力覚提示機能を有する WWW 上に構築された 仮想環境操作システム

市 毛 由希子^{*1} 比留川 博 久^{*2} 高 瀬 國 克^{*3}

A Virtual-Model Manipulation System using a Force-Feedback Six-Degrees-of-Freedom Manipulator—on the WWW

Yukiko Ichige^{*1}, Hirohisa Hirukawa^{*2} and Kunikatsu Takase^{*3}

A virtual model-manipulation system—aimed at off-line teleoperation teaching—has been developed on the World Wide Web. To give a feeling to the virtual model manipulation, the system is equipped with a force-display function as well as a virtual display. To realize this feeling, a high-speed contact-motion simulator enables the computation of constrained motion in the virtual environment. In addition, a firm force reaction is produced by using a six-degrees-of-freedom position-controlled manipulator with force feedback as a master arm. This manipulation system is intended to be used by anybody, anywhere, at any time freely. It uses standard modules (such as Web browsers for GUIs, VRML for graphics, and Java applet) and a position-controlled manipulator for model handling. Consequently, the developed system can be utilized anytime from anywhere equipped with the master arm. A prototype system was developed and virtual model manipulation was carried out successfully in two environment: a simple block world and a complex room environment. The manipulation system was experimentally tested, and it was shown that the new system can effectively manipulate a virtual model.

Key Words: WWW, Networked Robotics, Force Feedback, Virtual Reality

1. は じ め に

ロボットの遠隔操作システムの研究が急速に進められているなか、公衆回線を用いることで特別な配線を必要としないシステムの開発がなされている。さらに、いつでもどこでも誰でも操作できるという利点から、Web ブラウザ上に遠隔操作システムを構築することが提案されている [1] [2]。

Web ブラウザを GUI として用いたロボットシステムの先駆的な研究として、USC の Mercury Project [3] があげられ、移動ロボットの操作を行う研究 [4]~[6] や、マニピュレータに絵を描かせる研究 [7] 等も行われている。これらロボットシステムでは、オペレータはインターネットを通じてロボットを遠隔操作し、GUI は HTML をベースに構築されている。これらの研究ではいずれもオンラインで遠隔操作する方法がとられており、時間遅れの影響を免れることができず、操作性の向上を図るう

えで根本的な制約が科せられている。

一方、ロボットの遠隔操作システムの一つの方式に、オフライン遠隔操作システムがある。このシステムでは、まずロボットが作業を行う実環境を模擬し、計算機中にこの仮想環境を構築する。次にオペレータは仮想環境中のモデルを操作し、ロボットが行う操作シーケンスを獲得する。最後に操作シーケンスを遠隔の実ロボット転送し実行させるシステムである。これは時間遅れの問題を解決することができる有効な方法である。しかし仮想環境中での操作シーケンスの獲得法と、それを実ロボットシステムへ転送し実行させる方法はともにまだ確立されていない。

以上を背景とし、本研究では Web ブラウザを GUI として用いた、オフライン遠隔操作システムを取り扱う。その中で、仮想環境操作システムに焦点を絞って、Web ブラウザを GUI として用い、臨場感豊かに仮想環境を操作するための方法について論じる。

人間が手や足で物体を扱うときは、視覚だけでなく力覚も大きな役割を果たす。仮想環境を操作する場合も同様であり、臨場感あふれる良好な操作性を得るには、視覚と力覚に訴える情報提示が重要である。具体的には、マウスとグラフィック表示を用いた視覚中心の操作では十分でなく、仮想環境中の物体に生じる物理的な干渉状態を模擬し、その際の力感覚を運動指示

原稿受付 2002 年 4 月 15 日

^{*1}(株) 日立製作所 パーソナルヘルスケアベンチャーカンパニー

^{*2}産業技術総合研究所

^{*3}電気通信大学大学院

^{*1}Personal Healthcare Venture Company, Hitachi Ltd

^{*2}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

^{*3}The University of Electro-Communications

デバイスを介してオペレータに提示することが必要である。このような力感覚の提示は、一方的に位置を入力する従来タイプの仮想環境操作方法との対比から力覚提示と呼ばれ、各方面で研究が行われている。

