仮想環境のための干渉力発生アルゴリズム†

神 徳 徹 雄*・谷 江 和 雄*

A Force Display Algorithm for Virtual Environments

Tetsuo KOTOKU* and Kazuo TANIE*

Graphic simulators are currently used in application such as off-line teaching tasks on industrial robots and CAD systems. While recent advances in computer graphics have led to the development of high powered computers with high quality static and dynamic graphics, the display of kinesthetic information is still lacking. This display of kinesthetic information is critical for the development of simulators that can more accurately and realistically present simulated objects to the user. With this problem in mind, this paper proposes a method of calculating interaction forces produced in the simulation world. These forces are effectively used in a simulator where contact forces are felt by the user through its force-reflecting handle. In this method, two fundamental contacts, Face-Vertex and Edge-Edge, will be introduced, and the interaction force calculations will be defined. It will be demonstrated that every contact between two convex polyhedral objects can be described using this set of the fundamental contacts. The interaction forces will be determined from the sum of forces calculated at each fundamental contact. Using a simulator system which displays forces, certain preliminary experiments are carried out and the effectiveness of the method confirmed.

Key Words: telerobotics, force display, virtual reality, artificial reality, task teaching

1. ま え が き

近年、ロボットシステムにおけるシミュレータのニーズが高まりつつある。一般に、ロボットシステムの中で使用されるシミュレータはグラフィックディスプレイを用いて操作しているロボットや作業環境を操作者に視覚的に提示する装置である。たとえば産業用ロボットのオフラインティーチングでは、ディスプレイに表示されているロボットを観察しながら作業教示を行うシステムが普及しつつある。また、宇宙ロボットなどの遠隔操作においては、信号伝送遅れによる操縦性の低下を改善するために、予測表示用ロボットシミュレータ上でロボットの作業教示を行う方式が検討されている^{1)~4)}。こうした種々の目的で使用されるシミュレータを開発する際の重要課題は、リアルな映像、操作感を与えるシステムをいかに構築するかにある。視覚的な情報に限れば、最近の

コンピュータグラフィックス技術は、迫真性のあるロボットとその作業環境の映像を実時間で提示することを可能にしつつある。

一方、ある種の作業を行うとき、力感覚が作業の効率的遂行に重要な役割を果たすことが知られている。この種の典型的作業に、機械部品の組立作業などがある。組立作業では、ロボットのエンドエフェクタが把持する部品とそれを組み付ける相手部品との間に接触が随時発生し、ロボットはそのたびに拘束を受けることになる。この拘束力を巧みに調整することが、この種の作業を滑らかに遂行するために不可欠である。こうした要求に答えるためにロボットのアームの制御技術では、力制御やコンプライアンス制御などが⁵⁾、また遠隔操作技術の分野では、操縦されるロボットが受ける環境からの拘束力を操作者に伝達するバイラテラル遠隔制御方式が研究されている^{6),7)}。

さて、従来のこれらの研究の多くは実際のロボットや実環境を対象とした議論であるが、シミュレータ上でシミュレートされたロボットにおいても、拘束感の提示は教示作業効率を向上させる上で有効なことが指摘されている⁸⁾。そこで最近は仮想現実感の実現に対する関心の

† 第30回計測自動制御学会学術講演会で発表(1991・7)

* 工業技術院機械技術研究所 つくば市並木1-2

* Mechanical Engineering Laboratory, AIST-MITI, Tsukuba

(Received April 2, 1992)

(Revised August 14, 1992)

