

仮想作業空間のためのインタフェースデバイス
- S P I D A R -

佐藤 誠 平田 幸広 河原田 弘

東京工業大学精密工学研究所

あらまし 3次元形状モデリングのためのヒューマンインタフェースを向上させるためには、実空間における操作を形状モデルに対して行えるような仮想作業空間を実現することが必要である。

本研究では、人間の行う作業における知覚情報の流れと力の相互作用について分析を行う。そしてより自然な仮想作業空間のためには、これらの知覚情報や力の相互作用の仮想化が重要であることを明らかにする。

これに基づき、仮想作業空間を構成するための空間インタフェース装置 S P I D A R を新たに提案する。この装置は指先に取り付けたキャップを4本の糸で支えたものである。この糸の長さを計測することにより指先の位置情報を得るとともに、糸の動きを拘束して手の動きを制約することによって接触情報と圧覚情報を生成するものである。

さらに S P I D A R を用いた仮想作業空間を実現し、仮想作業空間での作業に対する接触情報や圧覚情報の有効性を確認した。

Space Interface Device for Artificial Reality - SPIDAR -

Makoto SATO, Yukihiro HIRATA and Hiroshi KAWARADA

Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics
Tokyo Institute of Technology

4259 Nagatsuta, Midoriku, Yokohama, 227, JAPAN

Abstract To develop human interface for shape modeling of 3-dimensional objects, it is necessary to construct a virtual space, where we can manipulate object models directly just like in real space.

In this paper, we observe human manipulation process of 3-dimensional objects and analyse the flows of perceptual information and physical forces in the process. We show the importance of perception cycle and investigate fundamental elements for direct manipulation in a virtual working space.

For the realization of the virtual working space, we propose a space interface device SPIDAR (S**P**ace I**I**nterface D**E**vice for A**A**rtificial R**E**ality). We make two experiments to evaluate the virtual working space using SPIDAR. We confirm the effect of the sense of touch and pressure on work in the virtual space.

1. まえがき

近年の計算機の処理能力の向上にはめざましいものがあるが、それにつれて計算機の操作性、すなわちヒューマンインタフェースが重要な問題となってきている。現在の計算機のヒューマンインタフェースについて考えてみると、文字情報など1次元的な情報を扱うものとしてはキーボードがあり、さらに図形など2次元的な情報に対してはマウスやタブレットなどがある。それに対して3次元情報を扱うヒューマンインタフェースは、その必要性が高まっているにもかかわらず十分に開拓がなされていないように思われる。3次元形状の入力を行なう場合を考えると、キーボードでは座標値などの数値を入力しなければならず、マウスでもディスプレイ上で2次元的に入力せざるをえない。より自然なヒューマンインタフェースとしては、例えば自分の手で粘土の形を変えたり、あるいは積木のように部品を動かして組み合わせたり取りはずしたりするような実空間での操作を計算機内のモデルに対して行なえることが望ましい。

最近、計算機内に作られた仮想的な3次元空間（以下、仮想空間と略す）内で、あたかも実空間の中で作業を行なうような環境を実現しようという試みが始められている。このような環境を実現するためには、実空間での作業に近いリアリティを人間の感覚に持たせることが重要になる。例えばNASAのエイムズ研究所では、ゴーグル型の立体視ディスプレイにコンピュータグラフィックスで仮想世界を表示し、これに対して仮想的な手でいろいろな操作を行なうことができるシステムが開発されている¹⁾²⁾。この仮想的な手は、実際の手にデータグローブと呼ばれる装置をはめることによって手の位置や指の動きを検出して、それに合わせて動くという遠隔操作のようなものとなっている（図1）。しかしこのシステムでは、触覚や圧覚などの体性感覚については十分な検討がなされていない。また文献3）では、マネジューラのような装置を手に取り付けることによって物体操作の際に発生する反力を生成する方法が提案されている。しかしこの装置では、作業を行なっていないときでも常にある程度の抵抗感を受けるという問題点がある。さらに仮想空間で直接に手で操作を行なうためには実際の手が見えていて、しかもそのまわりには仮想空間以外のものはなるべく見えないことが望ましい。しかし上の2つの例では、実際の手と仮想空間との視覚的な融合とい

