

モータ駆動による力覚制御能力をもつ 空間インタフェース装置の提案

平田 幸広・猿渡 基裕・佐藤 誠 (東京工業大学・精密工学研究室)

Abstract: Force sensation is important for manipulation of objects in real space. To realize the force sensation in virtual space, it is necessary to generate force of arbitrary magnitude and direction. We proposed a space interface device with force feedback using motors. It can apply force of arbitrary magnitude and direction to fingers, so that we can generate natural force sensation on fingers when the fingers touch virtual objects.

Keywords: Artificial reality, Virtual work space, Force feedback

1. まえがき

計算機内に作られた仮想的な3次元空間上の物体に対して実空間と同じように作業を行えるような環境を実現しようとする場合、物体操作の際に手や指先の触覚や力覚などの感覚を人間に与えることが重要である。

我々は現在までに、仮想空間内で力覚を受けながら物体操作を行うことを可能とする空間インタフェース装置SPIDAR (Space Interface Device for Artificial Reality) を提案している[1]。この装置は、指にはめたキャップに4本の糸をとりつけ、その糸の長さを計測することによって指の位置を求めるとともに、リレーのコイルと可動鉄片でその糸をはさんで拘束することにより、指先に力覚を与えることができるというものである。

しかし、このSPIDARにおける力覚生成方法で

は、指を動かしたときにその動きを妨げる方向の力しか加えることができない。そのため、組立作業などにおいて、物体を保持して移動させるときに指が物体面から受ける抗力などを表現することが不可能である。このような力を生成するためには、指の動きによらない任意の方向の力を生成することができなければならない。

本報告では、DCモータを用いて糸に張力を加えることができるように力覚生成装置の改良を行うことにより、新しい空間インタフェース装置を提案する。さらに、この新しい力覚生成装置を用いて、物体を保持する瞬間の指先制御の方法を、指先の運動の物理モデルに基づいて提案する。

2. 組立作業の分析

2.1 組立作業における基本操作

A Space Interface Device with Force Feedback Using Motors
HIRATA Yukihiko, SAWATARI Motohiro, SATO Makoto (Precision
and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology)

ここでは、作業手順の観点から、実空間での組立作業を分析してみる。具体例として積木について考えてみる。

いま、図1(a)のように置かれている積木を同図(b)のように組み上げる場面を想定する。大まかな作業手順は、

- ① Aを希望の位置に置く。
- ② BをAの上ののせる。
- ③ CをBの横に並べてAの上ののせる。

となる。さらに細かく見てみると、それぞれの手順は次のような基本操作に分解される。

- (1) 積木を保持する。
- (2) 積木を移動する。
- (3) 積木を配置する。
- (4) 積木を解放する。

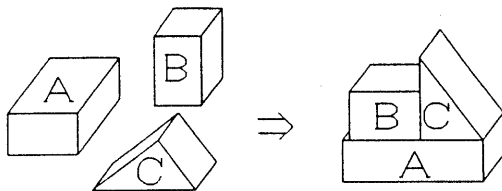
これら(1)~(4)の基本操作を繰り返すことにより、最終的に目標の形状に組み上げることができる。

以下、それぞれの基本操作について細かく分析を行う。

2.1.1 保持

まずはじめに、保持すべき積木の近くまで手を移動する。このとき、目で手と積木の相対位置を確認している。次に、積木の表面まで手をもっていく。このときは指先の触覚で積木に触ったことを知る。次に、複数の指で積木をはさみ、力を加えて保持する。このとき積木の表面からの抗力を指先の力覚で確認し、指先の力を加減することにより、積木を安定に保持することができる。

人間が物体を保持する場合、5本の指の全部または一部と掌が用いられるが、最低限必要なのは2本の指である。特に、親指は他の4本と向き合っており(拮指対向)、保持の安定性に極めて重要な役割をはたしている。このことから、物体を安定に保持するために



(a) 初期配置

(b) 目標配置

図1 組立作業の一例(積木)

は、最低限親指を含めた2本の指が必要であることがわかる。

2.1.2 移動・回転

物体の移動は、おもに肩・肘などの関節を用いて腕全体を制御することにより行われる。また、回転はおもに手首をひねることによって行われる。これらの操作は物体の位置や姿勢を目で確認しながら行われる。