高まりとも相まって、視覚的な情報だけでなく、干渉するモデル化された物体に作用する力を推定し、操作者にそれを伝達することができるシミュレータの研究が一部で進められている。たとえば岩田⁹⁾は、遠隔操作されるグラフィックディスプレイ上のロボットハンドで物体を把持したときの把持力を操作者に伝達できるシステムを開発した。また Funda ら¹⁰⁾は拘束感を表現できる遠隔操作型宇宙ロボット用動作教示シミュレータを提案している。さらに、Minsky¹¹⁾、福井ら¹²⁾は仮想現実感の研究として、グラフィックス上の物体の表面のテクスチャを触覚情報として人に感知させるシステムを検討している。現時点で提案されているこうしたシミュレータでは基本的にはまず物体間の干渉の有無を判定し、その干渉量に応じて物体間に働く力を定義された関数式に基づき生成する。その際、干渉計算が複雑になるため、従来の研究のほとんどは表面が比較的単純な数式で表現できる物体を対象とし、あるいは一点接触の場合に限定して議論が進められている。しかし汎用性のあるシミュレータを開発するには、多点接触を含む一般的な形状の物体同士の干渉力をも生成できるアルゴリズムの検討が必要である。

わわれは、遠隔操作型ロボットの作業教示用シミュレータの開発を目指し、グラフィックシミュレータ上で操作される物体が環境と干渉する際に発生する接触力を推定し、それを操作者に拘束力として提示する問題を検討してきた。そして前報では、ロボットのエンドエフェクタを点と仮定してこの問題を検討し、それを伝送遅延を含む遠隔操作マスタスレーブシステムに適用した結果を報告した¹³⁾。本論文ではより一般的な環境を対象とするために、大きさをもつ 3 次元物体同士の干渉の取り扱いが可能な干渉力計算アルゴリズムを提案すると共に、それをバイラテラル形マスタシステムに実装し、拘束感の提示効果を実験によって確認した結果を報告する。

2. 凸多面体の干渉問題

問題を扱いやすくするために、本論文では表面に摩擦のない二つの凸多面体モデル同士の干渉のみを取り扱う。一般に自由曲面を含む物体の形状は多面体で近似でき、また凹多面体も分割することにより凸多面体の集合で記述できる。したがって、凸多面体同士の干渉問題を解く手法が見いだされれば、この手法を適用することで、一般的な形状の物体を含む問題も解決できる。さらに本論文では互いに干渉する物体の一方は固定物、すなわち動かないと仮定する。Fig. 1(a)に凸多面体を含むモデル空間を示す。モデル空間中でシミュレートされたロボットアーム(以下仮想アームと呼ぶ)のエンドエフェク

タが物体 A を把持し、それを Fig. 1(b)のマスタアームで操る際に物体 A が固定物体 B に接触し拘束を受ける状況を想定する。ここで、座標系を以下のように定める。すなわち、物体の中心および仮想アームのエンドエフェクタの中心に原点をもつ座標系を $O_a-X_aY_aZ_a$ 、 $O_e-X_eY_eZ_e$ とし、それぞれ物体座標系、エンドエフェクタ座標系と名づける。また、モデル空間およびマスタ空間に対応して定める絶対座標系を $O-XYZ$ 、仮想アームのエンドエフェクタ座標系に対応して定めるマスタアームの操作端座標系を $O_g-X_gY_gZ_g$ とする。今、物体 A が固定物体 B に複数点で接触して受ける干渉力ベクトルを物体座標系で $f_1, f_2, \dots, f_n$ (n は接触点の数) とすると、物体中心 O_a に作用する力とモーメントを要素とするベクトル F 、およびこの F によって仮想アームのエンドエフェクタに作用する絶対座標系における力ベクトル F_e は、それぞれ次式で表わすことができる。

$$F = Q(f_1, f_2, \dots, f_n) \quad (1)$$

$$F_e = T T_a F \quad (2)$$

ここで、(1)式の Q は干渉力を物体中心に作用する力ベクトルに変換する関数、 T_a 、 T は物体座標系およびエンドエフェクタ座標系をそれぞれ、エンドエフェクタ座標系および絶対座標系へ変換する行列である。また、 J を絶対座標系で記述されたマスタ操作端位置と関節角度の