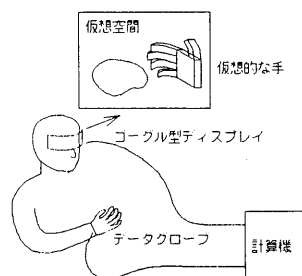


図1 仮想作業空間の一例（NASA）

うことが考慮されていない。本論文では、2章で人間が実空間で行なう操作における情報や力の流れを分析し、3章において実空間での操作と同様な操作が可能な仮想空間を実現するために必要な基本的要素を明らかにする。これにもとづいて、仮想作業空間を実現する空間インタフェースデバイスSPIDAR（SPace Interface Device for Artificial Reality）を4章で提案する。そしてSPIDARを用いた3次元形状の生成・加工のための仮想作業空間を実現する。5章において仮想作業空間における作業の容易性に対する接触情報と圧覚情報の有効性を確認する実験を行なう。

2. 実空間における人間の作業

実空間で人間が行なう作業をそのときの情報の流れの観点から、粘土細工を行なう場合を例にとりて考えてみる。

作業台に加工されていない粘土が置かれている。作業を行なう人間は、これから作ろうとする目的の形状をあらかじめ頭に思い浮かべているものとする。①まず目の前にある粘土とその形状を比較して違う部分を見つけ出し、その部分に着目する。②粘土と手の相対的位置関係を目で確認しながらその着目点まで手を移動させる。③手が粘土に接触したことにより移動の完了を確認し、④さらに指先などに力を加えて粘土を部分的に変形させる。以上の①～④の操作を、粘土が意図した形状になるまで繰り返す。

この①～④の操作において用いられている情報を整理すると次のようになる。

- | | |
|------------------|--------------|
| ① 粘土の形を見る | → 目から脳への視覚情報 |
| ② { 粘土と手の相対的位置関係 | → 目から脳への視覚情報 |
| 手の移動 | → 脳から手への制御情報 |
| ③ 手と粘土の接触 | → 手から脳への触覚情報 |

- ④ { 手の力による粘土の変形 → 脳から手への制御情報
粘土からの抗力 → 手から脳への圧覚情報

これらの流れを図示すると図2のようになる。実空間での人間の作業においては、この図のような触覚や圧覚などの体性感覚と視覚に関する知覚サイクルが形成されており、手と物体の間には作用・反作用の力学的相互関係が存在している。人間はこの知覚サイクルと力の相互作用をほとんど無意識に利用することによって、いろいろな作業を的確に行なうことが可能になっていると考えられる。

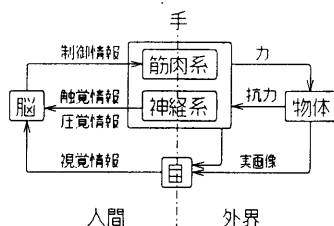


図2 知覚サイクルと力の相互作用

3. 仮想作業空間の基本要素

ここでは、人間が操作に用いている3つの知覚情報（視覚・触覚・圧覚情報）を仮想的に実現するために必要な要素と、人間にこれらの情報を伝達する（知覚させる）方法について検討する。

(a) 触覚情報

触覚情報を生成するためには、実空間上の手が仮想空間上の仮想物体と接触しているかどうかを判定しなければならない。そのためには手の位置情報と物体の位置、形状のモデルが必要になる。人間に触覚情報を知覚させるには、力学的な刺激を直接手に加えるかあるいは電気的な刺激などで代用する必要がある。

(b) 圧覚情報

手と物体の間に力が働くのは接触している状態からさらに手を物体の内部に入る方向に動かそうとしたときである。そのとき、手の動きは物体によって制約を受ける。制約を受ける度合は物体の性質（弾性・塑性、硬い・柔らかい、など）や状態（動く・動かない、など）によっても変わる。したがって圧覚情報を生成するためには、手の位置・運動方向と、性質・状態も含めた物体の形状モデルが必要となる。

人間に圧覚情報を伝えるためには、手の動きを制約すればよい。そのためには手に対して外部から直接に力を加えなければならない。しかし、逆にどんな物体にも触れていないときには何の抵抗もなく自由に手を動かすことができなければならない。

