

フォースディスプレイを用いた剛物体操作のための物体形状と外力の提示方法

長谷川 晶一^{*1} 小池 康晴^{*1} 佐藤 誠^{*1}

Presentation of Object Shape and Resultant Force for Manipulation of Hard Virtual Object
with Force Display

Shoichi Hasegawa^{*1} Yasuharu Koike^{*1} and Makoto Sato^{*1}

Abstract – We propose a new method to display grasping and resultant force for multi finger object manipulation. In the method we eliminate the effect of the resultant force in the distances between fingers. We made an experiment to compare between conventional and proposed method.

Keywords : haptic display, force display, grasping force, proxy

1 背景と目的

本論文では、物理モデルを持つ硬い仮想物体を自然に把持操作することが可能となるような、物体形状と外力の提示方法を提案する。

3次元物体を操作する場合、人は複数の指によって物体を把持する。フォースディスプレイを用いて仮想物体を操作する場合、ボタン操作などによって把持モードに切り替えて把持操作を行う方法もあるが、自然な操作を実現するためには、複数の指を用いて直接仮想物体を把持操作できることが望ましい。把持操作を行うためには、物体の形状と物体が指に与える外力を提示する必要がある。

多指による把持の提示については、Ishii と Sato [1] の報告がある。しかし、これは物体形状と物体が床面から受ける力の提示にとどまっており、慣性力など物理モデルを用いた場合に物体に作用する力を考慮していない。

Maekawa と Hollerbach [2] は、親指と人差し指による把持操作が可能なフォースディスプレイとその制御方法を提案しているが、接触モードと把持モードを分けており、拡張性に乏しい。

Yoshikawa と Ueda [3] は、モード切り替えなしで外力と把持力を提示する方法を提案しているが、外力提示と把持提示が分離されていないため、外力提示が把持力や指間距離を変動させるという問題がある。

川井と吉川 [4] は、内力(把持力)と外力それぞれに介在インピーダンスを設定することで、より硬い物体

の把持を安定に提示する方法を提案している。しかしこの方法は、外力を2本の指に等分に分配しているため、外力提示が把持力に影響を与えるという問題は解決されない。

本報告では、従来の提示方法の問題点を指摘し、外力提示が把持力提示に影響を与えないモデルを提案することで、物体を動かす際の操作感を向上させる。また、考案したモデルを拡張し、モード切り替えがなく、多指への適応が可能な、物体形状と外力の提示方法を示す。

2 実世界での把持

物をつかんで動かすという操作は、多指直接操作環境において多くのアプリケーションに必要な基本的な操作だと考えられる。そこで、物を水平に動かす際に生じる加減速が把持に及ぼす影響を端的に捕らえるため、親指と人差し指による水平1自由度の把持を考え、物体を水平に揺らすという作業を取り上げる。

2.1 把持のモデル

実世界で剛体を把持する場合、親指と人差し指の距離は把持対象の形状によって決まり、指が出す力によらず一定値となる。このときの剛体の運動方程式は、指が剛体に与える力を f_1, f_2 、剛体の中心位置を x とすれば(図1)。

$$m\ddot{x} = f_1 + f_2 \quad (1)$$

となる。指が物体に与える合力(=物体が指に与える外力の反作用)は $f_1 + f_2$ だが、指が発生させる力の大きさの和 $|f_1| + |f_2|$ は、合力よりも大きくなる。この合力に影響を与えない力は、物体がすべり落ちることの無いように物体-指間の抗力を保ち、把持を持続さ

^{*1}東京工業大学 精密工学研究所

^{*1}Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

せる．そこでこの力のことを把持力と呼ぶ．把持力は，

$$f_g = \begin{cases} |f_2| & (|f_1| > |f_2| \text{ のとき}) \\ |f_1| & (\text{それ以外のとき}) \end{cases} \quad (2)$$