福井らおよび木野らは、オペレータが与えた力ベクトルを、変位ベクトルに変換して運動指示デバイスに返すことで物体を操作し、干渉時に接触面の接線方向成分のみを返すことで、仮想物体上の衝突と表面なぞり動作を実現する方法を提案した[8][9]。木南らは、マスターアームの機械的な摩擦を利用することで接触状態を提示する手法に拘束力を導入した方式を提案している[10]。吉川らは“インピーダンス提示”という概念を提示し、仮想物体の表面摩擦を考慮した力覚提示方式を行っており[11]、さらに並列バネ駆動方式を用いて、物体の弾性係数を向上させる方式も提案している[12]。坂口らは、入出力デバイスとしてサーボモータ等を利用せず、電場によって見掛け上の粘性が変化する流体を用いたアクチュエータを利用し、力覚提示システムを開発している[13]。

本研究では、福井らおよび木野らの方法を一般化し、仮想環境の操作における汎用的な力覚提示の方法を与える。仮想環境は、標準的な幾何モデル記述用ファイルフォーマットで構築する。そして本方式に基づき視覚提示と力覚提示を可能とする、Web ブラウザを GUI として用いた仮想環境操作システムを開発する。

本論文では、2 章で仮想環境における力覚提示方式について述べ、3 章では仮想環境における物体の拘束運動の導出について述べる。4 章ではシステム構成、5 章では実現したシステムでの実験例を示し、最後にまとめを述べる。

2. 仮想環境における力覚提示

仮想環境中の物体を操作するとき、従来はマウスなどの入力デバイスを用いグラフィクスで確認しながら、物体の位置を変化させた。この方法によると、物体は任意の場所に位置決めできるが、反面、物体がほかの物体の中にめり込むといった不都合が生じる。一方、オフライン遠隔操作システムでは、物体を机に置いたり物体同士を組み合わせたといった拘束状態の制御が不可欠である。そこでここでは、物体が机にぶつかれば反力を受け、机の面に拘束されるという力学的プロセスを模擬し、よりリアルに仮想環境を操作できる方法を検討する。

力覚提示方式には大きく分けて二つの方法がある。一つはトルク制御型のマスターデバイス（アーム等）を用い、オペレータが変位を入力し、それに対し力をオペレータに対して出力する方法で、ここでは位置主導型力覚提示方式と呼ぶ。もう一つは位置制御型のマスターデバイスを用い、オペレータが加える力を計測（入力）し、それに対し位置を変化させる方法で、ここでは力主導型力覚提示方式と呼ぶ。本研究ではシャープな（堅い）拘束感が得られ、拘束計算によるむだ時間に対する許容度が比較的大きな力主導型の方法を採用する。さらにこの方法は、標準的な位置制御型マスターデバイスを用いることができる利点がある。

本研究では、汎用的なシステムの構築を目指す。そこで、仮想環境は任意の数と形状の多面体から成るものとし、Web ブラウ

Fig. 1 Image of a force-feedback system with GUI on WWW

ザ上で仮想三次元空間を構築するためのファイルフォーマットである VRML (Virtual Reality Modeling Language) によって構築されたモデルを対象とする。作成されたモデルは、仮想環境のグラフィック表示に用いられると同時に、力覚提示のためにも用いられる。力覚提示のために物体間の接触情報（接触位置や接触法線等）の検出、および接触拘束下での可動空間の導出が必要であるため、上記の幾何モデルを対象とするそれらの汎用アルゴリズムを作成しておく。