(c) 視覚情報

計算機内の仮想物体を視覚化することは、コンピュータ・グラフィックスの技術を用いることにより可能である。視覚化するためには、表面の色などの情報を含めた物体の形状モデルが必要となる。3次元的な操作を行なうためには、その物体が実際の空間上に存在するように立体に見えなければならない。そのために、両眼視差を利用した立体視を用いる。立体視に関しては、基本的な技術は数多く提案され、すでに実用化されている。

より自然な加工作業を考えると、実空間と仮想空間とが視覚的に融合している必要がある。このためには手のまわりには仮想空間以外のものが見えないことが望ましく、したがって手に大がかりな装置を直接取り付けることには問題がある。

自然な操作が行える仮想環境の実現のためには(a)～(c)の3つの要素すべてが実現され統合化されなければならない。

以上のような作業過程におけるそれぞれの情報の置き換えを行なった後の知覚サイクルは図3のようになる。仮想物体は映像表示装置により、CGの立体映像として表示されている。手の動きは位置計測装置によって位置情報として計算機に送られる。計算機では手と物体の接触の有無を調べ、手に直接刺激を加えることにより触覚情報を発生させる。手がさらに内

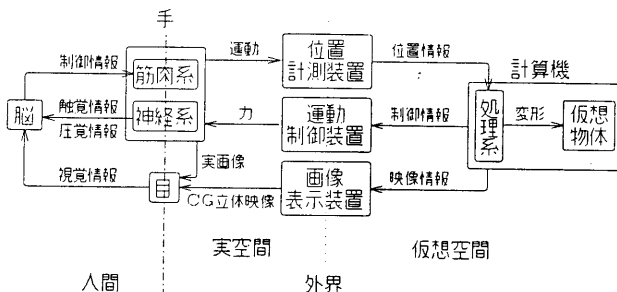


図3 仮想化された知覚サイクルと力の相互作用

部に入ろうとしたときには手の動きの制御情報を運動制御装置に送るとともに、仮想物体の変形や移動を行う。運動制御装置は、計算機からの制御情報をもとに手の動きの制御を行なうことにより圧覚情報を発生させる。

4. SPIDARによる仮想作業空間の実現

本章では、3章で明らかにした仮想作業空間の基本要素を実現するための空間インタフェース装置SPIDARを新たに提案する。この装置は、指にはめたキャップを4本の糸で支えたものである。この糸の長さを計測することによって指の位置情報を得るとともに、糸の動きを拘束して指の動きを制約することによって指先に接触情報と圧覚情報を与えるものである。この方法では指先に接触感や圧覚を与えることができるとともに、物体に触れていない状態、すなわち何の抵抗感もなく手を自由に動かせる状態も実現できる。また手に大がかりな装置を取り付ける必要もない。

このSPIDARとアナグリフ方式などの立体映像表示装置を組み合わせることにより、仮想作業空間を構築することができる(図4)。映像表示装置はNASAのシステムのようなゴーグル形のものではなく、作業を行なう人間の前方に置かれたモニターである。そこに仮想空間の映像を、実空間と仮想空間の座標系が一致するように表示する。人間は立体視用の眼鏡を通してこの映像を見ることができ、実空間と融合した仮想空間を見ることができ、そしてキャップをはめた指の位置が計測されて仮想空間中の物体との接触の有無が判定される。それに応じて接触情報と圧覚情報が指先に与えられる。

以下、SPIDARの各構成要素について説明する。

4-1. 位置計測装置

指先の位置の計測を行なう。計測すべき位置を示す3次元位置指示部と位置計測部に分けられる。

(a) 3次元位置指示部

計測すべき位置を示すための指示部は、4つの支点からプーリーを経由して重りをつけることによって直線的に張られた4本の糸が取り付けられたキャップ状のものである(写真1)。これに指をはめて3次元空間中の任意の点を指し示すことにより、指示部はその点に位置することになる。