合力は，

$$f_r = f_1 + f_2 \quad (3)$$

となる．以上から，ある合力 (f_r) を発生させる各指の

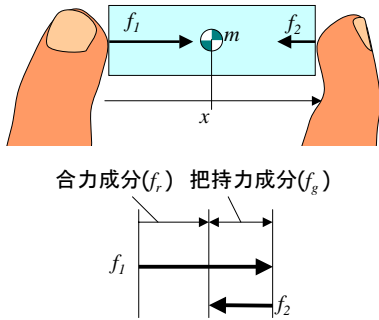


図 1 1自由度の剛体の把持と把持力

Fig.1 Grasping force on grasp of rigid body in 1DOF

力 (f_1, f_2) は，把持力 (f_g) の大きさによっていろいろな値をとり得ることがわかる．

2.2 把持力の計測

合力と把持力の関係がわかれば，フォースディスプレイを用いて把持操作環境を構築する際に，合力に応じて把持力の大きさを制御することができるので，操作感の向上が期待できる．そこで物体を把持操作する際に人がどのように把持力を制御しているのかを計測した．

2.3 計測方法

質量 1kg・重量 0.2kg の把持対象を左右に振るときに各指が物体に与える力を計測した．

把持対象の自由度のうち回転と奥行き方向を拘束し，上下左右方向だけに動くようにした．カセンサの質量による慣性力が計測結果に影響を与えることを防ぐため，計測にはシート状のカセンサ，FlexiForce¹を使用した．このセンサには出力特性にばらつきと非線形性があるので，校正済みのカセンサを用いて特性を計測し，計測結果を用いて出力値を補正した．

物体の位置計測には光学式位置計測装置，OPTO-TRAK²を用いた．

被験者には，物体を左右に 5cm 程度 8 回振ったあと，2 秒間静止させる作業を繰り返すように指示した．実験は 4 人の被験者に対して行った．図 2 に計測の様子を示す．

2.4 計測結果

図 3 に計測結果の一例を示す．グラフから，物体を振っているときに指が物体に与える力は，静止時の力

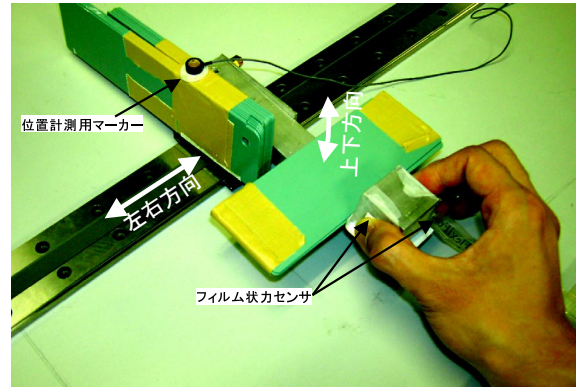


図 2 実物体把持時に指が加える力の計測

Fig.2 Measurement of finger force on real object grasping

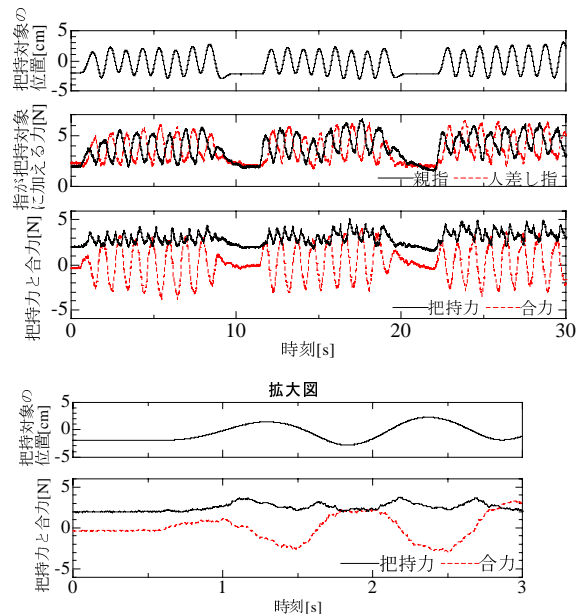


図 3 実物体把持時に指が加える力

Fig.3 Finger force on real object grasping

を下回らないことが分かる．これは，物体に加える力を大きくすることで，物体に合力を与えていることを示している．他の 3 人の被験者についても同様な結果を得た．

以上から，人は把持力が保たれるよう，指が物体に加える力を大きくすることで物体に与える合力を発生させていることがわかった．

3 フォースディスプレイによる把持提示の問題点

位置を計測し力を出力するタイプのフォースディスプレイで物体の形状を提示する場合，物体と指の間にばねモデルを考えることで提示力を求める．従来は，仮想物体に適切な質量と自由度を設定し，運動の法則に従って動かすことで，物体を把持操作可能な環境を構築していた [3]．図 4 に従来方式での把持提示方法を示す．

