多指多関節ハンドロボットのハンド可操作性に基づく バーチャル教示

川崎 晴久^{*1} 毛利 哲也^{*2} 阿部 竜久^{*1} 伊藤 聡^{*1}

Virtual Teaching Based on Hand Manipulability for Multi-Fingered Robots

Haruhisa Kawasaki^{*1}, Tetsuya Mouri^{*2}, Tatsuhisa Abe^{*1} and Satoshi Ito^{*1}

This paper presents a virtual teaching method for multi-fingered robots based on hand manipulability, in which a position and orientation of the robot hand is determined so as to maximize a manipulability of the robot hand on the condition that the robot grasps the object at taught contact points of the object. In order to get the finger joint angles in movable range, a penalty function is added to the manipulability measure. This approach does not require the accurate human hand model. The simulation results of a pick-and-place task are shown.

Key Words: Virtual Teaching, Manipulability, Virtual Reality, Robot Teaching, Multi-fingered Robot Hand

1. はじめに

ロボットの教示の従来法は、ロボットプログラミング、教示ツールを用いたダイレクトティーチングプレイバック [1] が主であるが、同時に多点の運動と力の教示が必要な多指多関節ロボットにはこれらの教示法の適用が困難である。近年、自動プログラミングに向け人間動作を視覚等によりモニターしその運動をダイレクトに教示する Teaching by showing [2], Assembly plan from observation [3] の手法が提案されている。人間の動作の観察からタスクプログラミングを自動的に行う手法は、操作者が運動軌跡など詳細なタスクの要求を陽に記述する必要がないので、同時に多点の教示が求められる多指多関節ロボットには有効である。

これまで、バーチャルリアリティ (VR) 環境でデータグローブを用いてロボット教示する試みは Takahashi ら [4] によりなされている。しかし、フォースフィードバックディスプレイを用い、仮想対象物を操作するときに操作者の指先に生じる仮想反力と操作者のハンドの運動から、直接的に遠隔操作する研究 [5] [6] は多いが、人間の動作意図を解析して多指多関節ハンドロボットの教示データを生成する研究 [7] は少なく、その技術は確立されていない。

筆者らの研究グループは、多指多関節ハンドを持つロボットを対象に、仮想空間での指先に作用する接触力を利用したバーチャ

ルロボット教示のコンセプトを提案した [8] [9]。ここで、バーチャルリアリティ環境で操作者に提示される仮想ハンドは、ロボットハンドモデルが良いか人間ハンドモデルが良いかの二つの選択肢 [10] がある。前者は、人間の手の動きをロボットハンドの運動領域に限定するので、操作者の動きをロボットの動きに直接的に変換できるが、ロボットの運動特性を操作者が理解する必要がある。一方、後者は、操作者にとって馴染みがあり扱いやすいが、人間ハンドはサイズや運動領域においてロボットハンドと異なるため、人間の運動の計測データを直接ロボットハンドで実行できないときがある。このため、教示データとなる運動をロボットハンドで実行できるように変換する必要がある。この変換の方法として、Rohling ら [11] は、人間とロボットの指先位置と姿勢の誤差が最小となる最適指先マッピング法を提案している。しかし、この方法は、正確な人間ハンドモデルを必要とし、指先位置は教示した位置とならない。

本稿では、バーチャルリアリティ環境で提示される多指多関節の仮想ハンドとして、教示における作業効率と把持の安定性において人間ハンドモデルがロボットハンドモデルより優れていることを実験的に示す。さらに、人間ハンドとロボットハンドの幾何学的差異を吸収するため、人間ハンドモデルで生成される運動からロボットハンドの運動へ変換するときに、ロボットハンドの可操作性を最大とするバーチャル教示法を提案し、シミュレーションと実験によりその有効性を示す。

2. バーチャルロボット教示

2.1 教示対象と問題設定

人間に代わってロボットに作業をさせる場合、人間と同じ構造をもったロボットを用いると都合のよいことが多い。例えば、

原稿受付 2002 年 2 月 20 日

^{*1}岐阜大学工学部

^{*2}岐阜大学バーチャルシステムラボラトリー

^{*1}Faculty of Engineering, Gifu University

^{*2}Virtual System Laboratory, Gifu University

Fig. 1 Robot with Gifu Hand II

作業に必要な工具類は、人間が利用するように設計されている。機構や大きさが同じロボットを用いると、これらの工具類がそのまま利用できる。人間の代わりを行えるような汎用性の高いロボットは、宇宙空間のような携帯できる物品が限定される条件で、その需要が高まると予想される。