(b) 位置計測部

指示部の位置は、指示部に取り付けた4本の糸の支点から指示部までの長さを計測して、その長さと各支点の位置から指示部の位置を計算によって求める。プーリー(写真2)の軸には回転量を検出するためのロータリーエンコーダが取り付けられており(写真3)、その回転量とプーリーの直径から糸

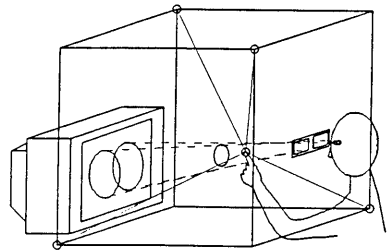


図4 SPIDARによる仮想作業空間

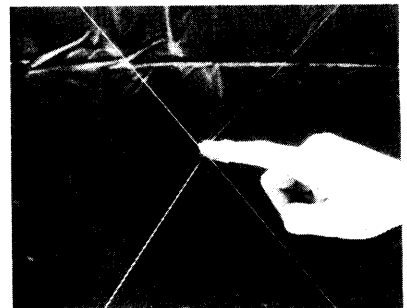


写真1 3次元位置指示部

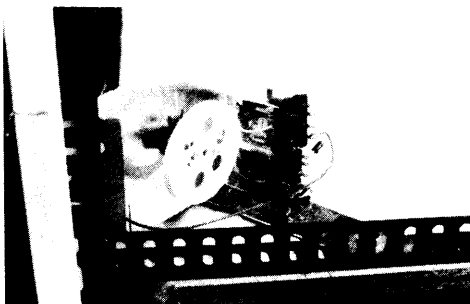


写真2 プーリー

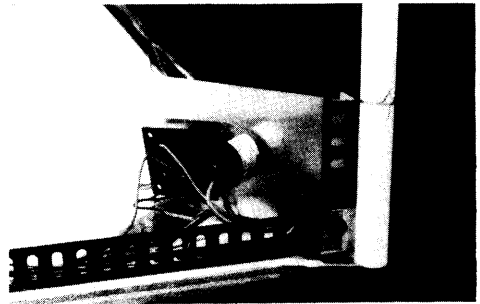


写真3 ロータリーエンコーダ

の長さの変化量が求められる。糸の長さの初期値を与えて、その変化量を累積加算することにより糸の長さが求められる。この4本の糸の長さを用いて指示部の位置座標 (x, y, z) を計算する。4つの支点の座標を (a_i, b_i, c_i) ($i = 0 \sim 3$)、糸の長さを l_i ($i = 0 \sim 3$) とすれば次式 (1) が成り立つ (図5)。

$$\begin{aligned} (x - a_0)^2 + (y - b_0)^2 + (z - c_0)^2 &= l_0^2 \\ (x - a_1)^2 + (y - b_1)^2 + (z - c_1)^2 &= l_1^2 \\ (x - a_2)^2 + (y - b_2)^2 + (z - c_2)^2 &= l_2^2 \\ (x - a_3)^2 + (y - b_3)^2 + (z - c_3)^2 &= l_3^2 \end{aligned} \quad (1)$$

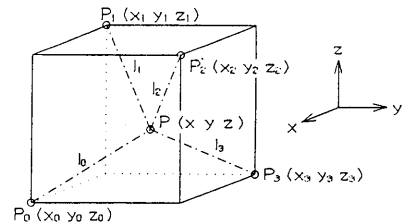


図5 位置計測

このままで x, y, z を代数的に求めるのは困難であるため、(1) 式のとなりあう2つの式の差をとってできる3つの式 (2) に変換する。

$$\begin{aligned} (a_1 - a_0)x + (b_1 - b_0)y + (c_1 - c_0)z &= L_1 - L_0 \\ (a_2 - a_1)x + (b_2 - b_1)y + (c_2 - c_1)z &= L_2 - L_1 \\ (a_3 - a_2)x + (b_3 - b_2)y + (c_3 - c_2)z &= L_3 - L_2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{ただし } L_i = \frac{a_i^2 + b_i^2 + c_i^2 - l_i^2}{2} \quad (i = 0 \sim 3)$$

