摩擦表面を有する仮想対象物の動的操作感提示*

吉川 恒夫^{*1}, 鄭 心 知^{*2}, 森 口 知 規^{*3}Display of Operating Feel of Dynamic Virtual Objects
with Frictional Surface

Tsuneo YOSHIKAWA, Xin-Zhi ZHENG and Toshiki MORIGUCHI

A system for displaying feel information while manipulating dynamic virtual objects is presented. A unified description of the dynamics of virtual objects based on the Lagrangian formulation is derived. The detection of the grasp states and the friction effects at the grasp points on a virtual object surface, which are important to help us recognize the object and handle it more dexterously, are treated explicitly. Display algorithms which create and present the dynamic operating feel of an object as well as the friction feel on the object surface to the operator are proposed. Experimental verification of the proposed approaches is performed and the results are outlined.

Key Words: Human Interface, Mechatronics and Robotics, Computer Control, Virtual Reality, Impedance Display, Operating Feel, Dynamics of Virtual Objects, Frictional Surface, Articulated Objects

1. 緒 言

近年、「人工現実感」の技術がヒューマンインターフェイスの新しい形態として注目を集めている。もともと、「人工現実感」は、計算機内部の情報を人間の感覚器に直接提示することにより、人間の周囲に人工的な空間(仮想空間)を作りだし、人間が直接的にその情報を獲得できることを目的とした技術として研究されてきた。一方、近年ではコンピュータの高速化が著しく、その扱う情報量が増大するに伴い、コンピュータと人間との間の情報交換の高速化、平易化が求められている。したがって、より人間の感覚器に直接的に作用する入出力デバイスが必要となり、この要求を満たすものとして「人工現実感」技術が注目を集めている。人間の視覚器官である目を通して仮想空間を提示する代表的なものに頭部搭載型ディスプレイ(HMD: Head-Mounted Display)があり、また、仮想空間に対する入力デバイスとしてデータグローブ(Data Glove)と呼ばれる手袋型の動作入力デバイスがある。Fisherら⁽¹⁾はこれらを用いて、コンピュータによって作り出された仮想空間とオペレータのインターフェイスの開発を行っている。

人間が外界を認識する際、視覚によるところが多いが、それに加え聴覚、力覚、触覚など様々な感覚を総動員し、それらを統合してより深い認識を得ている。ま

た、物の形状や肌ざわり、実際に持ったときの重量感、操作感といったものは力覚、触覚の助けを借りなければ評価することはできない。このようなことから、力覚、触覚といった体性感覚を通して情報を提示することの重要性が広く認識されるようになり、この問題に対する研究が盛んになってきている。Ouh-young⁽²⁾らは薬の分子と分子の6自由度の結合力を力覚提示と視覚提示により行い、その実験結果を報告している。また、Satoら⁽³⁾はワイヤーや糸の張力を用いた力提示装置を提案している。Minskyら⁽⁴⁾は2自由度を持つジョイスティックを用い、対象物表面のテクスチャ(肌合いや模様)を指に伝える仮想やすり(Sandpaper)を開発し、その制御則の安定性を論じている。また、Iwataら⁽⁵⁾は9軸マスタ・マニピュレータを用い、仮想対象物に触れたときの反力及び対象物を持ち上げたときの重量感を実現する手法を提案している。また、吉川ら⁽⁶⁾は複数のリンク機構を用いた操作感提示装置によって仮想対象物の動特性を考慮した操作感を実現する手法を提案し、それらを「インピーダンス提示」として一般化している。他にも操作反力に関する研究はいくつかある⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

人間が実際、対象物を把持し操作する際、指と対象物間には摩擦が生じる。この摩擦により人間は対象物を落とすことなく操作することが可能となる。また、対象物を認識する上でも表面の摩擦の果たす役割は大きい。しかし、上記の研究例ではいずれも指先と対象物間の摩擦を考慮している例はない。

一方、扱える仮想対象物はこれまで可動部を有しな

* 原稿受付 平成6年4月4日。

^{*1} 正員, 京都大学工学部 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)。^{*2} 京都大学工学部 (現: 豊橋技術科大学)。^{*3} 学生員, 京都大学工学部 [現: 村田機械(株)]。

いものに限定されており、はさみやクリップといった可動部を有する対象物の操作感をシミュレートするアルゴリズムの提案は行われていない。

そこで、本論文では文献(6)の「インピーダンス提示」(Impedance Display)の考え方をもとに「力計測、運動提示」法によって、表面摩擦を考慮した可動部を有する仮想対象物の動的な操作感をリンク機構を用いて提示装置によって実現するアルゴリズムを提案する。まず、仮想対象物の操作感を提示する基本的考え方を説明する。ついで、仮想対象物の運動方程式を対象物が可動部を有する場合に適用できる形で導出する。そしてオペレータの指先と対象物間に生じる摩擦をモデル化し、指先に実現させる目標指先加速度の計算方法および目標指先加速度を実現させるのに必要な各リンク機構の関節駆動入力の方法を示す。また、実際に提示実験を行う上でのいくつかの問題点を挙げ、それに対する解決策を提案する。最後に、2指用の提示装置による提示実験を行い、その結果について述べる。

