

NAIST-IS-MT9651030

## 修士論文

手形状入力装置を用いたインタフェースにおける  
応答遅延がインタラクションに与える影響の検討

金川 将成

1998年 2月 13日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
修士(工学)授与の要件として提出した修士論文である。

金川 将成

指導教官： 横矢 直和 教授  
千原 國宏 教授  
竹村 治雄 助教授

# 手形状入力装置を用いたインタフェースにおける 応答遅延がインタラクションに与える影響の検討\*

金川 将成

## 内容梗概

手を用いた操作の正確さや自然さを活かすために手形状入力装置と3次元位置計測装置を用いるユーザインタフェース（グローブインタフェース）が注目されている。本研究ではグローブインタフェースが持つ、1) 身振りや手振り（ジェスチャ）による表現が可能である、2) 直感的・直接的に3次元空間の指示が可能である、という2つの利点を各々活かした、ジェスチャを用いた擬人化インタフェースと仮想物体を直接操作するインタフェースに着目する。さらに、各々のインタフェースにおいて応答遅延と操作性の関連を調査した。一般に、ユーザの入力から計算機の出力までの時間（応答遅延）はインタフェースの操作性に強く影響を与える。従って、システムの設計や評価のためには、応答遅延と操作性の関連を知っておくことは重要である。被験者実験の結果、ジェスチャインタフェースにおけるユーザが許容可能な最大遅延量と知覚可能な最小遅延量が得られ、仮想物体直接操作インタフェースにおいて手の動作計測に遅延のある場合、ビジュアルフィードバックは却って操作の妨げとなり得ること、現実の手を透過的に見せることで作業時間や操作感覚を改善できること、などが明らかとなった。

## キーワード

手形状入力装置, 応答遅延, 人工現実感

\*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT9651030, 1998年2月13日.

# **A Study on the Effect of Time Lag on A User Interface with Glove-based Input\***

Masanari Kanagawa

## **Abstract**

On user interfaces, we adopt glove-based input to utilize the dexterity and naturalness that characterize our hands. We call it Glove-Interface which is the user interfaces with glove-based input. Glove-Interface principally has two merits. They are that we can use gestures combined with verbal expressions and that we can manipulate virtual objects directly and intuitively. We constructed two systems which make good use of the each merit to conduct empirical studies. One is gesture interface and the other direct manipulation interface for virtual object. The time lag affects on usability of user interfaces and it is important to investigate how much it affects. On gesture interfaces we've got the experimental results which are the maximum delay that a user can permit and the minimum delay that a user can perceive. On direct manipulation interface for virtual object, the experimental results show that visual feedback impedes direct manipulation with a large time lag. Also shown is that visibility of a real hand is effective in improving both manipulation efficiency and manipulation feeling.

## **Keywords:**

Glove-based Input, Time Lag, Virtual Reality

---

\*Master's Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT9651030, February 13, 1998.

# 目次

1. はじめに	1
2. 手形状入力装置を用いたインタフェース—グローブインタフェース	3
2.1 グローブインタフェースの構成と応答遅延	3
2.2 ジェスチャインタフェース	4
2.3 仮想物体直接操作インタフェース	5
3. ジェスチャによる実時間対話における応答遅延の主観評価	6
3.1 ジェスチャインタフェースと応答遅延	6
3.2 実験システムの構成と特徴	7
3.3 操作者が許容可能な最大遅延量の評価実験	8
3.3.1 実験の設定	9
3.3.2 結果と考察	9
3.4 操作者が知覚可能な最小遅延量の評価実験	10
3.4.1 実験の設定	11
3.4.2 結果と考察	11
3.5 実験1のまとめ	12
4. 仮想物体操作における応答遅延が操作性に与える影響の評価	14
4.1 仮想物体直接操作インタフェースと応答遅延	14
4.2 実験システムの構成と特徴	15
4.3 応答遅延と操作性の関連を評価する実験	16
4.3.1 実験の設定	16
4.3.2 結果と考察	19
4.4 応答遅延による操作性劣化の抑制手法に関する実験	21
4.4.1 実験の設定	21
4.4.2 結果と考察	24
4.5 実験2のまとめ	31

5. 考察	32
6. むすび	34
謝辞	35
参考文献	36

## 目 次

1	グローバルインタフェースの構成	4
2	応答遅延に対するシステムの評価	7
3	実験システムの構成	8
4	実験 1-1 の結果	10
5	実験 1-2 の結果	12
6	実験システムの構成	16
7	提示画面	17
8	仮想物体の位置関係	18
9	遅延－平均タスク達成時間 (STAY)	19
10	遅延－平均タスク達成時間 (MOVE)	20
11	遅延－平均タスク達成時間 (STAY)	25
12	遅延－手の平均移動距離 (STAY)	25
13	遅延－物体の平均把持回数 (STAY)	26
14	遅延－平均タスク達成時間 (MOVE)	26
15	遅延－手の平均移動距離 (MOVE)	27
16	遅延－物体の平均把持回数 (MOVE)	27
17	主観評価値	30

## 表 目 次

1	実験 1-1 における 7 段階主観評価の基準	9
2	実験 1-2 における 2 段階主観評価の基準	11
3	与えた条件	22
4	主観評価	23

# 1. はじめに

近年、計算機が一般に広く普及してきており、計算機の専門家以外のエンドユーザが計算機と接する機会が増えてきた。そのようなエンドユーザのための、より使いやすいユーザインタフェースへの要求が高まってきている。そのようなユーザインタフェースの1つとして、我々が日常生活で物体の操作や意志表示に用いている手に注目し、手を用いた操作の正確さや自然さを活かして、計算機システムに対する入力ができるユーザインタフェースが期待されている。このようなインタフェースは、人間の指の曲げ角を直接読み取る手形状入力装置と、3次元空間中における位置および姿勢を取得する3次元位置計測装置の登場を機に実現が可能となりつつある。実際、手を用いた計算機とのインタラクションが可能なシステムが盛んに研究され、遠隔操作、人工現実感（VR）、医療、科学的可視化、ロボット操作、音楽演奏、ビデオゲームといった多様な分野に渡ってアプリケーションが開発されてきている [1, 2, 3, 4].

このように、手形状入力装置と3次元位置計測装置を用いるユーザインタフェースを本論文ではグローブインタフェースと呼ぶ。グローブインタフェースには、以下のような2つの利点がある。

- ジェスチャによる表現が可能である
- 直感的・直接的に3次元空間の指示が可能である

1つ目の利点である、ジェスチャによる表現が可能であることを活かしたインタフェースを利用するアプリケーションとしては、手話の伝送や認識を行うシステムや、コンピュータグラフィクスをジェスチャにより操作するシステムなどが研究されている [1, 5, 6, 7, 8]. また、2つ目の利点である、直感的・直接的な空間指示が可能であることを活かしたインタフェースを利用するアプリケーションとしては、自由曲面を生成するシステムや遠隔操作システムなどが研究されている [9, 10, 11].

一般に、ユーザインタフェースにおいて、ユーザの入力から計算機の出力までの時間（応答遅延）は、インタフェースの操作性に強く影響を与える。すなわち、インタフェースの操作性は応答遅延が大きくなるにつれて急激に劣化する



[12, 13, 14]. 従って、インタフェースの操作性と応答遅延の関連からそのインタフェースの操作性を評価する際の尺度を得ることができる。以上のことから、応答遅延の大きさとインタフェースの操作性の関連を調査することは重要であると考えられる。

そこで、本研究ではグローブインタフェースの上述の2つの利点を活かしたインタフェースの中でも、応答遅延が大きくなりやすいものをそれぞれ取り上げ、それぞれのインタフェースにおいて応答遅延と操作性の関連を実験的に調査、検討する。まず、1つ目の利点を活かしたインタフェースとして、ジェスチャにより計算機と対話することのできるインタフェース（ジェスチャインタフェース）を用いて、ユーザが許容できる最大の遅延量や知覚できる最小の遅延量を調査した。次に、2つ目の利点を活かしたインタフェースとして、仮想物体を直接操作することのできるインタフェース（仮想物体直接操作インタフェース）を用いて、応答遅延が仮想物体の配置操作に要する作業時間に与える影響と、応答遅延の影響を軽減する手法について調査した。

以下2章では、グローブインタフェースの概要について述べ、ジェスチャインタフェースと仮想物体直接操作インタフェースについてそれぞれ述べる。さらに、3章ではジェスチャインタフェースにおける応答遅延と操作性の関連を調査した主観評価実験（実験1）について、また、4章では仮想物体直接操作インタフェースにおける応答遅延と操作性の関連を調査した定量および主観評価実験（実験2）についてそれぞれ述べ、最後に5章で全体を考察する。

## 2. 手形状入力装置を用いたインタフェース—グローブ インタフェース

### 2.1 グローブインタフェースの構成と応答遅延

グローブインタフェースの一般的な機器構成を図1に示す。まず、グローブインタフェースでは、ユーザの指の曲げ角を手形状入力装置により、また手の3次元位置・姿勢を3次元位置センサにより計測し、これらを計算機への入力データとする。次に、これらの入力データに基づいて計算機が処理を行う。例えば、ジェスチャインタフェースではジェスチャ認識を行い、仮想物体直接操作インタフェースでは仮想物体の挙動計算を行う。最後に、処理結果に基づいてコンピュータグラフィクス(CG)を描画し、Head Mounted Display (HMD) や CRT などの表示装置によりユーザに提示する。

一般にユーザインタフェースには、ユーザによる入力から計算機による出力までの時間である応答遅延が発生する。グローブインタフェースにおいて応答遅延が発生する要因には、入力データ取得時のセンサの計測遅延や通信遅延、ジェスチャ認識などの計算処理、CGの描画処理などがある。特に、ジェスチャインタフェースでは複雑なジェスチャの認識に時間を要し、仮想物体直接操作インタフェースでは複雑な仮想環境の描画に時間を要するため、グローブインタフェースの中でも大きな応答遅延が起きやすい。応答遅延はインタフェースの操作性に強く影響を与え、インタフェースの操作性は応答遅延が大きくなるにつれて急激に劣化する [12, 13, 14]。インタフェースの操作性と応答遅延の関連を知ることによりそのインタフェースの操作性の評価尺度が得られる。そこで本研究では、グローブインタフェースの中で、ジェスチャインタフェースと仮想物体直接操作インタフェースに注目し、これらのインタフェースにおける応答遅延の大きさと操作性の関連の調査を目的とする。