(2) 式は3元連立1次方程式であり、これを解くことにより指示部、すなわち指先の位置座標 (x, y, z) を求める。

4-2. 運動制御装置

これは指の動きを制約することによって、接触している仮想物体から指が受ける圧覚情報と接触情報を生成するものである。本装置では、指に取り付けるキャップに取り付けられた4本の糸の動きを拘束することによって指の動きを制約し、圧覚情報を生成する。糸はリレーのコイルと可動鉄片の間を通っており (図6)、コイルの電流をオン・オフすることによって糸がコイルと鉄片にはさまれて動きが拘束されたり、解放されたりする。指が仮想空間内の仮想物体と接触したときに、4本の糸の動きを拘束することによって指の動きを制約する。ただし4本とも拘束した場合、物体から離れる方向にも指を動かすことができなくなってしまうため一定時間拘束した後は解放する。

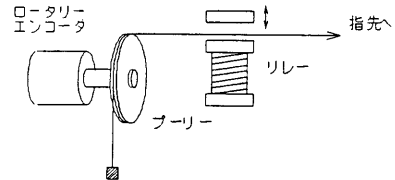


図6 リレーによる糸の拘束

5. 仮想作業空間の評価実験

この章ではSPIDARによって実現される仮想作業空間における作業の容易性に関する評価実験の結果を述べる。接触情報と圧覚情報が作業の正確さに与える効果を調べる次の2つの実験を行った。

5-1. 空間位置の指示操作の実験

これは仮想空間の把握に対する接触情報の効果を調べるものである。実験で用いた作業課題は、立体映像で提示されたいろいろな大きさの球の表面の任意の位置を指で指示することである (写真4)。この実験を運動制御装置を用いて接触情報

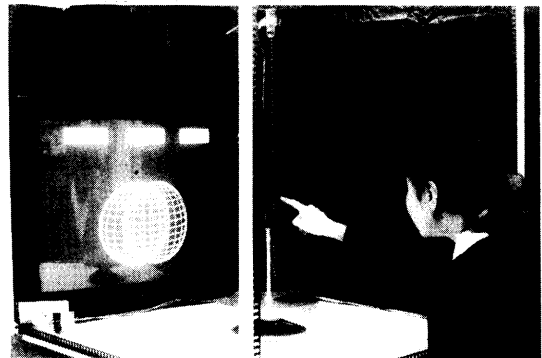


写真4 空間位置の指示操作

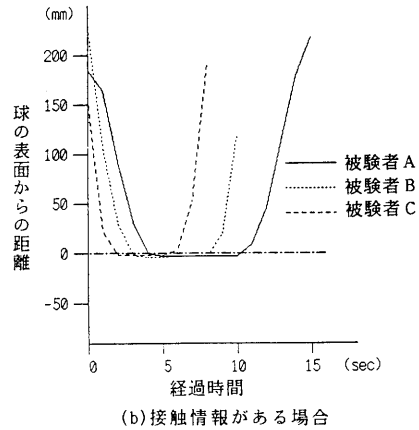
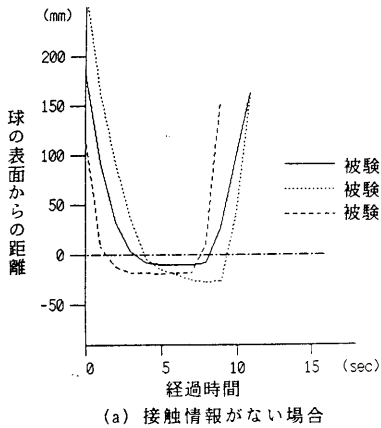


図7 指示操作における指の動き

を生成する場合と生成しない場合について行い、そのときの被験者の指の動きを記録する。

図7は3人の被験者について指の動きを表したもので、(a)は接触情報がない場合、(b)は接触情報がある場合である。横軸は時間、縦軸は指先と球の表面との距離を表し、水平な一点鎖線は球の表面を示している。接触情報がない場合(a)には、指が球の中まで入ってしまうことが多くみられ、指が安定に静止しない場合もある。接触情報がある場合(b)には球の表面で指が安定に静止している。このことから、圧覚情報が空間の把握に有効な情報であることがわかる。