2. リンク機構による操作感の実現

2.1 操作感提示装置の基本構成 ここでは、対象物を指でつかみ3次元空間内で操作しているような感覚(操作感)を図1のような環境に固定された台座をもつリンク機構を用いて提示する方法について述べる。図1で示すリンク機構は複数のロボットアームから構成され、各アームの先端にはオペレータが指先を挿入するためのリングが取り付けられている。このシステムはオペレータが指先で対象物を把持し、操作している感覚を得るような指先への反応を作りだそうとするものである。各アームの自由度は基本的にはオペレータの指に想定されるすべての運動自由度を実現できる必要がある。アームの各関節軸にエンコーダが取り付けられており、これによりオペレータの指先によって生じるアーム先端の運動を計測する。また、各アームの指先挿入部の直後には力覚センサが取り付けられて

図1: リンク機構を用いた操作感提示装置

おり、オペレータが指先で感じている力を検出する。これらの計測値により望ましい操作感を実現するような関節駆動力を算出し各関節上のアクチュエータより加えることによって操作感提示を実現する。

2.2 操作感提示の基礎的定式化 操作感提示装置は k 本のアームからなっており、第 i アームはそれぞれ n_i 自由度をもつものとする。ここで、仮想対象物の一般化座標を $\mathbf{r}_B$ 、対象物に働いている一般化力を $\mathbf{F}_B$ とする。また、第 i アームの先端位置を $\mathbf{r}_{h_i} \in \mathbf{R}^3$ ($\mathbf{R}^3$ は3次元ベクトル全体からなる集合)、オペレータの指先から第 i アームに加えられる指先力を $\mathbf{F}_{h_i} \in \mathbf{R}^3$ とし、 $\mathbf{F}_h \triangleq \text{col}[\mathbf{F}_{h_1}^T, \dots, \mathbf{F}_{h_k}^T]^T \in \mathbf{R}^{3k}$ とする。指先が対象物に接触している際、次のような運動学関係式および力のつりあい式を得る。

$$\mathbf{r}_{h_i} = \mathbf{f}_{r_i}(\mathbf{r}_B) \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_B = \mathbf{f}_f(\mathbf{F}_h; \mathbf{r}_B, \mathbf{r}_{h_i}) \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{f}_{r_i}, \mathbf{f}_f$ は適当な関数である。

仮想対象物の運動方程式はラグランジュの運動方程式により

$$\mathbf{F}_B = \mathbf{f}_{B_f}(\ddot{\mathbf{r}}_B; \mathbf{r}_B, \dot{\mathbf{r}}_B) \quad (3)$$

あるいは

$$\ddot{\mathbf{r}}_B = \mathbf{f}_{B_r}(\mathbf{F}_B; \mathbf{r}_B, \dot{\mathbf{r}}_B) \quad (4)$$

で与えられるとする。ただし、 $\mathbf{f}_{B_f}, \mathbf{f}_{B_r}$ は適当な関数である。また、第 i アームの運動学および動力学方程式は

$$\mathbf{r}_{h_i} = \mathbf{f}_i(\mathbf{q}_i) \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{M}_i(\mathbf{q}_i)\ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{h}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) - \mathbf{J}_i^T(\mathbf{q}_i)\mathbf{F}_{h_i} \quad (6)$$

で与えられるとする。ただし、 $\boldsymbol{\tau}_i \in \mathbf{R}^{n_i}$ は第 i アームの関節駆動力ベクトル、 $\mathbf{q}_i \in \mathbf{R}^{n_i}$ は関節変位ベクトル、 $\mathbf{f}_i$ は $\mathbf{r}_{h_i}$ と $\mathbf{q}_i$ の関係を表す関数、 $\mathbf{M}_i(\mathbf{q}_i) \in \mathbf{R}^{n_i \times n_i}$ ($\mathbf{R}^{n_i \times n_i}$ は $n_i \times n_i$ 次元の行列全体からなる集合)、は慣性行列、 $\mathbf{h}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i)$ は遠心力、コリオリ力、粘性摩擦及び重力の項、 $\mathbf{J}_i(\mathbf{q}_i) = \partial \mathbf{r}_{h_i} / \partial \mathbf{q}_i^T \in \mathbf{R}^{3 \times n_i}$ は $\mathbf{r}_{h_i}$ の $\mathbf{q}_i$ に関するヤコビ行列である。

式(1),(2),(3),(4)から、仮想対象物を操作したとき満たすべき指先力と指先の動きの関係が求められる。この関係を実現するようなアーム関節駆動力を式(5),(6)を用いて求め、提示装置に加える。ただし、ここでは $\mathbf{r}_{h_i}, \dot{\mathbf{r}}_{h_i}$ の値は計測により得られるものとし、 $\mathbf{r}_B, \dot{\mathbf{r}}_B$ は計測した $\mathbf{r}_{h_i}, \dot{\mathbf{r}}_{h_i}$ と対象物のモデルから計算できるものとする。

ここで操作感を提示するには以下に挙げる2通りの方法が考えられる⁽⁶⁾。

[1] 指先力 $\mathbf{F}_{h_i}$ を計測し、それにより仮想対象物に生じ

る一般化力 F_B , およびその運動 $\dot{r}_B$ を計算し, 指先の運動 $\dot{r}_{h_i}$ を決定する. 各アームはこの $\dot{r}_{h_i}$ を実現するように制御する.