このような考えのもと、我々は多自由度のロボットハンド“Gifu Hand II” [12] を開発した。これを Fig. 1 に示す。このロボットハンドは、市販の 6 自由度アーム ((株) デンソー製 VS6354B) に装着されている。Gifu Hand II は、人間の手に類似した構造であり、拇指は 4 関節 4 自由度、指は 4 関節 3 自由度、合計 20 関節 16 自由度のハンドである。アクチュエータはサーボモータであり、すべて指や掌に内蔵している。機構指先には、6 軸力覚センサ (ビー・エル・オートテック (株), NANO センサ) が取り付けられ、指腹部や掌には、624 点の分布型触覚センサ (ニッタ株, タクタイルセンサ, 特注シート) を装着できる。

多指多関節ハンドを持つロボットが宇宙のような遠隔地にある場合、その作業教示には軌道計画の煩雑さのほかに時間遅れなどの問題が生じる。これに対処するため、我々は、VR 環境を利用したロボット教示を提案し、これをバーチャルロボット教示と呼んでいる。そこでの着想は以下のようなものである。ロボットによる自律的な物体安定把持のための把持計画や物体操作計画は、著しい計算量を必要とし、さらに計画法も確立されていない。一方、人間は、経験をもとに物体把持における指の接触点や把持力を決めている。この情報を役立てることにより効率的なロボット教示が可能といえる。仮想空間での教示データを遠隔のロボットに一括して送信することにより通信の時間遅れによる制御系の不安定化の問題は回避される。

3 章以降での議論は、提案する教示システムを構築する上で生じる問題である。したがって、そのシステムの概要を述べることにする。

2.2 システムの構成

仮想環境でのロボット教示 [9] の概念図を Fig. 2 に示す。システムは、遠隔にあるロボットシステムと操作者を取り囲む VR ロボット教示システムに分かれる。操作者は仮想環境の中で、ハンドロボットの代わりに仮想対象物に対して作業を行う。仮想環境は、遠隔ロボットの視覚システムからの画像情報をもとに構築される。

操作者の手の位置・姿勢は三次元位置計測装置 (OPTOTRAK, Northern Digital Co.) で計測し、指の関節角度はデータグロー

Fig. 2 Conceptual figure of virtual robot teaching

Fig. 3 Force feedback glove

Fig. 4 Mechanical structure of force feedback glove

ブ (Cyber Glove, Virtual Technologies Co.) で計測し、前者を仮想ハンドの位置・姿勢とし、後者を仮想ハンドの指の関節角度とすることにより、操作者の手と仮想ハンドを連動させている。また、仮想対象物との接触により生じる仮想反力を、操作者のハンドに装着した多指多点力覚提示のフォースフィードバックグローブ [13] により操作者に提示する。Fig. 3 に試作したフォースフィードバックグローブの概観を示す。本グローブは市販のデータグローブにサーボモータ駆動のフォースフィードバック機構を搭載し、指先に装着した圧力センサ (イナバゴム (株) 製 感圧導電性エラストマーセンサ IESF-5-LT) の力信号を用いて PI 制御により仮想反力を人間の指に提示する。Fig. 4 にその機構構成を示す。モータは、操作者の手の甲に取り付けられ、ワイヤロープを介して指に力を提示する。各指の 1 箇所

た、指の2箇所には振動モータを配置しており、仮想物体と仮想ハンドの接触時のタイミングを振動モータの励振により操作者に提示している。

2.3 動作の解析とセグメント分割

操作者が物体把持や物体操作のタスクを実行するときの一連の運動データには、操作の意図が表れている。この意図を動作意図解析システムで解析する。人間の操作の意図は手の運動軌跡、指の運動軌跡、対象物体の把持位置、指先での仮想反力、および対象物体の運動軌跡を解析することで得られる[9]。人間は、経験をもとに物体把持における指の接触点や把持力を決めており、この情報を役立てることにより効率的なロボット教示が可能となる。動作意図解析システムでは、人間による一連の操作の解析を容易にするために、一連の動作を基本的動作に分割し、各基本的動作を基本動作コマンドとして表現する。