物体の移動・回転を的確に行うためには、物体が安定に保持されていなければならない。すなわち、手と物体が固定されていなければならない。そのためには、物体を固定するだけの力を常に指先に加えている必要がある。

移動・回転は通常持ち上げた状態で行う。積木が持ち上げられた状態にあることは、物体と床面などの相対位置関係を見ることや、指先に重さを感じることで知ることができる。

2.1.3 配置

配置操作は、保持している物体がすでに置かれている他の物体(あるいは床面など)と接触した際に指先に伝わる間接的な抗力や、視覚による物体間の相対位置関係の情報を頼りに行われる。また、物体同士がぶつかった際の音も、有効な情報となる。

2.1.4 解放

解放操作では、物体が安定に静止していることを確かめながら指先の力をゆるめていく。触覚を受けなくなるにより、解放操作の完了を知る。

以上より、組立作業は、

- ・視覚・聴覚や指先の触覚・力覚などのマルチモーダルな感覚情報を用いる。
- ・操作手段として腕全体と、親指およびそれと向き合う他の指の最低2本の指を用いる。

ということがわかる。

2.2 組立作業のための仮想作業空間の基本要素

組立作業が可能な仮想作業空間を実現するためには、上で述べた4つの基本操作を計算機内の形状モデルに対して行えるようにすることが必要である。ここでは、各基本操作を仮想空間内で実現するために必要な要素について検討する。

2.2.1 操作手段

腕は、指先に力を伝えるため、及び指先の位置を制御するために用いられている。しかし腕そのものの位

置や動きは必ずしも必要ではなく、物体に対して実際に操作を施す指先の位置・向きや動きがわかれば十分である。

保持は、親指を含めた最低2本の指を用いることにより可能である。安定な保持のためには3本以上の指が使えることが望ましいが、仮想空間においては、不安定な操作をあえて実現する必要はない。2本の指で保持した場合でも安定に保持したとみなせばよい。また、持ち替え操作など本来2本指ではできない操作も、2本指による操作を組み合わせることで可能である。

2.2.2 感覚情報

(1) 視覚

操作の対象となる仮想物体は、立体であると知覚されなければならない。したがって、仮想空間の呈示は、立体映像によって行われなければならない。また、仮想物体を手で直接操作することを考えると、実際の手と仮想物体の立体映像とが視覚的に融合している必要がある。

(2) 聴覚

物体同士が衝突したときの音を生成する際には、衝突が起きた位置から音が聞こえるようにしなければならない。したがって音像の定位が重要な問題となる。本報告では、聴覚については考慮していない。

(3) 触覚

指先に触覚を知覚させるためには、機械的な刺激などを直接指先に与える必要がある。あるいは、電気的な刺激で代行させることも考えられる。

(4) 力覚

指先に力覚を伝えるためには、外部から指先に直接に力を与える必要がある。その方法の一つとして、指を拘束することにより、指の動きを妨げる向きの力を指先にかける方法が考えられる。しかしこの方法では、

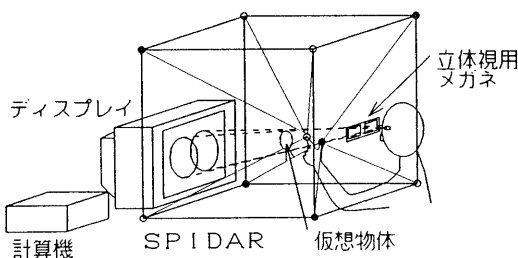


図2 SPIDAR II

力の方向が指の運動方向で決まってしまう。物体を保持して移動しているときの面からの抗力の向きは、指の運動方向に関係なく常に面の法線方向である。したがって、この方法では物体の移動の際に指が物体面から受ける抗力を実現することはできない。

