多自由度 Haptic Interface のための ダイナミック・フォース・シミュレータ

非会員 國 井 康 晴 (東大生研)

会 員 橋 本 秀 紀 (東大生研)

Dynamic Force Simulator for Multi-DOF Haptic Interface

Yasuharu Kunii, Non-member, Hideki Hashimoto, Member (Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

In this paper we present a Dynamic Force Simulator (DFS) for force feedback in human-machine systems. We propose a virtual world model with two force flows: one is the force flow from human to an object, the other is the force flow from an object to human. To use this model, DFS simulates object dynamics, contact model and friction characteristics of the human hand interacting with the object in Virtual Reality. After derivation of kinematic and force relations between hand and object space, we balance the two forces: one from the human and the other from the object in the contact force space in Virtual World and then realize the adequate feedback forces to human operator. Interaction with DFS allows calculation and feedback of appropriate forces to the force controlled actuators of the sensor glove we have developed. In this paper grasping of a cylinder in the virtual world is presented. During object grasping, we measure joint angles and torques using the sensor glove system. In the future we will use this system to analyze human dextrous manipulations called Human Skill.

キーワード：仮想現実感，力覚フィードバック，作業計測，グリップ変換行列

1. はじめに

近年，仮想現実感に関する研究が盛んに研究されている。また，ロボット工学の分野においてテレロボットのヒューマンインターフェースとして仮想現実感の応用が期待されている^{(1)~(3)}。これらの分野において，ここ数年，力覚フィードバックが注目され，様々な力覚フィードバック装置が開発されつつある^{(4)~(8)}。しかし，人間の指の複雑な運動をフォローするような装置の開発には至っていない⁽⁸⁾。将来的に，仮想世界における複雑な作業の必要性は，仮想現実感およびテレロボティクスの分野でますます増加するとみられ，多自由度入力装置の研究開発が望まれる。

一方，力覚フィードバックを目的とした仮想世界のモデル化に対する研究は，始められたばかりである。特に，動的な力覚情報提示に関する研究報告は少ない。これに対し，吉川らは，リンク機構を用いたシステムを提案している⁽⁹⁾。しかし，現在までの研究は，ロボットの教示を目的としたものではない。ここ数年，著者らはロボットのより簡単な教示システムの構成を目指し，特に把持操りに注目

し，研究を進めてきた^{(10),(11)}。本論文では，多自由度 Haptic Interface を用いた動的力覚提示を目的とした仮想現実感シミュレータ「ダイナミック・フォース・シミュレータ (DFS)」を提案する⁽¹²⁾。仮想世界モデルは，マニピュレータの把持をモデル化するのに用いられるコンタクトモデルおよびグリップ変換行列を使用して構成される。力覚フィードバックを行う Haptic Interface には，開発したセンサグローブ (SG) を使用する。SG は，11 自由度を有し，各関節の角度およびトルクの計測が可能である。DFS によって，人間はコンピュータ内に定義した仮想物体を操作することができ，人間の作業解析を行える。将来的に，DFS は著者らが提案する Robotic Network System (RNS) の教示システムとして用いられ，動作の高度化，さらにそれに伴うヒューマンインターフェースの最適化などに利用される^{(10),(11)}。図 1 に RNS の最小構成要素を示す。RNS は，B-ISDN を用いて複数台のロボットを遠隔地から管理するシステムであり，家庭，医療，建設現場などにロボットを配置する。

本論文では，操作者と物体の間の力の流れを用いて，人間の作業解析のための仮想現実感シミュレータ：

図 1 ロボットネットワークシステム
Fig. 1. Minimal unit of robotic network system.