力覚提示のための操作・処理の流れは次のようになる (Fig. 1)。オペレータはマスターデバイスの先端に取り付けられたグリップを握り、グラフィックス表示された仮想環境を見ながら、物体に対して任意の方向（位置・姿勢 6 自由度）に力を加える。物体が自由空間にあるときは、その力の大きさに比例した速度で物体を移動させ、同時にマスターデバイスも同じ方向に移動させる。物体が環境と接触しているときは、力による動作指示ベクトルは可動成分と拘束成分に分解され、可動成分のみが実行される。これらが実時間で処理されるため、自由状態から物体が机にぶつかり、その後机の面をなぞるように進むといった操作を、あたかも実環境を操作するようにシームレスに行うことができる。

仮想環境中の力覚提示のための、物体間における接触情報の検出、接触拘束下での可動空間の導出を行うソフトウェアは、干渉判定ソフトウェアである RAPID (Robust and Accurate Polygon Interference Detection) [15] を一部改造し、拡張したものである。次章で、RAPID、干渉点情報検出方法、動作可能成分導出方法について述べる。

3. RAPID を利用した仮想物体同士の干渉と可動範囲の導出

RAPID は、UNC (Univ. of North Carolina) の D. Manocha らが開発した、ポリゴン同士の干渉状態を高速に判定するソフトウェアである。RAPID はポリゴンの集合を内包する直方体である Bounding Box を求めた後に、これを Tree で表現した階層構造にしておき、この Tree 構造を利用して干渉判別を行

う。RAPID は 10 万ものポリゴンから成るような複雑なポリゴン同士のすべての接触を、ロバストかつ高速に判定することができる。例えば、可動モデルが 2 万ポリゴン、環境モデルが 9 万 8,000 ポリゴンから構成されるとき、干渉判定にかかる時間は 6.9 [ms] 程度である (SGI RealityEngine 90 MHz R8000 CPU, 512 MB Memory)。また、RAPID は三角形分割されたポリゴンのみに適応しているため、RAPID にモデルを渡す前に三角形分割を行う必要がある。

3.1 三角形同士の干渉点情報検出

RAPID は、三角形分割したポリゴンを Tree 構造にし干渉を判定している。しかし、ポリゴンを構成する三角形の干渉する辺を特定していないため、物体間の接触情報 (干渉点座標や、干渉点における環境モデルの外向き法線ベクトル) を特定することができない。そこでここでは、干渉状態判定と同時に干渉する辺の情報を得るアルゴリズムを与える。モデルは事前に三角形分割されていることを前提とする。また、可動モデルと環境モデルの干渉点情報を検出することは、それぞれを構成する三角形同士の干渉問題に帰着させることができる。

3.2 多面体同士の干渉

次に多面体同士の干渉について述べる。例えば Fig. 2 のように、多面体 A、多面体 B が接触しているとき、多面体 B の面 $\triangle B_1$ には、多面体 A を構成する $\triangle A_1$, $\triangle A_2$, $\triangle A_3$ で共通する頂点 P_1 が接触している。 $\triangle A_1$ と $\triangle B_1$ の接触、 $\triangle A_2$ と $\triangle B_1$ の接触、 $\triangle A_3$ と $\triangle B_1$ の接触すべてにおいて、三次元空間における二つの三角形の干渉問題に置き換えることができる。したがって多面体の境界面を三角形分割させることで、三角形同士の干渉問題として多面体の干渉を判定することができる。

次にこれを基本として、三角形分割された多面体同士の干渉を判定する方法について述べる。ここでは、多面体の表面を構成する三角形間の微量の食い込みにより、多面体間の接触を表現する。

三角形の干渉状態には、点接触・線接触・面接触が考えられる。これをさらに場合分けすると以下ようになる。

- 点接触には、Fig. 3 (a) に示すような一方の頂点が他方の

面に接触している場合と、Fig. 3 (b) に示すような両方の稜が接触している場合がある。

- 線接触には、Fig. 3 (c)~(e) に示すような一方の平面に他方の稜が接触している場合がある。
- 面接触は、当該の三角形同士には干渉がなく、隣接する三角形に Fig. 3 (a)~(e) の干渉が生じる。