後述の実験のピックアンドプレースタスクは、次のような基本的動作のセグメントに分割できる。すなわち、対象物体や所定の位置に向かって手を移動する *move*、物体近傍での手の移動と物体形状に合わせて指を開閉する *approach*、物体を安定に把持する *grasp*、物体を安定把持したまま搬送する *translate*、所定の位置に物体を置く *place*、物体から手を放す *release* の六つのセグメントである。これらのセグメントは、物体座標でのハンドの速度 ${}^{object}\mathbf{v}_{hand}$ 、基準座標での物体の速度 ${}^{ref}\mathbf{v}_{object}$ 、ハンド座標での i 番目の指先の位置 ${}^{hand}\mathbf{p}_{i-th\,finger}$ と速度 ${}^{hand}\mathbf{v}_{i-th\,finger}$ および仮想反力 ${}^{hand}\mathbf{f}_{i-th\,finger}$ という五つのパラメータの変化から分割が可能である。ただし三次元運動を総合的に評価するためベクトルノルムで評価することを基本とし、複数の指の運動は各位置ベクトルノルムの総和、速度ベクトルノルムの総和および指先の力ベクトルノルムの総和の三つのパラメータ

$${}^{hand}\mathbf{P}_{finger} = \sum \|{}^{hand}\mathbf{p}_{i-th\,finger}\| \quad (1)$$

$${}^{hand}\mathbf{V}_{finger} = \sum \|{}^{hand}\mathbf{v}_{i-th\,finger}\| \quad (2)$$

$${}^{hand}\mathbf{F}_{finger} = \sum \|{}^{hand}\mathbf{f}_{i-th\,finger}\| \quad (3)$$

で評価する。ここで、 ${}^{hand}\mathbf{P}_{finger}$ は指の開きを示す指標で、指の開きが大きい程その値は大きくなる。 ${}^{hand}\mathbf{V}_{finger}$ は指の動きを示す指標、 ${}^{hand}\mathbf{F}_{finger}$ は把持力の大きさの指標である。

translate を例にセグメント分割を述べる。この動作では物体とハンドが一体となって移動するため物体座標でのハンドの速度はゼロであり、基準座標での物体の速度が大となる。また、把持状態が維持されるため、指の開きは一定の値で、指の動き（指先速度）はゼロ、把持力は大きな一定値となる。こうした条件を満たす区間を *translate* としている。なお、他の区間の分割については文献[9]を参照されたい。分割した基本動作における目標軌道は、ロボットに高次の振動を励振しないように、区分ごとの時間の五次多項式により近似し滑らかな軌道としている。

3. 仮想ハンドモデル

3.1 ロボットハンドモデルと人間ハンドモデル

仮想環境で表示する仮想ハンドは、Fig. 5 に示すようにロボッ

(a) Virtual human-hand model

(b) Virtual robot-hand model

Fig. 5 Virtual hand model

トハンドモデルと人間ハンドモデルの二つの選択肢がある。前者は、操作者の操るハンドの動きをロボットの動きに直接的に変換できるが、ロボットの運動学的制約を操作者が理解する必要がある。後者は、操作者にとって馴染みがあり扱いやすいが、人間ハンドモデルで生成される運動をロボットハンドで実行できるように変換する必要がある。どちらのモデルが仮想ハンドのモデルとして優れているかの検証が求められる。実験で用いたロボットハンドモデルの幾何学形状と動作範囲は文献[12]に示されている。人間ハンドモデルはデータグローブに提供されている初期設定の人間ハンドモデル[14]を用いた。人間ハンドモデルの各指は4関節4自由度であり、合計20関節20自由度である。一方、ロボットハンドモデルは、2.1節で述べたように20関節16自由度である。両者の大きな差異は、ロボットハンドモデルの大きさが人間ハンドモデルの約1.3倍と大きいことである。また、拇指の内外転の動作範囲は、人間ハンドモデルでは人間のそれと一致して $0^\circ \sim 90^\circ$ であるが、ロボットハンドモデルでは $0^\circ \sim 30^\circ$ と狭く、さらに機構の制約上、ロボットハンドモデルでは、拇指と他の指との対向性を十分に確保できていないことである。