以下では、2.2 節でジェスチャインタフェースについて、2.3 節で仮想物体直接操作インタフェースについて、それぞれ述べる。

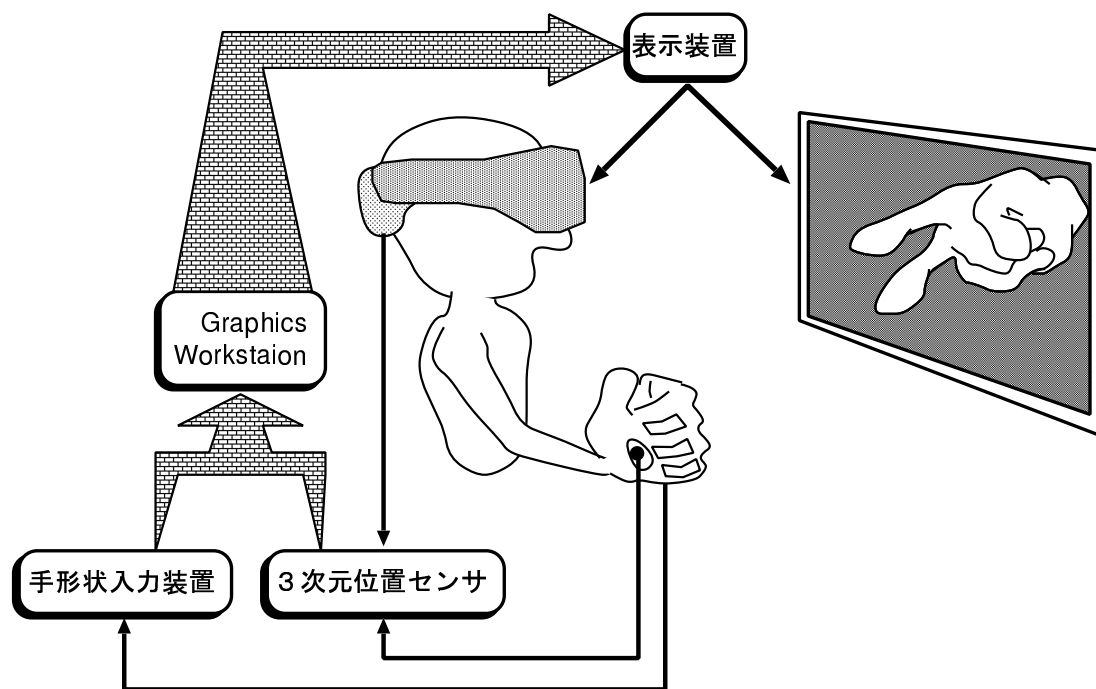


図 1 グローブインタフェースの構成

## 2.2 ジェスチャインタフェース

ジェスチャインタフェースは、ユーザがジェスチャを用いて計算機と対話することができるインタフェースである。ジェスチャインタフェースは、人と人のコミュニケーションに日常的に用いられるジェスチャによる対話を、計算機との対話においても実現しようとするものであり、自然で分かりやすいシステムを提供するものとして期待されている。

ジェスチャインタフェースの一種としては、ユーザが仮想空間内の動物との対話を行う環境である ALIVE が挙げられる [15]。ALIVE では、大画面の前に立ったユーザが、画面に映る自身と CG の犬の映像を観察しながら、その犬に対してジェスチャでいくつかの指示が行える。このような対話システムでは、ユーザのジェスチャの認識や、ジェスチャに基づいてシステムが応答する方針の決定などに時間を要するため、ユーザの入力から計算機の応答までに大きな応答遅延が起きやすい。しかし、このような対話システムでは、ユーザは自身のジェスチャを

認識する計算機を自己の対峙者とみなし、システムの応答時刻を予測できないために、計算機の応答に感じる遅延が他のシステムとは異なる可能性がある。そこで3章ではジェスチャインタフェースにおける応答遅延と操作性の関連について検討する。

## 2.3 仮想物体直接操作インタフェース

仮想物体直接操作インタフェースは、ユーザが手を3次元的に動かして、仮想物体を直接操作することのできるインタフェースである。仮想物体直接操作インタフェースでは、手を用いた操作の正確さや自由度の高さを活かした3次元操作が可能である。特に、仮想物体を操作する際の入力装置として広く用いられている、3次元計測装置と幾つかのボタンから成る3次元マウスを使用する場合に比べ、より直感的で直接的な空間指示が可能となると考えられる。

仮想物体直接操作インタフェースの例としては、手を用いて自由曲面の生成や変形を行うシステムが挙げられる [9, 10, 11]。これらのシステムでは、手形状に対応する仮想物体の形状の計算や、その表示などに時間を要するため、ユーザの入力から計算機の応答までに大きな応答遅延が起きやすい。このため仮想物体直接操作インタフェースに関しては、遅延による影響を緩和する操作補助手法などについて検討する必要がある。そこで4章では仮想物体直接操作インタフェースにおける応答遅延と操作性の関連について検討する。

### 3. ジェスチャによる実時間対話における応答遅延の主観評価

#### 3.1 ジェスチャインタフェースと応答遅延

ジェスチャインタフェースでは、ジェスチャの認識や CG の提示などに時間を要するため、ユーザの入力から計算機の応答までに大きな遅延が起きやすい。このようにシステムに遅延が存在する場合は、一般に操作性が悪化すると考えられている。そのため、これまで遅延に関して幾つかの研究がなされてきた。

例えば、MacKenzie らは 2 次元のマウスカーソルを目標の領域に移動するというタスクについて考えたところ 8.33, 25, 75, 225(msec) の 4 種類の遅延で 225(msec) のときにエラー率が高くなる、という被験者実験を行っている [13]。また、Card らは、2 つのビリヤードの玉を CG で提示して、運動している玉が静止している玉に衝突した時刻を 0 とし、その時刻 0 からある遅延を与えた後に静止していた玉が動き出すといった一連のアニメーションを被験者に見せる実験を行った。その結果、被験者の評価は、100(msec) 以内の遅延であれば、衝突と静止していた玉が動き出すという 2 つの事象に因果関係を感じるという結果を得ている [14]。

これらの実験は、元々遅延が全くないことが自然である事象に対して、あえて遅延を与えたものである。しかしながら、計算機を一つの人格を持っている自己の対峙者とみなす場合は、ユーザは計算機との間のインタラクションに予め遅延を想定する可能性がある。また、遅延に気付いてもその遅延を許容でき、インタフェースの操作感覚に影響を与えない可能性もある。そこで、本章ではその遅延がどの程度の量まで許容可能であるか、つまりユーザが許容できる最大の遅延量 ( $d_{max}$ ) を調査する。また、ユーザが遅延を知覚できない場合は、遅延は操作感覚に影響を与えない。そのため、ユーザがどの程度の遅延であれば知覚可能であるか、つまり知覚できる最小の遅延量 ( $d_{min}$ ) も調査する。これら  $d_{max}$  や  $d_{min}$  が分かれば、構築中のシステムがどのような状態にあるかを知ることができる。

例えば、図 2 において、応答遅延の大きさ ( $t$ ) が  $0 \leq d < d_{max}$  の範囲にあるときは、このシステムはジェスチャの認識処理などを追加する余裕がある。また、



図 2 応答遅延に対するシステムの評価

$t$  が  $d_{max} \leq d \leq d_{min}$  の範囲にあるときは、システムはこの範囲で応答するように設計すべきである  $t$  が  $d < d_{min}$  の範囲にあるときは、システムは処理を削減すべきであることがいえる。

以下、実験のシステムの構成について 3.2 節で述べる。そして、 $d_{max}$  を調査するための主観評価実験について 3.3 節で述べ、 $d_{min}$  を調査する為の主観評価実験について 3.4 節で述べる。

### 3.2 実験システムの構成と特徴

本章で行う実験は、ユーザに計算機を対峙者とみなしている意識が存在する点が従来研究と大きく異なる。そのため、ジェスチャインタフェースにおいて従来研究と最も差の出にくい場合、つまり、応答に即応性が求められる場合を設定し、ユーザが計算機を自己の対峙者とみなす場合、これまでと異なる結果となるかを調査する。このような要求を満たすために、本章では、ユーザと計算機がジャンケンを行うシステム（ジャンケンシステム）を構築し、実験に用いた。実験にジャンケンを採用した理由はジャンケンに以下の特徴があるからである。

- インタクションの手段としてジェスチャが用いられる
- 「対戦者」である計算機を自然にユーザの対峙者とみなすことが可能である
- 入力と応答が同時であると期待され、高い即応性が要求される

構築した実験システムの構成を図 3 に示す。被験者は、図 3 に示す平面  $z = 0$  より手前で動作を開始し、動作を終えた時点で拳が平面  $z = 0$  を越えるように

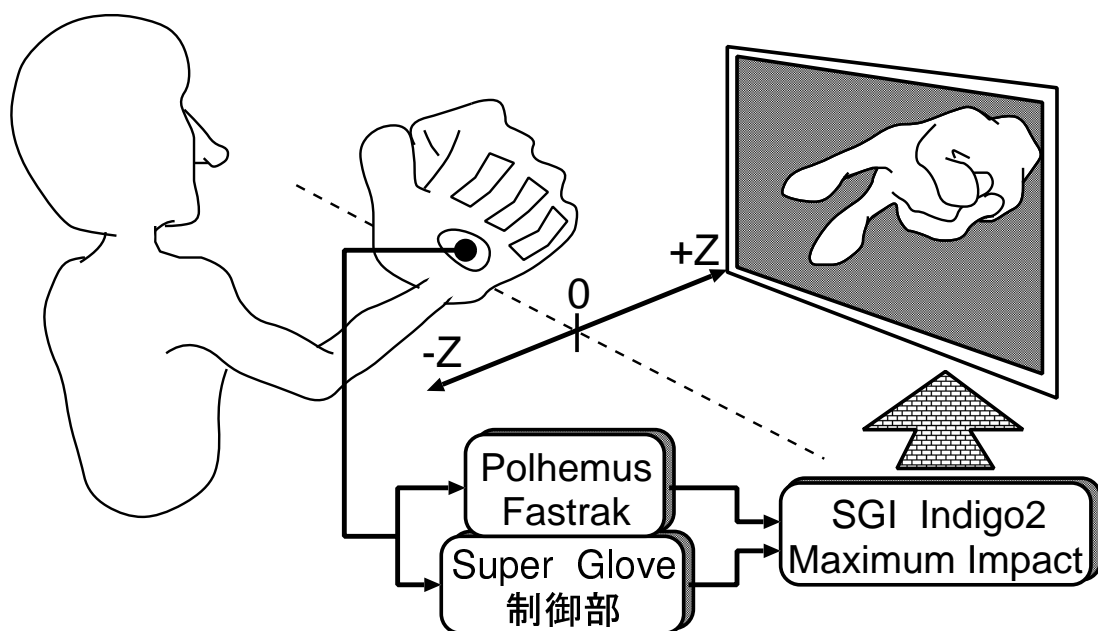


図 3 実験システムの構成

ジャンケンを行う。実験システムは、拳が平面  $z = 0$  を越えた時点を時刻  $t = 0$  として、グー、チョキ、パーの 3 種類の中からランダムに選んだ手形状を時間  $d$  だけ遅延した時刻  $t = d$  に CG により提示する。このとき手形状は補間アニメーションを伴って変化する。

以下の 2 つの実験では、遅延  $d$  をさまざまに変化させた場合に被験者がその遅延をどう感じるかを主観評価させ、その評価結果から  $d_{max}$  と  $d_{min}$  を求める。

本実験システムでは、計算機に SGI 社 Indigo<sup>2</sup> Maximum Impact を用い、手の位置計測に 3 次元位置センサ Polhemus 社 3SPACE Fastrak を、手形状の認識に手形状入力装置 日商エレクトロニクス社 Super Glove をそれぞれ用いた。

### 3.3 操作者が許容可能な最大遅延量の評価実験

本実験（実験 1-1）の目的は、ジャンケンシステムにおいて、ユーザが許容可能な最大遅延量  $d_{max}$  を求めることである。

### 3.3.1 実験の設定

本節における実験の設定は以下の通りである.

- (1) 1.0 秒を許容できる最大の遅延量と仮定し, 遅延を 0 秒から 1.0 秒まで 16 段階に変化させる. 具体的には遅延  $d_i(0 \leq i \leq 15)$  を次のように設定した.

$$d_i(\text{秒}) = \begin{cases} 0.05 \times i & (i \leq 10) \\ 0.1 \times (i - 10) + 0.5 & (11 \leq i) \end{cases}$$

- (2)  $i$  を 0 ~ 15 でランダムに変化させ, (3) を繰り返す. 以下,  $k$  回目の提示遅延量を  $d(k)$  で表す.