自然な力覚を伝えるためには、指の運動状態（速度・方向）によらずに、任意の大きさ・向きの力を指先にかけることが必要になる。

2.3 組立作業のための

空間インタフェース装置SPIDAR II

我々は、仮想空間内で組立作業を実現するための空間インタフェース装置としてSPIDAR IIをすでに提案している[2] (図2)。これは、指にはめたキャップを4本の糸で支え、この糸の長さを計測することによって指の位置を計測するとともに、その糸をリレーのコイルと可動鉄片ではさんで拘束することによって指の動きに制限を加え、力覚情報を与えるものである(図3)。指が物体に触れていない状態では、何の抵抗もなく自由に指を動かすことができる。また、指先に装着される装置は最小限に抑えてあるので実際の指は直接視覚情報として知覚される。このキャップ及び糸を2組用いることによって、2本の指を用いた組立作業を可能としている。

3. DCモータによる力覚生成装置を用いたSPIDAR

3.1 従来方式の問題点

SPIDAR IIでは、糸をリレーのコイルと可動鉄片ではさんで止めることによって指の動きを拘束して力覚を生成している。この方式では、指を動かそうと

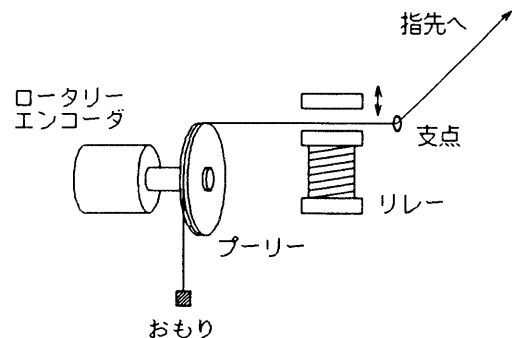


図3 改良前の力覚生成装置

したときにその動きを妨げる向きの力が指先にかかることになる。これは物体を押ししたときに生ずる力に近いものである。しかし物体を保持しているときの力の向きは、物体を移動する方向に関係なく、常に物体面に垂直な方向であり、従来の方法では実現することは不可能である。また、指を止めているときには力が生じないため、物体面からの抗力や物体の重さを表現することができない。以上のことから、糸の動きを拘束して力覚を生成することには問題があると思われる。

より現実に近い力覚を生成するためには、指の運動方向に関係なく、任意の向きの力を生成しなければならない。そのためには、直接糸に張力を与えることが必要となる。

3.2 モータを用いた力覚生成装置

本研究ではDCモータで糸を引っ張り、そのトルクを制御することで糸の張力を生成する方法を提案する(図4)。

3.2.1 モータのトルク制御

モータのトルクと電流の大きさは比例関係にあるので、電流を制御することにより張力を制御することができる。

図5にモータ制御回路のブロック図を示す。まず、計算機からは電流の大きさが指令値として8bit D/Aコンバータに送られる。その出力はOPアンプを用いた定電流回路に送られモータが駆動される。これにより、モータのトルクを256段階に制御でき、つねに指定した張力を得ることができる。張力の分解能

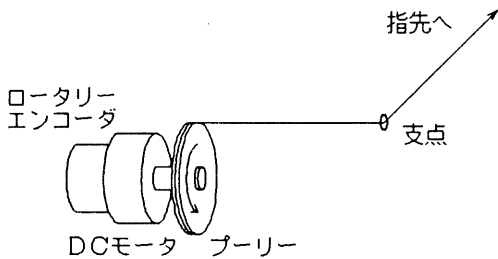


図4 改良後の力覚生成装置

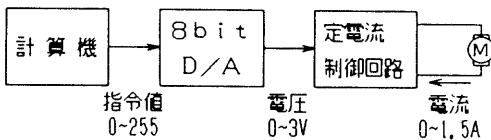


図5 モータ制御回路ブロック図

は1.6 (gw)で、0~約400 (gw)まで制御可能である。

3.2.2 力覚の合成

任意の方向の力を生成するためには、4本の糸のそれぞれの張力を調節しなければならない。ここでは、4本の糸の張力の配分について考える。

指先の位置をPとし、Pから各糸の方向の単位ベクトルを \vec{a}_i ($i=0\sim 3$)、生成すべき力ベクトルを \vec{f} とする(図6)。この \vec{f} を \vec{a}_i の一次結合で表したときの係数が各糸の張力の大きさととなる。ただし、負の張力を与えることはできないので、各係数は非負でなければならない。この条件をみたす係数を求めるために、次のように考える。