(a) Model space including two objects and a virtual arm

(b) Master arm

Fig. 1 Definition of coordinates in the model and master spaces

関係を表わす関数に対応するヤコビ行列とすれば、操作者に拘束力 F を感知させるためにマスタ関節に発生させるべき関節力ベクトル τ_m は次式で計算することができる。

$$\tau_m = J^T F_e \quad (3)$$

ここで、 T は行列の転値を表わす。以上において、物体 A や固定物体 B はモデル空間中に記述されているものが対象になるから、その形状は既知である。仮想アームはその形状が既知でかつ構造が既知の空間で操作されるから、環境を構成する物体とそのエンドエフェクタの相対位置は既知と仮定できる。一方、物体座標系もモデル構築の際に設定するようにすれば、結果的に上式中の T 、 T_a はシステムパラメータから容易に決定できる。そこで、操作者の挙動に依存して決まる上述の(1)式、すなわち物体間の接触位置とその位置で発生する干渉力から物体に作用する合力を算出する方法が与えられれば、操作者に感知させるべき干渉力は計算によって決定することになる。

以下では、この(1)式を計算するアルゴリズムを検討する。

3. 干渉力の計算

3.1 基本接触モデル

凸多面体同士の接触では、多様な干渉形態が考えられる。多様な干渉形態における干渉力を統一的方法で計算するために、本論文では基本接触モデルをまず定義する。そしてこの基本接触モデルの組合せで一般的な接触を表現するとともに、各基本接触モデルに対し定義される干渉力の合成により、多様な接触形態における干渉力を求める方法を提案する。ここで基本接触モデルとしては、

Fig. 2 Face-Vertex contact model (FV contact)

Fig. 3 Edge-Edge contact model (EE contact)

面-頂点接触モデル(以下 FV 接触)と稜線-稜線接触モデル(以下 EE 接触)の二つを導入する。FV 接触とは Fig. 2 に示すように、ある物体の頂点 V がほかの物体の面 F に干渉している状態、また EE 接触は Fig. 3 に示すように、ある物体の稜線 $E1$ がほかの物体の稜線 $E2$ と干渉している状態である。この 2 種の接触モデルを導入すると、すべての多面体の接触形態がこの組合せで表現できる。

たとえば Fig. 4(a) は、二つの物体が面同志で干渉する場合であるが、この接触形態では A 、 B 、 C 、 D の各点で一方の物体の頂点ともう一つの物体の面が接触するから、四つの FV 接触の組合せで表現することができる。また Fig. 4(b) は二つの物体が面同士で干渉する別の例であるが、この接触形態は点 A 、 B で頂点と面、点 C 、 D で稜線と稜線の接触が発生しているから、二つの FV 接触と二つの EE 接触の組合せとして表現される。一方、Fig. 4(c) は 2 物体が面と稜線で干渉する例である。これは図の点 A 、 B で稜線同志の接触が発生しているから、二つの EE 接触の組合せで表現することができる。

(a) Face-Face contact described by 4 FV contacts

(b) Face-Face contact described by 2 FV and 2 EE contacts

(c) Face-Edge contact described by 2 EE contacts

Fig. 4 Examples of objects in contact

このように多様な接触形態は上述の二つの基本接触モデルで記述されるから、この基本接触での干渉力の計算法を与えればそれらの合成として、一般的な物体間の干渉力の計算が可能になる。各基本接触における干渉力の計算法と合成法は以下の節に示す手順で行う。

3.2 FV 接触の干渉力

操作者によって、一つの物体の頂点 V がもう一つの物体の面 F に接触する状況が発生し、つぎの操作でさらに頂点 V が物体の面 F 内に押し込まれた状況を Fig. 5 (a) に示す。本論文ではこの図に示すように、頂点 V と面 F が接触している状態のみならず、頂点 V が面 F を突き抜けて物体内部に侵入し、物体間にオーバーラップが生じている状態をも含めて FV 接触状態と定義する。まず前報¹³⁾ 同様物体表面に線形のばねを仮定し、このばねが仮想的に物体操作により押し込まれるとして、物体表面の押し込み量とあらかじめ設定されるばねの剛性との積から干渉力を計算する。ただし、物体同士のオーバーラップ量は微小とし、干渉力としては並進力のみを考える。計算法を Fig. 5(b) に示す。頂点 V より面 F に垂線を下しその交点を S 、大きさが SV で、 S から頂点 V へ向かう物体座標系上で記述された位置ベクトルを侵入ベクトル $\mathbf{dx}$ とする。また、侵入ベクトル方向に物体 A および環境 B がもつばね定数を k_A, k_B とするとき、干渉点でのばね効果は環境および物体双方のばねが直列接続して生成されるとして、次式に従って計算される力ベクトル $\mathbf{f}$ を干渉力とする。

