

## 仮想世界を確かめる

佐藤 誠

東京工業大学 精密工学研究所  
〒226 横浜市緑区長津田町 4259

### 1. まえがき

近年、計算機はその能力の向上に伴い、三次元形状設計のプロセスにおいて重要な役割を担うまでになってきている。しかし、これまでの計算機を用いた形状設計作業は、煩雑な手続きと習熟を必要としてきた。しかし、ヒューマンインタフェースの観点から見ると、人間への負担はできるだけ少ない方がよい。そのためには容易にしかも効率よく作業できる環境が必要不可欠であると考えられる<sup>1,2)</sup>。

実世界では、人間は手を使って形状の加工を行なう。計算機を利用する場合でも、より自然で容易な三次元形状の加工を行なうためには、三次元の形状モデルを直接操作できることが望ましい。本稿では、バーチャルリアリティ (VR) 技術を形状加工へ応用すること、つまり形状モデルに対して手で直接操作ができる VR 空間の構築について説明する。人間が形状加工作業を行う場合には、目からの視覚情報はもちろん、手や指先の触覚や力覚などの感覚をも無意識のうちに用いている。三次元形状設計のための VR 空間を構築する際にも、効率良い作業を可能とするためには、視覚とともに触覚や力覚等の感覚情報を操作者にフィードバックすることが有効であると考えられる<sup>3)</sup>。ここではまず、VR 空間内での三次元物体操作における力覚情報の意味について考える。次に、VR 空間をネットワーク化する際の力覚の役割について述べる。

### 2. 力覚の役割

はじめに、力覚が三次元物体の操作におい

て、どのような役割を担っているかを簡単な例を挙げて分析してみよう。ここでは、三次元物体操作の基本的動作として pick-and-place を取り上げる。Pick-and-place とは、物体を持ち (pick)、移動し (move)、配置する (place) という一連の基本操作である。

**把持** 操作者は視覚情報によって手と物体との相対位置を確認しながら、手を物体表面付近まで移動させる。次に、触覚で物体に触れたことを確かめる。そして親指と他の指で物体を挟み、力を加えて把持する。物体表面からの反力を力覚として感じ、指に加える力を加減することにより物体を安定に把持する。また指先に物体の重さを感じることで物体を持ち上げていること知る。

**移動** 物体を安定に把持しながら、物体の平行移動・回転操作を行なう。安定な把持は物体からの反力を指先に感じながら把持力を調節することにより行なう。また物体の移動にともなう慣性力を指先に感じることで、物体の状態を認知することができる。

**配置** 物体を配置する際には、把持している物体が配置すべき目標地点と接触した際に生じる衝突感を頼りにそれぞれの相対位置関係を知覚する。次に、把持している力を緩めていき、物体からの力を指先に受けなくなることで解放したことを確認する。

このように、人間が作業を行なうときには、視覚・触覚・力覚などさまざまな感覚情報を用いてほとんど無意識のうちに行動の修正を行な

う。そして行動を修正するための制御情報が筋肉に送られ、最終的に意図した動作が実現される。このようなサイクルがうまく機能することによって、人間はいろいろな作業を的確に行なっている。

何らかの「作業」を目的とするようなVR空間を構成するためには、人間の動作の入力、その動作に対する仮想世界の更新(変形や移動など)、そして視覚や触覚・力覚などの感覚情報の計算機処理によるフィードバックを効果的に行なわなければならない

### 3. VR空間の構成

現在、仮想環境の情報を視覚的にユーザーに与える方法としては、CGが一般的である。一方、力覚情報提示の方法については研究段階であり、試行錯誤が繰り返されているところである。ここでは、私の研究室で提案している空間インタフェース装置 SPIDAR (SPace Interface Device for Artificial Reality) を取り上げ、VR空間内における力覚情報の意味について考えてみる。

SPIDAR は三次元空間での位置入力装置であると同時に、操作者の指先に力覚をフィードバックする力覚提示装置である。この装置は、指キャップに結ばれた4本の糸の長さをロータリーエンコーダで計測することにより、指の三次元位置を算出する。また、この糸をモータで引っ張り、そのトルクを制御することによ