Pのまわりの空間は、4本の糸のうちの3本を稜とし、Pを頂点とする三角錐領域4つに分けられる。 \vec{f} は必ずいずれか1つの領域に含まれており、 \vec{f} はこの三角錐をなす3本の \vec{a}_i の正係数の一次結合で表されることがわかる(図7)。したがって、この係数 k_i

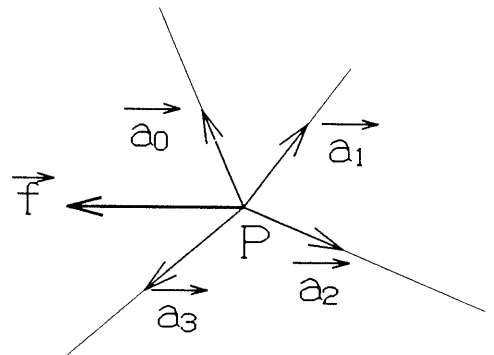


図6 糸の張力による力ベクトルの合成

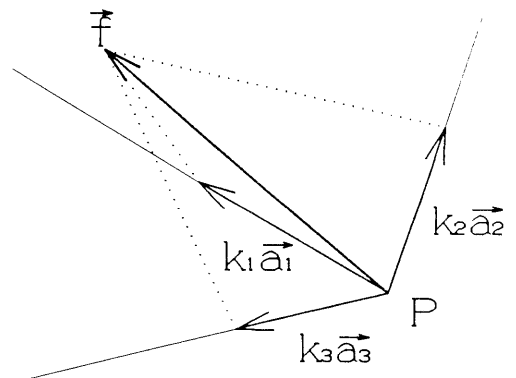


図7 糸の張力の決定

を求めれば各糸の張力の大きさを決定することができる。なお、残りの1本の張力は、糸がたるまない最小限の力をかけておく。

3.3 システムの構成

本研究で構築したシステムの構成図を図8に、システムのフローチャートを図9に示す。位置計測装置と力覚生成装置の制御はパーソナル・コンピュータPC-286Vで行い、仮想空間の接触判断や力の配分計算及び立体映像の生成はグラフィック・ワークステーションTITANで行っている。PC-286VとTITANはRS-232Cを介して通信を行っている。

4. 物体把握時の指先制御

前章では、新しい3次元インタフェース装置SPIDARにより、任意の大きさ・向きの力を生成することができることを示した。この章では、組立作業において物体を保持する瞬間の指先制御を、新しい力覚生成装置を用いて行う方法について説明する。

4.1 指先制御における問題点

実空間において指で剛体に触れる時、物体内に指が入り込むことはありえない。仮想空間内で剛体に触れる時にも、物体内への指の進入を妨がなければならない。安定な保持を実現するためにも、指を物体の表面で安

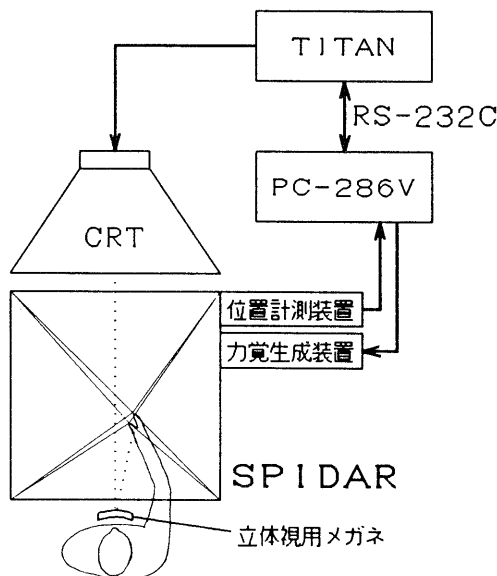


図8 システム構成

定に停止させることが必要である。そのためには、適切な強さの力を生成しなければならない。

4.2 指先の運動モデル

まず、指先は等速な慣性運動をしているものと仮定する。また、指先を質量 m (kg)の質点と仮定する。この質点が速度 v (m/s)で運動しているとし、力 f (N)を時間 T (s)だけかけて質点を停止させるものとする。このとき、運動量の変化と外部から与えられた力積の大きさが等しいことから、次の式が成り立つ。

$$f T = m v \quad (1)$$

T = 一定とすれば、 v に比例した大きさの力をかければよいことになる。ただし、実際には m を計測することはできないので、 $m/T = \alpha$ とおいて実験により α を定める。