文献 [16] によると、多面体同士の接触による拘束動作は、代表的な接触点の位置と、接触点における環境モデルの外向き法線ベクトルから求められる。そこで次に、外向き法線ベクトルの求め方について述べる (Fig. 4)。ここで、可動モデルに含まれる三角形を $\triangle P$ 、 $\triangle P$ を構成する辺を e_i, e_{i+1}, e_{i+2} とし、 $\triangle P$ の外向き法線ベクトルを n とする。環境モデルに含まれる三角形を $\triangle Q$ 、 $\triangle Q$ を構成する辺を f_j, f_{j+1}, f_{j+2} とし、 $\triangle Q$ の外向き法線ベクトルを m とすると、環境モデルの向き法線ベクトルは以下になる。

- Fig. 4 (a) のように e_i, e_{i+1} が $\triangle Q$ に干渉しているときはベクトル m 。
- Fig. 4 (b) のように f_j, f_{j+1} が $\triangle P$ に干渉しているときはベクトル n の逆ベクトル。
- e_i と f_j が相互に相手の三角形に干渉し、 $e_i \times f_j$ と e_{i+1} のなす角が $-\frac{\pi}{2}$ から $\frac{\pi}{2}$ ($(e_i \times f_j) \cdot (p_{i+2} - p_{i+1}) > 0$) のときはこのベクトル $e_i \times f_j$ (Fig. 4 (c))、そうでないならこの逆ベクトル (Fig. 4 (d))。

次に Fig. 3 に示す三角形同士の接触時に、接触点における外

Fig. 2 Collision between polyhedron A and polyhedron B

Fig. 3 Collision types between two triangles

Fig. 4 A normal vector from the outside of a polyhedron

向き法線ベクトルの求め方を示す。

- Fig. 3 (a) の場合は, Fig. 4 (a) もしくは Fig. 4 (b) に相当する。この頂点を構成する他の三角形の組み合わせでも, 同じ接触点の位置と外向き法線ベクトルが得られるが, それらは一つだけ使用すればよい。
- Fig. 3 (b) の場合は, Fig. 4 (c) もしくは Fig. 4 (d) に相当する。これら二つの稜はそれぞれ二つの三角形から構成され, 4 種類の組み合わせをチェックすることになるが, すべてから同じ接触点の位置と法線ベクトルが得られる。
- Fig. 3 (c) の場合は, 干渉する二つの頂点それぞれにおいてそれぞれ接触点の位置と法線ベクトルを得る。二つの頂点とも Fig. 4 (a) または Fig. 4 (b) で対応できる。
- Fig. 3 (d) の場合は, 一つの頂点と一組の稜の交差点で接触点の位置と法線ベクトルを得るため, Fig. 4 (a), (b) どちらかと, Fig. 4 (c), (d) どちらかの組み合わせで対応できる。
- Fig. 3 (e) の場合は, 二組の稜の交差点で接触点の位置と法線ベクトルを得るため, Fig. 4 (c) もしくは Fig. 4 (d) で対応できる。

3.3 不安定な接触

多面体間の頂点同士や, 頂点・凸稜間の接触は極めて不安定であり扱いにくい。そこで本稿では, 仮想環境を操作する際, 頂点同士や頂点・凸稜間の距離が一定値 ε 以下となる動作指示は無視する方法をとる。 ε を小さくすればそれが起こる確率は低く, 仮に起きたとしても, 微少な迂回をすることにより不安定接触を回避する結果となるだけで実際上問題はない。ここで食い込み量を ε に対して十分小さくすれば, あらゆる領域で 3.2 節に述べた方法を用いることができる。