¹<http://www.tekscan.com/flexiforce/flexiforce.html>

²<http://www.ndigital.com/optotrak.html>

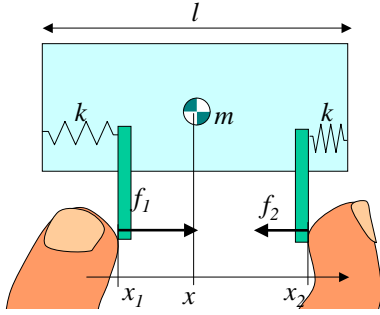


図4 従来の把持提示方法

Fig. 4 Conventional method for the presentation of grasp

このときの仮想物体の運動方程式は，

$$m\ddot{x} = f_1 + f_2 \quad (4)$$

$$f_1 = k(x_1 - (x - l/2)) \quad (5)$$

$$f_2 = k(x_2 - (x + l/2)) \quad (6)$$

となる．

$|f_1| > |f_2|, f_1 > 0, f_2 < 0$ のとき，指が物体に与える力 f_1, f_2 を合力 f_r と把持力 f_g で書き直すと，

$$f_1 = f_g + f_r, f_2 = -f_g \quad (7)$$

なので，親指と人差し指の指間距離は，

$$x_2 - x_1 = l - \frac{2f_g + f_r}{k} \quad (8)$$

と表せる．式(8)は，合力(f_r)が増えると把持力(f_g)が指間距離($x_2 - x_1$)のどちらかが減ることを示している．2.2節の計測結果から，物体に合力が加わる際も把持力(f_g)は保たれると言えるので，合力が加わると指間距離が減少すると考えられる．

このように，従来方式では物体を加速した場合など指が物体に合力を加えた場合に指間距離が減少する．このため，物体を加速する際に指間距離と把持力が減少し，把持の安定性が失われるという問題が生じる．

4 合力分配方式の提案

指が物体に合力を加える際に指間距離が変化するのは，バネモデルに合力がかかりバネ長が変化するためである．合力を指から物体に直接加え，形状提示のためのバネモデルに把持力だけがかかるようにすれば，指間距離の変化を避けることができる．

4.1 把持力の計算

従来方式では，物体に加える合力と把持力を1つのバネモデルから求めていた．形状提示のためのバネモデルに把持力だけがかかるようにするためには，把持力と合力を独立に求める必要がある．

把持力と合力を独立に求めるために，把持対象物体を形状と動力学の性質に分けて考える．把持力は，把

持対象物体と同じ形状で質量が0の仮想の物体を考えることで計算する．この仮想の物体は，把持対象の形状を表現しているが物体の中身の性質を持たないので，ここでは形状殻と呼ぶ．

指が形状殻をバネモデルを介して把持していると考えれば，指位置とバネモデルから形状殻のつりあいの位置を求めることができる．このときに各指にかかる力を把持力とする．

4.2 合力の計算

物体の運動方程式は位置を x ，指が物体に与える合力を f_r ，物体に働くその他の外力を f_e とすれば，

$$m\ddot{x} = f_r + f_e \quad (9)$$

なので，指が物体に与える合力は $m\ddot{x} - f_e$ である．

形状殻の位置はフォースディスプレイの位置から求めたつりあいの位置となるので，その加速度も，フォースディスプレイの加速度から求まるはずである．しかしフォースディスプレイの多くは加速度を計測できないので，形状殻の加速度を求めることはできない．

そこで物体と形状殻の間にバネモデルを考え，バネが発生する力を物体の慣性力として $m\ddot{x}$ の代わりに用いる．これにより，フォースディスプレイの加速度を計測せずに慣性力を求めることができる．

