

ダイナミック・フォース・シミュレータを用いた マイクロ環境におけるヒューマンインターフェース

Human Interface for Micro Environment with Dynamic Force Simulator

國井康晴*・橋本秀紀*

Yasuharu KUNII and Hideki HASHIMOTO

1. はじめに

ここ数年、**仮想現実感** (Virtual Reality) に関する研究が盛んに研究されている。また、宇宙、原子炉、深海など、人間の作業領域の拡大にともない、ロボット工学の分野においてテレロボット、トレイグジスタンスと呼ばれる概念が登場している。トレイグジスタンス技術により人間は、危険な環境、直接作業不可能な環境において、あたかも自分がそこに存在するような感覚で作業できる。実際の作業は、マニピュレータなどが行う。このテレロボットにおける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。現在、主に宇宙、原子炉などの極限環境をターゲットに、遠隔地に存在するロボットの遠隔操縦を中心に研究が進められている。

一方、近年、微細加工技術の発達にともない、機械部品の集積化や各種センサの小型化が可能となり、**マイクロ・ロボットの開発の可能性がでてきた**。現在、マイクロ・マシン (ロボット) 技術は、初期段階にあるが、将来的に大きな可能性を秘めている。その一つとして、マイクロ環境におけるテレロボットがある。しかし、マイクロ・ロボットに対して多くのセンサを搭載することは技術的に困難であり、センサの軽減が望まれる。一つの解決方法として、本研究では、マイクロ環境自体をシミュレートし、人間に提示することを行う。本報告は、マイクロ環境のシミュレーションを行い、人間に対して力覚フィードバックを行う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 (DFS)**」を提案し、力覚フィードバックのための仮想世界のモデル化の手法を示す。

2. マイクロ・トレイグジスタンス

現在、マイクロ・ロボットに関する研究は、構想段階に

*東京大学生産技術研究所 第3部

ある。現時点では、各微小部品、アクチュエータの制作などの基礎技術の研究が盛んに行われている。各部品、アクチュエータは、VLSI などのプロセス技術によりシリコン基板上に制作されている。現在、静電アクチュエータ、圧電素子アクチュエータ、電磁アクチュエータ、超磁気歪素子アクチュエータ、高分子アクチュエータなどの開発が行われ、グリッパなどに適用されてきている¹⁾。また、簡単なリンク機構を持ったマニピュレータの試作も行われつつある²⁾。

マイクロ・ロボットは、幅広い分野で応用が期待されている。細胞操作・遺伝子操作、眼球や神経などの細かく危険な手術などバイオ・メディカル関係、微小な電気・機械部品の加工や組立、超微細加工技術などが考えられる。これらの多くは、自動化可能な単調作業ではなく、人間の介入が必要とされる。しかし、マイクロ環境において人間が直接作業を行うことは不可能である。また、細胞操作や眼球手術などの場合、医者などのオペレータが顕微鏡などを見ながらマイクロ・ロボットを直接操作することになる。しかし、顕微鏡などによりマイクロ環境を見た場合、空間的な隔たりが存在してしまい、作業の困難が予想される。したがって、人間に対して臨場感を与えるマイクロ環境に対するトレイグジスタンス・システムの構成が考えられる。さらに、力覚的な臨場感も必要とされる。しかし、マイクロ・ロボットに対して、通常環境のロボットと同様なセンサを搭載することは、必ずしも期待できない。これは、環境そのものをコンピュータ内部に取り込み、コンピュータによってシミュレートすることで不足するデータ補うことで解決される。また、人間に対し適正な力覚フィードバックも行える。さらに、シミュレーション結果を通常環境を模擬した CG によって操作者に提示することによってより、作業の効率の向上が期待される。このために、仮想現実感技術の応用が必要不可欠である。仮想現実感技術の応

研究速報
用により，人間はマイクロ環境に対して擬似的に存在することが可能になる。

3. 通常環境とマイクロ環境

人間がマイクロ環境で擬似的に作業を進めるために，マイクロ環境を仮想世界としてコンピュータ中にモデル化する．マクロとマイクロの2つの世界において，物体は違った挙動を示す．これは，2つの世界の相似則，すなわち，大きさの絶対値が極端に違うことに起因する．すなわち，大きさが小さくなることによって，質量，慣性の影響が減少し，剛性が減少する．その反面，通常の世界ではこれらに隠れていた電気力（帯電効果）および表面力などが強く影響してくる（表1）．したがって，マイクロ環境においては，通常の世界で硬い材質の物がわずかな力によって，大きくたわんだり，また，付着した物体を取り除くことが困難になる．また，電気力の影響により物体が飛び去るという現象が生じる．ゆえに，以上のことを考慮した仮想世界のモデルが必要となる．しかし，基本的に通常の世界とマイクロ環境における物理法則は，同一のものである．したがって，本研究では最初の段階として，通常環境を使用した仮想世界の構築を目指す．

