摩擦を考慮した環境と剛体接触する 仮想道具の操作感提示

吉川 恒夫*・岡本 球夫*,**

Display of Operating Feel of Virtual Tools in Rigid Frictional Contact with Environment

Tsuneo YOSHIKAWA* and Tamao OKAMOTO*,**

A simulator for displaying the operational feel of virtual tools will be useful for development and design of new tools and for task training. Since a tool is usually used in contact with the environment, it is important for this kind of simulator to display a feel of contact with the environment to the operator.

In this paper, we propose an algorithm to display the operating feel of virtual tools in frictional rigid contact with virtual environments and present some experimental results to show the validity of the proposed algorithm. First of all, the dynamic equation of an articulated virtual tool in frictional rigid contact with a virtual environment is given. Secondly, the proposed algorithm is presented dividing it into three parts: acquisition of the manipulating input of the operator by the display system, simulation of the virtual tool, and the display of operating feel to the operator. Finally, the validity of the proposed algorithm is confirmed experimentally using a display device with a two-degree-of-freedom link mechanism.

Key Words: virtual reality, force display, virtual tool, rigid contact, frictional contact

1. はじめに

コンピュータのメモリ上に仮想世界モデルを構築し、特殊なインタフェースデバイスを用いて、その仮想世界への情報の入出力を人間の感覚的な操作によって可能にする技術を「人工現実感 (Virtual Reality)」といい、さまざまな分野への応用が期待されている。この人工現実感における初期の研究では人間への提示は視聴覚に限られていた¹⁾が、近年になって人間の外界認識における力覚や触覚の重要性も認識されるようになり、これらの感覚への提示についても研究が行われるようになった^{2), 3)}。

力覚や触覚提示を用いた人工現実感の応用例として道具の操作感シミュレータが考えられる。このシミュレー

タは仮想空間モデルのパラメータを変えるだけで操作する道具や操作環境を自由に設定することができるため、新製品開発のための操作感確認用シミュレータや、特殊作業の訓練用シミュレータなどに使うことが考えられる。実際に道具を用いてなんらかの作業を行うことを考えてみると、多くの場合、道具を環境に接触させて使用している。そのため、道具の操作感シミュレータの実現には環境との接触感の提示が必要であると考えられる。

仮想道具と仮想環境、すなわち仮想対象物間の接触感の提示に関する従来の研究には以下のようなものがある。神徳ら⁴⁾は凸多面体同志の接触をいくつかの基本接触モデルの組合せで表現することで接触力を生成し、その接触感の提示を実現している。山本ら⁵⁾は仮想工具による仮想対象物の加工を行っており、工具とボクセルモデルで表現した対象物との干渉状態に従って加工の際の工具の操作反力を生成している。また、Minsky ら⁶⁾は仮想やすり (Sandpaper) を開発し、対象物表面のテクスチャ (肌合いや模様) の提示を行っている。その他にもいくつ

* 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

** 現在 松下電器産業 (株) に勤務

* Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto

** Currently with Matsushita Electric Industrial co., Ltd.

(Received April 7, 1995)

(Revised December 4, 1995)

か研究^{7),8)}が行われている。

道具が環境に接触する際、その接触部には摩擦が生じる。この摩擦を利用して作業を遂行する道具も多く、またその接触感においても摩擦の果たす役割は非常に大きい。しかし、上記の研究例ではいずれも摩擦については考慮されていない。また、実際の道具と環境の接触には剛体接触^(注1)として扱うことができる接触も多く考えられるが、上記の研究例はいずれも接触を弾性接触として扱っており、剛体接触を想定した研究例はない。なお、オペレータの指先と仮想対象物との接触についてはあるが吉川⁹⁾は剛体接触や接触時の摩擦を考慮した研究を行っている。ただし、仮想対象物間の接触ではセンサによって接触部に働く力を直接測定できないため、この研究で用いられた方法をそのまま用いることはできない。

そこで、本論文は環境との剛体接触を想定し、またその際の摩擦も考慮した仮想道具の操作感提示アルゴリズムを提案する。まず、2章では環境と剛体接触する可動部をもつ仮想道具の力学について考える。3章では提案のアルゴリズムをオペレータの操作入力への獲得、仮想道具のシミュレーション、オペレータへの操作感提示と3つのパートに分けて説明を行う。また、本論文ではリンク機構を力覚提示装置として用いた操作感提示システムによって提案のアルゴリズムを適用した実験を行っており、4章ではその実験システムの紹介を行い、5章では実験内容およびその結果について述べる。

2. 仮想道具の力学

仮想道具は Fig. 1 のようにいくつかの剛体とそれを繋ぐ関節で構成されているとする。また、オペレータの操作力が加わる点と環境と接触する点をそれぞれ一箇所ずつもつものとする。環境との接触は剛体接触であり、接触点ではクーロン摩擦が生じると仮定する。ただし、簡単のため環境の運動や変形は考えないものとする。本章では、この仮想道具の力学について考える。