$$\mathbf{f} = k\mathbf{dx} \quad (4)$$

$$1/k = (1/k_A) + (1/k_B) \quad (5)$$

一方、力の発生位置は、頂点 V が属する物体については頂点 V の位置とし、そこに侵入ベクトル $\mathbf{dx}$ と反対方向の力 $-\mathbf{f}$ を発生させる。面 F を含む物体側では、点 S の位置に侵入ベクトル $\mathbf{dx}$ と同方向の力ベクトル $\mathbf{f}$ を発生させる。

3.3 EE 接触の干渉力

(a) Virtual spring structure assumed on the object surface

(b) Method of the force calculation

Fig. 5 Interaction force calculation for a FV contact

一つの物体 A の稜線 $E1$ がもう一つの物体の稜線 $E2$ に接触した後、それがさらに押し込まれて、両物体間にオーバーラップが発生した状態を Fig. 6(a) に示す。EE 接触でも稜線同士が接触するだけでなく、オーバーラップが生じる場合までを含めて、EE 接触と考える。また FV 接触同様、物体間にばね効果を想定するとともに、侵入ベクトルを定義し、干渉力を求める。すなわち Fig. 6(b) に示すように、稜線 $E1$ および $E2$ に直交する直線と稜線 $E1, E2$ の交点をそれぞれ Q, R とする。ここで線分 QR の長さを大きさにもち、点 Q より R に向かう方向を正とする物体座標系上で記述される位置ベクトルを侵入ベクトル $\mathbf{dx}$ とする。一方、ばね効果は侵入ベクトル上に FV 接触の場合と同様に設定し、以下、(4)、(5) 式に従って干渉力を計算する。

力の発生位置は稜線 $E1$ をもつ物体については稜線 $E1$ 上の点 Q 、稜線 $E2$ 側の物体では稜線 $E2$ 上の点 R とし、それぞれの点に侵入ベクトルと同方向および逆方向の力を発生させる。

3.4 干渉力の合成

物体同士の接触では、基本接触が同時に複数個発生するから、つぎに各基本接触が発生する干渉力を合成して、物体に作用する干渉力を求める。まず、 n 個の基本接触が発生しているとし、物体座標系上で記述されたその干渉力ベクトルをそれぞれ (1) 式の場合と同様に、 $\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_n$ とする。また各力ベクトルの作用点の物体座標系上の位置ベクトルを $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_n$ とすると、物体座標系上で記述された物体上の原点 O_a に作用する合成力ベクトルおよびモーメント $\mathbf{f}_t, \mathbf{\tau}_t$ は、釣り合いの式から次式で計算することができる (Fig. 7 参照)。

$$\mathbf{f}_t = \sum \mathbf{f}_i \quad (6)$$

(a) Virtual spring structure assumed on the object surface

(b) Method of the force calculation

Fig. 6 Interaction force calculation for an EE contact

Fig. 7 Integration of forces produced at contact models

$$\tau_t = \sum p_i \times f_i \quad (7)$$

一方、上式で計算される f_i , τ_i を $F = (f_i, \tau_i)^T$ と置けば (2) 式に代入すべき F が求められる。

4. 基本接触の探索

前章の手順で干渉力を計算するには、どのような接触がどの位置に発生しているかを、モデル化された空間を探索して発見しなければならない。人が操作する物体の運動に対し遅れなく干渉力を生成するには、できるだけ高速にこの探索を実行し、干渉力を計算する必要がある。本研究では探索に際し、まず対象となる多面体を、その各平面の方程式 $ax + by + cz + d = 0$ (ただし、 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$) の係数の組 (a, b, c, d) で記述すると共に、そのトポロジカルな構造を翼状リスト構造によって表現した。