3.2 仮想ハンドモデルの評価実験

仮想環境で球状物体と円筒物体のピックアンドプレースタスクの実験により、人間ハンドモデルとロボットハンドモデルの各仮想ハンドの優劣を評価した。実験では、操作者の意図解析による動作セグメント分割（第 2.3 節参照）での評価も行う。この場合、被験者ごとに操作の意図が異なっては正確な比較が行えない。そこで、作業指令が単純となるピックアンドプレースを選び、操作者の意図が統一できるよう注意した。

被験者には VR 環境で初めて作業をする 21～23 歳の男性 6 名を選んだ。各被験者には、VR 環境に提示した球および円柱を同じく VR 環境に提示された仮想ハンドで掴み、できるだけ早く VR 環境内の目標位置に移動させるよう指示した。球は、重量 350 [gf]、直径 50 [mm]、剛性 75 [gf/mm]、摩擦係数 0.7 の物体、円筒は、長さ 100 [mm]、直径 50 [mm]、剛性 75 [gf/mm]、摩擦係数 0.7 の物体を用いた。人間の手の初期位置は $(0.0, -100, -300)^T$ [mm]、球状物体は初期位置 $(50, -50, 0)^T$ [mm]、目標位置 $(50, -50, -300)^T$ [mm] とした。実験時には、被験者の各指関節角度および手の位置を計測する。また VR 環境内の指先と物体との位置関係、すなわち、仮想物体への指先のめり込み量より把持力を計算し、操作者にはフォースフィードバックグローブにより把持力を提示する。

3.3 結果の解析および考察

解析と比較を容易にするため、被験者が行ったピックアンドプレース作業の計測データを前述の五つのパラメータにより自動セグメント分割する。評価基準として、指示の実行時間と操作の安定性を採用した。被験者のうちの一人から得られた結果を Fig. 6 に示す。この図から、人間ハンドモデルでの実行時間はロボットハンドモデルのおよそ 1/2 である。また、物体座標でのハンドの速度、基準座標での物体の速度、およびハンドの速度ベクトルノルムの総和の各波形は、明らかにロボットハンドモデルのときと比較し、人間ハンドモデルのときはより滑らかである。さらに、実際に物体を搬送している translate セグメントでは、人間ハンドモデルのときは把持力がほぼ一定であるが、ロボットハンドモデルでは一定となっていない。これらは、操作者は、人間ハンドモデルの方が、安定に効率よく指示ができることを示している。

6 人の被験者による、grasp セグメントにおける球状物体と円筒物体を把持するまでの動作時間を Table 1 に示す。ほとんどの被験者は、人間ハンドモデルによる仮想ハンドがロボッ

トハンドによる仮想ハンドより動作時間が少ないことを示した。人間ハンドモデルでの実験では、すべての被験者に対して同一のモデルを用いた。人間ハンドモデルは被験者の指の長さと比較して最大で 15 % ほど長く、機構的にも固定軸の回転関節の組み合わせで表現されている。人間の手は機構的にこのように単純ではないが、被験者の感想では違和感は示されていない。以上の実験結果より、仮想ハンドはロボットハンドモデルより人間ハンドモデルが優れているといえる。

(a) Robot hand model

(b) Human hand model

Fig. 6 Results of segmentation

Table 1 Comparison of the task execution time

Subject	Duration of grasp segment [sec]				Time ratio Case A / Case B	
	Human hand model Case A		Robot hand model Case B			
	Spherical object	Cylindrical object	Spherical object	Cylindrical object	Spherical object	Cylindrical object
1	1.64	1.65	2.22	3.86	0.739	0.417
2	1.67	1.95	1.87	5.69	0.893	0.373
3	1.69	3.28	1.86	4.17	0.904	0.787
4	1.90	5.39	1.88	6.34	1.020	0.850
5	2.25	3.24	2.85	3.19	0.789	0.705
6	2.66	1.91	2.90	3.55	0.917	0.538
Mean	1.97	2.99	2.26	4.46	0.872	0.670