[II] 指先の運動 $\dot{r}_i$ を計測し, それにより仮想対象物に生じる運動 $\dot{q}_0$, およびそのとき対象物にかかっている一般化力 F_B を計算し, 指先力 F_{h_i} を決定する. 各アームはこの F_{h_i} を実現するように制御する.

[I] は「力計測, 運動提示」の考え方であり, [II] は「運動計測, 力提示」の考え方であるといえるが, 両者とも目指すところは同じであり, さらに式 (3), (4) で表される対象物の「インピーダンス提示」(Impedance Display) のための二つの具体的方式と考えられる. したがって, 2.1 の装置は力提示装置というよりはインピーダンス提示装置であるとみなすのが妥当であろう.

また, 上述の計算アルゴリズムではインピーダンス提示装置それ自身の動特性に対する補償も同時に行っている. これは提示装置の高速, 高精度な動きを可能とし, 提示性能を向上させるにあたり大きな役割を担うものであり, 操感提示において必要不可欠である.

なお, 本論文では [I] の方式を用いることにし, 3 章で式 (1)~(4) を導出し, 式 (6) の計算については 4 章で論じる.

3. 仮想対象物の運動学および動特性

本章では, 仮想対象物の運動学および動力学関係式である式 (1)~(4) を具体的に導出する. 仮想対象物として図 2 のような $m-1$ 個の可動部を有する m 個の剛体からなる対象物を考える. ここで, 可動部は 1 自由度の直動関節または回転関節により構成されているものとする. この対象物をオペレータが k 本の指で把持し, 操作しているときの対象物の運動を考える. 空間に固定された基準座標系を Σ_0 とし, Σ_0 からみた対象物上の把持点 $C_i (i=1, \dots, k)$ の位置を r_{h_i} と表す. また, 各把持

図 2: 可動部を有する仮想対象物

点にはそれぞれ F_{h_i} の力が指先より対象物に加えられるものとする.

今, 対象物を構成する任意の一つの剛体に対象物座標系 Σ_B を固定し, その位置を $x_B \in \mathbf{R}^3$, 姿勢をオイラー角 $\phi_B \triangleq [\phi_B, \theta_B, \psi_B]^T$ で表現するものとする. また, 第 j 可動部の関節変数を $q_{B_j} (j=1, \dots, m-1)$ とし, それらを成分にもつ関節変数ベクトル q_B , $q_B \triangleq [q_{B_1}, \dots, q_{B_{m-1}}]^T \in \mathbf{R}^{m-1}$ を定義する. 仮想対象物の一般化座標として x_B , ϕ_B , q_B をとり, $r_B \triangleq [x_B^T, \phi_B^T, q_B^T]^T \in \mathbf{R}^{m+5}$ とする. これより式 (1) の両辺を一回時間微分することにより次式を得る.

$$\dot{r}_{h_i} = J_{B_i}(r_B) \dot{r}_B \quad (7)$$

ここで $J_{B_i}(r_B) \triangleq \partial r_{h_i} / \partial r_B^T = \partial f_{r_i} / \partial r_B^T \in \mathbf{R}^{3 \times (m+5)}$ は r_{h_i} の r_B に関するヤコビ行列である. 仮想仕事の原理より, 把持点 C_i から加えられる力 F_i に等価な一般化力 F_{B_i} は $F_{B_i} = J_{B_i}^T(r_B) F_{h_i}$ で与えられる. これより, 対象物にかかる一般化力 F_B は

$$F_B = J_B^T(r_B) F_h \quad (8)$$

となる. ただし, $J_B \triangleq [J_{B_1}^T, \dots, J_{B_k}^T]^T \in \mathbf{R}^{3k \times (m+5)}$. したがって, 式 (3), (4) に対応する仮想対象物のラグランジュ運動方程式は

$$M_B(r_B) \ddot{r}_B + h_B(r_B, \dot{r}_B) = J_B^T(r_B) F_h \quad (9)$$

と与えられる. ただし, $M_B(r_B) \in \mathbf{R}^{(m+5) \times (m+5)}$ は仮想対象物の慣性行列, $h_B(r_B, \dot{r}_B) \in \mathbf{R}^{m+5}$ は遠心力, コリオリ力及び重力の項を表すものとする.