2.1 運動方程式

仮想空間の基準座標系を Σ_V と定め、この座標系についてのベクトルを V_* で表わすものとする。また、任意に定義された仮想道具の一般化座標を q_t とする。仮想道具にはオペレータの操作力 VF_{th} が点 H_V (オペレータの操作点) から、環境との接触力 VF_{tc} が点 C_V (環境との接触点) から加えられるものとする。点 H_V の位置と速度を Vr_{th} , $V\dot{r}_{th}$ で表わし、点 C_V の位置と速度

Fig. 1 Model of virtual tool

を Vr_{tc} , $V\dot{r}_{tc}$ で表わす時、これらのベクトルは q_t , $\dot{q}_t$ の関数としてつぎのように表現できるものとする。

$$Vr_{th} = f_{th}(q_t) \quad (1)$$

$$Vr_{tc} = f_{tc}(q_t) \quad (2)$$

$$V\dot{r}_{th} = J_{th}(q_t) \dot{q}_t, \quad J_{th}(q_t) = \partial Vr_{th} / \partial q_t^T \quad (3)$$

$$V\dot{r}_{tc} = J_{tc}(q_t) \dot{q}_t, \quad J_{tc}(q_t) = \partial Vr_{tc} / \partial q_t^T \quad (4)$$

この仮想道具の運動方程式はつぎのように表わせる。

$$M_t(q_t) \ddot{q}_t + \hat{h}_t(q_t, \dot{q}_t) = J_{th}^T(q_t) VF_{th} + J_{tc}^T(q_t) VF_{tc} \quad (5)$$

ただし、 $M_t(q_t)$ は仮想道具の慣性行列、 $\hat{h}_t(q_t, \dot{q}_t)$ は重力やコリオリ力や関節力の項とする。

この運動方程式は VF_{tc} を変えることで、さまざまな接触状態に対応する。仮想道具の状態 (q_t , $\dot{q}_t$ で与えられる) から環境との接触の有無やすべり速度が求まるが、以下ではそれらの環境との相対関係から VF_{tc} を決定し、環境との接触状態を導く。

1) 環境と接触しない場合

この場合 $VF_{tc} = 0$ となり、環境との接触状態は“非接触状態”となる。

2) 環境と接触する場合

接触力 VF_{tc} は垂直抗力 VF_{tcv} と摩擦力 VF_{tch} に分けることができる ($VF_{tc} = VF_{tcv} + VF_{tch}$)。このうち、まず垂直抗力について考える。剛体接触時の垂直抗力は接触面の法線方向への拘束によって与えられる。環境と道具の先端部との法線距離を $d_v(q_t)$ とすると、剛体接触時には次式が成り立つ。

$$d_v(q_t) = 0 \quad (6)$$

(6) 式は剛体接触の拘束条件式であり、 VF_{tcv} はこれを満たすように定められる。ここで、(6) 式に伴うラグランジュ乗数を λ_v とし、接触面の法線方向外向き単位ベクトルを Ve_v とすると、 $VF_{tcv} = \lambda_v Ve_v$ となる。ただし、 VF_{tcv} が引力 ($\lambda_v < 0$) となってしまう場合には垂直抗力が働かない ($VF_{tcv} = 0$) のものとする。

(注1) ここで剛体接触とは、互いに接触する物体が両者とも剛体と仮定できる場合の接触を指し、弾性接触とは、どちらかが弾性を有して、たわみにより接触が生じると仮定できるような接触を意味する。

つぎに摩擦力について考える。環境との接触点の速度 $V_{\dot{r}_{tc}}$ を接触面に対して法線方向成分 $V_{\dot{r}_{tcv}}$ と水平方向成分 $V_{\dot{r}_{tch}}$ に分けるとき、 $V_{\dot{r}_{tch}}$ は環境とのすべり速度を表わす。摩擦力はこのすべり速度によってつぎのように決定する。

a) すべり速度が 0 の場合

まず摩擦力によって静止状態(すべり速度ゼロ)が維持できるかどうかを判定する。接触点 C_V での環境との接平面を考え、その平面上に任意の平面座標系 Σ_C をとる。そして、 Σ_V の任意のベクトルを Σ_C に射影する行列を T_{vc} 、逆に Σ_C で表わされた平面上のベクトルを Σ_V のベクトルに変換する行列を T_{cv} とする。このとき、静止状態を表わす拘束条件式は

$$T_{vc} V_{\dot{r}_{tc}} = 0 \quad (7)$$

となる。(7)式を満たすように(5)式を解くと静止状態を維持するために必要な摩擦力 $V_{\dot{F}_{tch}}$ が求まる。 $V_{\dot{F}_{tch}}$ は(7)式に伴うラグランジュの乗数ベクトルを λ_h とすると $V_{\dot{F}_{tch}} = T_{cv} \lambda_h$ で与えられる。