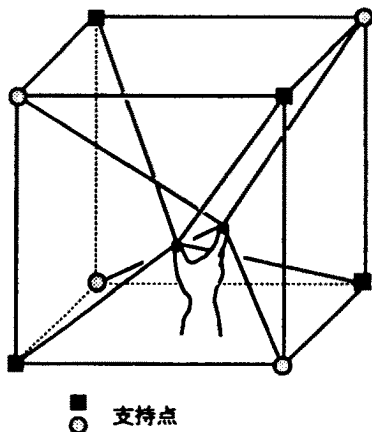


図1 SPIDAR 概念図

て、糸の張力を制御する。指先に取り付けられている4本の糸の張力を適当に調節することによって、任意の大きさ・向きの力を生成することができる。(図1及び図2参照)

この装置によって仮想物体からの抗力、物体の重さ等の力覚を自由に指先にフィードバックすることが可能となる。SPIDAR とCGディスプレイを組み合わせたVR空間では、ディスプレイ上にコンピュータグラフィックスによって、仮想空間内の物体と仮想の指が映像表示される。この仮想の指は、SPIDARによって計測されるユーザーの指の動きと連動している。そして、この仮想の指と仮想物体との接触の有無を計算機が判定し、VR空間を管理している。それに応じて力覚情報と映像を生成している。

### 4. 仮想物体の加工作業

前述したVR空間を用いて、仮想旋盤上の仮想物体を指で削って変形加工する際の力覚情報の効果を調べた。作業課題は、図3(a)のようなコップ状の仮想物体を、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。この課題を力覚情報を与える場合と与えない場合について行ない、比較した。作業精度を評価するために、加工作業の達成率  $R_a$  と欠損率  $R_e$  を次のように定義する。

$$R_a = 1 - S_a / S_2, \quad R_e = S_e / S_1$$

図3(d)は変形後の仮想物体の回転軸を通る断面を表わしたものである。S1は目標形状の面

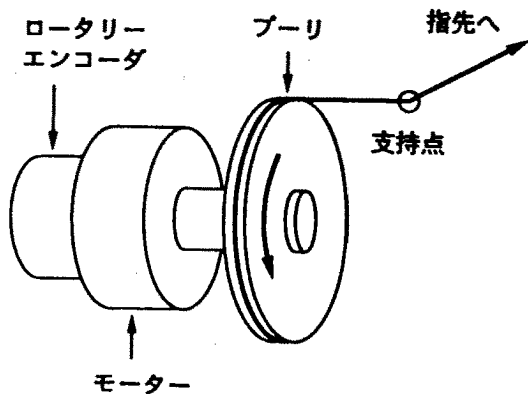


図2 モーターとエンコーダ

積, S2は初期形状から目標形状まで加工する部分の面積, Saは加工が不十分で目標よりも大きくなっている部分の面積, Seは加工し過ぎて目標よりも小さくなってしまった部分の面積である. Ra, Reとも0~1の値をとり, 作業の初期状態ではRa = Re = 0である. 理想的な作業が行なわれた場合ではRe = 0のままRaが1に近づく.

図4は3人の被験者について達成率(縦軸)と欠損率(横軸)を表したものである. ○印は力覚情報がある場合, □印は力覚情報がない場合を示している. 力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, 力覚情報の効果が顕著に現われているのが分かる.

### 5. 仮想物体の重さ

次に, VR空間での物体の重さの取り扱いについて考えてみる<sup>5,6)</sup>. VR空間では物体の重さを自由自在に設定できる. 仮想物体の重さは存在しなくても良いのだろうか? 先のVR空間内において pick-and-place 作業を行ない, 対象となる仮想物体の重さを変えて実験を行なった. 仮想物体は5×5×5cmの立方体であり, 6種類の重さ(20, 35, 50, 70, 100, 150g)について調べた. ちなみに, この大きさの立方体を実世界の素材に置き換えてみると, 発泡スチロー

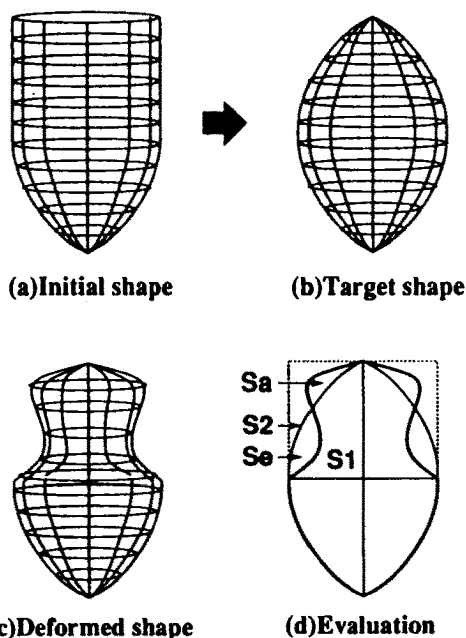


図3 仮想旋盤の課題

ル約10g, 木約40g, アルミニウム約150gである. VR空間での pick-and-place の実験結果の平均値を図5に示す. これは作業の迅速さと正確さを表したグラフである. 横軸は仮想物体の重さを, 縦軸は左軸が作業時間, 右軸が配置された物体と目標地点とのずれ量を表している.