部品の最終組み立てなどで生じる頂点同士の接触などの問題は, 頂点や稜の面取りを行うことで回避することができる。

3.4 仮想物体の可動方向成分導出

仮想環境の可動モデルと環境モデルの干渉時における, 可動モデルの動作可能成分を得るために, 速度に関する拘束条件式 (拘束不等式) を求める。可動モデルの基準点速度を作業空間に固定した絶対座標系において, 並進速度 $\dot{X}$, 角速度 ω として表す。一点接触の際の拘束条件式は, 基準点から接触点への距離ベクトルを $(x, y, z)^T$, 接触点における法線ベクトルを $n = (n_x, n_y, n_z)^T$ とすると,

$$n^T \cdot (\dot{X} + \omega \times (x \ y \ z)^T) \geq 0 \quad (1)$$

であり, これを整理すると,

$$\begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & (-n_y z + n_z y) & (n_x z - n_z x) & (-n_x y + n_y x) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \omega \end{bmatrix} \geq 0 \quad (2)$$

と表される。一般に接触点が n 個ある場合の拘束条件式は式 (2) をならべた連立不等式となり,

$$C \begin{pmatrix} \dot{X} \\ \omega \end{pmatrix} \geq 0 \quad (3)$$

という速度についての連立線形不等式で表される。 $C: n \times 6$ は係数行列で, n は等価な拘束点 (接触点) の数である。この係数行列は干渉点での外向き法線ベクトルと, 接触点座標値とでつくられる。

この不等式の解は, 凸多面錐になることが知られている。等号を成立させる解はすべての接触状態を維持する速度であり, 不等号を成立させる解は, いずれかの接触点を離脱させる速度に対応する [16]。可動モデルの動作可能成分は, モデルの速度をこの凸多面錐に正射影することにより, 求めることができる。

4. 仮想環境操作システム

ロボットを遠隔操作するための仮想環境操作システムを構築し実験を行った。

4.1 システム構成

システムは以下のように構成される。

- (1) 仮想環境が格納されている PC。
- (2) 仮想環境の表示・操作を行う GUI の構築と, 可動モデルと環境モデル同士の干渉チェックシミュレーションを行う PC/WindowsNT4.0 (CPU: Pentium 128 Mhz, Memory: 96 Mb)。
- (3) マスターアームの制御を担当するボードコンピュータ 68040/VxWorks。

仮想環境が格納されているコンピュータには Web サーバが起動されており, Web ブラウザからアクセスしてオペレーション用の PC にダウンロードすることで GUI が構築される。GUI の構成は以下のようになっている。

- (1) 仮想環境グラフィックス表示のための VRML プラグイン (SGI 社製 CosmoPlayer2.0)。

Fig. 5 Construction of system

Fig. 6 Diagram of system functions

- (2) 仮想環境中のモデルの操作, マスターアームとの通信を行う Java (サン・マイクロシステムズ・インコーポレーテッド商標登録) アプレット.

- (3) 干渉チェックを行うモジュール.

Java アプレットから仮想環境中のモデルを動かすためには, VRML 世界を操作するための Java のライブラリである EAI (External Authoring Interface) を使用し, Java アプレットから干渉チェックモジュールを動作させるためには, Java 言語から他のプログラミング言語のモジュールを呼び出す機能である JNI (Java Native Interface) を使用した. また, Java アプレットは自分自身のダウンロード元以外との HTTP による通信を禁止する仕様のため, ProxyServer を経由してマスターアームとの通信を行う. 本実験では, 仮想環境が格納される PC と, ユーザインタフェースを構築する PC は同一の PC とした.

マスターアームの手先には 6 軸力覚センサ (Jr3 社製) が取り付けられており, さらにその先にユーザが操作するハンドルが取り付けられている (Fig. 5).

ボードコンピュータである 68040/VxWorks は, 力覚センサから読み取った値に比例した値を, モデルの指示動作ベクトルとしてシミュレータに渡す. そして, 干渉チェック後に得られた値をマスターアームの手先の速度として受け取り, メモリにその値を書き込んでマスターアームを動作させる.