また, 対象物の可動部がアクチュエータにより能動的に駆動される場合あるいは受動的な弾性力や粘性力が働く場合にはそれらを関節駆動力 $\tau_B \in \mathbf{R}^{m+5}$ として考慮することができる. このとき, 仮想対象物の運動方程式は式 (9) に代わって

$$M_B(r_B) \ddot{r}_B + h_B(r_B, \dot{r}_B) = J_B^T(r_B) F_h + \tau_B \quad (10)$$

となる. 例えば可動部がアクチュエータにより能動的に駆動され, さらに, 弾性係数 $K_{q_B} = \text{diag}[k_{q_{B_1}}, \dots, k_{q_{B_{m-1}}}]$ の弾性力, 粘性摩擦係数 $D_{q_B} = \text{diag}[d_{q_{B_1}}, \dots, d_{q_{B_{m-1}}}]$ の摩擦力が働くものとした場合には, τ_{q_B} は

$$\tau_B = [0, 0, 0, 0, 0, 0, \tau_{q_B}^T]^T \quad (11)$$

$$\tau_{q_B} = \tau_a - K_{q_B} [q_B - \hat{q}_B] - D_{q_B} \dot{q}_B \quad (12)$$

となる. ただし, τ_a は関節に取り付けられたアクチュエータの駆動力, $\hat{q}_B$ は関節変数のつりあいの位置を成分にもつベクトルである. また, 関節を完全に自由関節としたい場合にはその関節に対応する τ_{q_B} の要素を 0 にすればよい.

また, $m = 1$ とすることで式(9)は単一剛体からなる対象物を扱う場合の定式化となる。

4. 対象物表面の摩擦の定式化および 関節駆動力の計算

本章では, まずはじめに, 指先と対象物間の接触状態を定式化し, 非接触, 静止摩擦接触, 動摩擦接触の判断法を示す。次に, この判断に基づいて実際に各指先から対象物に加えることのできる力を定式化する。最後にオペレータの指先に与える望みの加速度およびそれを実現するための提示装置への駆動入力を導出する。

4.1 接触状態および指先力 仮想空間内において指先の形状は点とし, 指先と対象物とは摩擦あり点接触を行うものとする。また, ある瞬間の各把持点 C_i 近傍の仮想対象物の表面形状は指先の位置ベクトル $\mathbf{r}_{hi}$ 空間における超曲面により $S_i(\mathbf{r}_{hi}) = 0$ と表されるものとし, $S_i(\mathbf{r}_{hi}) > 0$ は対象物内部を表すものとする。このとき, $\mathbf{r}_{hi}$ の計測値 $\hat{\mathbf{r}}_{hi}$ が次式を満たすとき対象物と指先 (第 i 指) とは接触していると判断される。

$$S_i(\hat{\mathbf{r}}_{hi}) \geq 0 \quad (13)$$

式(13)を満たすときは引き続いて以下のようにして静止摩擦状態, 動摩擦状態の判断を行う。ただし, 指先と対象物間に働く摩擦はクーロン摩擦とする。今, 指先 (第 i 指) と対象物との接触点 C_i における対象物表面の内向き単位法線ベクトル $\mathbf{n}_{Ci}$ は式(13)より

$$\mathbf{n}_{Ci} = \frac{\partial S_i(\mathbf{r}_{hi})}{\partial \mathbf{r}_{hi}} / \left\| \frac{\partial S_i(\mathbf{r}_{hi})}{\partial \mathbf{r}_{hi}} \right\| \quad (14)$$

と表される。

本方法では指先力 $\mathbf{F}_{hi}$ は計測できるものとしているが, この計測により得られた指先力を $\hat{\mathbf{F}}_{hi}$ とする。ここで, 指先力の計測値 $\hat{\mathbf{F}}_{hi}$ を接触点での対象物表面に対して垂直な成分 $\hat{\mathbf{F}}_{hni}$ 及び接平面内成分 $\hat{\mathbf{F}}_{hti}$ に分解することを考える。式(14)を用いると $\hat{\mathbf{F}}_{hni}$ 及び $\hat{\mathbf{F}}_{hti}$ はそれぞれ次式で求められる。

$$\hat{\mathbf{F}}_{hni} \triangleq (\mathbf{n}_{Ci}^T \hat{\mathbf{F}}_{hi}) \mathbf{n}_{Ci} \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{F}}_{hti} \triangleq \hat{\mathbf{F}}_{hi} - \hat{\mathbf{F}}_{hni} \quad (16)$$

また, 対象物表面に対する指先の相対速度ベクトルを $\dot{\mathbf{r}}_{Ri}$, $\dot{\mathbf{r}}_{Ri}$ の表面接平面への正射影ベクトルを $\dot{\mathbf{r}}_{Rti}$ とすると, $\dot{\mathbf{r}}_{Ri}$, $\dot{\mathbf{r}}_{Rti}$ はそれぞれ次式で求められる。

$$\dot{\mathbf{r}}_{Ri} = \hat{\mathbf{r}}_{hi} - \mathbf{J}_{B_i}(\mathbf{r}_B) \dot{\mathbf{r}}_B \quad (17)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_{Rti} = \dot{\mathbf{r}}_{Ri} - (\mathbf{n}_{Ci}^T \dot{\mathbf{r}}_{Ri}) \mathbf{n}_{Ci} \quad (18)$$