ここで、 $|V_{\dot{F}_{tch}}| \leq \mu_s |V_{\dot{F}_{tcv}}|$ (μ_s は最大静止摩擦係数)の場合、 $V_{\dot{F}_{tch}}$ は静止摩擦の範囲にあり静止状態は維持される。よって、この場合は環境と“静止摩擦接触状態”にあり、摩擦力は $V_{\dot{F}_{tch}} = V_{\dot{F}_{tch}}$ と与えられる。また、 $|V_{\lambda_h}| > \mu_s |V_{\dot{F}_{tcv}}|$ の場合には $V_{\dot{F}_{tch}}$ が最大静止摩擦力を越えてしまい静止状態が維持できない。この場合、環境との接触状態は“動摩擦接触状態”となり、摩擦力はつぎの動摩擦モデルで与えられる。

$$V_{\dot{F}_{tch}} = \mu_d |V_{\dot{F}_{tcv}}| V_{e_d} \quad (8)$$

ただし、 μ_d は動摩擦係数とする。また、 V_{e_d} は摩擦の方向を表わす単位ベクトルを示し、この場合 $V_{e_d} = V_{\lambda_h} / |V_{\lambda_h}|$ とする。

b) すべり速度が 0 でない場合

この場合、環境とは“動摩擦接触状態”にあり、摩擦力は(8)式で与えられる。ただし、 $V_{e_d} = -V_{\dot{r}_{tch}} / |V_{\dot{r}_{tch}}|$ とする。

2.2 衝突時の運動

剛体接触を想定する場合、非接触状態から接触状態に遷移する衝突時には衝撃現象が生じ、衝突前後で系の速度が不連続に変化する(FIG. 2)。この現象はラグランジュの衝撃運動方程式で記述される¹⁰⁾。ここでは、この式を用いて衝突時の仮想道具の運動の変化を考える。

仮想道具の衝撃運動方程式は次式で与えられる。

$$M_t(q_t) [\dot{V}_{I_a} \dot{q}_t - \dot{V}_{I_b} \dot{q}_t] = J_{tc}^T(q_t) [V_{P_{tcv}} + V_{P_{tch}}] \quad (9)$$

ただし、 $V_{P_{tcv}}$ 、 $V_{P_{tch}}$ はそれぞれ環境よりうける衝突力積と摩擦力積を表わす。また、 I_b^* 、 I_a^* は衝突直前、

Fig. 2 Collision between tool and environment

直後の速度ベクトルを表わす。(9)式は(4)式によってつぎのような接触点の速度に関する式に書き換えられる。

$$M_t(q_t) J_{tc}^{-1}(q_t) [V_{I_a} \dot{r}_{tc} - V_{I_b} \dot{r}_{tc}] = J_{tc}^T(q_t) [V_{P_{tcv}} + V_{P_{tch}}] \quad (10)$$

衝突直後の接触点の速度 $V_{I_a} \dot{r}_{tc}$ は接触直前のすべり速度によってつぎのように求める。ただし、接触面の垂直方向成分 $V_{I_a} \dot{r}_{tcv}$ についてはすべり速度に関係なくニュートンの仮定によって

$$V_{I_a} \dot{r}_{tcv} = -B_e V_{I_b} \dot{r}_{tcv} \quad (11)$$

と与えられる。ただし、 B_e は反発係数を表わす。

1) 衝突直前のすべり速度が 0 の場合

はじめに、衝突後もこの静止状態が維持されると仮定する($V_{I_a} \dot{r}_{tch} = 0$)。この仮定と(11)式で与えられる $V_{I_a} \dot{r}_{tcv}$ から $V_{I_a} \dot{r}_{tc}$ を求め、これによって(10)式を解くと $V_{P_{tcv}}$ 、 $V_{P_{tch}}$ が求まる。 $V_{P_{tcv}}$ 、 $V_{P_{tch}}$ はそれぞれ垂直抗力と摩擦力の衝突時における積分値なので、つぎのように静止摩擦の判断を行う。

$$|V_{P_{tch}}| \leq \mu_s |V_{P_{tcv}}| \quad (12)$$

上式を満たす場合は静止状態が維持され、 $V_{I_a} \dot{r}_{tc}$ は前述の仮定に従うものとなる。

(12)式を満たさない場合は静止状態が維持できず動摩擦に遷移すると考え、 $V_{P_{tch}}$ を次式によって与える。

$$V_{P_{tch}} = \mu_d |V_{P_{tcv}}| V_{e_d} \quad (13)$$

ただし V_{e_d} は上記の静止摩擦の判断の際に求めた $V_{P_{tch}}$ と同じ方向をもつ($V_{e_d} = V_{P_{tch}} / |V_{P_{tch}}|$)。このとき、(10)式に(11)(13)式を代入して解くことで $V_{I_a} \dot{r}_{tc}$ が求まる。