4. ロボットハンドの可操作性

4.1 人間ハンドモデルによる教示の問題点

前章の実験結果は、VR 環境を利用したロボットハンドの教示には、効率および把持の安定性において人間の手に基づいて作成した仮想ハンドが優れていることを示している。しかし、人間ハンドモデルを使用する場合、次の二つの点が問題となる。

- (1) 教示対象である Gifu Hand II の幾何学形状は、人間の手に類似しているが、完全には一致しない。したがって、人間ハンドモデルによる仮想ハンドで作られる運動が、ロボットハンドで実行できない場合が生じる。
- (2) ロボットハンドで把持できるとしても、関節の動作範囲の限界や特異点に近く操作性がよくない場合が生じる。

これらの問題を解決するために、ロボットハンドの可操作性に基づいた教示データの生成法を提案する。

4.2 ハンド可操作性に基づく教示データ生成

Fig. 7 に対象物を把持するロボットハンドを示す。図中、 Σ_h はハンド座標系、 Σ_r は基準座標系、 C_i は指先と物体との接触位置を表す。ロボット教示では、ハンドの位置姿勢と接触位置が必要である。人間は物体を掴むとき、安定に把持できる接触位置を経験により自然と選択していると考えられる。したがって、指先と物体との接触位置は、教示された位置すなわち VR 環境における人間動作の計測データ C_i とする。しかし、ロボットのハンドの位置姿勢は、教示された位置姿勢とする必要性はなく、指先位置が教示された位置を実現できる範囲で適当に設定が可能である。そこで、ロボットのハンドの位置姿勢 ${}^{ref}\mathbf{r}_{hand}$ が、ハンド可操作性を最大となるように定める方法を提案する。ハンドの可操作性は次式で与える。

$$PI = \sum_{i=1}^5 \left(w_i \sqrt{|\mathbf{J}_i^T \mathbf{J}_i|} + \rho_i P_i \right) \quad (4)$$

ここで、 w_i と ρ_i は重み係数、 $\mathbf{J}_i$ はハンド座標系で表した i 番目の指の幾何学的ヤコビ行列で、拇指以外の指については

$${}^{hand}\mathbf{v}_{i-thfinger} = \mathbf{J}_i \dot{\mathbf{q}}_{i-thfinger} \quad (5)$$

を満たし、拇指については

Fig. 7 Robot hand grasping an object

$$\begin{bmatrix} {}^{hand}\mathbf{v}_{1stfinger} \\ \dot{\Theta} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{1stfinger} \dot{\mathbf{q}}_{1stfinger} \quad (6)$$

を満たす。ただし、 $\mathbf{q}_{i-thfinger} = [q_1^i, q_2^i, q_3^i]^T$ ($1 < i$) は i 番目の指の関節ベクトル、 $\mathbf{q}_{1stfinger} = [q_1^1, q_2^1, q_3^1, q_4^1]^T$ は拇指の関節ベクトル、 $\Theta = q_2^1 + q_3^1 + q_4^1$ は掌と拇指とのなす角度、 P_i は次式で定義されるペナルティ関数である。

$$P_i = - \sum_j \left(\frac{1}{(q_j^i - a_j^i)^2} + \frac{1}{(b_j^i - q_j^i)^2} \right) \quad (7)$$

ここで、 a_j^i と b_j^i は i 番目の指の j 番関節の可動限界角度を表す。このペナルティ関数は、ロボットハンドの位置姿勢が可動範囲となるようにするために加えている。

逆運動学の関係式を用いることにより、評価関数はハンドの位置姿勢 ${}^{ref}\mathbf{r}_{hand} = [{}^{ref}x_{hand}, {}^{ref}y_{hand}, {}^{ref}z_{hand}, {}^{ref}\theta_{hand}, {}^{ref}\phi_{hand}, {}^{ref}\psi_{hand}]^T$ と Θ の関数として表される。ここで、 ${}^{ref}x_{hand}, {}^{ref}y_{hand}, {}^{ref}z_{hand}$ は基準座標で表したハンドの位置を表し、 ${}^{ref}\theta_{hand}, {}^{ref}\phi_{hand}, {}^{ref}\psi_{hand}$ は基準座標からハンド座標への姿勢を表す z - y - z オイラー角である。