4.3 合力の分配

求めた合力は把持力計算のためのバネモデルを通さずに，直接各指に加えなければならない．

各指にかかる把持力を減らす向きに外力を分配すると把持力が減少してしまうので，把持力と外力が同じ向きとなる指だけに外力を分配する．

以上をまとめると図5になる．また，このときの親

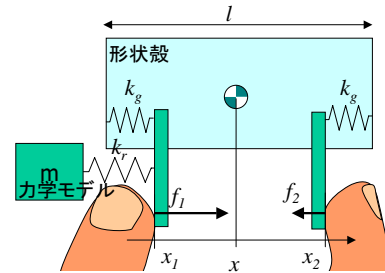


図5 合力分配方式による把持提示

Fig. 5 Presentation of grasp with resultant force distribution method

指と人差し指の指間距離が，

$$x_2 - x_1 = l - \frac{2f_g}{k} \quad (10)$$

となることから，合力の形状提示への影響がなくなると考えられる．

5 多指 6 自由度物体の把持への拡張

前章で提案した合力分配方式を，多指による 6 自由度物体の把持の提示に適用するために拡張する．

5.1 把持力の計算

バネモデルから形状殻のつりあいの位置を求める計算は， n 本の指による把持の場合には次のようになる．

仮想世界での指位置 (指のプロキシ [6] の位置) を r_i ，指が形状殻に与える力を f_i ，バネモデルの係数を k_i とすると (図 6)，形状殻に指が与える外力の合力 F と

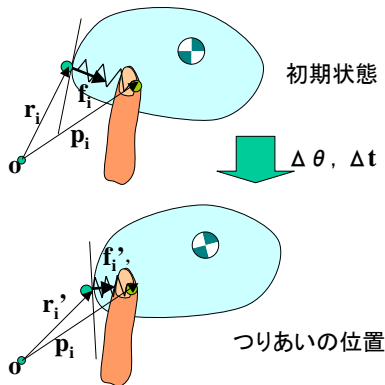


図 6 形状殻のつりあいの位置
Fig. 6 Balance position of shape shell

合モーメント N は，

$$F = \sum f_i \quad (11)$$

$$N = \sum r_i \times f_i \quad (12)$$

となる．つりあいの位置での指のプロキシの位置を r'_i ，指が形状殻に与える力を f'_i とし，形状殻を Δt 移動し $\Delta\theta$ 回転させたときに，バネがつりあったとすれば (図 6)，つりあいの位置では，合力・合モーメントは 0 なので，

$$0 = \sum f'_i \quad (13)$$

$$0 = \sum r'_i \times f'_i \quad (14)$$

となる． $\Delta\theta$ が小さいので，

$$r'_i \approx r_i + \Delta\theta \times r_i + \Delta t \quad (15)$$

と近似でき，

$$f'_i = k(p_i - r'_i) \quad (16)$$

なので，式 (13)，式 (14) を Δt ， $\Delta\theta$ について解くことで，形状殻のつりあいの位置を求めることができる．

つりあいの位置を求めた後，各指のプロキシの位置を更新する [6]．

5.2 合力の計算

6 自由度物体の場合も，指が物体に加える合力は，物体の慣性力と指以外から物体に加わる外力の和になる．

6 自由度物体の慣性力を求めるために，形状殻と物体の間に並進 3 自由度，回転 3 自由度のバネを考え，バネが出す力を慣性力とする．

5.3 合力の分配

合力の分配に求められる条件として次のことが考えられる．

1. 分配された合力の和がもとの値に近くなる．
2. 把持力に応じた合力を分配する．
3. 指にかかる力が連続に変化する．
4. 指に把持力を減らす向き力を加えない．

以上の条件は，各指が形状殻と接している点を r_i ，その点での接面の法線ベクトルを n_i ，各指が形状殻に加える把持力を f_{gi} ，各指に配分される合力を $k_i n_i$ ，指が物体に加える合力の力とモーメントを F, N とすれば，次のように定式化できる．

$$P = (F - \sum k_i n_i)^2 + \gamma_1 (N - r_i \times \sum k_i n_i)^2 + \gamma_2 (\sum (k_i - k |f_{gi}|))^2 + \gamma_3 (\sum k_i^2 + k^2)$$