2) 衝突直前のすべり速度が 0 でない場合

この場合は衝突時に動摩擦が生じているものと考え。前述の動摩擦に遷移した場合と同様に $V_{P_{tch}}$ を(13)式のよって与える。ただし、この場合は $V_{e_d} = -V_{I_b} \dot{r}_{tch} / |V_{I_b} \dot{r}_{tch}|$ である。この後も同様にして $V_{I_a} \dot{r}_{tc}$ を求める。

Fig. 3 Virtual space and real space

3. 操作感提示アルゴリズム

本章では提案する操作感提示アルゴリズムについて説明を行う。このアルゴリズムはつぎのようなパートに分けることができる。

1. オペレータの操作入力 の獲得
2. 仮想道具のシミュレーション
3. オペレータへの操作感提示

以下では、それぞれについて詳しく述べる。

3.1 オペレータの操作入力 の獲得

仮想空間の基準座標系 Σ_V に対応する実空間の基準座標系を Σ_R と定め、この座標系についてのベクトルを R_* で表わすものとする。また、仮想空間でのオペレータの操作点 H_V に対応する実空間の点を H_R とする (仮想空間と実空間の関係を Fig. 3 に示す)。提案するアルゴリズムでは力覚提示装置に取り付けられたセンサの測定値より点 H_R の位置 $R_{r_{th}}$ 、速度 $R_{\dot{r}_{th}}$ とその点に加わるオペレータの操作力 $R_{F_{th}}$ を獲得し、これをオペレータからの操作入力とする。

3.2 仮想道具のシミュレーション

ここでは、前節で得られたオペレータの操作入力から仮想道具の運動をシミュレートする方法について説明する。大枠はつぎのようなものである。まず、オペレータの操作入力と直前の環境との接触状態からそのサンプリング時における理想的な (すなわち、環境との剛体接触という拘束条件と矛盾しないような) 仮想道具の状態を決定する。そして、その状態をもとに運動方程式を求めて仮想道具の運動をシミュレートする。また、運動方程式を求める際に環境との接触状態も決定する。この接触状態はつぎのサンプリング時まで継続するものと考え、つぎのサンプリング時で仮想道具の状態を決定するために用いられる。

上記のように、提案するアルゴリズムではオペレータの操作入力にそのまま従って仮想道具の状態を決定していない。それはつぎのような理由からである。オペレータの操作入力には提示の際のシステムの制御誤差が含

まれるため、その操作入力に従って仮想道具の状態を決定すると剛体接触を想定する環境に食込みを生じたり、静止摩擦状態なのにすべりを生じる場合がある。シミュレーションは 2.1 節で導出した運動方程式に従って行われるが、この運動方程式は剛体接触を想定しているため環境への食込みが存在すると使えない。また、すべり速度に誤差の影響が現れると異なる接触状態での運動がシミュレートされて不自然な提示となる可能性がある。そこで、直前の環境との接触状態によって剛体接触や摩擦を考慮した理想的な仮想道具の状態を決定することで、シミュレーションの際に問題となるシステムの制御誤差の影響を取り除いている (注 2)。

このアルゴリズムでは以下のように理想的な仮想道具の状態を決定する。まず、オペレータの入力より得られた $R_{r_{th}}$ 、 $R_{\dot{r}_{th}}$ をそのまま仮想空間のオペレータの操作点 (H_V) の位置、速度として用いてオペレータの操作に従う場合の仮想道具の状態 (q_t 、 $\dot{q}_t$ で表現できる) を求める。このとき、オペレータの操作に従った場合の接触点の位置、速度をそれぞれ $V_{r_{tc}}$ 、 $V_{\dot{r}_{tc}}$ とする。

1) 環境と干渉しない場合

$V_{r_{tc}}$ が環境の外部にある、すなわち道具が環境と干渉しない場合には、オペレータの操作入力にそのまま従って仮想道具の状態を決定する。

2) 環境と干渉する場合

$V_{r_{tc}}$ が環境の表面もしくは内部にある、すなわち道具が環境と干渉している場合には、直前の環境との接触状態によって剛体接触や摩擦を考慮した理想的な接触点の位置と速度を決定し、その接触点の位置と速度を満たすように道具の状態を決定する。接触点の位置と速度はつぎのように決定する (Fig. 4)。

a) 直前が動摩擦接触状態

接触点の位置は $V_{r_{tc}}$ に一番近い環境表面の位置とし、その速度は $V_{r_{tc}}$ の接触面の水平方向成分を採用する。

b) 直前が静止摩擦接触状態

この場合は静止摩擦によって静止が維持されるものとする。よって、接触点の位置は直前の接触位置とし、その速度は $\mathbf{0}$ とする。

c) 直前が非接触状態

(注 2) なお、このときに生じるオペレータと道具の接触点の運動と、理想的な道具の運動の間の誤差は、後述の (19) 式に示すように、適当なフィードバック制御則により、接触点の運動に対する加速度目標値を修正することによって、低減するという手法をとっている。