- (3) ジャンケンシステムの遅延を  $d(k)$  に設定し被験者に対戦させる.

この設定で, 計算機の手形状のアニメーションは 5 フレーム (約 0.2 秒) とし, 本学の学生 8 名を被験者とし, 実験を行った. また, 被験者にはジャンケンをした際に感じた遅延を表 1 の 7 段階の評価で回答させた. この際, 被験者は評価を下すまで同一の遅延  $d(k)$  で何度でもジャンケンを行える.

### 3.3.2 結果と考察

遅延時間  $d_i$  に対する平均主観評価値とその主観評価値の分散を図 4 に示す. 図 4 において, 折れ線グラフは被験者全員の主観表価値の平均を示しており, 棒グラフは被験者全員の主観表価値の分散を示している. 表 1 の 7 段階評価におい

表 1 実験 1-1 における 7 段階主観評価の基準

1	遅延を全く感じない
2	遅延をほとんど感じない
3	遅延を感じるが気にならない
4	どちらでもない
5	遅延を感じ, やや気になる
6	遅延を感じ, かなり気になる
7	遅延を感じ, 非常に気になる



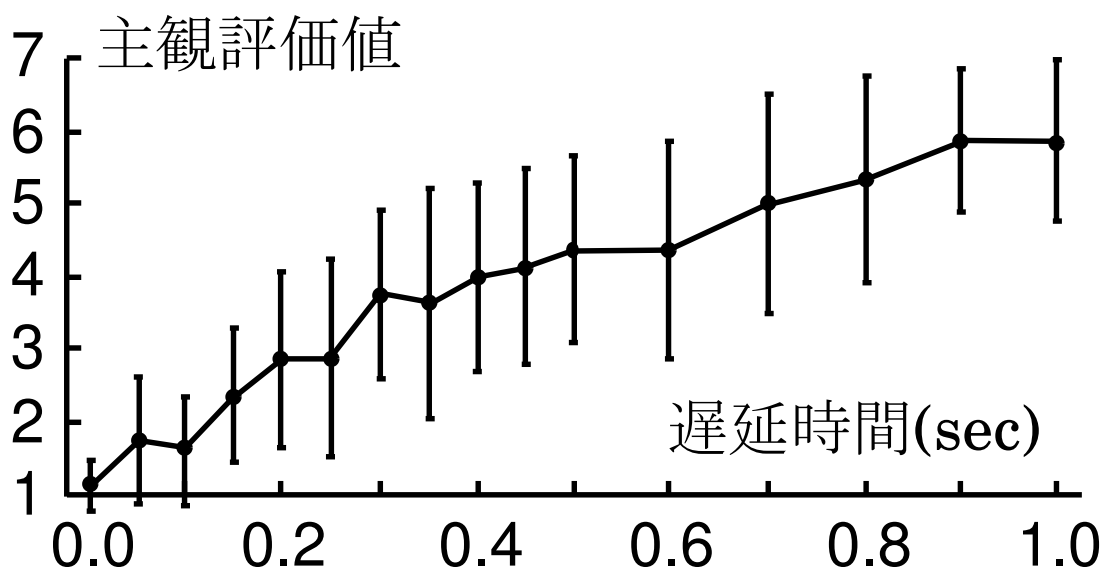


図 4 実験 1-1 の結果

て、許容できる最大の遅延量  $d_{max}$  は、平均主観評価値が 4 程度のときの遅延量と考えられる。よって本実験の場合、図 4 より個人差が大きいものの、平均的に  $d_{max} \simeq 0.4$  (秒) といえる。

なお、図 4 より、主観評価値が完全には単調増加でない傾向がある。この原因としては、与えた  $d(k)$  が 1 系列のみで、直前の遅延に影響を受けたためと考えられる。つまり、 $d(k-1)$  が小さい場合  $d(k)$  の遅延は感じやすく、 $d(k-1)$  が大きい場合  $d(k)$  の遅延は感じにくい、という傾向があったためであると考えられる。また、本実験における計算機の手形状のアニメーション (5 フレーム=約 0.2 秒) に対して、遅延を感じると報告する被験者がいた。

### 3.4 操作者が知覚可能な最小遅延量の評価実験

本実験 (実験 1-2) の目的は、ジャンケンシステムにおいて、ユーザが知覚可能な最小遅延量  $d_{min}$  を求めることである。

### 3.4.1 実験の設定

本節における実験の設定は以下の通りである.

- (1) 実験 1-1 で求めた最大許容量  $d_{max}$  を考慮し, 与える遅延の幅を 0 秒から 0.38 秒まで 20 段階に変化させる. 具体的には遅延  $d_i (0 \leq i \leq 19)$  を  $d_i(\text{秒}) = 0.02 \times i$  と設定した.
- (2) 各  $d_i$  が 10 回ずつ出現するようにランダムな順で遅延を変化させ, (3) を 200 回繰り返す. 以下,  $k$  回目の提示遅延量を  $d(k)$  で表す.
- (3) ジャンケンシステムの遅延を  $d(k)$  に設定し, 被験者に対戦させる.

なお, 実験 1-1 では計算機の手形状のアニメーションに時間が掛かりすぎて遅延を感じると報告した被験者がいたため, 本実験のアニメーションは 2 フレーム (約 0.08 秒) とした. 被験者は本学の学生 13 名であり, このうち 6 名は実験 1 の経験者であった. また, 本実験では, 被験者には設定した遅延を表 2 に示す 2 段階の評価で回答させた. この際, 被験者は実験 1-1 と同様に, 評価を下すまで同一の遅延  $d(k)$  で何度でもジャンケンを行える.

### 3.4.2 結果と考察

遅延時間  $d$  に対する知覚率の全被験者の平均値の変化を図 5 に示す. ここでいう知覚率とは, 遅延  $d$  に対して, 遅延を感じたという回答の割合である. 遅延がおおよそ  $d = 0.08$  (秒) より小さい場合, 遅延の知覚率は  $d = 0$  の場合とほぼ等しく,  $d > 0.08$  では急激に知覚率が増加している. このことから, 実験に用いたジャンケンシステムの場合, 知覚できる最小の遅延量  $d_{min}$  は  $d_{min} \simeq 0.08$  (秒) であるといえる.

表 2 実験 1-2 における 2 段階主観評価の基準

0	遅延を感じない
1	遅延を感じる

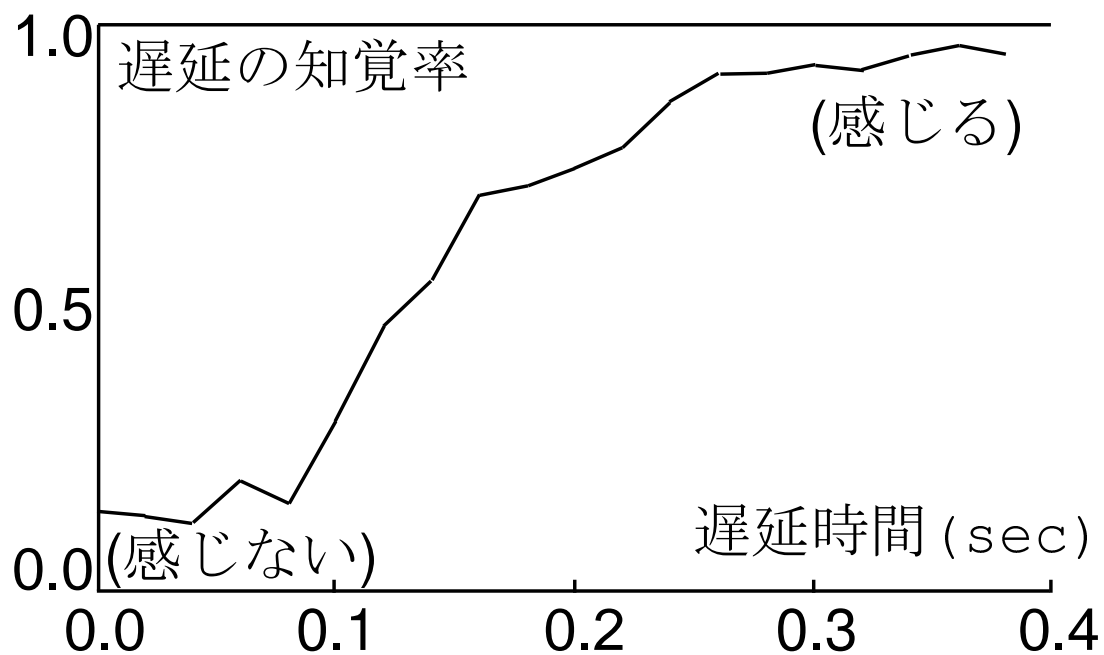


図 5 実験 1-2 の結果

なお、実験 2 では計算機の手のアニメーションに遅延を感じる被験者はいなかった。また、従来の Card らのビリヤードの玉の衝突の研究 [14] と比較すると、まず、彼らの結果によると、100(msec) 以内の遅延であれば衝突と静止していた玉が動き出すという 2 つの事象に因果関係を感じるという結果を得ている。そして、本実験により求められた  $d_{min} \simeq 0.08$  (秒) という結果より、Card らの実験とおおよそ同様な結果が得られることが分かった。つまり、予め遅延を予想していても、遅延を予想しない場合と同じように遅延を感じると考えられる。

### 3.5 実験 1 のまとめ

実験 1-1 より、ユーザが計算機を自己の対峙者とみなすようなジェスチャインタフェースに高い即応性が要求される場合において、ユーザが許容できる最大の遅延量  $d_{max}$  が、平均的に  $d_{max} \simeq 0.4$  (秒) であることが分かった。

また、実験 1-2 より、ユーザが計算機を自己の対峙者とみなすようなジェスチャインタフェースに高い即応性が要求される場合において、知覚できる最小の遅延

量  $d_{min}$  が,  $d_{min} \simeq 0.08$  (秒) であることが分かった. この結果は, 従来 of Card らの実験とおおよそ同様な結果が得られており, 予め遅延を予想していても, 遅延を予想しない場合と同じように遅延を感じるということが明らかとなった.

## 4. 仮想物体操作における応答遅延が操作性に与える影響の評価

### 4.1 仮想物体直接操作インタフェースと応答遅延

仮想物体直接操作インタフェースのインタラクション特性を左右する要因としては次のようなものがあげられる [12, 16].