として， P を最小化する $k_i, k (k_i, k \geq 0)$ を求める．(17)

この問題は 2 次計画問題なので解くことができる [5]．ただし， $\gamma_1 \sim \gamma_3$ は各項の重みづけで適当な値に設定する必要がある．

ここで得られる分配された合力の和は，最適化問題の解なのでもとの合力と等しくならない．そこで差を形状殻に加えて把持力を再計算することで，合力全体が指に伝わるようにする．

6 合力分配方式の評価実験

並進 3 自由度を持つ剛体の親指と人差し指による把持をフォースディスプレイ (SPIDAR[1]) を 2 台用いて提示し，提案方法と従来方法を比較した．

6.1 実験条件

提示する物体は，幅 6cm，高さ 10cm の直方体とし，質量を 1kg とした．重力加速度の大きさは，実世界より小さい $2.0m/s^2$ とした．これは，フォースディスプレイの提示力の制約により，実世界と同じ重力を提示することができなかったためである．

把持力計算のためのバネモデルと慣性力計算のためのバネモデルのバネ係数を共に 800N/m とした．また，物体と指の間には摩擦力が働くものとし，摩擦係数を 1.0 とした．

被験者には、各指の仮想世界での位置、把持物体を示す映像を提示した。実験の様子を図7に示す。被験者には2.2節の計測と同様に、物体を左右に5cm程度8回振ったあと、2秒間静止させる作業を繰り返すように指示した。5人の被験者に対して実験を行った。