ここで, $\dot{\mathbf{r}}_{Rti}$ は指先の対象物表面に対する滑り速度を意味する。

(a) 静止摩擦接触

(b) 動摩擦接触

図3: 指先力の分解

これより, 以下の式を満たすときの接触状態を, 静止摩擦接触状態とする。

$$\|\hat{\mathbf{F}}_{hti}\| \leq \mu_s \|\hat{\mathbf{F}}_{hni}\| \quad \text{および} \quad \|\dot{\mathbf{r}}_{Rti}\| = 0 \quad (19)$$

ただし, μ_s は最大静止摩擦係数である。この場合, 計測した指先力 $\hat{\mathbf{F}}_{hi}$ が対象物に加えられていることになる (図3(a))。したがって,

$$\mathbf{F}_{hi} = \hat{\mathbf{F}}_{hi} \quad (20)$$

となる。一方,

$$\|\hat{\mathbf{F}}_{hti}\| > \mu_s \|\hat{\mathbf{F}}_{hni}\| \quad \text{または} \quad \|\dot{\mathbf{r}}_{Rti}\| > 0 \quad (21)$$

となった瞬間より接触状態は動摩擦接触状態に移し, この場合, 指先から対象物に実際に加えることのできる力は次式となる (図3(b))。

$$\mathbf{F}_{hi} = \mu_d \|\hat{\mathbf{F}}_{hni}\| \frac{\dot{\mathbf{r}}_{Rti}}{\|\dot{\mathbf{r}}_{Rti}\|} + \hat{\mathbf{F}}_{hni} \quad (22)$$

ただし, μ_d は動摩擦係数である。

以上のようにして摩擦状態を判断し指先より対象物に加えられる力を計算する。

4.2 指先加速度の計算 提示装置によってオペレータに提示すべき指先加速度を $\ddot{\mathbf{r}}_{hdi}$ とし, 以下にそれぞれの把持状態に対して指先加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_{hdi}$ を計算する方法を示す。なお, 非接触, 接触 (静止摩擦, 動摩擦) を問わず, すべての把持状態で一貫して指先加速度を計算するためにオペレータの各指先に微小な仮想質量 m_v を考えることにする。

(a) 非接触状態 計測された指先力 $\hat{\mathbf{F}}_{hi}$ が m_v にかかることになり, 指先加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_{hdi}$ は次式で与えられる。

$$\ddot{\mathbf{r}}_{hdi} = \frac{1}{m_v} \hat{\mathbf{F}}_{hi} \quad (23)$$

ここで, m_v を十分小さくすることにより, 微少な指先力で提示装置のアーム先端は瞬時に動き, 指先の動きに従従することになり, オペレータは近似的に無負荷状態を感じる。

(b) 静止摩擦接触状態 対象物に加えられている力は式(20)より $\hat{\mathbf{F}}_{hi}$ となる。この時, 指先の動きは対

対象物上の把持点の動きに一致しなければならない。これより、対象物の質量に対して m_v が小さく無視できるとし、(7),(9) より $\ddot{\mathbf{r}}_{hd_i}$ を

$$\ddot{\mathbf{r}}_{hd_i} = \mathbf{J}_{B_i}(\mathbf{r}_B) \mathbf{M}_B^{-1}(\mathbf{r}_B) [\mathbf{J}_B^T(\mathbf{r}_B) \hat{\mathbf{F}}_h - \mathbf{h}_B(\mathbf{r}_B, \dot{\mathbf{r}}_B)] + \dot{\mathbf{J}}_{B_i}(\mathbf{r}_B) \dot{\mathbf{r}}_B \quad (24)$$

で与える。ここで $\mathbf{r}_B, \dot{\mathbf{r}}_B$ はそれぞれ仮想対象物の一般化座標、一般化速度であり、式(9)または式(10)より得られる $\ddot{\mathbf{r}}_B$ を時間積分して得られる。

(c) 動摩擦接触状態 この場合式(22)で求められた $\mathbf{F}_{h_i}$ が指先から対象物に加えられている。この時、対象物表面に対して法線方向には指先と対象物間に相対運動はなく、接線方向にのみ相対運動を生じる。そこで、法線方向には指先の動きと対象物上の把持点の動きを一致させることにし、接線方向にのみ m_v を考慮し、 $\hat{\mathbf{F}}_{h_i} - \mathbf{F}_{h_i}$ によって加速されることにする。すると、対象物上の把持点の加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_{C_i}$ は

$$\ddot{\mathbf{r}}_{C_i} \triangleq \mathbf{J}_{B_i}(\mathbf{r}_B) \mathbf{M}_B^{-1}(\mathbf{r}_B) [\mathbf{J}_B^T(\mathbf{r}_B) \mathbf{F}_h - \mathbf{h}_B(\mathbf{r}_B, \dot{\mathbf{r}}_B)] + \dot{\mathbf{J}}_{B_i}(\mathbf{r}_B) \dot{\mathbf{r}}_B \quad (25)$$