Fig. 4 Position and velocity of contact point

接触点の位置は動摩擦接触状態の場合と同様に決定する。また、この場合には衝突が生じているものと考え、2.2節に従ってその運動の変化を計算する。接触点の速度には $V_b \dot{r}_{tc} \equiv V_R \dot{r}_{tc}$ とした場合の衝突後の速度 $V_a \dot{r}_{tc}$ を採用するものとする。

また、以上のように決定した仮想道具の状態をもとに2.1節に従って運動方程式や接触状態を求め、仮想道具の運動をシミュレートする。ただし、このときに用いられるオペレータの操作力 $V F_{th}$ は $R F_{th}$ とする。

3.3 オペレータへの操作感提示

前節で求めた仮想道具の状態および運動より、仮想空間でのオペレータの操作点 (H_V) の位置、速度および加速度が求まる。提案するアルゴリズムでは、この仮想空間でのオペレータの操作点の位置、速度および加速度が、実空間での H_V に対応する点 (H_R) で実現されるように力覚提示装置の制御を行う。前節で求めた仮想道具の状態は剛体接触や摩擦を考慮した理想的なものであり、仮想道具の運動もこれらのことを考慮した運動方程式から求められている。よって、このアルゴリズムに従って理想的な仮想道具の状態と運動をオペレータに伝えることで目標の感覚、すなわち“摩擦を考慮した環境と剛体接触する仮想道具の操作感”が提示される。

4. 実験装置

本論文では提案するアルゴリズムの有効性を検証するために実際に実験を行った。本章ではその実験装置の紹介を行う。

4.1 実験システムの構成

実験に用いたシステムの構成を Fig. 5 に示し、各要素の詳細を以下に記述する。力覚提示装置は垂直多関節型ロボットであるダイキン工業 (株) 製研究用ミニチュアロボットの第一軸を機械的に固定したものを並列駆動型2自由度マニピュレータとして用いた。関節駆動にはDCサーボモータ (定格トルク $3.6 \times 10^{-3} \text{ Kg} \cdot \text{m}$) を減速比 1:8 で用いている。各関節角はそれぞれの関節に取り

Fig. 5 Experimental setup

Table 1 Link parameters

i	m_i [$\times 10^{-3} \text{ Kg}$]	l_i [$\times 10^{-3} \text{ m}$]	l_{gi} [$\times 10^{-3} \text{ m}$]	I_i [$\times 10^{-5} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$]
1	25.7	128.0	60.9	10.6
2	18.6	50.0	29.9	6.03
3	22.8	128.0	64.0	4.98
4	57.3	144.0	16.5	8.48

付けられている光学式エンコーダにより計測し、関節角速度は得られた関節角を差分することで求めている。また、アーム先端部には自作の力センサを取り付け、そこに加えられるオペレータの操作力を測定している。このときの諸元を Table 1 (Fig. 6 参照) に示す。

表中の m_i , l_i はそれぞれリンク i の質量、リンク長さである。また l_{gi} は関節 i からリンク i の重心までの長さであり I_i はリンク i の重心に関する慣性モーメントである。実験の際には Fig. 6 のようにアームの先端に回転関節を介してオペレータが把持するための器具 (長さ $1.62 \times 10^{-1} \text{ m}$ 質量 $7.45 \times 10^{-2} \text{ Kg}$) を取り付ける。ホストコンピュータには日本電気 (株) 製パーソナルコンピュータ (i486DX2, 66MHz) を用いた。プログラミング

Fig. 6 Mechanism of display device

Fig. 7 Display device

には C 言語およびアセンブリ言語を用いた。また、視覚提示装置にはパーソナルコンピュータの CRT を用いており、ワイヤフレームによる 2D 視覚提示を行っている (実験装置を Fig. 7 に示す)。

4.2 オペレータへの入出力

ここでは前節で紹介した力覚提示装置によって、いかにオペレータの操作入力を獲得し、仮想道具の操作感を提示するかについて述べる。

操作入力獲得

実世界の基準座標系 Σ_R におけるアームの先端 (オペレータの把持用器具の取付け部 (Fig. 6)) の位置 ${}^R r_{lh}$ と速度 ${}^R \dot{r}_{lh}$ はエンコーダの測定値より得られる関節変位ベクトル q_l とその速度 $\dot{q}_l$ の関数としてつぎのように与えられるものとする。

$${}^R r_{lh} = f_{lh}(q_l) \quad (14)$$

$${}^R \dot{r}_{lh} = J_{lh}(q_l) \dot{q}_l, \quad J_{lh}(q_l) = \partial {}^R r_{lh} / \partial q_l^T \quad (15)$$