作業時間について観察すると, 物体の重さが重くなるほど作業時間が長くなり, 特に, 50g以下のときに早く作業を終えていることが分かる. そして, 作業の正確さについて観察する

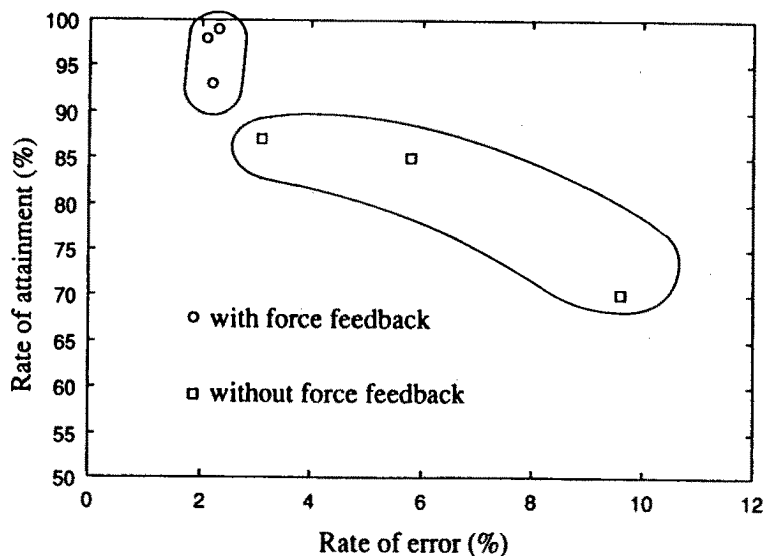


図4 仮想旋盤作業での力覚の効果

と、重さが 35 g ~ 50 g 程度のときに最も正確に作業ができていることがわかる。この実験の結果から、VR空間内での pick-and-place 操作を行なう上で、最適な重さ 20 g ~ 50 g 程度というものがあることが分かる。

被験者の主観評価でも、質量が重いものは当然操作しにくいですが、軽いものも不安定さを感じるため、適当な重さがあった方がやりやすいという感想が多く聞かれた。

## 6. ネットワークVRと力覚

VR技術により、仮想的な三次元空間の中に入り込んで、歩き回ったり、そこにある仮想三次元物体に触れるなど、様々な疑似体験が可能となる。このようなVR技術をネットワーク通信技術と融合することにより、遠隔地にいる人間が共通のVR空間に入り込んで共同作業を行なうことが可能となる。

ここでは、ネットワーク型VR空間における力覚情報の役割について考えてみる。前章までに述べてきたような単独型VR空間をネットワーク型VR空間に拡張する際に問題となるのは、各参加者の端末が同じ内容のVR空間情報を持たなければならない、ということである。つまり、一参加者の操作によってVR空間が変化した場合、他の参加者のすべての端末に表示されるVR空間も同時にデータの変更を行なって、ネットワーク型VR空間全体の同一性を保つ必要がある。同一性の破壊は、一つの仮想物体を複数の端末で同時に変更しようとする時に発生しやすい。つまり、端末間での矛盾が一番の問題となるわけである。この問題を解決する方法として、「アクセス権」という考え方を導入することが一般的である。この考え方は、一人の参加者が仮想物体を操作している時には、他の参加者にはその物体を操作できなくする、