Dynamic Force Simulator (DFS) を提案し、動力的覚情報提示を行う。DFS では、仮想世界における力のバランスを用いて仮想世界の構成を行う。はじめに仮想世界モデルについて第 2 章で述べ、3 章で各部を細かくモデル化していき、内力による物体変形について述べる。第 4 章で DFS システムについて説明し、最後に、提案する仮想世界モデルを用いて SG による円柱形状仮想物体の把持実験を行い、仮想世界モデル検証する。

2. 仮想世界のモデル化

自由運動をしている人間と物体が、お互いに力を加えることで相手の運動を拘束しあっていると考え、力の伝達を人間 $\Rightarrow$ 物体、物体 $\Rightarrow$ 人間の 2 つに分ける。ここで、物体から人間への力の流れによる拘束力によって人間は物体を感じることができる。

人間 $\Rightarrow$ 物体の力の流れを見ていく。これは指（接触点）に生じた力が物体表面に伝わっていく流れである。物体表面上に加えられた力が物体に伝わるかどうかは、接触条件（状況）および摩擦条件によって規定される。現在、接触条件を表現するための手法としてコンタクトモデルがロボットマニピュレータの分野において提案されている^{(13),(14)}。これら 2 つの条件を考慮した後、力は物体に伝わり物体が運動する。条件に当てはまらない力は、人間の拘束されない運動となる。

人間 $\Rightarrow$ 接触条件 $\Rightarrow$ 摩擦条件 $\Rightarrow$ 物体

次に、物体 $\Rightarrow$ 人間の力は、摩擦条件のみが考慮され人間に伝達される。接触条件に関しては人間 $\Rightarrow$ 物体のときと同じものが定義されるため特に明記しないものとする。

物体 $\Rightarrow$ (接触条件 $\Rightarrow$) 摩擦条件 $\Rightarrow$ 人間

以上 2 つの流れをバランスさせることで、SG の位置目標計算を行う仮想世界モデルの構成を図 2 に示す。ここで、物体から出てきた力から人間が加えた力を引いているのは、この中に人間からの力が含まれているためである^(3.2.2) 章参照)。

図 2 に基づき、後述する DFS の力の流れを図 5 に示す。図 5 は、SG 部、物体ダイナミクス部、座標変換計算部より構成され、SG より指の関節角度 θ 、トルク τ が計測される。以下の章で個々に関して詳しく述べる。

図 2 仮想世界モデル
Fig. 2. Relation between human and object.

3. 力のバランスと物体の変形

3.1 座標変換

図 3 に、3 本の指で物体を把持する場合を示す。各指 i ($i=1 \cdots n$: n は指の本数) の各関節トルクを τ_{ij} ($j=1 \cdots m$: m は関節数) とし、各指先での接触力を f_i 、指先への反力を f_i^* とする。また、各指先の座標系を T_i 、各接触点における座標系を C_i とする。ただし、 C_i の x, y 軸は、物体表面の接線とし、 z 軸はその法線とする (図 4)。物体重心を原点とした座標系を B とする。各座標系間の座標変換および力に関する座標変換を、

$$\begin{matrix} U_i & V_i \\ T_i \longrightarrow C_i \longrightarrow B \end{matrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{matrix} \Gamma_i & A_i \\ \tau_i f_i \longrightarrow C_i f_i \longrightarrow B f_i \end{matrix} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と定義する。摩擦モデル、コンタクトモデル、接触力のバランスは、接触点座標系 C_i において議論される。

3.2 力のバランス

3.2.1 人間が発生する力 各指の関節角度 θ は、SG の制御および各座標系や座標変換の計算に使用される。一方関節トルク τ は、ヤコビアン J_i と座標変換 Γ_i によって各接触点座標系 C_i での力 ${}^{C_i}f_i$ に変換される。

ここで、接触点座標系 C_i の各軸に関する単位一般化力ベクトルを単位レンチ w と呼ぶ。 w は、力の方向を表わすものであり、各方向の力は、 w とその方向の力の大きさによって表現される。単位レンチ w を用いて、コンタクトモデルは定義される。コンタクトモデルとして点接触、線接触、面接触、ソフトフィンガー接触が定義されている⁽¹⁴⁾。ここでは、代表例として摩擦ありの点接触とソフトフィンガー接触を Table 1 に示す。点接触の場合、 x, y, z の各軸方向の並進力は伝達できるが、各軸まわりのモーメントは伝達されないで、 x, y, z 各成分を持つ単位レンチが定義される。また、ソフトフィンガー接触の場合、点接触の場合に加えて z 軸まわりのモーメントが定義される (Table 1)。以下、このコンタクトモデル (単位レンチ) を用いて接触力を表現していく。

ある接触点座標系 C_i ($i=1, \dots, n$) 上での接触力 ${}^{C_i}f$ は、接触点座標系 C_i 上における単位レンチベクトル ${}^{C_i}w_{ij}$ を

図 3 3本指による物体把持
Fig. 3. Object grasped by 3 fingers.