- 表示装置の性能に依存する視覚的解像度
- 物体の挙動計算の忠実度や、仮想環境の写実性などのシステムデザイン
- 計測装置の精度や仮想空間の提示パラメータの正確さに依存する視覚・位置覚の静的整合性
- 計測、通信、計算処理および描画などによって起こる遅延の量に依存する視覚・位置覚の動的整合性

本論文では、応答遅延に注目しており、これらの要因の中では動的整合性に相当する。市販の入出力装置の精度や一般的なシステムデザインが用途によっては実用レベルにあるのに対し、応答遅延は仮想環境の描画や、遠隔協調作業などに伴う通信遅延などにより容易に増加する。従って、応答遅延は単純な人工現実感システムであっても致命的な操作性の劣化を招く場合があり、その影響が大きいために従来にも仮想環境における遅延の調査が、幾つかなされてきた。木島らは、応答遅延がポインティング操作に与える影響を調査し [12]、佐藤らは、運動視表示による仮想空間操作の影響を調査している [17]。本章では、仮想物体の配置操作に関して、

1. 応答遅延の増加に伴う操作性の劣化がどの程度であるか
2. 様々な視覚効果を与えた場合に、応答遅延による操作性の劣化が抑制できるかどうか

の2点について配置対象が静止している場合と運動している場合のそれぞれについて実験的に検討したので報告する。

以下、4.2節で実験システムの構成と特徴を述べる。次に、4.3節で応答遅延と操作性の関連を評価する実験（実験 2-1）について述べ、さらに、4.4節で、応答遅延によって操作性が劣化する場合に、その劣化を抑制する手法を検討するために行なった実験（実験 2-1）について順に述べる。

## 4.2 実験システムの構成と特徴

実験のために仮想物体を直接操作できる没入型のグローブインタフェースを構築した。構築した実験システムの構成を図6に示す。図6において手形状入力装置に取り付けた3次元位置センサのレーザから得られる現実の手の位置情報に基づいて、CGによる仮想の手を現実の手と重なるように提示する。これは、仮想物体の操作をより直接的にするためである。CGによる仮想の手を現実の手と重なるように提示するために表示装置としては、透過型の Head Mounted Display (HMD) を用いた。この際現実の手と仮想の手の静的整合性（位置ずれ）には各被験者によって異なり、目測で最大2cm程度である。被験者はタスクを遂行する際、拳を握ることによって手から一定の範囲内にある仮想物体を把持できる。また、把持した仮想物体は手を開くことによって解放できる。なお、実験システムでは、計算機には SGI 社 Indigo<sup>2</sup> Maximum Impact を、手や頭部の位置計測に3次元位置センサ Polhemus 社 3SPACE Fastrak を、手形状の認識に手形状入力装置 日商エレクトロニクス社 SuperGlove を、さらに、表示装置（HMD）として OLYMPUS 社 Mediamask をそれぞれ用いた。

なお、本実験では、仮想環境における操作の中でも、もっとも基本的なものの一つとして、仮想物体の把持操作をタスクとして取り上げており、仮想の手が現実の手に遅れて表示されることによる影響のみを純粹に見るために、手に関する動作の計測のみをバッファリングして、遅延を与える。すなわち、見回し遅延や、描画更新間隔は変化させていない。

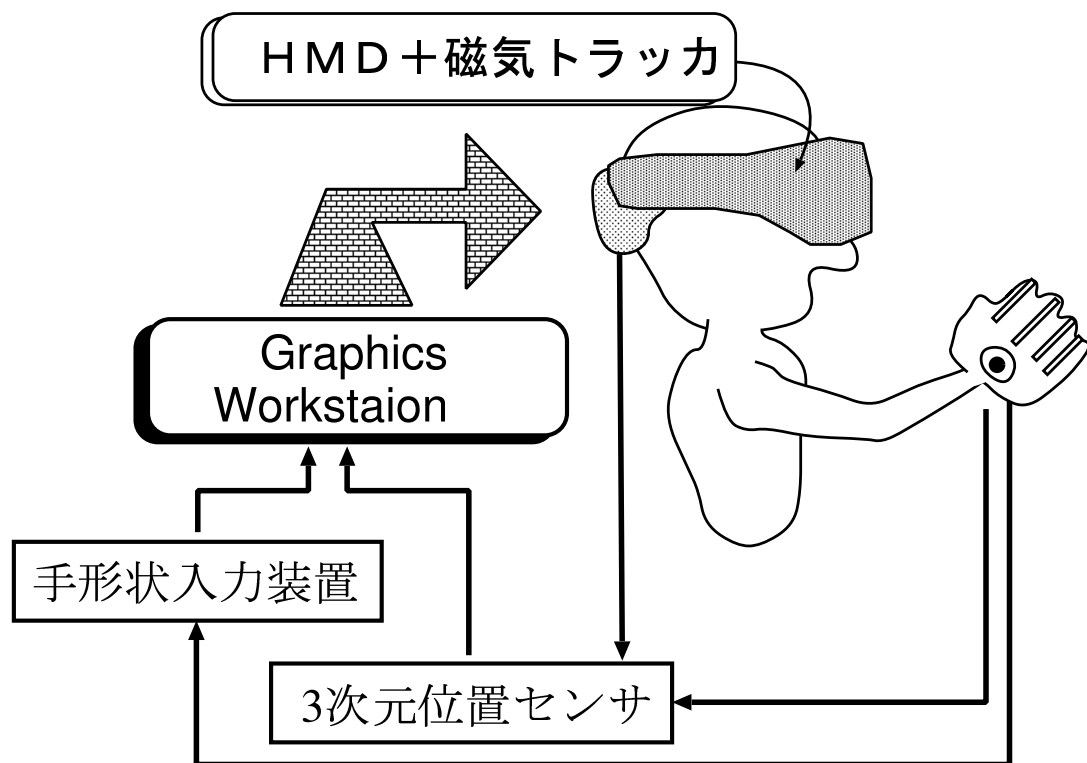


図 6 実験システムの構成

### 4.3 応答遅延と操作性の関連を評価する実験

本節では、手の動作計測に応答遅延があるグローブインタフェースにおいて、仮想物体を操作する際の、応答遅延と操作性の関連について調査した実験（実験 2-1）について述べる。ここでいう手の動作計測とは、手の 3次元位置と姿勢および、指の曲がり角である手形状の総称である。

#### 4.3.1 実験の設定

ここでは、実験 2-1 の設定について述べる。実験 2-1 では、直径 6cm の赤い球を把持し、1 辺 15cm の立方体（目標領域）の中に、球を入れて放すというタスクを設定した。被験者に提示される画面の例を図 7 に示す。左側に見えるのが目標領域である緑白色の立方体であり、右側に見えるのが青色の仮想の手で、真ん中

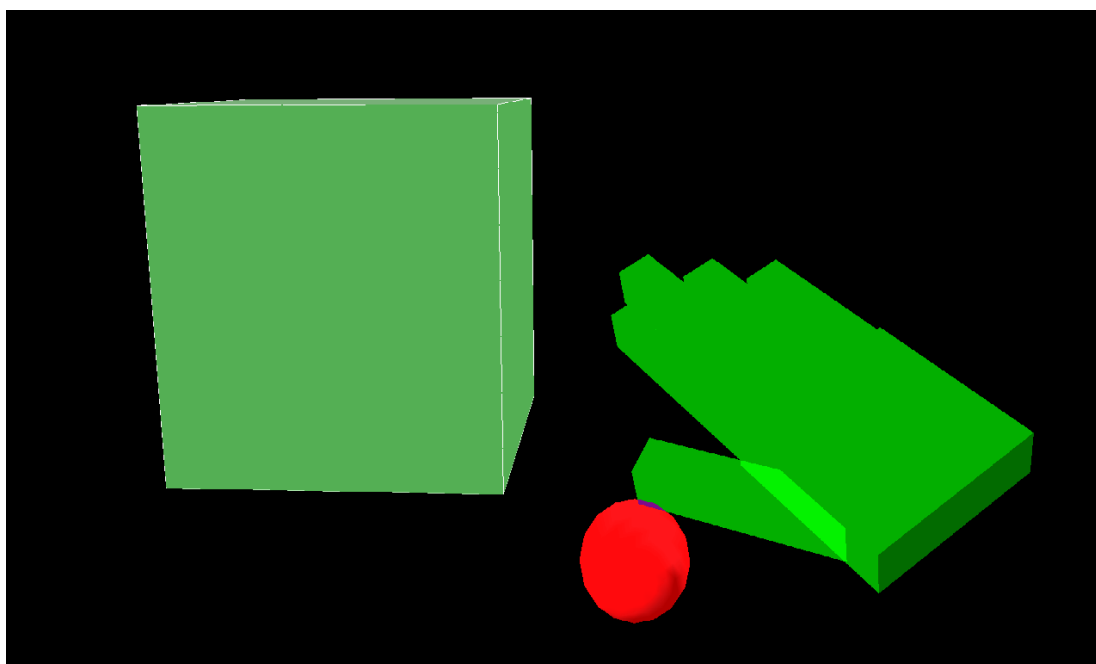


図 7 提示画面

に見えるのが被験者が操作する対象である赤色の球である。なお、実験は被験者がタスク遂行において視覚的に現実の手に頼ることのないよう現実の世界が全く見えない完全な没入型のインタフェースとした。これは、遅延のない現実の手が見えることにより、被験者がタスクを遂行する際に現実の手に頼ってしまい、現実の手の動作に対して仮想の手が遅れることによる影響が減少すると考えたからである。また、タスクの開始と終了は以下のように定義する。

**タスクの開始** 球を初めて握った瞬間

**タスクの終了** 球の全体が目標領域の内部にある間に、球を放した瞬間

各仮想物体の位置関係を図 8 に示す。球は、各試行の初期状態で一定の位置（図 8 に示す位置）に出現する。目標領域の初期位置は球が出現する位置を中心とする  $xy$  平面に平行な直径 40cm の円の円周  $C$  を 8 等分した 8 箇所いずれかである。また、操作を補助するために次の 3 種類のビジュアルフィードバック（VFB）を提示する。



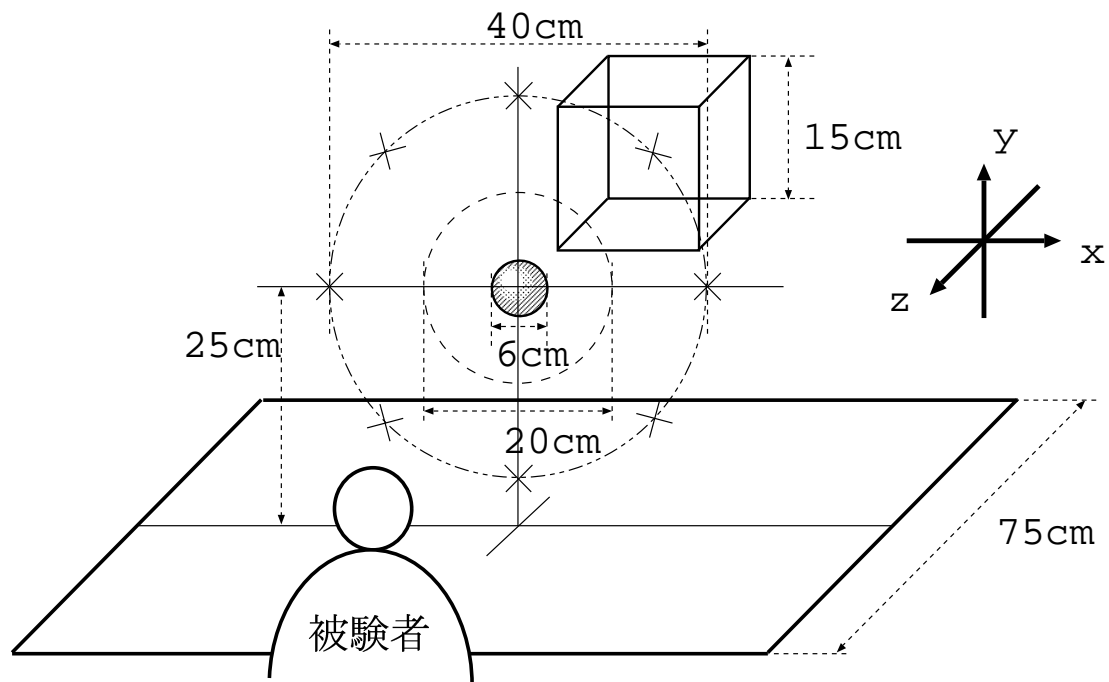


図 8 仮想物体の位置関係

- 手が球を把持できる範囲にあり球を把持していない時，球の周りに白のワイヤフレームの立方体を表示する．
- 本来赤い球の色を，把持している間は黄色で表示する．
- 球の全体が目標領域の内部にある時には，目標領域を白のワイヤフレームのみで表示する．