5-2. 物体の加工作業の実験

これは物体の加工という作業の正確さに対する圧覚情報の効果を調べるものである。作業課題は、立体映像で提示された図8(a)のようなコップ状の物体を、同図(b)のラグビーボールのような形に変形させることである(写真5)。この実験を圧覚情報がある場合とない場合についてそれぞれ4回ずつ行い、そのときの指の動きと物体の変形の過程を記録する。このコップ状の物体は21個の制御点からなる円筒体で、変形は制御点を移動して側面の形を変えることにより行なう。

ここで作業の精度を評価するために、加工作業の達成率 r_a と欠損率 r_m を次のように定義する。

$$r_a = 1 - \frac{S_a}{S_2} \quad (3)$$

$$r_m = \frac{S_m}{S_1} \quad (4)$$

図9は物体の回転軸を通る断面を表わしている。

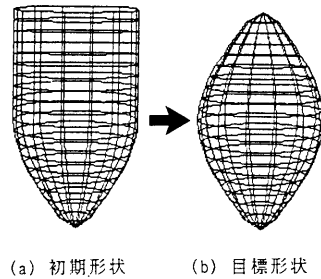


図8 加工作業の課題



写真5 物体の加工作業

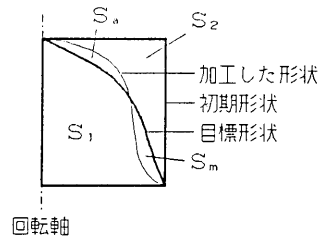


図9 達成率と欠損率の定義

s_1 は目標形状の面積, s_2 は初期形状から目標形状まで加工する部分の面積, s_a は加工が不十分で目標より大きくなっている部分の面積, s_m は加工し過ぎて目標より小さくなってしまった部分の面積である. r_a , r_m とも 0~1 の値をとり, 作業の初期状態では $r_a = r_m = 0$ であり, 理想的な作業では $r_m = 0$ のまま $r_a = 1$ に近づく.

図 10 は 3 人の被験者について, 各作業で最も目標の形に近づいたと思われる時刻での達成率 (縦軸) と欠損率 (横軸) を表したものである. ○印は圧覚情報がある場合, ×印は圧覚情報がない場合を示している. (a) では圧覚情報がある場合には欠損率が低くなるとともに達成率も高くなっており, 圧覚情報の効果が顕著に現われている. (b) は達成率は変わらないが欠損率が低くなった場合である. (c) は達成率が向上した例である. この被験者の場合, 圧覚情報がないときの方が欠損率が低い. これは圧覚情報がないときには物体に触ること自体が十分にできなかったために加工作業ができなかったものと思われる.

図 11 は図 10 (a) の被験者の作業の進行の様子を見たものである. (a) は達成率の時間変化を, (b) は欠損率の時間変化を表わしたものである. 実線は圧覚情報がある場合, 破線は圧覚情報がない場合である. 同図 (b) を見ると, 圧覚情報がない場合には作業の早い段階で欠損率が高くなってしまい作業を中止している. 同図 (a) を見ると, 圧覚情報がある場合には急激な欠損もなく目標の形に近づいていることがわかる. また図 12 はこの被験者の指の動きの一部を, 回転軸からの距離と高さの 2 次元で示したものである. 圧覚情報がある場合はない場合に比べて, 加工面に沿った無駄のない規則正しい動きをしている. 以上のことから, 圧覚情報のフィードバックが仮想作業空間における加工作業にきわめて重要であることが示された.