表1 Contact Models

	通常	マイクロ
質量	大	小
剛性	大	小
慣性	大	小
電気力	小	大
表面力	小	大

4. Dynamic Force Simulator の実現

4.1 仮想世界のモデル化

現実の世界において人間⇄物体，物体⇄人間の2つの力の流れが存在する．本来この2つの流れは，同時に起こるものであるが，力の流れを分けて考える．指に生じた力は物体表面に伝わってゆく．物体表面上に加えられた力が物体に伝わるかどうかは，摩擦条件によって規定される．しかし，力の伝達は，その接触条件（状況）によっても多く左右される．たとえば，物体を爪の先で把持する場合と，指の腹で把持するのでは，明らかに腹の方が力を任意に伝えられる．現在，この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^{3),4)}．以上より，センサグローブの位置目標計算を行うブロック図（図1）が構成される．

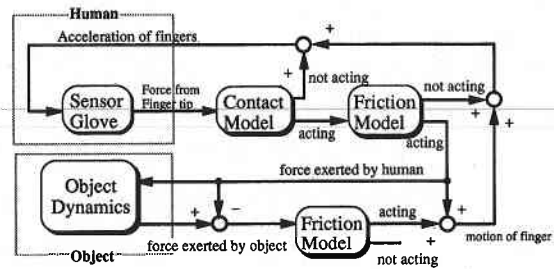


図1 Model of Virtual World

4.2 座標変換

指 i ($i=1 \dots n$: n は指の本数)の指先の座標系を 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．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，

$$T_i \xrightarrow{U_i} C_i \xrightarrow{V_i} B \tag{1}$$

$$T_{if} \xrightarrow{\Gamma_i} C_{if} \xrightarrow{\Lambda_i} B_{if} \tag{2}$$

4.3 コンタクトモデル

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，力の方向を表すものであり，力の大きさはスカラーによって表現される．単位レンチ w を用いて，コンタクトモデルを表したものを表2に示す．

ある接触点座標系 C_i ($i=1, \dots, n$) 上での接触力 ${}^C_i f$ は，単位レンチベクトル ${}^C_i w_j$ ($j=1 \dots m$: m は接触点の数)によって2つの力に分割される．一方は， ${}^C_i w_j$ によって表現できる力 ${}^C_i \hat{f}_j$ ，もう一方は ${}^C_i w_j$ で表現されない力 ${}^C_i \hat{f}$ である．

表2 Difference of Dynamics between Micro and Macro Environment

Contact Model With Friction	
Point Contact	Soft Finger
$w_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ $w_2 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ $w_3 = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)^T$	$w_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ $w_2 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^T$ $w_3 = (0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)^T$ $w_4 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)^T$

研究速報

$${}^C_i \mathbf{f} = {}^C_i \hat{\mathbf{f}} + \sum_{j=1}^k c_j {}^C_i \mathbf{w}_j = {}^C_i \hat{\mathbf{f}} + {}^C_i \tilde{\mathbf{f}} \quad (3)$$

ここで、 c_j は各単位レンテベクトル方向の力の大きさ。
次に、力 ${}^C_i \tilde{\mathbf{f}}$ は

$$\begin{aligned} {}^C_i \tilde{\mathbf{f}} &= [w_{11}, w_{12}, \dots, w_{im}] [c_{11}, c_{12}, \dots, c_{im}]^T \\ &= {}^C_i \mathbf{W}_i \mathbf{c}_i \end{aligned} \quad (4)$$

と表せる。

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

$$\begin{aligned} {}^B \tilde{\mathbf{f}} &= {}^B \tilde{\mathbf{f}}_1 + \dots + {}^B \tilde{\mathbf{f}}_n \\ &= [\Lambda_1 {}^C_1 \mathbf{W}_1, \dots, \Lambda_n {}^C_n \mathbf{W}_n] [c_1, \dots, c_n]^T \\ &= {}^B \mathbf{W} \mathbf{c} \end{aligned} \quad (5)$$