で与えられることになり、したがって指先加速度 $\ddot{\mathbf{r}}_{hd_i}$ は、

$$\ddot{\mathbf{r}}_{hd_i} = \frac{1}{m_v} (\hat{\mathbf{F}}_{h_i} - \mathbf{F}_{h_i}) + (\mathbf{n}_{C_i}^T \ddot{\mathbf{r}}_{C_i}) \mathbf{n}_{C_i} \quad (26)$$

となる。

式(23),(24),(26)で得られた各把持状態での指先加速度を提示装置の各アーム先端に実現させることができれば、オペレータにあたかも摩擦表面を有する仮想対象物を把持し操作しているかのような感覚を与えることができる。これを実現する関節駆動入力は式(5),(6)より

$$\tau_i = \mathbf{M}_i(\mathbf{q}_i) \mathbf{J}_i^{-1}(\mathbf{q}_i) [\ddot{\mathbf{r}}_{hd_i} - \dot{\mathbf{J}}_i(\mathbf{q}_i) \dot{\mathbf{q}}_i] + \mathbf{h}_i(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) - \mathbf{J}_i^T(\mathbf{q}_i) \hat{\mathbf{F}}_{h_i} \quad (27)$$

で与えられる。ただし、このとき $\mathbf{q}_i$ は $\mathbf{J}_i(\mathbf{q}_i)$ が正則となる範囲にあるものと仮定する。

5. 操感提示実施時の問題点とその解決法

仮想対象物を剛体と仮定して定式化を行ってきたが、提示装置を用いて提示実験をする際、実際に対象物が存在しないため、対象物内に指先が入り込んでしまう可能性がある。この原因としては1)「力計測、運動提示」により、指先に各把持状態での加速度を与える制御を行うことを考えているが、対象物に接触した瞬間の指先速度と把持点での対象物速度との違いにより生じる衝突力等を考慮していないことや、2)アームのモデル化誤差や制御の離散値化誤差が存在するため加速

図4: 把持点サーボ補償

度の誤差が累積して大きな位置誤差が生じてしまうことなどが考えられる。1)に関しては運動エネルギー保存の法則に基づく衝突モデルを考え、それにより指先に与える運動を計算するといった方法などが考えられるが、衝突力の厳密なモデル化は難しく計算量も多くなる。そこで、ここでは以下のような簡単な位置と速度のサーボ補償を行い、対象物を把持している際、指先が対象物内に入り込まないようにすることで1),2)の問題点に対処することを考える。

第 i 指の位置と速度の偏差をそれぞれ $\mathbf{e}_{h_i} \triangleq \mathbf{r}_{h_i} - \mathbf{r}_{hd_i}$, $\dot{\mathbf{e}}_{h_i} \triangleq \dot{\mathbf{r}}_{h_i} - \dot{\mathbf{r}}_{hd_i}$ とする。ここで、目標把持位置 $\mathbf{r}_{hd_i}$ は静止摩擦状態で接触している場合、最初に対象物表面に指先が接触した点となる(図4(a))。一方、動摩擦状態での接触では $\mathbf{r}_{hd_i}$ を近似的に現在の指先位置から最短距離にある対象物表面上の点にとることにする(図4(b))。したがって、動摩擦状態接触時には、対象物表面に対して法線方向にのみ位置偏差が生じることになる。さらに、速度偏差 $\dot{\mathbf{e}}_{h_i}$ を位置偏差 $\mathbf{e}_{h_i}$ 方向のベクトル $\dot{\mathbf{e}}_{hs_i}$ とそれに直交するベクトル $\dot{\mathbf{e}}_{hpi}$ に分解すると、

$$\dot{\mathbf{e}}_{hs_i} = \frac{(\dot{\mathbf{e}}_{h_i}^T \mathbf{e}_{h_i})}{|\mathbf{e}_{h_i}|} \frac{\mathbf{e}_{h_i}}{|\mathbf{e}_{h_i}|} \quad (28)$$

$$\dot{\mathbf{e}}_{hpi} = \dot{\mathbf{e}}_{h_i} - \dot{\mathbf{e}}_{hs_i} \quad (29)$$

となる。これらを用いて式(24),(26)で求めた加速度に指先の偏差に対するサーボ補償を行って、式(27)の $\ddot{\mathbf{r}}_{hd_i}$ に代えて与える新しい加速度 $\ddot{\mathbf{r}}'_{hd_i}$ を求める。ここで与える $\ddot{\mathbf{r}}'_{hd_i}$ は静止摩擦状態の場合には、

$$\ddot{\mathbf{r}}'_{hd_i} \triangleq \begin{cases} \ddot{\mathbf{r}}_{hd_i} - (K_p \mathbf{e}_{h_i} + K_d \dot{\mathbf{e}}_{h_i}) : (\dot{\mathbf{e}}_{h_i}^T \mathbf{e}_{h_i}) \geq 0 \text{ の場合} \\ \ddot{\mathbf{r}}_{hd_i} - (K_p \mathbf{e}_{h_i} + K_d \dot{\mathbf{e}}_{hpi}) : \text{その他の場合} \end{cases} \quad (30)$$