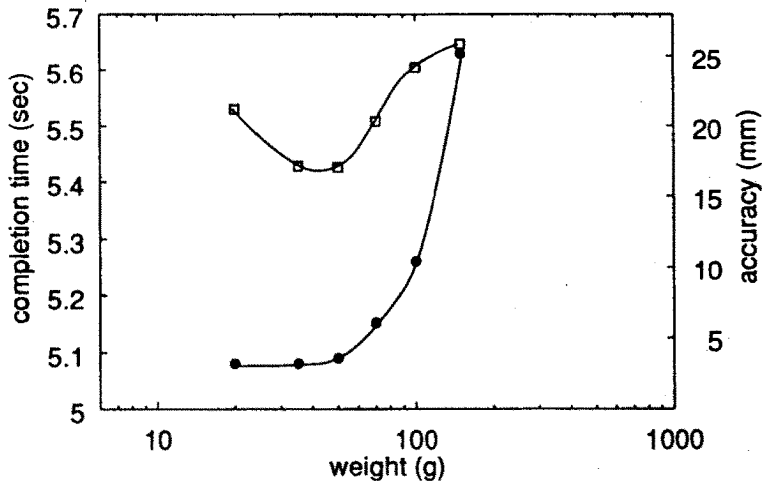


図5 仮想物体の重さの影響

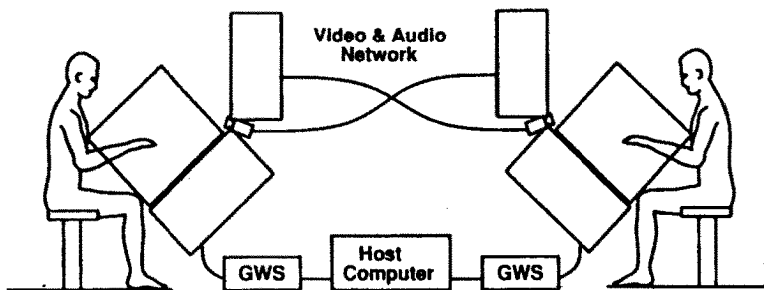


図6 ネットワーク型 SPIDAR

他の参加者にはその物体を操作できなくする、というものである。しかし、このような考え方は、真の協同作業とは言えない。物体を操作しようとするすべての参加者に等しくアクセス権は与えられなければならない。力覚フィードバック可能な三次元空間インタフェース装置を用いることにより、「アクセス権」という考えを採用しなくともVR空間の同一性は保つことができる。各参加者がVR空間の同一性保存を妨げるような行動を起こそうとしても、力覚によって矛盾の起きるような動きは事前に防がれるのからである。

図6は研究室で開発したネットワーク型のVR空間システムである。作業者の顔前には協同作業者の顔が映し出されており、その下の画面には共有VR空間が映し出されている。作業者はSPIDARを使ってVR空間に働きかけを行ない、カメラ・マイクを通して協同作業者と会話を行なう。SPIDARは力覚フィードバックが可能なので、2人の作業者が1つの仮想物体を操作している時は互いの力が伝達され、共有VR空間はいつも同一性が保存されている。このようにして遠隔地にいる2人の作業者が1つのVR空間に入って、3次元形状モデリングの遠隔協同作業などが可能である。

## 7. あとがき

VRは、コンピュータと人間との間を結ぶ新しいヒューマンインタフェース技術として現在発展、進行中の技術分野であり、その定義自体がまだ明確にはなっていない。VRと同じような意味で使われる言葉も多く、「仮想現実 (Virtual Reality)」、 「人工現実感 (Artificial Reality)」、 「遠隔存在 (Tele-Presence)」、 「サイバースペース (Cyber Space)」等々、VRの将来に期待する人々が様々な名前では呼んでいる。テレ・コミュニケーションへの適用に関しても、将来の目的は一つではなく、臨場感の追求および協同作業支援の追求の二つが考えられている。前者は、実際に会って対話しているのと同様の臨場感を実現しようとするものである。

一方後者は、実際の現実空間での対面対話は必ずしも効率的ではない、という立場から、もっと効率的な空間を創り出そうというものである。いずれも大変魅力的な挑戦であり、未来のコミュニケーション形態に大きな貢献をもたらすであろう。

(本文は機械振興、27巻6号の解説に基づいている。)

## 文 献

- 1) S. S. Fisher, M. McGreevy, J. Humphries and W. Robinett: Virtual environment display system. *Proceedings of 1986 ACM Workshop on Interactive Graphics*, 77-87, 1986.
- 2) J. D. フォーレイ: 近未来のインタフェース. *サイエンス*, 17 (12), 77-85, 1987.
- 3) 佐藤 誠: フォースディスプレイ. *テレビジョン学会誌*, 46, 681-684, 1992.
- 4) 佐藤 誠, 平田幸広, 河原田 弘: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案. *電子情報通信学会論文誌*, J74-D-II, 887-894, 1991.
- 5) M. Ishii and M. Sato: A 3D interface device for pick-and-place task. *The 3rd International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence*, Tokyo, 105-110, 1993.
- 6) 平田幸広, 水口武尚, 佐藤 誠, 河原田 弘: 組立操作のための仮想作業空間. *電子情報通信学会論文誌*, J76-D-II, 1788-1795, 1993.