また、アームの先端に加えられるオペレータの操作力 ${}^R F_{lh}$ が力センサで測定されるものとする。

実験ではこのロボットの手先を実空間でのオペレータの操作点 H_R とみなしている。そのためオペレータの位置、速度および力の操作入力はいずれも ${}^R \dot{r}_{th} = {}^R \dot{r}_{lh}$, ${}^R \ddot{r}_{th} = {}^R \ddot{r}_{lh}$, ${}^R F_{th} = {}^R F_{lh}$ となる。

操作感の提示

ロボットアームの運動方程式が次式で与えられるとする。

$$\tau_l = M_l(q_l) \ddot{q}_l + \hat{h}_l(q_l, \dot{q}_l) - J_{lh}^T(q_l) {}^R F_{lh} \quad (16)$$

ただし、 τ_l は関節駆動力ベクトル、 $M_l(q_l)$ は慣性行列、 $\hat{h}_l(q_l, \dot{q}_l)$ は遠心力、コリオリ力、粘性摩擦および重力負荷の項を表わす。

(15) 式を微分して (16) 式に代入すると、つぎのようなリンク先端部の加速度と関節駆動力の関係が求まる。

$$\tau_l = M_l(q_l) J_{lh}^{-1}(q_l) [{}^R \ddot{r}_{lh} - \dot{J}_{lh}(q_l) \dot{q}_l] + \hat{h}_l(q_l, \dot{q}_l) - J_{lh}^T(q_l) {}^R F_{lh} \quad (17)$$

Fig. 8 Virtual tools used in experiment

操作感提示のためロボットアームの制御は線形化部とサーボ補償部からなる 2 段階制御とする。関節駆動力入力 τ_{in} は (17) 式を用いてシステムの線形化を行ったつぎのようなものとする¹¹⁾。

$$\tau_{in} = M_l(q_l) J_{lh}^{-1}(q_l) [u_{in} - \dot{J}_{lh}(q_l) \dot{q}_l] + \hat{h}_l(q_l, \dot{q}_l) - J_{lh}^T(q_l) {}^R F_{th} \quad (18)$$

ここで、 u_{in} は加速度入力でつぎのようなサーボ補償器を用いる。

$$u_{in} = V \ddot{r}_{th} + K_a [V \ddot{r}_{th} - {}^R \ddot{r}_{lh}] + K_v [V \dot{r}_{th} - {}^R \dot{r}_{lh}] + K_p [V r_{th} - {}^R r_{lh}] \quad (19)$$

ただし、 K_a , K_v , K_p はフィードバックゲインを表わす。この入力によってアームの先端、すなわち実空間のオペレータの操作点 (H_R) が仮想空間のオペレータの操作点 (H_V) の加速度 $V \ddot{r}_{th}$, 速度 $V \dot{r}_{th}$, 位置 $V r_{th}$ を実現するように制御される。

5. 実験

本論文では前章で紹介した実験装置を用いて鉛直平面内で実験を行った。本章では、まず実験内容について説明を行う。ついで、実験の結果を示しその結果について考察を加える。

5.1 実験内容

実験では棒状の柄をもつ 2 種類の仮想道具を想定した (Fig. 8)。1 つはハンマーのような道具 (道具 1) で柄の先端に半径 0.02m で質量 0.05Kg の球状のおもりが取り付けられている。もう 1 つはローラーのような道具 (道具 2) で柄の先端に半径 0.02m で質量 0.05Kg で慣性モーメント $1.0 \times 10^{-5} \text{ Kg} \cdot \text{mm}^2$ の円柱状のドラムが回転関節によって取り付けられている (ただし、回転関節には摩擦が生じないものとする)。実験の際には Fig. 9 のように柄の部分はリンク先端に取り付けられた把持用の器具自身で表現し、柄の先端に取り付けられているおもり

Fig. 9 Supposed situations

や回転するドラムをシミュレートすることで提示を行う。このとき、オペレータの操作点 H_V はおもりのドラムの中心部分としている。仮想環境には水平な壁を用意しており、道具と壁との最大静止摩擦係数および動摩擦係数はそれぞれ $\mu_s = 0.5$, $\mu_d = 0.3$ 反発係数は $B_e = 0.5$ と設定している。また、重力加速度は 9.8m/s^2 とする。