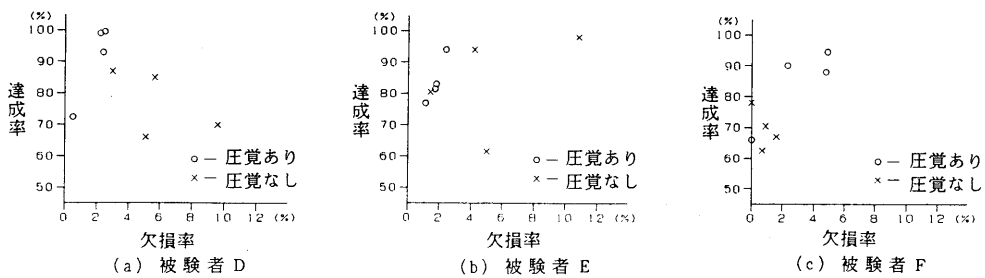


図 10 加工作業における達成率と欠損率

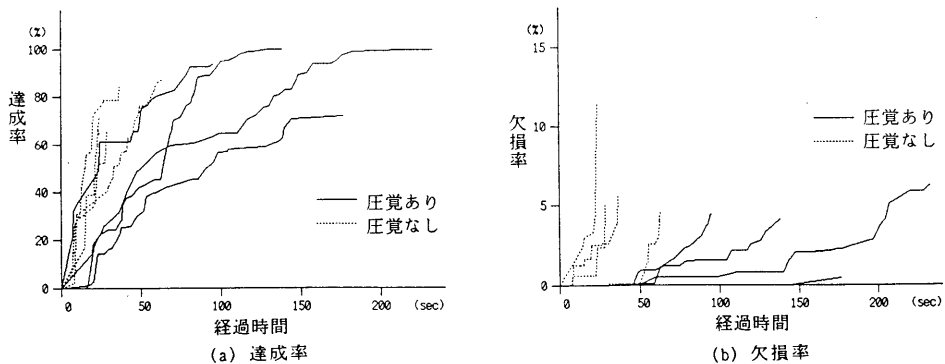


図 11 被験者 D の達成率と欠損率の時間変化

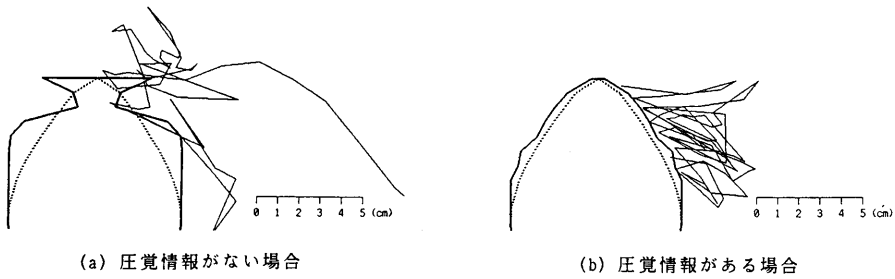


図 1.2 加工作業における指の動き

6. まとめ

本研究では、実空間で人間の行う操作における情報と力の流れについて分析を行なうことにより、仮想作業空間の実現のために必要な基本要素について検討した。その結果、実空間では視覚や触覚などに関する知覚サイクルと、物体と手の力学的相互関係が存在し、人間はこの知覚サイクルや力の相互作用をほとんど無意識に利用して的確な操作を行っていることを示した。そしてより自然な仮想作業空間を実現するためには、この知覚サイクルや力の相互作用を仮想的に実現しなければならないことを明らかにした。

以上の結果にもとづいて、仮想作業空間を実現するための空間インタフェース装置 SPIDAR を提案した。この装置は指先に取り付けたキャップを4本の糸で支えたものである。この糸の長さを計測することにより指先の位置情報を得るとともに、糸の動きを拘束して手の動きを制約することによって接触情報と圧覚情報を生成するものである。大がかりな装置を手に取り付ける必要がないため、何も触っていない状態では、抵抗感を受けることなく自由に手を動かすことができる。また実空間と仮想空間の視覚的な融合という点でも、大がかりな装置が手の回りにないことは都合がよい。

さらに実際に装置を試作して仮想作業空間を構成し、この仮想作業空間での作業の正確さに対する接触情報と圧覚情報の効果について調べた。そして、接触情報や圧覚情報をフィードバックすることにより作業の正確さが向上することが確認された。

参考文献

- 1) J. D. フォーレイ: "近未来のインターフェース", サイエンス, vol.17, No.12, pp.77-85 (Dec. 1987)
- 2) 廣瀬通孝: "空間知覚と認知工学", 計測と制御, Vol.27, No. 1, pp.43-48(1988)
- 3) 岩田洋夫: "実時間グラフィックスと力感覚帰還装置を用いた仮想立体のハンドリング", '89 N I C O G R A P H 論文コンテスト論文集, pp.62-67(1989)