一般に、物体間の厳密な干渉検査では、物体位置・姿勢を更新するごとに物体を構成する面・稜線すべてに対し一つ一つ干渉検査を行うことになり、物体の構造が複雑になるにつれて、実時間性が急速に損なわれる。そこで探索の効率化を計るために、2 物体間の最接近点を逐次追跡する手法¹⁴⁾を導入した。Fig. 8 に二つの凸多面体がある姿勢でモデル空間中に存在するときの最接近点を示す。最接近点探索はそれを常に物体面全域について実行すると時間を要する。しかし、物体の運動に比較して、探索のサンプリング速度を高速化すれば、最接近点の移動範囲は一つ前のサンプリング時点における最接近点の近傍に限られる。そこで、高速でサンプリングを実行し、常に前の最接近点の近傍のみを探索してつぎの最接近点を追跡していく手法を採用した。この具体的追跡法は以

Fig. 8 Nearest points between two objects that are evaluated in the algorithm

下のとおりである。まず、各物体の面、稜線、頂点を構成要素、最接近点を含む構成要素を最接近要素と呼ぶことにする。いま、二つの物体があるとき、最初にそれぞれの物体から最接近要素の候補を取り出し、それぞれの要素上での最接近点 (C_A, C_B) を見つける。つぎに、一方の C_A に対してもう一方の点 C_B を含む要素の隣接要素を追跡し、より接近した要素を探索する。もし、それが存在する場合は、その要素上の最接近点を新しく点 C_B とする。次にこの点 C_B に対し、点 C_A を含む構成要素の隣接要素を探索し、より接近した要素の有無を調べ、それが発見されたらその要素上で最接近点を同様に調べ、それが存在する場合はその要素上の最接近点を新しい点 C_A とする。以下この手順を C_A, C_B の双方から見て最接近点となるまで繰り返せば、その最終状態として最接近点求められる。この方法は物体の構造の複雑さによらず、ほぼ一定時間で探索が完了するという特長がある。

各サンプリング周期で最接近点を探索すると、つぎにその最接近距離 d を求め、 $d > 0$ の場合は干渉なしとして、 $F = 0$ を出力する。一方 $d \leq 0$ が発生したときは、干渉ありとして、干渉位置探索プログラムへ移行する。本研究では、二つの凸多面体の干渉問題を仮定しているから、 $d \leq 0$ が発生したときの物体間の接触は 1 領域に限られる。そこで干渉探索プログラムでは、翼状構造データを参照しつつ、最接近点近傍の稜線や面を追跡し、基本接触の種類とその発生位置を見いだすと共に、3 章のアルゴリズムにしたがって、干渉力を計算する。この干渉探索プログラムは、干渉状態が続く間は繰り返し実行される。一方、干渉状態が解除された場合は、再び最接近点追跡プログラムが実行され、以下上述のプロセスが繰り返される。Fig. 9 に探索プログラム全体のフローチャートを示す。

Fig. 9 Flow chart of interaction force calculation program

5. 実 験

以上の干渉力計算アルゴリズムの妥当性を評価すべく実験を行った。本章ではその結果を述べる。

5.1 実験システム

Fig. 10 に実験システムの構成を示す。全システムは、シミュレータおよびモデルをリアルタイムで表示するためのグラフィックディスプレイ、モデル空間中の物体を操作するためのマスタマニピュレータとその制御装置からなる。マスタマニピュレータは 4 関節 4 自由度(並進 3 自由度(x, y, z), 鉛直軸回り 1 自由度(ϕ))をもち、各関節に姿勢を検出するためのエンコーダとトルクを発生するためのダイレクトドライブモータが装備されている¹⁵⁾。また操作端には操作者が感知する力・トルクを検出するための 6 軸力・トルクセンサが装着されている。マスタの制御装置内ではエンコーダの信号より操作端の位置・姿勢を計算し、シミュレータにその情報を出力する。シミュレータ内では操作端の動きに応じてグラフィックディスプレイ上に表示する物体を操作すると共に、干渉力計算アルゴリズムにより物体間に発生する干渉力を計算する。一方この干渉力に応じてマスタマニピュレータの各関節の DD モータの電流を制御することにより、物体の干渉にとまなう拘束力を操作者に提示する。操作者