図 4 接触座標系
Fig. 4. Contact frame.

表 1 コンタクトモデル
Table 1 Contact models.

Contact Model With Friction	
Point Contact	Soft Finger

$w_1 = (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)^T$ $w_2 = (0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0)^T$ $w_3 = (0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0)^T$	$w_1 = (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0)^T$ $w_2 = (0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0)^T$ $w_3 = (0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0)^T$ $w_4 = (0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1)^T$

用いて 2 つの力に分割される。

$$c_i \tilde{f}_i = c_i \tilde{f}_i + \sum_{j=1}^{k_i} c_{ij} w_{ij} = c_i \tilde{f}_i + c_i \tilde{f}_i \quad (3)$$

ここで、 c_{ij} は各单位レンチベクトル方向の大きさである。 $c_i \tilde{f}_i$ は接触点に対して力を伝達可能な力であり、 $c_i \tilde{f}_i$ は、接触点に伝わらない力である。接触点は、 $c_i \tilde{f}_i$ 方向には、拘束はなく自由な運動が可能である。

次に、力 $c_i \tilde{f}_i$ は

$$c_i \tilde{f}_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}] [c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{im}]^T = c_i W_{ic_i} \quad (4)$$

と表わせる。

物体重心座標系 B における各接触点の接触力の合力 ${}^B \tilde{f}$ は、

$$\begin{aligned} {}^B \tilde{f} &= {}^B \tilde{f}_1 + \dots + {}^B \tilde{f}_n \\ &= [A_1^T W_1, \dots, A_n^T W_n] [c_1^T, \dots, c_n^T]^T \\ &= {}^B W C_h \quad \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

と表わせる。ここで、 $c_h = [c_1^T, \dots, c_n^T]^T$ とする。

式(5)は、ベクトル c_h の方程式である。一般に行列 ${}^B W$ は長方形行列であり、その解は、 ${}^B W C_h = 0$ の一般解 c_{h_g} と ${}^B W C_h = {}^B \tilde{f}$ の特殊解 c_{h_p} から構成される。したがって解は

$$c_h = c_{h_g} + c_{h_p} \quad (6)$$

の形で求められる。この解を式(5)に代入すると、

$${}^B W c_h = \underbrace{{}^B W c_{h_g}}_0 + \underbrace{{}^B W c_{h_p}}_{{}^B \tilde{f}} = {}^B \tilde{f} \quad \dots \dots \dots (7)$$

となる。 ${}^B W c_{h_p} (= {}^B \tilde{f})$ は、実際に物体の運動に作用するが、 c_{h_g} は、 ${}^B W$ の零空間 (Null space) になり、物体の運動に影響を与えない各接触点における力の集合を示す。すなわち、この方向に力を加えた場合、各接触点における力はお互いに打ち消し、物体に伝達されない。

〈3.2.2〉 物体が及ぼす力 仮想物体が受ける外力は、重力と人からの力のみと仮定する。仮想物体の運動方程式は、ニュートン・オイラーの方程式より、

$${}^B f_{\text{ext}} = \begin{bmatrix} \hat{m} & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} - {}^B \tilde{f} \quad \dots \dots \dots (8)$$

となる。ただし、 ${}^B f_{\text{ext}}$ は、物体から人間に加わる力で、

$${}^B f_{\text{ext}} = \begin{bmatrix} \hat{m} & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega \times \hat{m} n \\ \omega \times H \omega \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (9)$$

と表わされる。ここで、 $\hat{m} = \text{diag}(m, m, m) \in R^{3 \times 3}$ 、 m は物体の質量、 $g \in R^3$ は重力加速度ベクトル、 $H \in R^{3 \times 3}$ は物体の慣性テンソルであり、 ω, v は、物体の角速度および並進速度ベクトルである。