また，与える遅延量は具体的には次のように設定した．

1. 遅延の幅を 0 frame から 27 frame まで 10 段階に変化させる．具体的には遅延  $d_i (0 \leq i \leq 9)$  を  $d_i = 3 \times i$  (frame) と設定した．(ただし，1frame  $\simeq$  30msec.)
2. 10 種類の各  $d_i$  が，円周 C の 8 箇所にも 1 回ずつ出現するように，計 80 タスクについてランダムな順で遅延を与える．

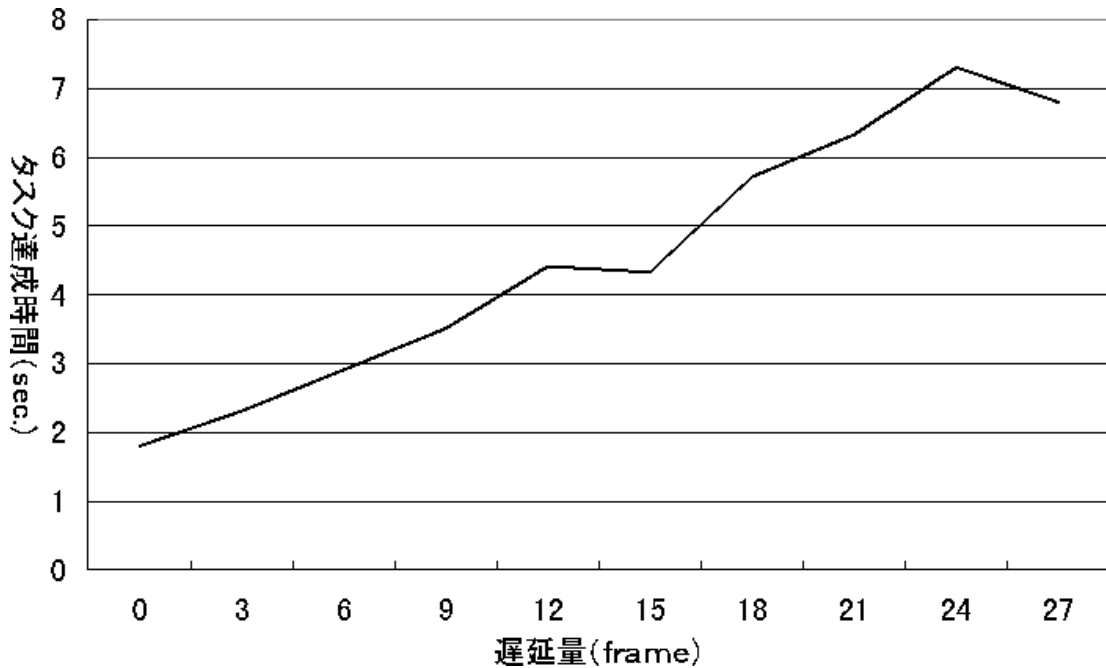


図 9 遅延—平均タスク達成時間 (STAY)

なお、与える遅延に関わらず、手形状認識や位置計測に要する時間は約 15msec. であった。また、目標領域に関して条件を設け、実験は目標領域が静止している場合 (STAY) と、目標領域が円周 C 上を被験者から見て時計回りに 10cm/sec. で運動している場合 (MOVE) の 2 種類の実験を行なった。即ち、被験者は 1 人につき合計 160 回のタスクを遂行する。

仮想物体操作の未経験者から熟練者までの本学の右利きの学生 12 名を被験者として、以上のような条件でタスクを遂行させ、各遅延量に対するタスクの開始からタスクの終了までの時間 (タスク達成時間) を計測した。被験者にはできるだけ早くかつ正確にタスクを達成するように指示した。また、実験中は一度タスクを開始すると、そのタスクを終了するまで休憩は許さないが、タスクとタスクの間は休憩を許した。なお、学習による実験データのバラツキを平滑化するため、被験者の半数は STAY (実験 2-1-1) を先に行ない、残りの半数は MOVE (実験 2-1-2) を先に行なった。次にそれぞれの実験結果と考察について述べる。

#### 4.3.2 結果と考察

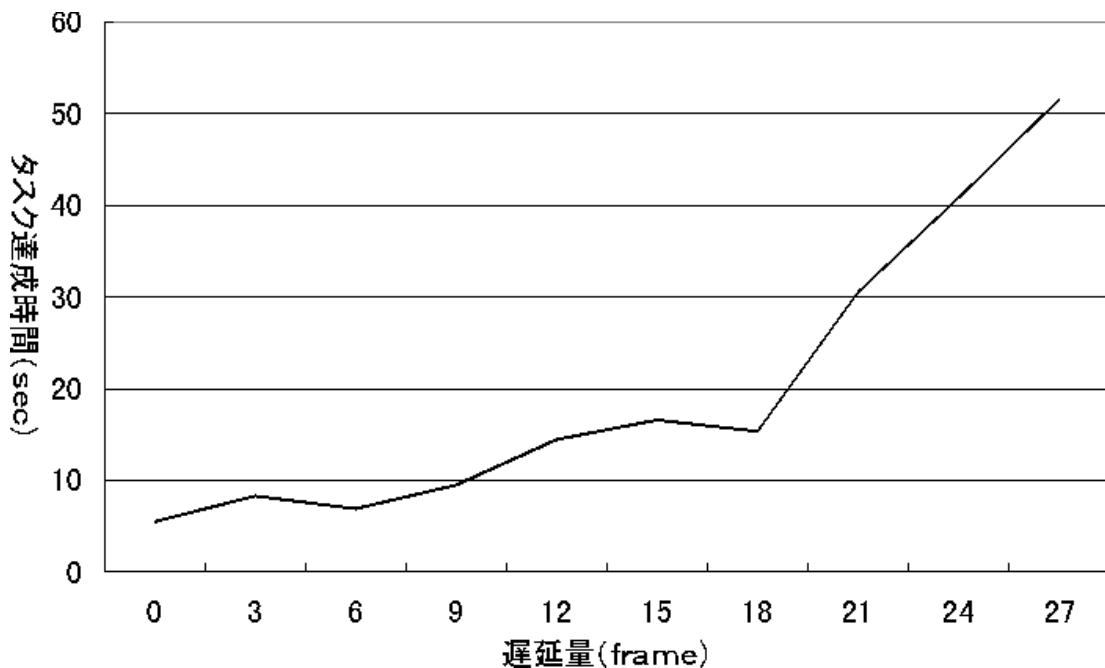


図 10 遅延—平均タスク達成時間 (MOVE)

まず、目標領域が静止している場合 (STAY) の遅延量  $d$  に対するタスク達成時間の全被験者の平均値の変化を図 9 に示す。タスク達成時間は与えた遅延量に対してほぼ比例している。これは、球の把持や解放の操作の確認が遅延量  $d$  に比例した時間だけ余分に掛かるためであると考えられる。一般に開ループ運動 (視覚的に提示された目標位置まで素早く手を動かす運動) に関しては遅延量の影響は少なく、閉ループ運動 (目標位置の近辺で手先位置を修正し正しくポインティングを完了する運動) に関して遅延量の影響が大きくなっていると指摘されている [12]。本実験の場合、目標領域に球を合わせる作業が閉ループ運動であり、被験者のタスクの遂行を観察する限り、この作業の際に遅延に比例して大きく時間が掛かっていると考えられる。

また、目標領域が移動している場合 (MOVE) の遅延時間  $d$  に対するタスク達成時間の全被験者の平均値の変化を図 10 に示す。

図 10 では遅延が 18frame を越えると急激に遅延の影響を受けており、目標領域が運動している場合は、タスク達成時間は与えた遅延量に対して比例していな

い。これは、仮想の手の位置の予測に加えて、目標領域の将来の位置を予測しなければタスクが達成できないためであると考え。具体的には、被験者のタスクの遂行を観察する限り、目標領域が静止している場合と同様に開ループ運動に関しては遅延量の影響は少ないと考える。また、閉ループ運動に関しては図 10 より、目標領域が静止している場合（図 9）と比較して、目標領域が運動しているため遅延量の影響が大きくなっているのであると考え。

以上より、手の動作計測に遅延があるグローブインタフェースにおいて、遅延の増加と共に仮想物体の直接操作の操作効率は劣化し、その傾向は操作対象が運動している場合、より顕著になることが確認された。

#### 4.4 応答遅延による操作性劣化の抑制手法に関する実験

4.3 節では、グローブインタフェースにおいて、手の動作計測に対する応答遅延が操作性を劣化させることを確認した。そこで本節では、手の動作計測に対する応答遅延のあるグローブインタフェースにおいて、視覚効果が操作性に与える影響について調査した実験（実験 2-2）について述べる。

##### 4.4.1 実験の設定

視覚効果による影響を調査するために、実験 2-1 とは次の 2 項目について条件を変更し検討した。

- 手の可視状態
- ビジュアルフィードバック（VFB）

本実験では、HMD を透過モードや没入型のモードに切り替えたり、仮想の手を描画するかどうかといった切り替えを施したりした。上に挙げた手の可視状態とは、HMD の切り替えや、仮想の手の描画の切り替えを組み合わせた結果得られた以下の 3 つの状態のことである。

- 仮想の手のみが見える（VR）

- 仮想の手と現実の手の両方が見える (AR)
- 現実の手のみが見える (MR)

また VFB は, 4.3 節で述べた, 3 種類の VFB を与える場合と与えない場合の 2 つの状態を設定した.

表 3 与えた条件

条件名	VFB	手の可視性
VRV	あり	仮想の手
VRN	なし	
ARV	あり	仮想の手と現実の手
ARN	なし	
MRV	あり	現実の手
MRN	なし	

これらを変更した理由は次の通りである. まず, 実際の手動きには応答遅延は存在しない. そのため手の可視状態を変化させることにより実際の手が見えた場合, 与えた遅延による影響が軽減し, タスクの処理効率が向上するとの考慮による. また, VFB に関しては, 一般的に状態によって, 視覚効果を切り替える手法は操作遂行の補助をしており有効であると考えられているが, それが遅延のある環境でも本当に有効であるかどうかを調べるためである. 本実験では, 以上の 3 種類の可視状態と VFB を与えるかどうかの 2 つの状態を組み合わせることにより, 表 3 にある 6 つの視覚効果に関する条件を設定した.

また, VFB の有無を切り替えるようにしたことに伴い, タスクの開始の定義を変更した. すなわち, 球を最初に把持する際の VFB の影響も見るために, 球の中心から半径 10cm の範囲に手が初めて入った瞬間をタスクの開始と再定義した. さらに, 被験者の疲労を考慮し, 与えた遅延は, 0, 9, 18 frame (各々,  $d_0$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ とする) の 3 種類に限定した. また, タスクの内容は以下のように設定した.

- 実験 1 と同様，3 種類の各  $d_i$  が，円周 C 上の 8 箇所に 1 回ずつ出現するように，計 24 タスクについてランダムな順で遅延を与える。(これを 1 セットとする.)
- まず VFB がある状態で 1 セットを，さらに VFB がない状態で 1 セットの計 2 セットを行なう。(これを 1 パターンとする.)
- 手の“可視性” 3 種類と“STAY と MOVE” の 2 種類で計 6 パターンの実験を行なう.