と定め、動摩擦状態の場合には

$$\ddot{\mathbf{r}}'_{hd_i} \triangleq \begin{cases} \ddot{\mathbf{r}}_{hd_i} - (K_p \mathbf{e}_{h_i} + K_d \dot{\mathbf{e}}_{hs_i}) : (\dot{\mathbf{e}}_{h_i}^T \mathbf{e}_{h_i}) \geq 0 \text{ の場合} \\ \ddot{\mathbf{r}}_{hd_i} - K_p \mathbf{e}_{h_i} : \text{その他の場合} \end{cases} \quad (31)$$

と定める。ただし、 K_p, K_d はサーボ補償ゲインである。式(30),(31)では、指先が対象物内から外に出る方向に動く場合に微分補償項を除いているが、これは指先が対象物から離れようとする際に実際には感じないダンピングの影響を避けるためである。

図 5: システム構成

6. 実験

以上に述べた操作感提示法の有効性を検証するために、鉛直平面内を運動する仮想対象物を2本指で扱うときの操作感を生成する実験を行った。

以下に実験装置、方法、結果を示し結果について考察を加える。

6.1 実験装置 実験に用いたシステムの構成を図5に示し、各要素の詳細を以下に記述する。提示装置は2本指用とし、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平行駆動型2自由度マニピュレータとして、2台のベース部を0.3mの間隔で配置して用いた。関節駆動はDCサーボモータ(定格トルク $3.6 \times \text{Kg} \cdot \text{m}$)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より差分的に求めた。また、手先には自作の力センサーと指を通すための器具を取り付けた(図6)。このときの諸元を表1に示す(図7参照)。表中 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

図 6: 力覚提示装置

表 1: リンクのパラメータ

Link	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	141.0	16.5	8.48

図 7: ロボットのモデル

i の質量中心までの長さであり, I_i はリンク i の質量中心に関する慣性モーメントである。ホストコンピュータはパーソナルコンピュータ (i486DX2, 66MHz) を用いた。プログラミングはC言語およびアセンブリ言語を用いた。また、パーソナルコンピュータのCRTにオペレータの指先と仮想対象物をワイヤーフレームにより表示した。

6.2 実験方法および結果と考察 2種類の仮想対象物を想定して実験を行った。一つは直径0.06m, 質量0.4kg, 慣性モーメント $3.6 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ の球状物体(対象物1(図8(a))), もう一つはクリップの様な弾性関節で繋がれた2つの剛体からなる対象物(対象物2(図8(b)))を想定した。ここで、対象物2の関節には以下の式によりモデル化される非線形回転バネと回転ダンパが働

(a) 対象物 1

(b) 対象物 2

図 8: 提示実験における対象物

図 9: 対象物 1 の実験結果

図 10: 対象物 2 の実験結果

くものとする。

$$\tau_{q_{B1}} = -k_{q_{B1}}[(q_{B1} - \hat{q}_{B1})^5 + (q_{B1} - \hat{q}_{B1})] - d_{q_{B1}}\dot{q}_{B1}$$

ただし、 $k_{q_{B1}}$, $d_{q_{B1}}$ はそれぞれ $k_{q_{B1}} = 5 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}$, $d_{q_{B1}} = 2.5 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ とした。

オペレータは親指と人差し指をアーム先端のリングに挿入し、CRTを見ながらこれらの操作を行うことで、仮想対象物の動特性、表面摩擦の影響および仮想関節の柔らかさを感じることができるか調べた。

提示装置の可動範囲内でオペレータが容易に対象物を操作できるよう、重力加速度は地球上の10分の1に設定した。また、指先の仮想質量 m_v は $1.25 \times 10^{-2} \text{ kg}$ と

し、式(30),(31)のサーボ補償でのパラメータは $K_p = 2.2 \times 10^3 \text{ 1/s}^2$, $K_d = 1.6 \times 10^2 \text{ 1/s}$ とした。ただし、 K_p , K_d の値は対象物内に指先が入り込まないようにするとともに、把持した状態で不安定振動が生じないように経験的に求めた。また、式(19),(21)について測定誤差などを考慮して $\|\dot{r}_{Rt_i}\|$ がしきい値 $\varepsilon = 50 \text{ (mm/s)}$ 以下の場合、 $\|\dot{r}_{Rt_i}\| = 0$ として摩擦状態を判定した。対象物1,2の提示実験において制御のサンプリング周期は $2.8 \times 10^{-3} \text{ sec}$ であった。

図9, 図10はそれぞれ対象物1, 対象物2の表面の摩擦係数 μ_s, μ_d を $\mu_s = 1.0, \mu_d = 0.8$ としたときの実験結果である。ここで、図9中 x, y は対象物1の中心位置の座