と表せる。

4.4 摩擦モデル

図 2⁶⁾ に示すように、静止摩擦条件は、静止摩擦円錐で表され、

$$\sqrt{c_{ix}^2 + c_{iy}^2} < \mu_s c_{iz} \quad \mu_s: \text{静止摩擦係数} \quad (6)$$

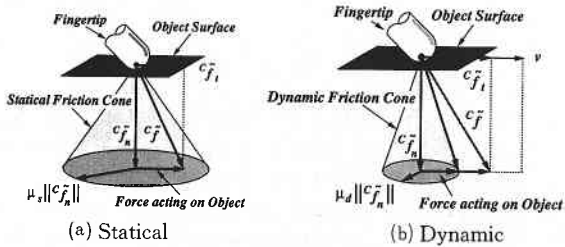


図 2 Friction Cone

動摩擦力に関する動摩擦円錐と力の関係を図 4.4⁶⁾ に示す。人間の指と物体との間に相対速度 v_i が存在する場合、動摩擦力は、

$$f_{df} = \mu_d \frac{\|c_{fn}\| v_i}{\|v_i\|} \quad \mu_d: \text{動摩擦係数} \quad (7)$$

4.5 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。

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、

$${}^B \mathbf{f}_{ext} = \begin{bmatrix} \hat{m} & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} - {}^B \tilde{\mathbf{f}} \quad (8)$$

ただし、

$${}^B \mathbf{f}_{ext} = \begin{bmatrix} \hat{m} & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B \mathbf{g} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} w \times \hat{m} v \\ w \times H w \end{bmatrix} \quad (9)$$

ただし、 $\hat{m} = \text{diag}(m, m, m) \in R^{3 \times 3}$ 、 m は物体の質量、 ${}^B \mathbf{g} \in R^3$ は重力加速度ベクトル、 $H \in R^{3 \times 3}$ は慣性テンソルとする。この ${}^B \mathbf{f}_{ext}$ が物体が人間に加える力である。

4.6 センサグローブを用いた仮想世界の提示

以上より図 1 のブロック図を書き直すと図 3 に示すようになる。このブロック図は、主に人間 (センサグローブ) 部、物体ダイナミクス部、座標変換計算部の 3 つの部分から構成される。センサグローブ (人間) から、指の関

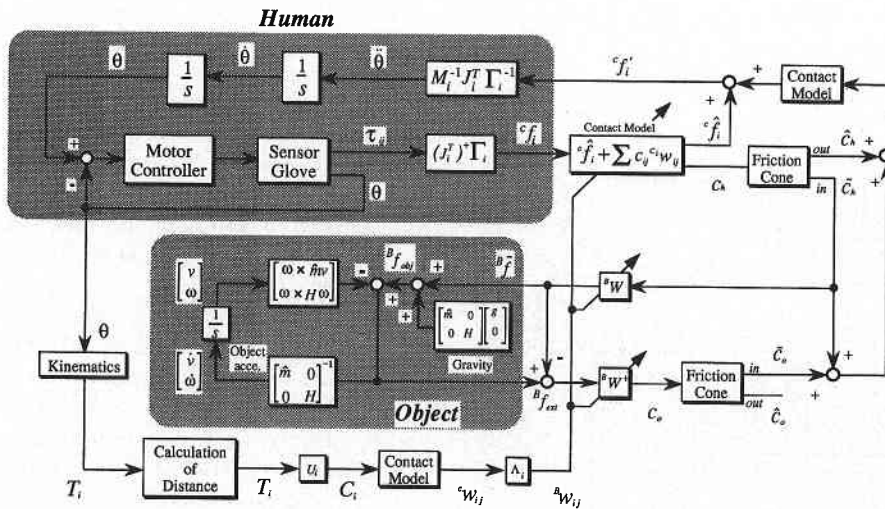


図 3 Force flow of Dynamic Force Simulator

研究速報

節角度 θ , トルク τ が計測される. τ は, ヤコビアン J_i と座標変換 T_i によって各接点座標系での力 Cf に変換される. この力はコンタクトモデルと摩擦モデルによって物体に伝達される力とされない力に分割される. 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. 伝達された力は, ${}^B W$ 行列を使用して物体重心座標系に写像される (${}^B \tilde{f}$). この時, 物体内部でつり合う力 (内力) は, ${}^B W$ 行列の零化空間に入るのでカットされる. 物体は, 力 ${}^B \tilde{f}$ と重力を受けて運動する. 物体ダイナミクス部において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. ${}^B f_{ext}$ は, 物体の運動から人間の加えた力を引いたものである. これは, 物体からの力に対して摩擦を考慮するためであり, 人間からの内力情報を保存するためである. 内力情報の使用によって物体の変形が考慮できる. さらに, ${}^B f_{ext}$ に対し, ${}^B W$ 行列の疑似逆行列を作用させることにより物体からの力 ${}^B f_{ext}$ を接触力空間において各接点に対して分配する. 分配された力は, 摩擦モデルが考慮された後, 再び人間からの力 \tilde{e}_n を加える. この力とコンタクトモデル, 摩擦モデルにおいて物体に伝達されなかった力の合力を用いてセンサグローブへの位置指令値を生成する.