式(8)より、 ${}^B f_{\text{ext}}$ は、物体の運動より人間が加えた力 ${}^B \tilde{f}$ を取り除いたものである。

また、 ${}^B W$ 行列と大きさ成分 c_{obj} を用いて、

$${}^B f_{\text{ext}} = {}^B W c_{\text{obj}} \quad \dots \dots \dots (10)$$

と表わせる。これより、

$$c_{\text{obj}} = {}^B W^+ {}^B f_{\text{ext}} \quad \dots \dots \dots (11)$$

となる。ただし、 ${}^B W^+$ は、 ${}^B W$ の疑似逆行列 $W^+ = W^T [W W^T]^{-1}$ である。

〈3.2.3〉 バランス 物体には、人間の加えた力が作用しているが、式(9)で求められた物体からの力は、人間が加えた力を取り除いたものである。したがって、人間と物体からの力を接触力空間内で再び加え合わせることで力のバランスが得られる。このとき、人間にフィードバックされる力 c_{ret} は

$$\begin{aligned} c_{\text{ret}} &= c_h + c_{\text{obj}} \\ &= (c_{h_p} + c_{\text{obj}}) + c_{h_g} \quad \dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

となる。ここで、 c_h は人間からの力、 c_{obj} は物件からの力であり、 c_{h_p}, c_{h_g} は、 c_h の特殊解、一般解成分である。 c_h に含まれる内力情報 c_{h_g} は、物体からの反力によって打ち消される。物体からの反力に関しては、次の節で述べ

図 5 DFS における力の流れ図
Fig. 5. Force flow of dynamic force simulator.

る。

〈3・3〉 物体の変形

c_h の ${}^B W$ に対する零空間成分 $c_{h,h}$ を求めることによって、物体を内部に向かって押し潰す力（内力成分）を求めることができる。この内力によって、物体の変形が考慮でき、さらに変形の反力と $c_{h,h}$ のバランスをとることにより、物体内部方向への指の運動が拘束される。また、変形による反力は、物体からの力に対し摩擦を考慮するために重要である。ここでは簡単な例として図 6 (a) に示すようにバネを使った場合を考える。円柱物体を 2 本の指で挟み込む場合、物体表面に対してバネを配置する。指が物体表面から内部にめり込んだ距離を z とする。図 6 (b) に示すように、このとき各指には物体に加わる重力分の力 $\frac{1}{2}mg$ と変形による反力 kz の合力が加わることになる。ここで、 k はバネ係数である。反力 kz と各接触力とのバランスをとることにより、センサグローブによって物体表面が表現される（後述する図 8 参照）。さらに、接触点座標系において反力 kz と物体からの力（この例の場合は重力加速度）を用いて摩擦条件を考慮する。

本方法において変形による物体運動の変化は、物体の慣性テンソルの変化として反映されることになる。本論文では接触点にバネを仮定して変形を行っているが、変形に対しては有限要素法などを用いた方法の採用も可能である。

〈3・4〉 摩擦モデル

接触点において摩擦を考慮する。ここでは、クーロン摩擦のみを考慮する。摩擦により、接触点に生じた力を物体表面に伝達可能な力とそうでない力に分割する。摩擦は、「人間 ⇒ 物体」の流れにおいては式 (5) の c_h 、「物体 ⇒ 人間」においては、式 (10) の c_{obj} に対して考慮される。ここでは、 c_h, c_{obj} を c と表わす。

図 6 内力と物体の反力
Fig. 6 Object deformation by internal force.