4.2 処理の流れ

本システムにおけるユーザの動作に伴う, システム処理の流れの概略を機能線図 Fig. 6 を使って説明する. 初めに, WWW ブラウザ上に提示した仮想環境中にある任意のモデルをマウスで選択し, その情報をシミュレータに送る. 次に, シミュレータ中の RAPID はモデルが記述されている VRML ファイルの構文解析を行い, 可動モデル, 環境モデル共に, 先に述べた Tree 構築を行う. この準備の後, マスターアームのハンドルに加えた力に比例する指示動作ベクトルが干渉検出モジュールに送られ (力入力), 可動モデルと環境モデルが接触していない場合は, 指示動作ベクトルがそのまま可動ベクトルとして出力される. それらが接触している場合は, 3 章に述べた方法で動作可能成分が導出され, それが可動ベクトルとして出力される (動作出力). また同時に仮想環境中の可動モデルの位置変更が可動

Fig. 7 Example of a basic experiment

ベクトルを用いて行われ, 環境モデルが更新される (モデル更新). このように力入力, 動作出力, モデル更新のサイクルが繰り返されることで, 干渉検出を行いながら仮想環境中の物体を操作できる.

5. 実 験

基礎実験として仮想角柱と仮想床で構成される環境での実験例を示す (Fig. 7).

角柱が床に接触する際には, しっかりとした力感覚を得られ, 表面を滑らかに滑ることも可能である. オペレータがハンドルに力を加えてから拘束計算を行い, ロボットアームの手先を動かすまでの一連のループにかかる時間を Fig. 8 に示す. 実行時間は括弧無しが基礎実験, 括弧付きが後に述べる応用実験のデータである.

基礎実験時に, 可動モデルの角柱を床に押し付けてから環境モデルの床にそって動かした際の, 仮想環境グラフィクス表示部を Fig. 9 に示す. 可動モデルの箱が画面右上から環境モデルの床に押し付けられ, 床上を滑って行く様子である.

Fig. 8 Execution time

Fig. 9 Collision test on a WWW browser

Fig. 10 The virtual room used in the experiment

次に応用実験例を示す。このシステムの応用として、例えば家の中で働くロボットなどが考えられることから、この例を想定した仮想環境における実験例を Fig. 10 示す。

この仮想環境には部屋の床や壁、机、椅子、本棚、数冊の雑誌、ステレオ機器などのモデルが存在し、これらのモデルの中

で、椅子、本、雑誌、ステレオ機器は可動モデルとした。オペレータはマウスのクリック動作で選択し、可動モデルを動かすことができる。

この実験での実行時間を Fig. 8 の括弧内に示す。応用実験例では、実行時間に 140 [ms] 程度かかる。力を加えるタイミングに対してモデルとアームの動作の反応が遅く、快適な操作性が得られるとは言い難いが、干渉した感覚はシャープに得られる。実行時間の大部分は画面の描画処理 (77.56 [ms]) と通信時間 (48.24 [ms]) であり、干渉判定にかかる時間は 0.40 [ms] と基礎実験と変わらない。これはポリゴン数が増えても、干渉に関係する可動モデルと環境モデルの接触計算のみを行い、干渉していない環境モデル間との接触計算は行わないためである。したがって本実験以降の計算機性能の向上を考えると、この問題はすぐ解消されることが予想できる。

6. お わ り に

本研究では、ロボットのオフライン遠隔操作教示システムへの応用を想定し、視覚に加え力覚提示を可能にすることで優れた操作性をもたらす仮想環境操作システムを構築した。このシステムは標準的のヒューマンインターフェース、標準通信プロトコル、ネットワーク可搬言語を用いている。また、マスタデバイスとして標準的位置制御型ロボットアームを使用し、仮想環境中の可動モデルの拘束運動をダイレクトにロボット (マスター) アームに返すシステムを構築、実験を行った。

実験によって、本研究で提案した拘束運動を導出するアルゴリズムを組み込んだ全体システムが、適切に機能することが確認できた。

今後の課題としては、ロボットアーム以外の入出力デバイスの適用 [17]、実環境に存在するロボットの操作等が考えられる。

また、現在 CORBA を通信に、JAVA を開発プログラミング言語に用いた、分散オブジェクトシステムの開発が急速に進んでいる。今回のようなシステム構成から CORBA を用いた分散オブジェクトにすることで、さらにネットワークに分散したロボットの遠隔操作システムを容易に構築できる。