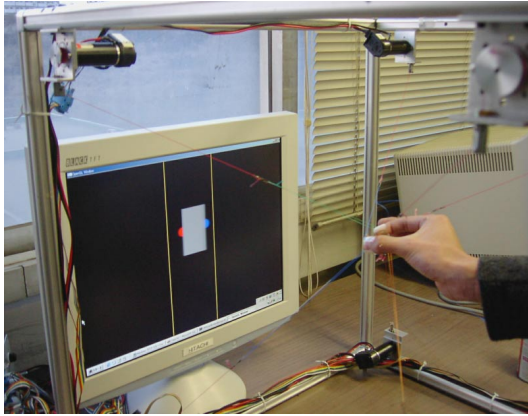


図7 比較実験の様子

Fig. 7 Setup of experiment for comparison

6.2 実験結果

実験結果の1つを図8と図9に示す。また、表1に

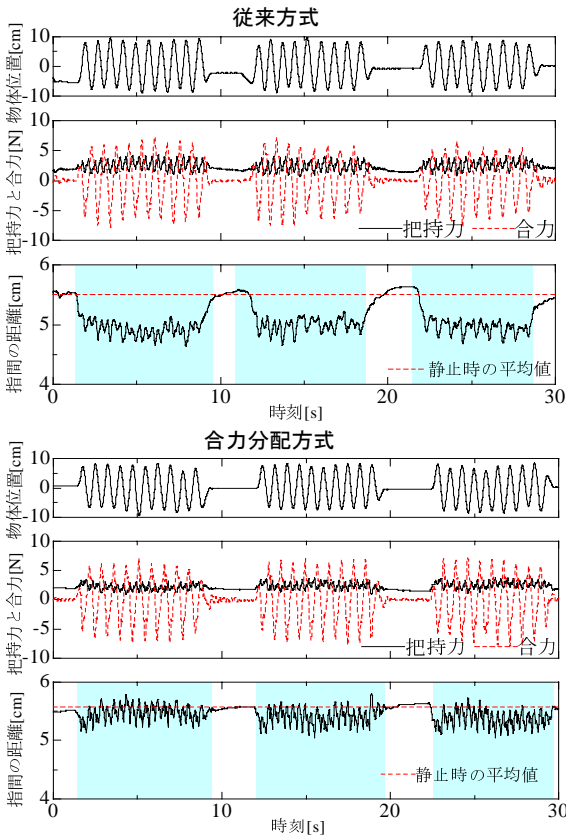


図8 従来方式と提案方式の比較

Fig. 8 Comparison between conventional method and proposed method

把持力、表2に指間距離の時刻0秒から30秒までの平均と標準偏差を示す。表1、表2の標準偏差と図8

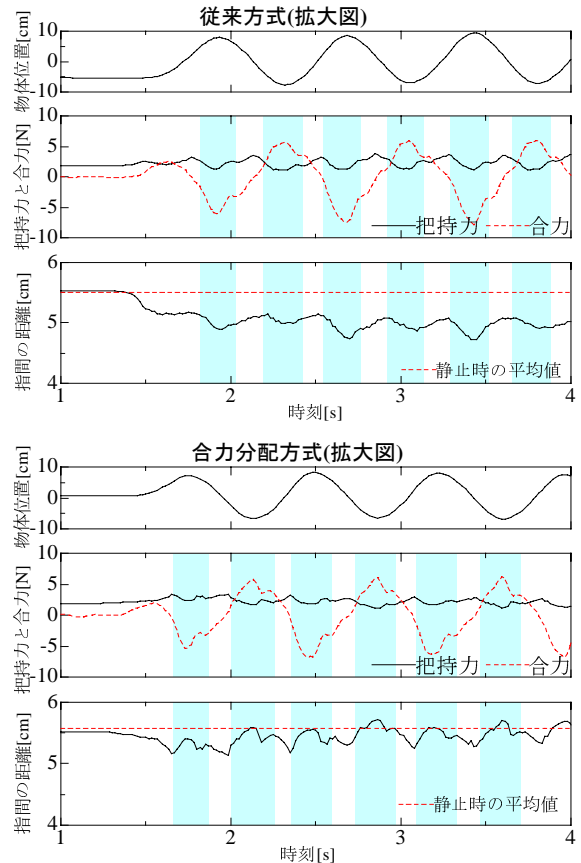


図9 従来方式と提案方式の比較 (拡大図)

Fig. 9 Comparison between conventional method and proposed method (zoom in)

被験者	A	B	C	D	E
平均 (従来) [N]	2.0	2.0	1.7	1.8	4.1
平均 (提案) [N]	2.2	2.4	1.6	1.6	4.7
偏差 (従来) [N]	0.39	0.35	0.28	0.35	0.77
偏差 (提案) [N]	0.34	0.29	0.21	0.22	0.35

表1 把持力の平均値と標準偏差

から、提案方式では従来方式よりも把持力・指間距離とも変動が小さくなるのが分かる。このことから、提案方式はより現実に近く、安定した把持を提示したと言える。

拡大図 (図9) をみると、従来方式では合力の大きさが大きい時刻 (図の網掛け部分) に把持力・指間距離が減少するという問題が見られるが、提案方式では把持力の減少が小さくなり指間距離は増加している。これは、従来方式の把持力・指間距離と合力の関係式 (式 (8)) が示す、合力の提示が把持力・指間距離の減少を引き起こすという仮説と合致する。提案方式の指間距離の式 (式 (10)) は、指間距離と把持力は合力に拠らないことを意味するが、実際には、合力が加わると把持力がわずかに減少し、その分指間距離が増加するという結果になった。

次に図8の指間距離を見ると、従来方式では把持対

被験者	A	B	C	D	E
平均 (従来)[cm]	5.0	5.4	5.5	5.4	4.8
平均 (提案)[cm]	5.4	5.4	5.6	5.6	4.8
偏差 (従来)[cm]	0.10	0.089	0.076	0.074	0.16
偏差 (提案)[cm]	0.085	0.073	0.054	0.056	0.087

表 2 指間距離の平均値と標準偏差

象が運動する期間(網掛け部分)の指間距離が静止期間の指間距離に比べて極端に小さくなっている。これは、運動期間に把持力が把持の保持に必要な値を下回らぬよう、被験者が指間距離を小さく保つためだと考えられる。一方、提案方式では従来方式のような運動期間の指間距離の減少は見られない。