〈3.4.1〉 静止摩擦 接触点座標系 C において接触力 ${}^C f = (f_x, f_y, f_z)$ を生じさせている時、静止摩擦条件は、

$$\|{}^C f_t\| = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} < \mu_s \cdot \|{}^C f_n\| \quad (13)$$

と表わされる。ここで、 μ_s は静止摩擦係数、 ${}^C f_t$ は、 ${}^C f$ の接線方向のベクトル、 ${}^C f_n$ は、 ${}^C f$ の法線方向のベクトルとする。この条件を満たす時、接触力は伝達されることになる。

人間 ⇒ 物体のとき、伝達されない力は、人間の指の自由な運動（滑り）として、センサグローブの方にフィードバックされる。ただし、このとき発生した運動に対しては、後で述べる動摩擦力が考慮されることになる。

次に、 ${}^C f$ を ${}^C W$ 行列と大きさ c を用いて表現したとき、一般にベクトル c は、

$$c = [c_{f_x} c_{f_y} c_{f_z} c_{m_x} c_{m_y} c_{m_z} \dots] \quad (14)$$

と表わせる。ただし、コンタクトモデルによっては、存在しない成分もある。このとき、静止摩擦条件は、

$$\sqrt{c_{f_x}^2 + c_{f_y}^2} < \mu_s c_{f_z} \quad (15)$$

となる。この条件によりベクトル c は、伝わる力 $\bar{c}$ と伝わらない力 $\hat{c}$ に分割される。

〈3.4.2〉 動摩擦 接触点が速度 ${}^C v$ で運動している場合、動摩擦が考慮される。この場合、 ${}^C f$ の法線方向

の力 ${}^c f_n$ の大きさに比例した力

$${}^c f_{df} = \mu_d \| {}^c f_n \| \frac{{}^c v}{\| {}^c v \|} \quad \dots\dots\dots (16)$$

が接触点に伝達される。ここで、 μ_d は動摩擦係数である。 ${}^c f_{df}$ を ${}^c W$ 行列とその大きさ c_{df} で表現する時、 $c_{df} (= \tilde{c})$ が伝達されることになり、残り $\tilde{c} (= c - c_{df})$ は滑りとなる。

〈3.4.3〉 摩擦過程の変化 静摩擦、動摩擦間の移行は、接触点の速度を基準に切り替える。すなわち、接触点の移動速度 $\| v \|$ に対して、

$$\begin{cases} \| v \| \leq \alpha: \text{静摩擦} \\ \| v \| > \alpha: \text{動摩擦} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (17)$$

である。ここで、 α は定数である。理想的には α の値は 0 である。しかし $\alpha=0$ とした場合、計算時間などによる時間遅れにより、各接触点は $\| v \|$ の近傍で振動的になるものと予想される。したがって、実際には $\| v \|$ がある範囲 α に入った場合に、静摩擦に移行させる。

〈3.5〉 仮想世界の構成

図 2 の仮想世界モデルを、前述の座標変換、コンタクトモデル、摩擦モデル（摩擦条件）を用いて細部を書き直し、図 5 を構成する。図 5 は、現実の世界の人間（Human）部、物体（Object）部、座標変換部および力伝達部から構成される。力伝達部は、人間 $\Rightarrow$ 物体、物体 $\Rightarrow$ 人間の二つの流れおよびそのバランスで構成される。

〈3.5.1〉 人間 $\Rightarrow$ 物体 センサグローブから、指の関節角度 θ 、トルク τ が計測される。 θ は、センサグローブの制御および各座標系や座標変換の計算に使用される。一方 τ は、ヤコビアン疑似逆行列 (J_i^+) と座標変換 Γ_i によって各接触点座標系での力 ${}^c f_i$ に変換される。力 ${}^c f_i$ はコンタクトモデルによって物体に伝達される力 c_h とされな力 ${}^c \tilde{f}_i$ に分割される。同様に、摩擦モデルによって、伝達される力 $\tilde{c}_h$ と伝達されない力 $\tilde{c}_h$ に分割される。伝達されない力は、センサグローブに対しフィードバックされる。伝達される力 $\tilde{c}_h$ は、 ${}^B W$ 行列を使用して物体重心座標系に写像され、ここで、各接触点からの力と合成される (${}^B \tilde{f}$)。