すなわち，各被験者は 1 パターンにつき 48 回のタスクを 6 パターン，合計 288 回のタスクを遂行する．なお，実験中，以下の指標を記録した．

[タスク達成時間] タスクの開始からタスクの終了までの時間．

[手の移動距離] 1 タスクの間で物体を把持している間の手の移動距離．

[物体の把持回数] 1 タスクの間での物体の把持回数．

被験者は，実験 1 の経験者から無作為に選んだ 6 名である．これらの被験者は実験 2-1 によりタスクに関してある程度学習していると考えるが，パターンの順番による影響を避けるため，念のため，被験者毎に全て異なるパターンの順序で実験を行なった．また，被験者には表 4 の 4 項目について，7 段階で主観評価をさせた．次に各々の実験結果及び評価結果について述べる．

表 4 主観評価

評価項目	評価の基準	
	1	7
嗜好	嫌い	好き
操作性	使いにくい	使いやすい
直感性	分かりにくい	分かりやすい
疲労度	疲れやすい	疲れにくい

#### 4.4.2 結果と考察

実験 2-2 の定量評価の各指標について，全被験者の平均値を示したグラフを図 11 から図 16 に示す．

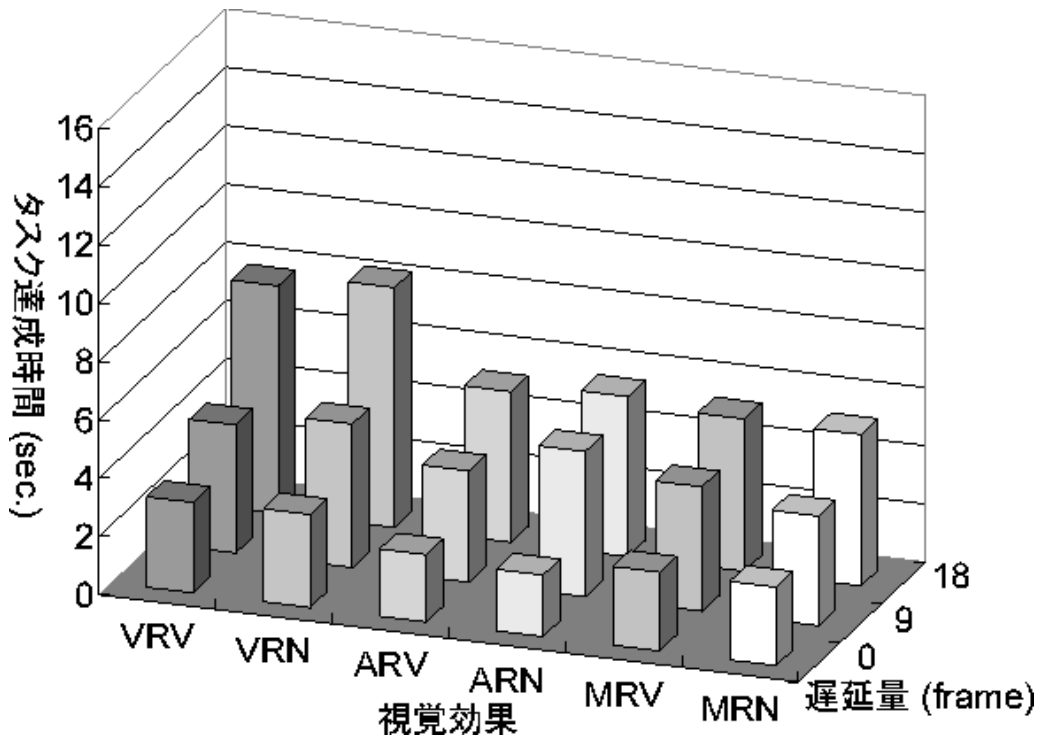


図 11 遅延—平均タスク達成時間 (STAY)

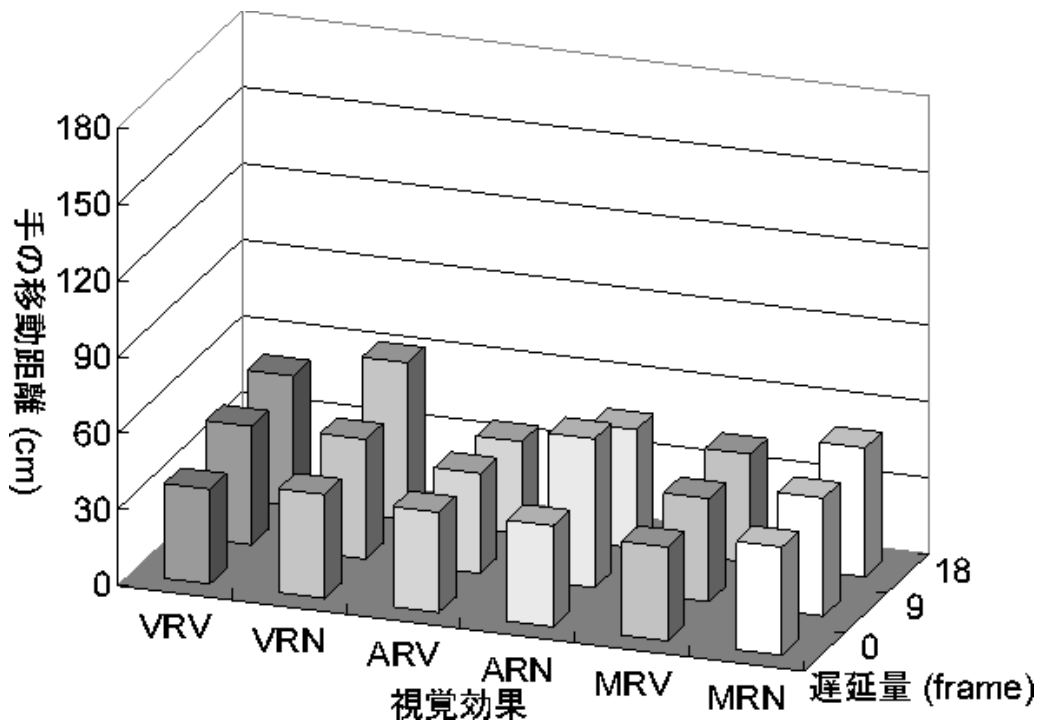


図 12 遅延—手の平均移動距離 (STAY)



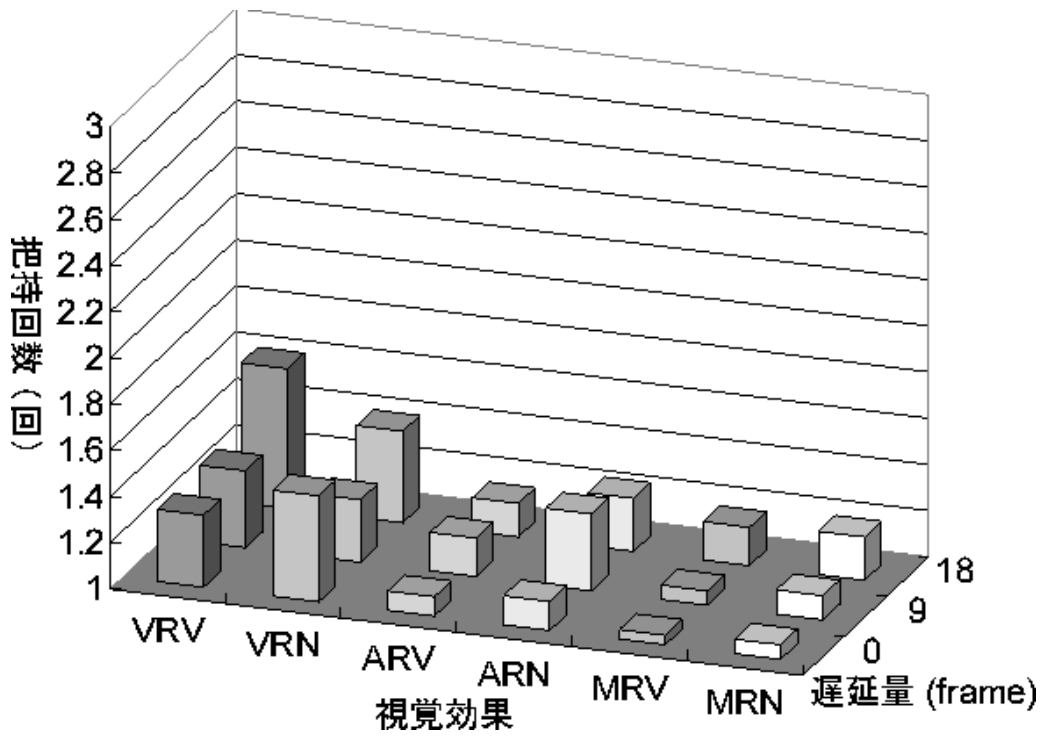


図 13 遅延—物体の平均把持回数 (STAY)

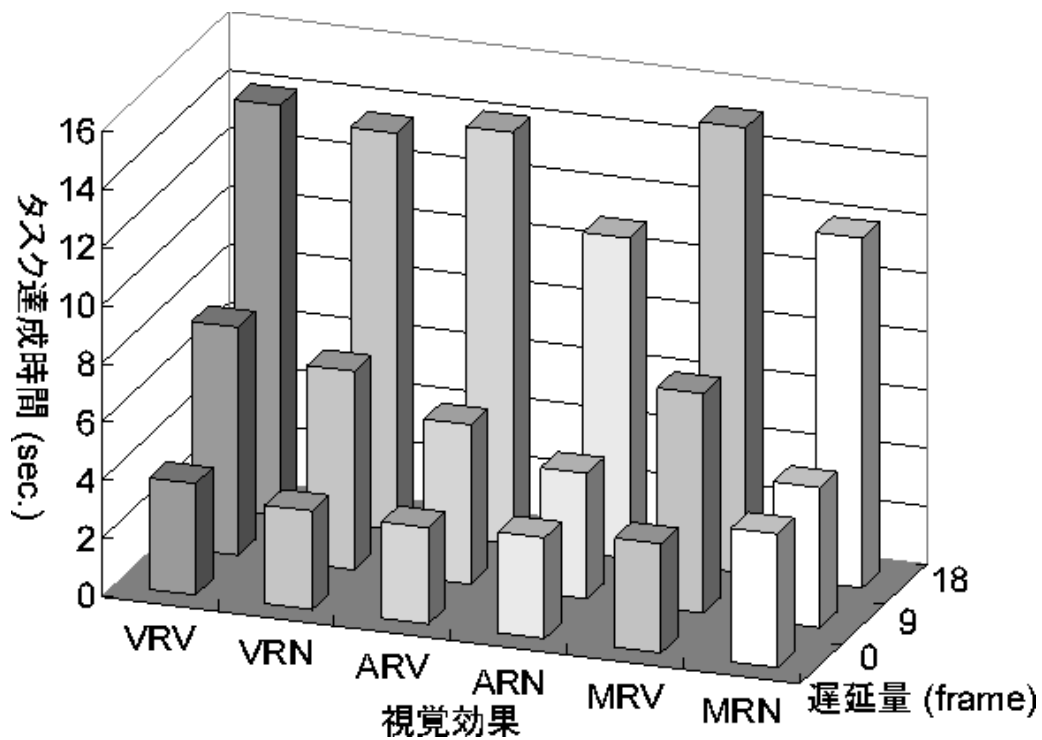


図 14 遅延—平均タスク達成時間 (MOVE)