4.3 モデルに基づく制御実験

以下に比例定数を決定するための実験について述べる。

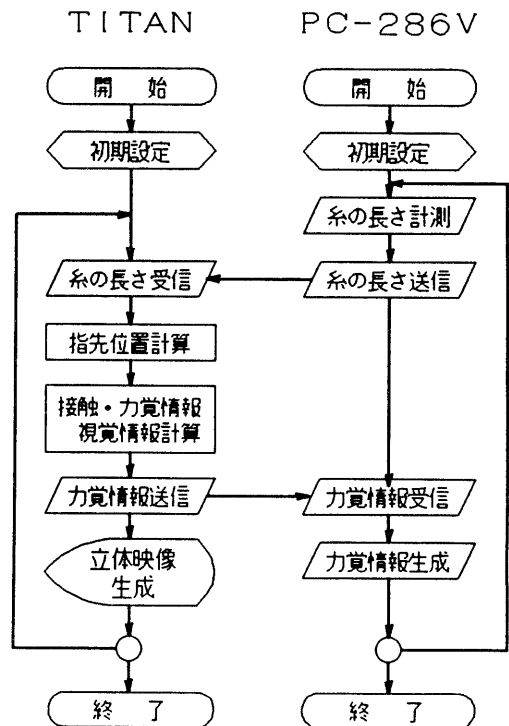


図9 フローチャート

実験課題は、被験者の前に提示された仮想剛体面を、人差し指で触ることである。この仮想剛体面は床面と被験者に対して垂直に設定されている。この動作を、なるべく指や腕に力をいれない状態で、指を動かす速さをいろいろ変えて行わせる。

この実験課題を、4人の被験者に対して、

- (a) $\alpha = 3.2$
- (b) $\alpha = 1.6$
- (c) $\alpha = 0.8$

の3つの条件について行い、そのときの指先の軌跡を記録した。

図10は各条件について、指先の速度と指の停止位置の正確度の関係を示したものである。横軸は接触するときの指先の速度を示し、縦軸は指先が停止した位置と物体の表面との距離である。縦軸の正側は、指が引き戻されていることを示す。また負側は、指が物体の内部に進入していることを示す。

以下に実験結果とその考察を述べる。

(a) $\alpha = 3.2$

いかなる速度においても指が引き戻されていることから、全体的に力が大きすぎることがわかる。また、右上がりの傾きが大きいことから、速度が大きいほど力が大きすぎる度合いが大きいことがわかる。

一方、点のばらつきは非常に小さく、ほぼ直線上に集中している。

(b) $\alpha = 1.6$

速度が小さい(100 mm/s以下)ときには指が内部に進入していることから力が弱すぎることがわかり、逆に速度が大きいときには力が強すぎる傾向がある。しかし、(1)に比べて、物体の表面近くで指が停止していることがわかる。

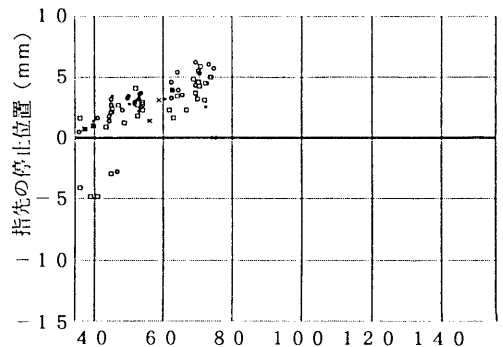
(c) $\alpha = 0.8$

いかなる速度においても指が物体内部に進入していることから、全体的に力が弱すぎることがわかる。進入した距離は、速度によらずほぼ同じような値をとり、またばらつきが大きい。その位置は点在している。これは、指先のどのような速度に対しても、生成される力覚は弱すぎていることを示している。