〈3.5.2〉 物体 $\Rightarrow$ 人間 物体のダイナミクスを表現しているのが、Object 部である。Object 部で物体が人間に対して発生する力として ${}^B f_{ext}$ が計算される。この ${}^B f_{ext}$ に対し、 ${}^B W$ 行列の疑似逆行列を作用させ物体からの力 ${}^B f_{ext}$ を各接触点に分配される。この操作で陰にコンタクトモデルが考慮される。(${}^B W$ に情報が含まれる)。分配された力は、摩擦モデルが考慮された後、伝達される力 $\tilde{c}_{obj}$ と伝達されない力 $\tilde{c}_{obj}$ に分割され、 $\tilde{c}_{obj}$ が人間からの力 $\tilde{c}_h$ とバランスをとる。物体の変形による反力とバランスした後、コンタクトモデル、摩擦モデルにおいて物体に伝達されなかった力を加えてセンサグローブへの位置指令値を生成する。

4. DFS 実験システムの構成

〈4.1〉 実験システム

実験システムを、図 7 に示す。人間が発生できる信号は 5~10 [Hz]、位置・力情報を表示するためには、20~30 [Hz] が必要であると報告されている⁽⁸⁾。計算負荷軽減のためシステムを 5 つに分割し構成した。

1. 計測・制御（トランスピュータ：T-800）
2. 通信（トランスピュータ：T-800）
3. キャリブレーション（トランスピュータ：T-800）
4. ダイナミクス計算（i860）
5. グラフィックス（HP Apollo 735）

計測・制御用、通信用のトランスピュータシステムは、当

図 7 DFS 実験システム構成
Fig. 7. DFS Experimental system structure.

図 8 仮想環境とセンサグローブ
Fig. 8. Virtual environment and sensor glove.

研究室にて設計・開発した。

〈4・2〉 センサグローブ

センサグローブ (SG) を図 8 (b) に示す。SG は、親指、人差し指に各 3 自由度、他の 3 本に 2 自由度、手首に 3 自由度の計 11 自由度を有する (図 9)。また、手首のひねり方向の回転を除く 10 自由度に対して力覚フィードバックが可能である。SG の関節の構造を図 10 に示す⁽¹⁶⁾。各関節は、ワイヤを介してモータが接続されている。ポテンションにより各関節角度が計測され、ワイヤの張力差を計

図 9 センサグローブの自由度
Fig. 9. DOF of SG.

図 10 センサグローブの関節の構造
Fig. 10. Schematic of joint on SG.

測することで、関節トルクを得る。

5. 実験結果

提案する仮想世界モデルにより、SG によってコンピュータ中に定義した円柱物体 (図 8 (a)) の把持実験を行う。実験では、仮想物体を 2 本指で把持し、右横に移動させる。ここで、仮想物体の質量 m を 1 [kg] とし、静止・動摩擦係数を $\mu_s = \infty$, $\mu_d = 0$ とした。図 11 の (a) ~ (h) に物体を把持して移動する一連の作業の様子を示す。(a) ~ (c) において物体を把持し、持ち上げる。次に、(f) ~ (h) において物体を右に移動する作業を行った。また、物体把持時の人差し指の指先の位置 (接触点)、第 1, 2 関節の角度およびトルクを図 12 に示す。データ

図 12 物体把持時の SG からの計測データ
Fig. 12. DATA from sensor glove during grasping.

図 11 仮想世界における作業
Fig. 11. Object grasping in virtual world on DFS.

図 13 ロボットシミュレータとの接続
Fig. 13. Communication to robot simulator.

は、SG の出力から直接計測した。指先が物体表内部に侵入しているが、これはワイヤの伸びと時間遅れなどによるものである。この実験では、物体表面へ指先が接触後、各指先に対して内力を打ち済すよう反力を生成した。

6. ま と め

本論文では、動的力覚情報提示のための仮想現実感システム：“ダイナミック・フォース・シミュレータ”を提案し、仮想世界の力のバランスとそこから導かれる仮想世界モデルの構成図を示した。さらに、内力情報を利用した物体の変形法に関して述べた。また、計算機中に円柱形状物体を定義し、SG を使用して仮想物体の把持実験、指の関節角度およびトルクの計測を行った。これにより、提案する仮想世界モデルにおいて物体の把持が可能であることを示した。今後、より複雑な作業を実現するために、より高性能で自由度の多い SG を開発する予定である。新しい SG を用いて、人間の運動を解析し、テレロボットシステムにおけるヒューマンインターフェースの簡易化を検討する。さらに、DFS とロボットサーバスシステムを接続し、DFS の作業データに基づいた Dextrous Hand System (DRH) による作業シミュレーション (図 13) を実際に DRH 上で実現させ、RNS を構築する。