オペレータはリンク先端に取り付けた把持用の器具を実際の道具をもつように握って、CRTを見ながら鉛直平面内で操作を行う。そして、道具を仮想環境に衝突させたり、なぞらせたりすることで仮想道具の挙動やその操作感を確認する。

この実験では、サンプリングタイムは $1.88 \times 10^{-3}\text{s}$ とし、制御に用いた (19) 式のゲインは $K_a = 1.5$, $K_v = 5.0$, $K_p = 5.0 \times 10^4$ とした。また、実験時間は 10.0s としている。

5.2 結果と考察

道具 1 を想定した場合の実験結果を Fig. 10 に示す。

図の (a)(d) はそれぞれ水平、垂直方向のオペレータの操作点 (H_V, H_R) の位置を示す。ここでは仮想空間での操作点 H_V の位置を実線で、実空間での操作点 H_R の位置を破線で表わしている。また、仮想壁面の位置を垂直方向の 0 としているため、想定した道具では 0.02m の位置で壁に接触する。図の (b)(e) はそれぞれ水平、垂直方向の道具 (シミュレートする部分) に加わる力を示している。ここで、実線は壁との接触力 (垂直抗力、摩擦力) を、破線はオペレータの操作力を表わしている。そして、図の (c) は壁との接触状態、(f) は摩擦係数 (摩擦力/垂直抗力) を示している。

以下では道具 1 での実験結果について考察を加える。この実験ではオペレータは仮想道具を壁に軽く衝突させて (1.0s)、そのまま壁に押し付け (区間 1)、その後、壁面を左右になぞり (区間 2,3)、最後は壁面上に静止させる (7.6s) という一連の動作を行っている。Fig. 10(d) を見ると、道具を壁に接触させている間 ($1.0\text{s} \sim$) 実際の位置を示す破線は理想的な剛体接触の位置を示す実線には

とんど一致しており、剛体接触が十分に提示されていることがわかる。また、Fig. 10(e) では道具を壁に衝突させた際にオペレータの操作力は一瞬大きな値を示しており、衝突時の衝撃力が提示されていることがわかる。壁面をなぞる際、前半 (区間 2) はゆっくりとなぞりを行い、後半 (区間 3) は素早くなぞりを行っている (Fig. 10(a))。このとき、前半ではオペレータの操作力が摩擦力とほぼ等しい大きさとなっており、なぞりにともなう摩擦感が提示されていることがわかる。また、後半ではオペレータの操作力は摩擦力に比べて大きくなっており、摩擦感のほかに道具の慣性も提示されている (Fig. 10(b))。このことから、操作速度に対応した操作感が実現されていることがわかる。Fig. 10(c)(f) を見ると、なぞりはじめや方向転換時に摩擦係数が静止摩擦状態で徐々に大きくなり動摩擦状態になった瞬間に動摩擦係数 (0.3) まで落ちているようすが見られる。また、 4s 付近や 5s 付近ではスティックスリップ現象が見られる。サンプリング時間の関係で必ずしも動摩擦に変わる直前の摩擦係数は最大静止摩擦係数 (0.5) とはなっていないが、ほぼクーロン摩擦での摩擦の遷移状態が実現されていることがわかる。また、Fig. 10(a) を見ると静止摩擦状態において仮想空間 (実線) と実空間 (破線) はほとんど一致しており、静止摩擦による拘束感が実現されていることがわかる。

一方、道具 2 を想定した場合の実験結果を Fig. 11 に示す。

ここで、図の (a) ~ (f) に関しては道具 1 の結果と同様のものを示している。また、壁との接触位置についても道具 1 と同様に 0.02m である。これらのほかに (g) でドラムの回転角、(h) でドラムに加わるトルクを示している (ただし、反時計回りを正としている)。

ついで、道具 2 での実験結果について考察を加える。この実験ではオペレータは道具を壁に接触させて (1.0s)、なぞりを行い (区間 1,2)、ドラムが回転している状態でいったん壁から離し (区間 3)、再び壁に接触させる (7.6s) という動作を行っている。Fig. 11(d) を見ると道具 1 での実験と同様に壁に道具を接触させている間 (区間 1,2 と $7.6\text{s} \sim$)、剛体接触が十分に提示できていることがわかる。Fig. 11(a)(g) では壁面をなぞる間 (区間 1,2) 摩擦によってドラムの回転がオペレータの水平方向の操作に従うようすが見られ、ドラムが回転した状態での接触 (7.6s) では摩擦によってドラムの回転が止まるようすが見られる。道具 2 ではなぞりの際にも非常に安定して静止摩擦状態が維持されており、すべり速度をもって接触させた場合でも動摩擦状態は一瞬ですぐに静止摩擦状態となっている (Fig. 11(c)(f))。また、この実験でのなぞり動作も道具 1 の場合と同様に前半 (区間 1) はゆっくり