はこの拘束力とシミュレータ上の映像をモニタしつつ、操作を実行する。

干渉力計算とグラフィック表示の制御には実時間性を高めるために、トランスピュータ(T 800, 20 MHz)を用いた並列演算システムを導入した。すなわちトランスピュータをマスタマニピュレータの制御に 1 台、干渉力計算アルゴリズムを内蔵したシミュレータに 2 台導入した。またグラフィックス上の物体表示にはワイヤフレームモデルを用い、その制御にはワークステーション(Sun 4/330 GX)を用いた。以上のシステムで干渉力の計算は 10 ms ごとに行っている。

5.2 実験内容

干渉力の計算に用いる基本接触の組をいくつか含む 2 種の作業環境を取り上げ、アルゴリズムの検証実験を行った。第 1 の環境は Fig. 11 に示すように、垂直な堅い固定壁と堅い立方体のある空間である。この空間においてまず仮想アームのエンドエフェクタ座標系を操作立方体の物体座標系に一致させて、立方体を把持していると仮定した。これはマスタアームの操作端の運動を、並進 3 自由度(x, y, z)および鉛直軸回りの回転 1 自由度(ϕ)を有する操作立方体の運動に一致させるように操作系を構成することに相当する。こうした操作系を用いて、Fig. 12 にその上面図を示す作業シーケンスにしたがって作

Fig. 10 Experimental setup

Fig. 11 Environment model I

Fig. 12 Task sequence for environment model I

業を実行するよう操作者に要求した。すなわち、まず立方体を壁に接触していない状態(A)から、少し傾けつつ水平に壁方向に移動させて、稜線を壁面に接触させ(B)、つぎに鉛直軸回りにそれを回転して面接触の状態にしてから(C)、壁面にその面接触を維持しつつ立方体を押し付けの一連の動作を実行させた。第2の環境は Fig. 13 に示すように、大きさの等しい二つの堅い立方体が存在する空間である。一方の立方体は固定されており、もう一つの立方体を上述の同様の操作系により操作する。操作者に要求した作業シーケンスを作業空間の上面図として Fig. 14 に示す。まず非接触の状態(A)から、一方の立方体を水平に移動し、固定立方体の側面にその稜線を接触させる(B)、つぎに、稜線-面接触を維持しつつ立方体を鉛直軸まわりに回転させて面-面接触に移行した後(C)、固定立方体の稜線に面を押し付けつつその回りに回転させる(D)。最後にこの回り込んだ面に対して面の押しつけ動作(面-面接触)を行う(E)。上述の2種の作業実験では、ともに操作者に拘束感を主観的に評価させると同時に、作業中に操作端に作用する力・トルクを6軸センサによって測定した。

なお、環境の剛性はいずれの実験も、各物体とも等しい($k_A = k_B$)とし、安定が確保される範囲で最大に設定した。具体的には、第1の環境では $k = 2000$ N/m、第2の環境では $k = 800$ N/m に設定した。