評価関数を最大とする最適解は、最急降下法による繰り返し計算で求める。このとき、人間の教示した指先位置を満たす可動範囲内のロボットハンドの位置姿勢を初期値として与える必要がある。そのため、教示時のハンドの位置姿勢を開始点とし、その近傍の空間を探索し、条件を満たす位置姿勢が求められると探索を中止し、求められなければ探索空間を拡大して可動範囲内のロボットハンドの位置姿勢を求める初期値探索を行う。可操作性を最大とするように決めたロボットハンドの位置姿勢は、外乱等が作用しても頑健であることが期待できる。

5. ロボットハンドの可操作性に基づく教示の実験

Fig. 1 に示す多指多関節ハンドロボットを対象に、ロボット教示の実験を行った。対象物の形状、配置等は、仮想ハンドの評価実験と同一の条件である。

5.1 ハンド可操作性

4.2 節で提案した方法を用い、人間動作をロボットコマンド [9] に変換した。ロボットコマンドでは、ハンドの位置姿勢とその速度、物体との非接触状態における指先の位置と速度、物体の把持状態における各指先の接触位置と接触力が教示される。このとき、位置座標は物体座標系で与える。物体の把持状態におけるハンド可操作性を最大とするハンド位置姿勢は、重み係数 w_i と ρ_i を、どの指もそれぞれ 1.0 と $10.0 \cdot 10^{-10}$ として求めた。**Fig. 8** に可操作性の結果を示す。(a) はロボットハンドモデルのとき、(b) は人間ハンドモデルのときである。点線は操作者の教示位置姿勢での可操作性で、実線が提案するハンド可操作性を最大としたときである。Translate セグメントに着目すると、提案する方法により、ロボットハンドモデルのときはハンド可操作性が 35% 向上している。人間ハンドモデルのときは、教示データがロボットハンドの可動範囲になかったが、ハンド可操作性を最大とする位置姿勢を求めることにより可動範囲に位置姿勢を修正している。なお、人間ハンドモデルのときの可操作性は、ロボットハンドモデルの 1.6 倍であった。人間ハンドモ

(a) Case of the robot hand model
(b) Case of the human hand model
Fig. 8 The manipulability of robot hand

Fig. 9 Modified parameters

Fig. 10 Robot experiment

デルのときの仮操作性が高い理由は、次のように考える。すなわち、ロボットハンドモデルのとき、操作のしづらさから把持位置が必ずしも操作者が把持したい位置で物体と指先を接触させていないため、可操作性が低くなっている。一方、人間ハンドモデルのときは、操作者が把持したい接触位置となっており、このことが、可操作性を高めていると考える。

5.2 ロボット教示の実験

球状物体を対象にピックアンドプレースタスクを人間ハンドモデルで教示し、ハンド可操作性を最大とするようにハンドの位置姿勢を修正し、データの円滑処理を行いそのデータからロボット教示コマンド[9]を生成した。Fig. 9は円滑処理した後

の教示データである。生成した教示コマンドはロボットシミュレーションシステムで実現が可能であることを確認し、実機が多指多関節ハンドロボットでその実験を行った。Fig. 10は各基本動作における実験状況を示す。教示データを実行することを確認できた。

6. おわりに

多指多関節ハンドロボットの仮想環境でのロボット教示では、人間ハンドモデルに基づいた仮想ハンドモデルが操作者にとって操作しやすいことを示した。この場合、大きさや運動領域の違いにより、人間ハンドモデルでの教示データにより直接ロボッ

トハンドを動作させることができないときがある。この問題を解決するため、ロボットハンドの位置姿勢を可操作性が最大となるように生成する方法を提案した。この方法の特徴は、人間の把持に関する経験をいかすため、物体の把持位置には人間の計測データを用いていることである。提案する方法の有効性を計算機シミュレーションと多指多関節ハンドロボットの実験により確認した。なお、提案した手法は、2本指のような単純なロボットハンドの場合にも適用が可能であるが、5本指で操作する人間の経験を十分に生かすことは難しくなると推察される。また、人間が物体を把持するときにハンドの可操作性を評価指標としているかどうかは、今後の検討課題であるが、ロボットハンドには外力に対抗しやすく物体を操作しやすいという意味で適切な評価指標といえる。