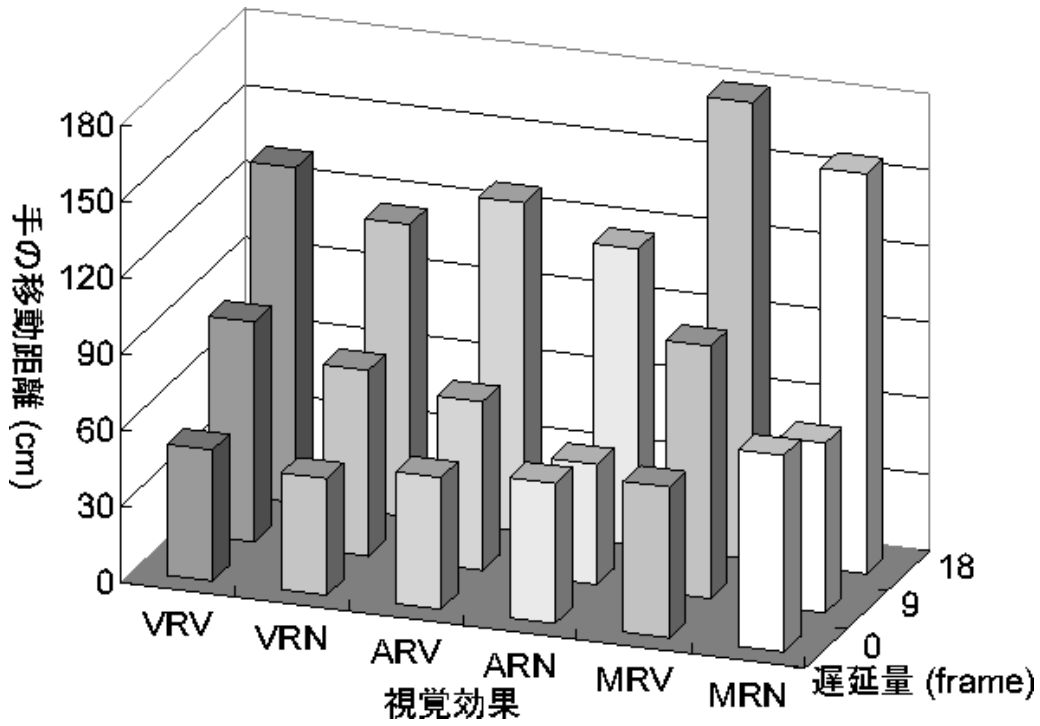


図 15 遅延一手の平均移動距離 (MOVE)

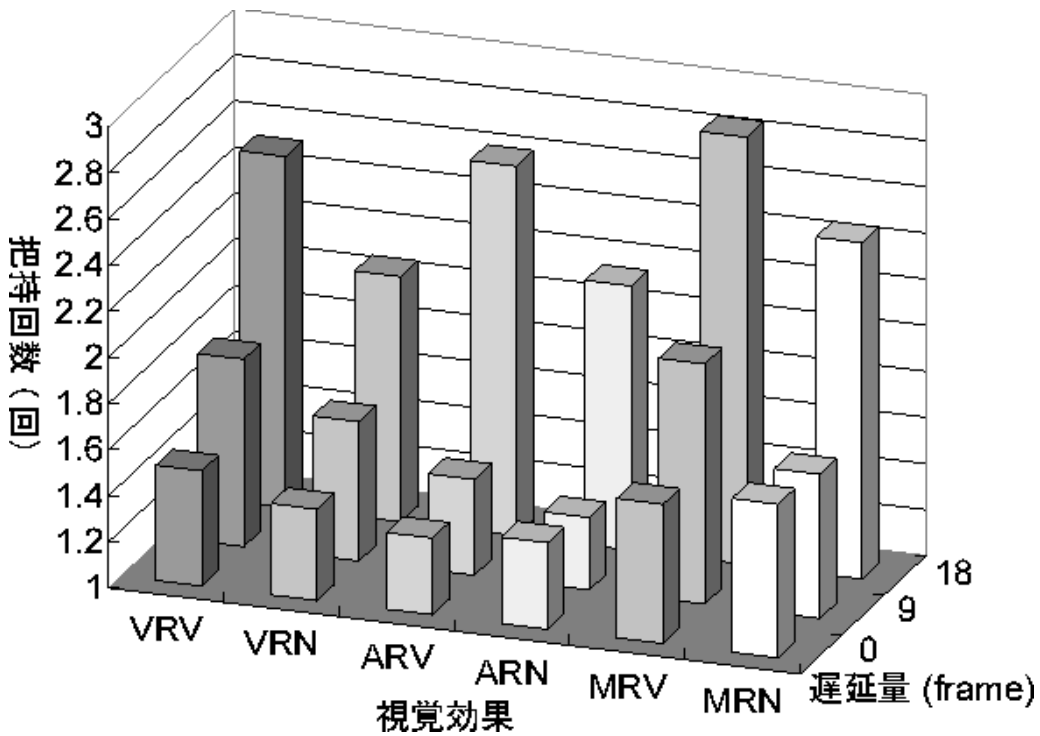


図 16 遅延一物体の平均把持回数 (MOVE)

### (1) 目標領域が静止している場合（STAY）の結果と考察

まず、目標領域が静止している場合に関して考察する。タスク達成時間（図 11）は、全体的に VR の 2 パターンが他の 4 パターンに比べて長くなっており、遅延量の増加とともにその差は大きくなっている。遅延量が最大の 18 frame の時、タスク達成時間の最も長い VRN の場合に比べて、現実の手が見える 4 パターンでは 33% から 37% 程度タスク達成時間が短縮されている。この結果は、現実の手を観察できることで遅延による操作性の劣化をある程度補償できることを示している。現実の手を見ることのできる場合、被験者は、遅延量に関わらず現実の手の現在位置を確認できるために、仮想の手の将来の動作を予期しながら、現実の手を頼りに予め操作しているものと考えられる。

手の移動距離（図 12）に関しては、現実の手が見える 4 パターンが優れるという傾向はそれほど顕著ではない。これは、VR の 2 パターンにおいて、タスク達成時間や把持回数が増加するのは主に目標領域付近での球の配置（閉ループ運動）に苦勞するためであり、この時手を大きく移動させる必要がないからであると思われる。

物体の把持回数（図 13）では、現実の手が見える 4 パターンが優れるという傾向はさらに顕著である。これは、実環境が観察できると視覚的情報が豊富となり、奥行きへの把握が容易になるために、球の配置の際の失敗が少なくなっているのではないかと考えられる。

また VFB の有無による影響については、タスク達成時間（図 11）と物体の把持回数（図 13）ではほとんど差が見られない。ただし、手の移動距離に関してはすべての場合について VFB のある場合がない場合よりも短くなっており、短縮率は遅延量が最大の 18 frame の場合で 15% から 21% 程度である。手の移動距離に関して VFB が有効である理由は、VFB のある場合、物体が目標領域に入っていることが明示されるため、閉ループ運動のフィードバックループを確実に修正でき、微調整に要する手の移動量を削減できるためと考える。

以上のことから、目標領域が静止している場合、実際の手が見え、かつ VFB のある場合（ARV もしくは MRV）が最も操作性に優れ、実際の手が見えず、かつ VFB のない場合（VRN）が最も操作性に劣るといえる。

## (2) 目標領域が運動している場合（MOVE）の結果と考察

次に、目標領域が運動している場合について考察する。この場合、3種類の指標全てについて（図14、図15、図16）、全体的にARの2パターンが優れるが、目標領域が静止している場合とは異なり、MRの2パターンの指標値は顕著に劣っている。この理由は次のように考えられる。目標領域が運動している場合、その速度と遅延量を考慮して、目標領域と仮想の手の双方の将来の位置を予測しながら物体を配置する必要がある。ここで、物体をタイミングよく放すためには、仮想の手が現実の手に比べてどの程度遅れているかを知る必要がある。すなわち、仮想の手と現実の手が共に見える環境では遅延量が視覚的に把握できるが、どちらか一方のみが見える環境では遅延量がうまく把握できず、指標値が劣ったものと考えられる。ただし、VRの2パターンでは、現実の手の位置を体性感覚から把握することが可能なため、MRの2パターンよりは優れた指標値になったものと思われる。

また、VFBの有無による影響については、全体的に、遅延量の小さい場合はVFBがある方が優れた指標値になっているが、遅延量が大きくなるにつれて、VFBがない方が逆に優れている。遅延量が最大の18 frameの場合、VFBのある場合のタスク達成時間（図14）は、ない場合に比べて3%から27%増加している。これは、VFBによって目標領域内に物体があると示された瞬間に現実の手を開いても、実際の物体の解放までには遅延があるために、その間に目標領域が移動してしまい、タスク達成に失敗してしまうためであると考えられる。すなわち、移動物体に対して操作を行なう場合、操作に遅延がある時はVFBはユーザを惑わせ、遅延に対する正確な予測を妨げることがあるといえる。

以上のことから、目標領域が運動し、かつ手の動作計測に大きな遅延がある場合、実際の手と仮想の手の双方が見え、かつVFBのない場合（ARN）が最も操作性に優れ、実際の手のみが見え、かつVFBのある場合（MRV）が最も操作性に劣るといえる。

## (3) 実験 2-2 の主観評価の結果と考察

評価の基準は表4に示した通りである。主観評価値の全被験者の平均を図17に示す。グラフより、仮想の手と現実の手の双方が見える場合は、一方のみが見

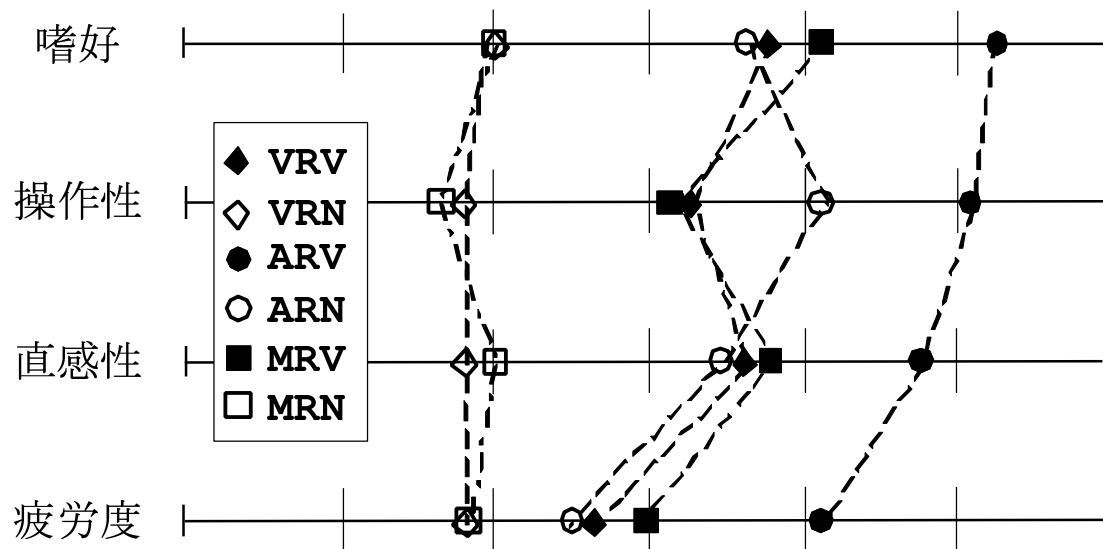


図 17 主観評価値

える場合よりも操作性に優れると評価されている。これは、現実の手に頼った先読み操作と、その操作の仮想の手による確認がともに可能であることによると考えられる。また、VFBのある場合はない場合よりも直感性に優れると評価されている。これはVFBにより仮想環境の状態が的確に把握できるためである。ただし、目標領域が運動している場合、VFBは「タスクに失敗することが多いので紛らわしい」と報告する被験者がおり、先の定量実験での考察を裏付けている。