5.3 実験結果と考察

3名の被験者に対し上記の実験を実施した。Fig. 15 に

Fig. 13 Environment model II

第1の環境を用いた場合の実験結果を示す。(a), (b)は仮想環境中の物体の水平面内での運動の時間変化(x, y : x, y 軸方向の並進運動, ϕ : z 軸回りの回転運動)を絶対座標系で表示したものである。また(c), (d)は物体座標系の x, y 軸方向の力成分(f_x, f_y)および z 軸回りのトルク成分(τ)の時間変化を示している。さらに区間 A, B, C はそれぞれ Fig. 12 の各移動相に対応している。Fig. 15 の結果から、まず区間 A では f_x, f_y, τ がほぼ零であることより、操作物体が自由空間にあること、さらに y が微増し x が減少することから、物体上の y 軸を少し壁面に対して傾けて壁面方向に立方体进行操作して、それを壁面に接近させていることがわかる。区間 B では x, y がほぼ一定で f_y が増加することから、稜線-面接触が発生し、さらに f_y がほぼ一定かつ τ が負方向に増加し、 ϕ が減少することから z 軸回りに物体を回転して、それを面に押しつけつつある状況が読み取れる。また、区間 C では ϕ, x, y がほぼ一定で τ が減少、 f_y がほぼ零、 f_x が微増することから、面-面接触を維持しつつ物体を壁面に押しつけている状態が読み取れる。以上は実物体を操作した場合とほぼ同等の力・トルク反力や運動を示しており、干渉力計算アルゴリズムが妥当に働いていることが確認できる。

Fig. 16 に第2の環境を用いた場合の実験結果を示す。Fig. 15 同様、(a)~(d)は立方体の運動履歴および反力の履歴、区間 A~E はそれぞれ Fig. 14 の移動相に対応している。Fig. 16 の結果から、区間 A では自由な運動が認められ(f_x, f_y, τ : ほぼ零)、区間 B では接触状態が発生し(f_x 増加)、 ϕ, f_x, τ の増加から面-稜線接触より面-面接触への移行が生じていることが推測される。つぎに区間 C では ϕ が微増し、 τ が減少することより面-面接触から稜線を回り込む動作へと移行することが読み取れる。また区間 D では、 ϕ が増加することより稜線を回り込む動作が一層進むこと、および τ が減少し負へと変化するとともに、 f_x と f_y の大小が反転することにより、接触面が x 軸に垂直な面から y 軸に垂直な面に切り替わりつつある傾向が推測される。区間 E では y, ϕ, f_y が

Fig. 14 Task sequence for environment model II

(a) Translational motions of the object in model space

(b) Rotational motion of the object in model space

(c) Translational forces applied to the object in model space

(d) Torque applied to the object in model space

Fig. 15 Experimental results for environment model I (Subject: TK)

ほぼ一定で、かつ x が微増していることから、 y 軸に垂直な面が、面-面接触を保ちつつ、面に沿ってゆっくり運動している状況が推測できる。以上観察された立方体の運動およびそれに作用する干渉力の挙動は、実物体を Fig. 14 のシーケンスで操作した場合とほぼ同等と考えられ、第2の環境に対しても提案するアルゴリズムが妥当に干渉力を生成していることが確認できる。

また、各被験者は実験中、稜線-面接触、面-面接触などを明瞭に識別できるとの印象を述べており、被験者の主観的評価によっても、拘束感が妥当に生成されることが確認された。

本実験で用いた上記の作業では、移動の各相において、(FV, FV), (FV, FV, FV, FV), (FV, FV, EE, EE), (EE, FV)などの基本接触の組合せが発生する。これらは一応 FV, EE のほとんどの組合せを含むことから、FV,

(a) Translational motions of the object in model space

(b) Rotational motion of the object in model space

(c) Translational forces applied to the object in model space

(d) Torque applied to the object in model space

Fig. 16 Experimental results for environment model II (Subject: TK)

EE 両基本接触で記述される干渉についてほぼ提案するアルゴリズムが有効に利用できるものと考えられる。

なお、本研究では仮想環境を対象とする実験を中心に拘束感のリアリティの評価を行ったが、厳密にはモデル化された環境に対応する実環境との比較が必要である。この点については現在検討を進めている。