以上のことから、次のことがいえる。

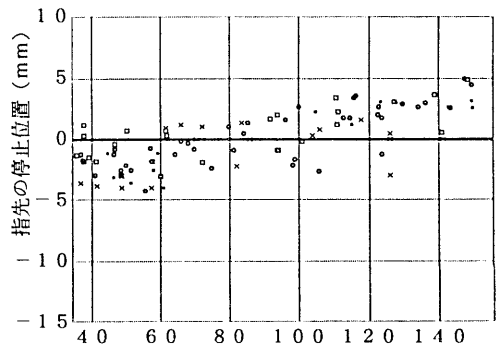
比例定数が大きくなるにつれて、右上がりの傾きが大きくなり、生成される力は大きくなりすぎる。次に、比例定数を小さくしていくと速度に対する依存度は小

さくなるが、全体的に生成される力は弱くなる。



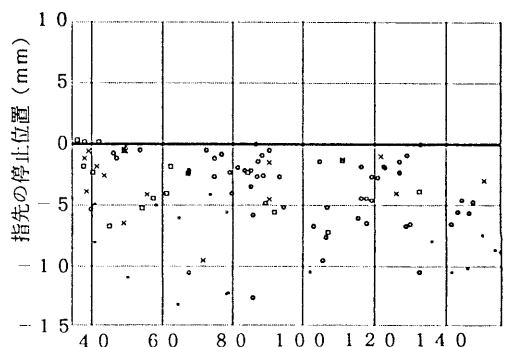
指先の速度 (mm/s)

(a) $\alpha = 3.2$



指先の速度 (mm/s)

(b) $\alpha = 1.6$



指先の速度 (mm/s)

(c) $\alpha = 0.8$

図10 指の速度と指の停止位置の正確度

4. 4 制御方法の補正

以上の結果をもとに、生成される力の補正を行う。

まず、速度による依存度が小さくなるような比例定数 α を決め、全体的に弱くなる分だけ、定数項をつけ加えて補正する。

$$f = \alpha' v + f_0 \quad (2)$$

ここで f_0 は人間が物体に触るときに指にかけている力であると考えることができる。

補正項を加えて生成される力について前節と同様な実験を行った。 α' としては、先の実験でもっとも速度の依存度が小さかった $\alpha = 0.8$ を用いた。 f_0 としては、(2) で $v = 100$ (mm/s) ($f = 160$ (g w)) のときにはほぼ表面で指が止まっていることから、このときと同じ大きさの力が生成されるように 80 (g w) とした。

図 1 1 に実験結果を示す。いかなる速度においても、ほぼ表面で指が停止していることがわかる。ずれの距離の平均は約 1.1 mm である。

5. むすび

本報告では、まず実際の組立作業の分析を行い、組立作業のための仮想作業空間の実現に必要な要素について検討を行った。それに基づき、すでに提案されている SPIDAR の力覚生成装置を、DC モータを用いて糸に張力を加えることができるように改良し、新しい空間インタフェース装置を提案した。この装置を用いることにより、任意の大きさ・方向の力を生成す

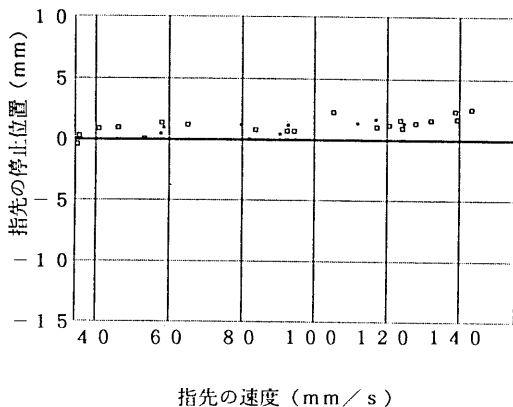


図 1 1 補正後の指の速度と指の停止位置の正確度

ることができるようになった。

さらに、この力覚生成装置により、物体を把握する瞬間の指先制御の方法を、指先の運動の物理モデルをもとに検討した。力の大きさを指の速度の 1 次関数とすることで、指を物体の表面で安定に停止させることができ、自然な力覚を与えることができるようになった。

今後の課題としては、物体を保持したときや持ち上げたとき、さらには保持している物体が他の物体にぶつかったときなどに、指先にかかる力の生成について検討することがあげられる。

参考文献

- [1] 佐藤, 平田, 河原田: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, 信学論, J74-D-II-7, 887/894 (1991)
- [2] 平田, 水口, 佐藤, 河原田: 仮想積木の世界, 信学技報, HC91-2, 9/14 (1991)