以上、主観評価では結果として、全ての項目についてARVの評価が最も高く、VRNやMRNは評価が低くなっている。

なお、「直接自分の手で操作しているような感覚を最も得られる」との理由で、VFBがあり実際の手のみが見えるMRVが最も分かりやすいと報告する被験者が2名いた。これらの意見は、手の動作計測における誤差や遅延が十分小さいグローブインタフェースにおいては仮想の手を表示する必要がなく、逆に仮想の手を表示するとユーザに違和感を与える可能性を示している。

## 4.5 実験2のまとめ

実験 2-1 により，手の動作計測に遅延があるグローブインタフェースにおいて，操作対象が静止している場合は，仮想物体の直接操作の操作効率は線形に劣化し，操作対象が運動している場合，その操作効率は線形以上に劣化することが分かった．それらの原因としては，まず，操作対象が静止している場合は，操作の確認に要する時間が遅延量に比例して増加するためであり，操作対象が運動している場合は，操作対象の将来の予測が必要になるためであると考えられる．

そして，実験 2-2 により，操作対象が静止している場合は，ほぼすべての指標について現実の手が見える場合が優れているという結果が得られた．これは，遅延に関わらず現在の手の位置が把握できるので，予測行動が可能であるためであると考えられる．また，VFB のある場合が手の移動距離において優れているという結果も得ることができた．これは物体を配置する直前の微調整である閉ループ運動の修正が容易になるためであると考えられる．また，被験者の主観評価により仮想の手と現実の手の双方が見える方が，使いやすく，VFB のある方が分かりやすく，疲れにくいということがわかった．さらに，仮想の手と現実の手の双方が見えて，VFB のあるパターンが最も好まれるパターンであることも分かった．

以上より，操作対象が静止している場合は，現実の手が見え，かつ VFB のある場合が最も操作性に優れており，操作対象が運動している場合は，現実の手と仮想の手が見え，かつ VFB のない場合が，最も操作性に優れていることが分かった．また，ユーザにとっては仮想の手と現実の手の双方が見える場合が嗜好に合うということが分かった．

## 5. 考察

本論文では使いやすいグローブインタフェースの構築を目指し、グローブインタフェースの操作性を左右する要因の中でも、操作性への影響が強いことから応答遅延に着目し2つの実験を行った。

まず、実験1には、計算機を対峙者とみなすようなジェスチャインタフェースに高い即応性が要求される場合における、応答遅延がユーザの感覚に与える影響を調査する実験について述べた。

次に、実験2には、仮想物体を操作するインタフェースにおいて、

1. 遅延量の増加に伴う操作性の劣化がどの程度であるか
2. 様々な視覚効果を与えた場合に、操作性の劣化が抑制できるかどうか

の2点について調査した。

実験1から、ユーザが計算機を対峙者とみなすようなジェスチャインタフェースとして構築した実験用システムにおいて、

- 許容可能な最大遅延量が  $d_{max} \simeq 0.4$  (sec)
- 知覚可能な最小遅延量は  $d_{min} \simeq 0.08$  (sec)

であるという定量的な結果を得ることができた。これらの値は快適なジェスチャインタフェース構築のための指標の1つとすることができると考える。

また、実験2では、実験2-1の結果より、静止した目標領域に仮想物体を配置する場合は与えた遅延量に比例してタスクの達成時間が増加し、目標領域が運動している場合は遅延量に対して線形以上にタスクの達成時間が増加することが確認された。

さらに、実験2-2の結果より、

- 1) 遅延のある場合でも、現実の手を見せることで操作性をある程度改善できる
- 2) 遅延量が大きく、目標領域が運動している場合は、ビジュアルフィードバックはかえって仮想物体を配置しづらくする

### 3) 主観的には仮想の手と現実の手の双方が見える場合が好まれる

ということが明らかになった。

今後の課題としては、以下のようなものが挙げられる。

まず、ジェスチャインタフェースにおいては、ジャンケン動作の開始から終了の直前までの予備動作の速度や勝ち負けの判定、被験者および計算機側の手形状、音声（かけ声）の有無などによって応答遅延の感じ方が変化する可能性がある。また、本実験では、計算機側に応答遅延が存在する場合のみについて調査したが、計算機側が被験者の動作よりも早い動作をした場合についてのユーザの感じ方についても検討する余地がある。

また、仮想物体直接操作インタフェースにおいては、まず、没入型インタフェースの頭部の動きに関する応答遅延（見回し遅延）や描画更新間隔も変化する状況で、目標領域の運動速度や仮想の手と現実の手のずれの大きさといった静的整合性の度合を変更した場合について検討する必要がある。また、描画面が現実の手よりも奥側にあるため、今回とは手の隠蔽関係が異なり、見回し遅延の存在しないフィッシュタンク型の仮想環境では、本実験で得られた結果とは異なる可能性があるため、この場合についても、検討する必要がある。最後に、本実験では手の動作遅延が操作性に与える影響のみを調査しているが、見回し遅延のみが操作性に与える影響や、手の動作遅延と見回し遅延が共に存在する場合の操作性への影響も検討する必要がある。



## 6. むすび

本論文では使いやすいグローブインタフェースの構築を目指し、グローブインタフェースの操作性を左右する要因の中でも応答遅延に着目して考察した。まず、計算機を対峙者とみなすようなジェスチャインタフェースにおいて求めた許容可能な最大遅延量は、インフォメーションシステム等の擬人化インタフェースを構築する際に有効な指標となると考える。また、知覚可能な最小遅延量は、人間の認知機構の性能に基づいた普遍的なアプリケーションの特性に大きく依存しないだろうと考える値であり、

さらに、没入型の仮想物体を操作するインタフェースでは、

- 静止した目標領域に仮想物体を配置する場合は与えた遅延量に比例してタスクの達成時間が増加する
- 目標領域が運動している場合は線形以上にタスクの達成時間が増加する
- 遅延のある場合でも、現実の手が見えるようにすることで操作性をある程度改善できる
- 遅延量が大きく、目標領域が運動している場合は、ビジュアルフィードバックはかえって仮想物体を配置しづらくする
- ユーザにとっては仮想の手と現実の手の双方が見える場合が嗜好に合う

というようなことが分かった。このような結果は、人工現実感システムを構築する際の指標として、利用できると思われる。

## 謝辞

本研究の遂行にあたり，終始ご援助を賜わり，暖かく見守ってくださった両親に厚く感謝の意を表します。

本研究の全過程を通して，直接懇切なる御指導，御鞭撻を賜ったソフトウェア基礎講座 横矢 直和教授に衷心より感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり，終始有益な御助言と御鞭撻を頂いた像情報処理学講座 千原 國宏教授，並びにソフトウェア基礎講座 竹村 治雄助教授に厚く御礼申し上げます。

さらに，本研究を通じて，懇切丁寧なる御指導，御鞭撻を頂いた，ソフトウェア基礎講座 岩佐 英彦助手，並びにソフトウェア基礎講座 山澤 一誠助手に厚く感謝致します。

あらゆる面において，御指導，御助言を頂いた清川 清氏に深く感謝致します。

そして物心両面において常に温かい御助言を頂いたソフトウェア基礎講座の大隈 隆史氏，並びに佐藤 哲氏に深く感謝します。

また被験者として協力して頂いた，本学学生諸氏および井田 明子女史に感謝致します。

最後に，本研究の全過程を通して終始有益な御助言を頂いたソフトウェア基礎講座の諸氏，ソフトウェア基礎講座事務補佐員 福永 博美女史，ならびに元ソフトウェア基礎講座事務補佐員 村上 和代女史に深く感謝します。

## 参考文献

- [1] Sturman, D. J. and Zeltzer, D.: “A Survey of Glove-based Input,” *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.14, No.1, pp.30-39, 1994.
- [2] 竹村 治雄, 伴野 明, 岸野 文郎, 小林 幸雄: “大型 3 次元表示装置を用いた仮想操作環境の試作”, 第 20 回画像工学コンファレンス, pp.281-284, 1989.
- [3] Sturman, D. J., Zeltzer, D. and Pieper, S.: “Hands-on Interaction With Virtual Environment”, *Proc. ACM Sympo. on User Interface Software and Technology (UIST '89)*, pp.19-24, 1989.
- [4] 大西 剛, 竹村 治雄, 伴野 明, 岸野 文郎: “手振りを用いたユーザインタフェースに関する一検討”, 信学技報, HC90-23, 1990.
- [5] 黒田 知宏, 佐藤 宏介, 千原 國宏: “VR 技術を応用した手話の伝送システム”, 第 11 回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム (HIS '95), pp.375-380, 1995.
- [6] 藤本 英雄, 陳 連怡, 水野 直樹, 玉腰 浩史, 藤本 美樹, 嶋 浩太郎: “人工現実感を利用した手話学習システムの開発”, 第 13 回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム (HIS '97), pp.249-254, 1997.
- [7] Fels, S. and Hinton. G.: “Glove-TalkII: An Adaptive Gesture-to-Formant Interface”, *Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI '95)*, pp.456-463, 1995.
- [8] 崎山 朝子, 大平 栄二, 佐川 浩彦, 大木 優, 池田 尚司: “リアルタイム手話アニメーションの合成方法”, 信学論 (D-II), J79-D-II, No.2, pp.182-190, 1996.
- [9] 川村 洋介, 田中 和明, 鄭 絳宇, 安部 徳広, 何 守杰, 滝 寛和: “人工現実感を利用した意匠設計システム”, 信学技報, IE97-58, PRMU97-89, MVE97-74, 1997.

- [10] 中野 幸一, 渡辺 弥寿夫: “VRによる伝統工芸デザイン支援システムの開発”, 信学技報, MVE97-32, 1997.
- [11] 吉田 美寸夫, ジュリ A. ティヘリノ, 宮里 勉, 岸野 文郎: “手振りと言語による仮想物体形状生成インタフェース”, テレビ誌, Vol.50, No.10, pp.1482-1488(1996-10), 1996.
- [12] 木島 竜吾, 廣瀬 通孝: “仮想環境におけるポインティング動作と時間遅れの影響”, 第 11 回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム (HIS '95), pp.467-476, 1995.
- [13] MacKenzie, I. S. and Ware, C.: “Lag as a Determinant of Human Performance in Interactive Systems”, *Proc. ACM Conf. on Human Factors in Computing Systems (INTERCHI '93)*, pp.488-493, 1993.
- [14] Card, S. K., Moran, T. P. and Newell, A.: “*The Psychology of Human-Computer Interaction*”, pp.49-51, 1983.
- [15] Blumberg, B. M. and Galyean, T. A.: “Multi-Level Direction of Autonomous Creatures for Real-Time Virtual Environment”, *Proc. SIGGRAPH on Computer Graphics*, pp.47-54, 1995.
- [16] Smets, G. J. F. and Overbeeke, K. J.: “Trade-Off Between Resolution and Interactivity in Spatial Task Performance”, *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol.15, No.5, No.5, pp.46-51, 1995.
- [17] 佐藤 隆宣, 伴野 明, 岸野 文郎: “運動視表示の遅延による仮想空間操作への影響”, 信学技報, IE90-57, 1994.