5. DFS実験システムの構成

実験システムを, 図4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⁷⁾. したがって, 計算負荷軽減のためシステムを3つに分割する.

1. 計測・制御 (トランスピュータ: T-800)
2. キャリブレーション (HP Apollo 710)
3. ダイナミクス計算・グラフィックス (HP Apollo 735)

今回, 計測・制御用に研究室にて設計・開発されたトランスピュータを2つ使用したシステムの製作した. 1台は, 計測・制御用に, もう1つがワークステーションとの通信

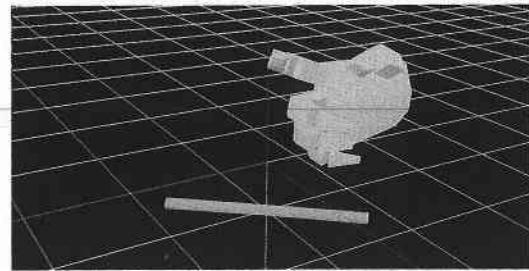


写真1 Virtual World

用である. これにより制御ループは, 約 1 [ms] で実現することが可能である. 写真1にDFSの仮想世界を示す. センサグローブは, 11自由度を有しその内手首の回転を省く10自由度に対して力覚フィードバックが可能となっている. 各関節角度, 関節トルクが計測可能である.

6. ま と め

本論文では, 物理法則を持った仮想世界の実現を目指し, 人間がリアルタイムアクセス可能な仮想世界生成の一手法を提案した. 今後, 力覚フィードバック実験を行い, 本モデルの検証を行う. さらに, 仮想環境を, 電気力, 表面力等を考慮したマイクロ環境に拡張していく.

(1994年4月7日受理)

参 考 文 献

- 1) Chang-Jin Kim, Albert P.P, Silicon-Processed Overhanging Microgripper, Journal of Micro Electro Mechanical Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 31-36, 1992.
- 2) F. Behi, M. Mehregany and K.J. Gabriel, A Microfabricated Three-Degree-Of-Freedom Parallel Mechanism, Proc. of the 3rd IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 159-166, Napa Valley, CA, 1990.
- 3) Salisbury, J.K. and Craig, J.J., 1982. Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues, Int. Journal of Robotics Research, Vol. 1, No. 1, pp. 4-17, 1982
- 4) Mason, M.T., Salisbury, J.K., 1985. Robot Hands and the Mechanics of Manipulation. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1985.
- 5) Kerr, J. and Roth, B., 1986. Analysis of Multifingered Hands, Int. Journal of Robotics Research, Vol. 4, No. 4, pp. 3-17, 1986
- 6) 吉川他, “表面摩擦及び動特性を考慮した可動部を有する仮想物体の操作感提示” 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 817-820, 1993.
- 7) Karun B. Shimoga. A Survey of Perceptual Feedback Issue in Dexterous Telemanipulation: Part I. Finger Force Feedback Proc. of Virtual Reality Annual International Symposium VRAIS, pp. 263-270, 1993.

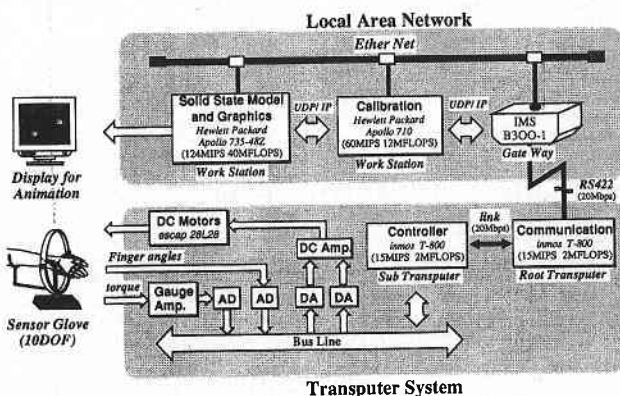


図4 Experimental System of DFS