Fig. 10 Experimental results (tool 1)

Fig. 11 Experimental results (tool 2)

りとなぞりを行い、後半(区間2)は素早くなぞりを行っている。このときのオペレータの操作力もやはり前半に比べて慣性の影響が大きい後半の方が大きくなっており (Fig. 11(b)), 操作速度に対応した操作感が実現されて

いることがわかる。この操作力の結果を道具1の場合と比較すると慣性力の影響が大きい後半は顕著な違いはみあたらないが、影響が小さい前半では道具1の場合より小さい力でなぞり動作が行われていることがわかる。ま

た、なぞりはじめや方向転換の際に引っかかりを感じることなくスムーズに操作が行われている。これらのことから、道具による操作感の違いが提示されていることがわかる。

6. おわりに

本論文では、摩擦を考慮した環境と剛体接触する仮想道具の操作感を提示するためのアルゴリズムを提案した。そして、リンク機構を力覚提示装置として用いた操作感提示システムに提案のアルゴリズムを適用して実験を行い、その有効性を検証した。

この操作感提示アルゴリズムでは、まず、仮想道具の状態を決定し、それに従って環境と摩擦を伴う剛体接触をする仮想道具の運動をシミュレートしている。ここで、仮想道具の状態をオペレータの操作入力だけでなく剛体接触や摩擦を考慮した理想的なものとするすることで、運動方程式を適用し仮想道具の運動をシミュレートする際に生じる操作入力に含まれるシステムの制御誤差の問題を解決している。また、オペレータにはこの仮想道具の状態や運動に従うように力覚提示装置の制御を行うことで提示を行っている。これによって、環境と剛体接触する仮想道具の操作感を提示することが可能になり、また、そのときに生じる摩擦を利用した作業も可能となる。

本論文では、オペレータの操作力が加わる点と環境と接触する点がそれぞれ一箇所のみであると仮定したが、現実の各種道具を用いる作業においては、同時多点接触の場合も多いと考えられる。そのような場合には、くいつきなどの現象のシミュレーション¹²⁾が必要となろう。

参考文献

- 1) S.S. Fisher, M. McGreevy, J. Humphries and W. Robinett: Virtual Environment Display System, *Computer Graphics*, **21**-1, 4/5 (1987)
- 2) M. Ouh-young, D.V. Bread and F.B. Brooks, Jr.: Force Display Performs Better than Visual Display in a Simple 6-D Docking Task, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1462/1466 (1989)
- 3) H. Iwata: Artificial Reality with Force Feedback: Development of Desktop Virtual Reality Space with Compact Master Manipulator, *Computer Graphics*, **24**-4, 165/170 (1990)
- 4) 神徳, 谷江: 環境のための干渉力発生アルゴリズム, 計測自動制御学会論文集, **29**-3, 347/355 (1993)
- 5) 山本, 近藤, 石黒, 内川: 力覚生成を伴う仮想対象物の変形操作の手法, ロボティクス・メカトロニクス'94 講演会講演論文集, 1007/1010 (1994)
- 6) M. Minsky, M. Ouh-young, O. Steele, F.P. Brooks, Jr. and M. Behensky: Feeling and Seeing; Issues in Force Display, *Computer Graphics*, **24**-2, 235/243 (1990)
- 7) 福田, 登尾: 階層的な自由空間モデルを用いた高速接触力生成アルゴリズム, 第11回日本ロボット学会学術講演会論文集, 825/828 (1993)
- 8) 高宗, 神徳, 谷江: 位置と力の制御モードの切り替えに基づく仮想空間における拘束感生成法に関する研究, 第11回日本ロボット学会学術講演会論文集, 821/824 (1993)
- 9) 吉川, 鄭, 森口: 摩擦表面を有する仮想対象物の動的操作感提示, 日本機械学会論文集, **60**-578-C, 3335/3342 (1994)
- 10) 遠山茂樹: 機械のダイナミクス・マルチボディ・ダイナミクス, コロナ社 (1993)
- 11) 吉川, 横小路, 松本, 鄭: 動特性を考慮した仮想物体操作感の実現, 日本ロボット学会誌, **11**-8, 1236/1243 (1993)
- 12) 内山勝: 接触状態のシミュレーション, 日本ロボット学会誌, **11**-2, 201/205 (1993)

[著者紹介]

吉川 恒夫 (正会員)

1969年京都大学大学院工学研究科博士課程数理工学専攻修了。同大学工学部助手、助教授を経て、86年同教授、91年より機械工学教室に担任替え、現在に至る。ロボット工学、制御工学の研究に従事。IEEEなどの会員(工学博士)。

岡本 球夫

1993年、京都大学工学部機械学科卒業。95年同大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年松下電器産業(株)入社。在学中は人工現実感の研究に従事。