.23(\text{mm})$, $Mb=7.44(\text{mm})$

例2 20型家庭用TV受像機(水平解像度250TV本)を用いて2mの距離で立体視を行う場合

画面の大きさは、縦300mm、横400mmとすると $Dd=400/(250*1.33)=1.20(\text{mm})$
 $De=60(\text{mm})$, $C0=2000(\text{mm})$ より,
 $Mf=76.9(\text{mm})$, $Mb=83.3(\text{mm})$, $\theta_1 - \theta_0 = \theta_0 - \theta_2 = 2Dd/C0 = 2.4/2000(\text{rad})$
 $=0.0012(\text{rad})=0.0687(\text{deg})=4.13(\text{min})=247.51(\text{sec})$
視野角は、11.5(deg)

例3 HDTV(画面サイズ300×500mm)を用いて2mの距離で立体視を行う場合(水平解像度は1000TV本とする)。

$Dd=500/(1000*1.67)=0.299(\text{mm})$, $De=60(\text{mm})$, $C0=2000(\text{mm})$ より
 $Mf=19.7(\text{mm})$, $Mb=20.1(\text{mm})$, $\theta_1 - \theta_0 = \theta_0 - \theta_2 = 0.598/2000(\text{rad})$
 $=0.000299(\text{rad})=0.017(\text{deg})=1.027(\text{min})=61.67(\text{sec})$
視野角は、14(deg)

例4 視野角30度で2m先の画面を見る場合に、奥行きを10mm程度の精度で行うために必要な画面の解像度

$De=60$, $C0=2000(\text{mm})$, $Mf=10(\text{mm})$ とした場合, $Dd=0.15(\text{mm})$
視野角30度とすると画面の横幅は、1072mmとなる。
このとき、表示されるドット数は7147ドットである。

これらの例から考えると、奥行き方向の表現には非常に解像度の高い表示装置が必要になる。目の分解能を0.5分として考えると視野角30度の表示では3600ドット程度の解像度で充分と考えられるが、副尺視力は数秒のずれを認知できるので7147ドットでも充分かは不明となる。これらの解像度の影響が立体視に実際どの様に作用するかは、今後の課題として十分に興味深いものであると考えられる。

参考文献

- [1] E.Lee, J.MacGregor and N.Lam: "Keyword-menu retrieval: an effective alternative to menu indexes", Ergonomics, vol.29, no.1, pp115-130 (January 1986).
- [2] T.L.Roberts and T.P.Moran: "The evaluation of text editors: methodologys and empirical results", Communications of the ACM, vol.26, no.4, pp. 265-283 (April 1983).
- [3] T.K.Landauer, K.M.Ballori, and S.Hartwell: "Natural command names and initial learning : a study of textediting terms", Communications of the ACM, vol.26, no.7, pp. 495-503 (July 1983).
- [4] F.H.Raab, E.B.Blood, T.O.Steiner and H.R.Jones: "Magnetic position and orientation tracking system", IEEE Transactions on Aerospace and Electronics systems, vol. AES-15, no.5, pp709-718 (September 1979).
- [5] D.Whitfield, R.G.Ball and J.M.Bird: "Some comparisons of on-display and off-display touch input devices for interaction with computer generated displays", Ergonomics, vol.26, no.11, pp. 1033- 1053 (November 1983).
- [6] S.K.Card, W.K.English, and B.J.Burr: "Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystic, step keys and text keys for text selection on a CRT", Ergonomics, vol.21, no.8, pp. 601-613 (August 1978).
- [7] J.M.Schurick, B.H.Williges and J.F.Maynard: "User feedback requirements with automatic speech recognition", Ergonomics, vol.28, no.11, pp.1543-1555 (November 1985).
- [8] R.A.Bolt: "Gaze-orchestrated Dynamic Windows", Computer Graphics, vol.15, no.3, pp.109-119 (August 1981).
- [9] L.J.Bass: "A generalized user interface for applications programs(II)", Comm. ACM, vol.28, no.6, pp. 617- 627 (June 1985).
- [10] K.Snowberry, S.R.Perkinson and N.Sisson: "Computer display menus", Ergonomics, vol.26, no.7, pp. 699-712 (July 1983).

- [11] J. Whiteside, S. Jones, P. S. Levy, and D. Wixon: "User performance with command, menu, and iconic interfaces", Human factors in computing system CHI'85 proceedings, pp.185-191 (April 1985).
- [12] S. Yamamoto: "A study of VDU operators' information processing based on saccadic eye movement and response time", Ergonomics, vol.28, no.6, pp.855-867 (June 1986).
- [13] 広瀬: "ヒューマン・インタフェースの定量的評価の方法論", テレビジョン学会技術報告, VVI78-6, pp.97-102 (1986-10).
- [14] P. Reisner: "Formal grammar and human factors design of an interactive graphics system", IEEE Transactions on Software Engineering, vol. SE-7, no.2, pp.229-240 (March 1981).
- [15] S. K. Card, T. P. Moran and A. Newell: "The psychology of human-computer interaction", Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ (1983).
- [16] S. K. Card, T. P. Moran and A. Newell: "The keystroke-level model for user performance time with interactive systems", Communications of the ACM, 23, 7, pp.396-410 (July 1980).
- [17] M. Hammer, J. S. Kunin, and S. Schoichet: "What makes a good user interface?", 1983 Office Automation Conference Digest, AFIPS Press, pp. 121-130 (February 1983).
- [18] P. J. Hayes, P. A. Szekely, and R. A. Lerner: "Design alternatives for user interface management systems based on experience with Cousin", Human factors in computing system CHI'85 proceedings, pp.169-175 (April 1985).
- [19] 広瀬, 須藤, 石井: "3次元空間内の遠隔操作におけるヒューマン・インタフェース", SIC E 第2回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.237-244 (1986).
- [20] 広瀬, 須藤, 石井: "3次元立体視における奥行き情報の認知精度に関する研究", 情報処理学会第32回全国大会論文集, pp.1431-1432 (1986).

- [21] 広瀬, 亀山, 石井: "立体マウスの開発に関する研究(第2報)", 情報処理学会第32回全国大会論文集, pp.1797-1784 (1986).
- [22] 広瀬, 須藤, 石井: "3次元立体視におけるマン・マシン・インタフェース", SICE第1回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.105-108 (1985).
- [23] 瀬川, 井上, 熊本: "立体視を応用したグラフィックスと3次元教示", SICE第2回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.229-236(1986).
- [24] 瀬川, 井上, 熊本: "3次元ステレオ・グラフィック・システムの試作", SICE第1回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp.101-104 (1985).
- [25] W.Buxton and R.Baeker: "Human-computer interaction: Selected theories, technologies, techniques & tools", ACM SIGGRAPH 86 Course note vol. 20, pp.1-58 (1986).