参 考 文 献

- [1] 比留川, 他: “ワールドワイドロボティクスの提案—その 1: VRML を用いたオフライン遠隔操作システム”, 第 2 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.108-113, 1996.
- [2] 原, 比留川, 他: “ワールドワイドロボティクスの提案—その 2: WWW ブラウザを用いた遠隔操作環境の構築”, 第 2 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.114-119, 1996.
- [3] The Telegarden: <http://www.usc.edu/dept/garden/>
- [4] R. Siegwart, C. Wannaz, P. Garcia and R. Blank: “Guiding Mobile Robots through the Web,” Workshop Proceeding of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent and Systems (IROS), pp.1-6, 1998.
- [5] P. Saucy and F. Mondada: “KhepOnTheWeb: One Year of Access to a Mobile Robot on the Internet,” Workshop Proceeding of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent and Systems (IROS), pp.23-29, 1998.
- [6] R. Simmons: “Xavier: An Autonomous Mobile Robot on the Web,” Workshop Proceeding of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent and Systems (IROS), pp.43-47, 1998.

- [7] M. Stein: "Painting on the World Wide Web: The PumaPaint Project," Workshop Proceeding of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent and Systems (IROS), pp.37-42, 1998.
- [8] 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", 電子情報通信学会論文誌, D-II, vol.J74-D, no.8, pp.1052-1059, 1991.
- [9] 木野, 雨海, 高瀬: "力主導型マスターアームを用いた力呈示による仮想物体操作", 電気学会研究会資料, SC-97-30, pp.73-79, 1997.
- [10] 木南, 尹, 妻木, 内山: "6 自由度型小型ハプティックデバイスの評価と仮想剛体間の接触実験", 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.415-416, 1999.
- [11] 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, vol.11, no.8, pp.1236-1243, 1993.
- [12] 吉川, 川井: "並列バネ駆動による仮想物体表面の弾性係数向上について", 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.397-398, 1999.
- [13] 坂口, 福住, 古荘: "ER ブレーキを用いたパッシブ型力覚提示システムに関する基礎研究", 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.393-394, 1999.
- [14] 神徳, 高宗, 他: "コンフィギュレーション空間を利用した仮想空間における拘束力計算法", 計測自動制御学会論文集, vol.33, no.10, pp.1026-1034, 1997.
- [15] <http://www.cs.unc.edu/geom/OBB/OBBT.html>
- [16] 比留川: "組立作業過程における拘束の表現と解析", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.2, pp.192-200, 1993.
- [17] 上田, 高瀬, 比留川: "3 自由度フォースフィードバック・マウスの試作", 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol.3, pp.827-828, 1999.

市毛由希子 (Yukiko Ichige)

1974 年 9 月 3 日生. 1999 年電気通信大学大学院情報システム学研究科博士前期課程修了. 同年 (株) 日立製作所機械研究所に入社. 医療福祉ロボットの研究に従事. (日本ロボット学会正会員)

比留川博久 (Hirohisa Hirukawa)

1959 年 1 月 15 日生. 1987 年神戸大学大学院自然科学研究科システム科学専攻博士課程修了. 同年電子技術総合研究所 (現: 産業技術総合研究所) 入所. 現在, 産業技術研究所知能システム研究部門ヒューマノイド研究グループ. 知能ロボットの研究に従事. 学術博士. (日本ロボット学会正会員)

高瀬國克 (Kunikatsu Takase)

1944 年 3 月 26 日生. 1970 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了. 同年電気試験所 (現: 産業技術総合研究所) 入所. 1994 年より電気通信大学大学院情報システム学研究科教授. 工学博士. (日本ロボット学会正会員)