標であり、 ψ は対象物の姿勢を表している。また、図10中 x, y は対象物2の左取手部分に固定された座標系 Σ_B の位置座標であり、 ψ は Σ_B の姿勢を表している。また、 q_{B1} は対象物2の可動部分の関節変数である。図9、図10中 $F_{Bz}, F_{By}, F_{B\psi}, F_{Bq1}$ はそれぞれ x, y, ψ, q_{B1} に対応した一般化力である。

図9ではオペレータは対象物を把持し、数秒間静止させた(区間1)後、左右に振り(区間2)、その後、対象物を放り上げ、落ちてくる対象物を再び掴む(区間3)という一連の動作を行っている。図9(c),(d)より、オペレータは対象物を把持し持ち上げている間、多少の変動はあるものの絶えず対象物の重さ(図9(d)破線)を感じていることが分かる(1.0sec~5.0sec)。また、対象物を放り上げる際にはより大きな力が指先にかかっていることが分かる(5.0sec~5.7sec)。一方、落ちてくる対象物を再び掴む際にも大きな力を感じることができており、把持点サーボ補償により衝撃力も実現できていることが分かる(6.4sec付近)。また、図9(a),(b)より、対象物を左右に振った際、オペレータは対象物の動きに対して逆位相の力を感じており、実際の物理現象に沿う結果となっている(2.5sec~5.0sec)。また、図9(g),(h)は各指先力の計測値を用いて式(15),(16)から計算される $\hat{F}_{hti}$ と $\hat{F}_{hni}$ の比の値を示したものであり、図中に引かれた2本の破線($\mu_s = 1.0$)を越えない場合、それぞれの指先は静止摩擦接触状態にあることを意味する。また、この破線を越えているときは、接触状態は動摩擦接触となっている。

一方、図10ではオペレータは対象物2を把持し(区間1)、持ち上げた状態で可動部を動かし(区間2)、その後、対象物全体を上下に振っている(区間3)。図10(c),(d)より先ほどと同様に、対象物を持ち上げた状態では対象物の重さ(図10(d)破線)を感じることができており、(0.5sec~2sec)。また、対象物を上下に振った際には、対象物の動きに対して逆位相の力をオペレータが感じていることが分かる(4.5sec~6.8sec)。一方、図10(g),(h)より可動部の動き q_{B1} とそれに対応する一般化力 $F_{q_{B1}}$ をみると $F_{q_{B1}}$ の変化に対して q_{B1} が同位相で変化しているのが分かる(1.8sec~4.5sec)。これは可動部の運動については慣性力に対して可動部に働くバネ力が支配的になっていることを意味する。また、このことは、対象物全体を振った時と可動部を動かした時でオペレータにそれぞれに応じて異なる操作感を提示できていることを示している。

7. 結 言

本論文では、仮想対象物の動特性および表面摩擦を考慮した操作感をリンク機構を用いた操作感提示装置

によって実現するアルゴリズムを提案した。その際、仮想対象物の動特性をラグランジュの運動方程式により表現することにより単一剛体および複数剛体からなる対象物に対して統一的な定式化を行った。また、提案したアルゴリズムの有効性を実験により検証した。

この操作感提示法はリンク機構の先端部にオペレータの指先を挿入し、指先にかかる力と仮想対象物の動特性および対象物表面の静止摩擦及び動摩擦を考慮して、指先の運動を求め、指先にその運動を実現させる関節駆動力をリンク機構に与えることにより対象物を操作している感覚をオペレータに提示するものである。これにより、オペレータには対象物の動特性を考慮した操作感を提示できるとともに、表面摩擦を利用した対象物の操りまでも提示することが可能となった。

今後の課題としては「運動計測、力提示」の方法による実現を実験的に検証し、「力計測、運動提示」の方法との比較、検討することなどが挙げられる。

文 献

- (1) S.S.Fisher, M.McGreevy, J.Humphries, and W.Robinett, Virtual Environment Display System, *Comput.Graphics*, 21-1 (1987), 4.
- (2) M.Ouh-young, D. V. Beard, and F.P.Brooks,Jr., Force Display Performs Better than Visual Display in a Simple 6-D Docking Task, *Proc.IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (1989), 1462.
- (3) M.Sato, Y.Hirata, and H.Kawarada, Space Interface Device for Artificial Reality -SPAIDAR-. *Trans.Inst. Electron. Inf. Commun. Eng. (Japan)*, J74D-II-7 (1991), 887.
- (4) M.Minsky, M.Ouh-young, O.Steele, F.P. Brooks,Jr., and M. Behensky, Feeling and Seeing: Issue in Force Display. *Comput.Graphics*, 24-2 (1990), 235.
- (5) H.Iwata, Artificial Reality with Force-Feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator, *Comput.Graphics*, 24-4 (1990), 165.
- (6) 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, Vol.11, No.8 (1993-11), 1236.
- (7) 神徳・谷江, 仮想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 Vol.29, No.3 (1993), 347.
- (8) 広田・広瀬, 仮想触覚環境の開発, 第8回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, 計測自動制御学会, (1992-10), 17.
- (9) 岩田・中島, ペン型フォースディスプレイの開発, 第8回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, 計測自動制御学会, (1992-10), 97.