(平成 7 年 1 月 27 日受付, 同年 12 月 25 日再受付)

文 献

- (1) 橋本：「人工現実感とロボット」, 日本ロボット学会誌, **10**, 7, 903 (1992)
- (2) 小菅・藤澤・福田：「仮想ツールダイナミクスに基づくマン・マシン系の制御」, 日本機械学会論文集 (C 編), **60**, 527, 211 (1994)
- (3) 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・スレーブス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 (1992)
- (4) 橋本：「フォースディスプレイとロボットハンド」, 日本ロボット学会誌, **11**, 7, 943 (1993)

- (5) 野間・岩田：「自由度フォースディスプレイの開発とその操作性評価」, 計測自動制御学会論文集, **29**, 4, 455, (1993)
- (6) G. Burdea, J. Zhuand, E. Roskos: "Towards a Portable Dexterous Master with Force Feed-back, Presence: Teleoperators and Virtual Environments", MIT Press, (1991)
- (7) E. Chen, and B.A. Marcus: "EXOS Hand Exoskeleton Haptic Display", Submitted to Symposium on Haptic Interfaces to Virtual Environments and Teleoperator Systems, 1994, Chicago, IL.
- (8) B. Karun and A. Shimoga: "Survey of Perceptual Feed-back Issue in Dexterous Telemanipulation": Part I. Finger Force Feedback Proc. of Virtual Reality Annual International Symposium VRAIS, p. 263 (1993)
- (9) 吉川・横小路, 他: 「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 (1993)
- (10) M. Buss, and H. Hashimoto: "Information and Power Flow During Skill Acquisition for the Intelligent Assisting System"—IAS, Proceedings of the International Workshop on Intelligent Robots and Systems IROS'93, pp. 321-326.
- (11) H. Hashimoto, M. Buss, Y. Kunii, and F. Harashima: "Intelligent Cooperative Manipulation System Using Dynamic Force Simulator", Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2598-2603.
- (12) Y. Kunii, H. Hashimoto: "Dynamic Force Simulator for Multi-Finger Force Display", IEEE Transactions on Industrial Electronics, **43**, 1, 74 (1996)
- (13) J. K. Salisbury, and J. J. Craig: "1982. Articulated Hands": Force Control and Kinematic Issues. International Journal of Robotics Research, **1**, 1, 4, Spring (1982)
- (14) M. T. Mason, J. K. Salisbury: "1985. Robot Hands and the Mechanics of Manipulation", MIT Press, Cambridge, Massachusetts (1985)
- (15) J. Kerr, and B. Roth: "1986. Analysis of Multifingered Hands. International Journal of Robotics Research, **4**, 4, 3, Winter (1986)
- (16) 金子, 他: 「ワイヤ駆動ロボットのための張力作動形トルクセンサ」, 1990 年, 第 2 回ロボットセンサシンポジウム, No. 2103.

國 井 康 晴

(非会員) 1969 年 1 月 7 日生。1992 年 3 月中央大学理工学部電気工学科卒業, 1994 年 3 月中央大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程前期課程修了。1994 年 4 月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程に入学, 現在に至る。マニピュレータの障害物回避, 仮想現実感シミュレータ, 主に力覚フィードバックの研究に従事。

橋 本 秀 紀

(会員) 1957 年 8 月 15 日生。1981 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業, 1987 年 3 月同大学大学院工学系研究科電気工学専攻課程博士課程修了, 工学博士。同年 4 月同大学講師, 生産技術研究所勤務, 1990 年 7 月助教授, 現在に至る。1989-90 年 MIT 客員研究員 (LIDS, LEES)。知的制御システムおよび制御工学, ロボティクスの研究に従事。