参 考 文 献

- [1] H. Asada and Y. Asari: "The Direct teaching of tool manipulation skills via the impedance identification of human motion," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.1269-1274, 1988.
- [2] T. Kuniyoshi, M. Inaba and H. Inoue: "Teaching by showing: generating robot programs by visual observation of human performance," Proc. 20th Int. Symp. Ind. robots, pp.119-126, 1989.
- [3] S. B. Kang and K. Ikeuchi: "Toward Automatic Robot Instruction from Perception-Temporal Segmentation of Tasks from Human Hand Motion," IEEE Trans. on Robotics and automation, vol.11, no.5, pp.670-681, 1995.
- [4] T. Takahashi and H. Ogata: "Robotic assembly operation based on task-level teaching in virtual reality," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp.1083-1088, 1992.
- [5] 拓植英明, 福田敏男 他 3 名: "仮想空間を用いたテレマニピュレーションシステムの操作性改善に関する研究", 日本バーチャルリアリティ学会誌, vol.5, no.3, pp.1027-1032, 2000.
- [6] T. Yoshikawa and A. Nagura: "Development and Control of Touch and Force Display Devices for Haptic Interface," Proc. of SYROCO'00, pp.427-432, 2000.
- [7] R. M. Voyles, J. D. Morrow and P. K. Khosla: "Gesture-Based Programming for Robotics: Human-Augmented Software Adaptation," IEEE Intelligent Systems, November/December, pp.22-29, 1999.
- [8] H. Kawasaki, K. Nakayama and G. Parker: "Teaching for Multi-Fingered Robots Based on Intention of Motion In Virtual Reality," Proc. of IECON'2000, pp.427-433, 2000.
- [9] 川崎晴久, 中山寛治, グラハム パーカー: "VR 環境での人間の動作意図に基づくロボット教示", 日本バーチャルリアリティ学会誌, vol.5, no.2, pp.899-906, 2000.
- [10] H. Kawasaki, K. Nakayama and S. Ito: "On a Better Hand Model in Virtual teaching for Multi-Fingered Robots," Proc. of VSM-2000, pp.456-464, 2000.
- [11] R. N. Rohling and J. M. Hollerbach: "Optimized Fingertip Mapping for Teleoperation of Dexterous Robot Hand," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.769-775, 1993.
- [12] 川崎晴久, 内山和直, 小松恒夫: "研究用プラットフォームをめざした分布型触覚センサを有する人間型ロボットハンド", 日本機械学会論文集, vol.66, no.651, (C 編), pp.3672-3678, 2000.
- [13] 岩田久嗣: "振動モータとサーボモータを組み合わせた多点力覚提示グローブの開発", 日本機械学会東海学生会第 32 回学生員卒業研究発表講演会前刷, p.911, 2001.
- [14] Virtual Technologies Inc.: CyberGlove[®] User's Manual. 1997.

川崎晴久 (Haruhisa Kawasaki)

1949 年 6 月 27 日生。1974 年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了, 同年日本電信電話公社 (現 NTT) 入社, 1990 年金沢工業大学教授。1994 年 8 月より岐阜大学工学部教授, 現在に至る。ロボット制御, バーチャル・リアリティ応用ロボティクスなどの研究に従事。計測自動制御学会, 日本機械学会, 日本バーチャルリアリティ学会, IEEE などの会員。工学博士。(日本ロボット学会正会員)

阿部竜久 (Tatsuhisa Abe)

1977 年 4 月 28 日生。2000 年岐阜大学工学部機械工学科卒業, 2002 年同大学大学院工学研究科機械工学専攻博士前期課程修了。現在, 豊田車体 (株) に勤務。

毛利哲也 (Tetsuya Mouri)

1971 年 7 月 18 日生。2000 年名古屋工業大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。同年岐阜大学バーチャルシステム・ラボラトリー非常勤研究員, 現在に至る。ロボットハンド, 力覚情報を用いたロボットの接触状態同定に関する研究に興味を持つ。日本機械学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

伊藤 聡 (Satoshi Ito)

1968 年 12 月 10 日生。1991 年名古屋大学工学部情報工学科卒業。1993 年同大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。1994 年より理化学研究所バイオ・ミメティックコントロール研究センターに勤務。1999 年, 岐阜大学工学部助手, 現在に至る。工学博士。計測自動制御学会, IEEE などの会員。

(日本ロボット学会正会員)