実験終了後、被験者に内観を聞いたところ「提案方式の方が物体が硬く感じられる」「提案方式の方が物体が重く感じられる」「提案方式の方が実物体を揺らした感覚にちかい」といった回答のほか「違いが分からなかった」といった回答も得た。「違いが分からなかった」と答えた被験者でも指の力や指間距離の変化などの客観的なデータには図 8 と同様の傾向が見られた。

7 考察

フォースディスプレイには表現できるバネモデルのバネ係数に上限がある。そのため、合力提示を行う際に、指間距離や把持力の変動といった問題が発生する。

実世界でもやわらかい物体を把持操作すれば同じ現象が生じると考えられるが、実世界の把持操作対象の多くは硬いため、実世界と同様の環境をフォースディスプレイを用いて再現しようとする場合に問題となる。

提案方式は、人が合力を与える方法に合わせて合力を分配することで、バネ係数を増すことなく指へ合力が伝わりやすくし、問題を解決したといえる。

8 結論

本論文では、まず実世界で物体を把持操作する際の把持力を計測した。そして、従来の提示方法には、合力が発生すると把持力が指間距離が減少するという問題があることを指摘した。

つぎに、合力の把持力への影響を軽減するために、把持力と合力を独立に算出し、合力を形状提示のためのばねモデルを介さずに、直接物体に加えることを提案した。さらに実験を行い提案方式の有効性を確認した。

9 今後の課題

本研究では把持方向と平行な合力を把持対象に加える場合について議論したが、把持方向と垂直に合力を加える際にも、人は把持力を変化させる [7]。把持方

向と合力の向きに応じて提示力を制御することで、指間距離の変動を抑え、操作感を向上させることができると考えられる。

参考文献

- [1] M. Ishii, M. Sato: A 3D Spatial Interface Device Using Tensed Strings, PRESENCE (MIT Press Journal), Vol.3, No.1, pp.81-86 (1994)
- [2] Hitoshi Maekawa, JohnM. Hollerbach: Haptic Display for Object Grasping and Manipulating in Virtual Environment, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 2566-2573, 1998.
- [3] Tsuneo Yoshikawa, Hitoshi Ueda: Haptic Virtual Reality: Display of Operating Feel of Dynamic Virtual Objects, Robotics Research, The Seventh International Symposium, pp.214-221, 1996
- [4] 川井昌之, 吉川恒夫: 内力・外力分離型介在インピーダンスを用いた仮想物体把持の力覚提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.6 No.1
- [5] 古林 隆: 線形計画法入門, 産業図書
- [6] Ruspini, D., Kolarov, K., Khatib, O.: The Haptic Display of Complex Graphical Environments, SIGGRAPH 97 Proceedings, 1997.
- [7] Flanagan, J.R. and WING, A.M.: The role of internal models in motion planning and control: evidence from grip force adjustments during movements of hand-held loads. The Journal of Neuroscience, 17, 1519-1528, 1997.

(2002年4月30日受付)

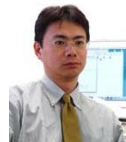
[著者紹介]

長谷川 晶一 (正会員)



1997年東京工業大学工学部電気電子工学科卒業, 1999年同大学院知能システム科学専攻修士終了。同年ソニー株式会社入社, 2000年東京工業大学精密工学研究所助手, 現在に至る。フォースディスプレイ, ヒューマンインタフェースの研究に従事。

小池 康晴 (正会員)



1987年東京工業大学工学部情報工学部卒業, 1989年同大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻修士終了。同年トヨタ自動車株式会社入社, 1991年ATR視聴覚機構研究所出向, 1992年ATR人間情報通信研究所。1994年トヨタ自動車株式会社に戻る。1998年東京工業大学精密工学研究所助教授, 現在に至る。運動制御の神経回路網の研究に従事。工学博士

佐藤 誠 (正会員)



1973年東京工業大学工学部電子物理工学科卒業, 1978年同大学院博士課程修了, 同年, 同大学工学部助手, 現在, 同大学精密工学研究所教授, 現在に在る。パターン認識, 画像処理, ヒューマンインタフェースの研究に従事。工学博士。