6. む す び

本研究ではモデル空間中で大きさのある物体が干渉する場合に発生する力を、リアルに人に感知させるための干渉力の計算アルゴリズムを提案した。本アルゴリズムは、2種の基本接触をまず定義し、すべての接触をこれらの集合として捉えて、各基本接触が発生する干渉力の合力から干渉力を生成する点に特長がある。いくつかの基本接触の組合せを含む接触が発生する単純な動作を取

り上げて検証実験を行い、アルゴリズムの効果を確認した。本論文で扱った対象は凸物体であり、かつ、また一方が静止した二つの物体同士の干渉に限られるが、より複雑な環境は基本的には本手法を合成すれば取り扱いが可能である。この点については現在検討が進められている。また移動物体の取り扱いは、今後の検討課題である。

おわりに、本研究に対し日頃討論いただき、当所ロボット工学部大山尚武部長、藤川昭雄部付主任研究官、小森谷清感覚制御課長、ならびに感覚制御課、バイオロボティクス課の諸氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 橋本, T. B. Sheridan, M. V. Noyes: 時間遅れを有するテレオペレーションにおける予告情報の効果, 人間工学, 22-2, 91/92(1986)
- 2) 町田, 戸田, 岩田: シミュレータ介在型宇宙用テレオペレーションシステム, ロボティクス・自動化システムシンポジウム講演論文集, 45/50(1988)
- 3) 内山, 中村, 児玉, 佐藤: 多腕宇宙ロボット用シミュレータ, ロボティクス・自動化システムシンポジウム講演論文集, 69/72(1988)
- 4) S. Tachi, H. Arai and T. Maeda: Tele-Existence Simulator with Artificial Reality, Proc. of the IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS '88), 719/724 (1988)
- 5) M. T. Mason: Compliant Motion, Robot Motion (Ed. M. Brady et al), 305/322, MIT Press (1983)
- 6) R. C. Goerts and F. Bevilacqua: A Force Reflecting Positional Servomechanism, Nucleonics, 10-11, 43/45 (1952)
- 7) 横小路, 吉川: マスタ・スレーブ型遠隔操縦システムの操作性, 計測自動制御学会論文集, 26-5, 572/579 (1990)
- 8) M. Ouh-young, D. Beard and F. P. Brooks, Jr.: Force Display Performs Better than Visual Display in a Simple 6-D Docking Task, Proc. of the IEEE Int. Conference on Robotics and Auto-mation, 1462/1466 (1989)
- 9) 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, 第5回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, 62/67(1989)
- 10) J. Funda and R. P. Paul: Efficient Control of a Robotic System for Time-Delayed Environment, Proc. of the Int. Conference on Advanced Robotics, 219/224 (1991)
- 11) M. Minsky, M. Ouh-young, O. Steele, F. P. Brooks, Jr. and M. Behensky: Feeling and Sensing: Issues in Force Display, Computer Graphics, 24-2, 235/243 (1990)
- 12) 福井, 下条: 力覚をフィードバックする操作デバイスによる仮想形状のなぞり動作, 電子通信学会論文誌(D-II), J74-D-II-8, 1052/1059(1991)
- 13) 神徳, 谷江, 横井, 藤川: 仮想環境におけるバイラテラルマスタ・スレーブテレオペレーションに関する基礎実験, 計測自動制御学会論文集, 28-6, 750/759(1992)
- 14) M. C. Lin and J. F. Canny: A Fast Algorithm for Incremental Distance Calculation, Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1008/1014 (1991)
- 15) 神徳, E. J. Huesler, 谷江, 藤川: ダイレクトドライブマスタアームの試作, 機械技術研究所所報, 44-6, 199/210(1990)

[著 者 紹 介]

神 徳 徹 雄 (正会員)

1988年, 東京大学大学院工学系研究科計数工学専門課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。ロボット工学部感覚制御課所属。テレロボティクス, 力感覚の提示技術などの研究に従事。日本ロボット学会, 情報処理学会などの会員。

谷 江 和 雄 (正会員)

1971年, 早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。現在, ロボット工学部バイオロボティクス課長。ロボットの機構と制御, センサ, インタフェースなどの研究に従事(工学博士)。