

## 位置決め作業アシストのための操作力依存可変ダンピング制御

武 居 直 行<sup>\*1</sup> 菊 植 亮<sup>\*1</sup> 佐 野 明 人<sup>\*1</sup>  
望 山 洋<sup>\*1</sup> 澤 田 英 明<sup>\*2</sup> 藤 本 英 雄<sup>\*1</sup>

## Force-Dependent Variable Damping Control for Positioning Task Assist

Naoyuki Takesue<sup>\*1</sup>, Ryo Kikuuwe<sup>\*1</sup>, Akihito Sano<sup>\*1</sup>,  
Hiromi Mochiyama<sup>\*1</sup>, Hideaki Sawada<sup>\*2</sup> and Hideo Fujimoto<sup>\*1</sup>

This paper is concerned about a variable impedance control for human-machine cooperative positioning systems. The prospective profile is found from the dynamic equation and the properties of the operational profiles known as suitable ones. We propose a simple variable impedance control in which the damping coefficient is varied according to the operational force of human based on the above profile. The experiments of positioning tasks are examined and the effectiveness of the proposed method is shown. The properties on conventional methods are compared.

**Key Words:** Variable Impedance Control, Human-Machine System, Cooperative Task System, Power Assist, Friction

## 1. は じ め に

人と機械が協調して作業を行う、いわゆる「人間・機械協調系」の研究が盛んに行われている [1]~[19]. その多くは、人の操作力を力覚センサで検出し、その力覚情報をもとにロボットの機械インピーダンスを制御 [20] [21] する手法である。しかし、固定した慣性・粘性のインピーダンスでは操作者の操作感と作業性能の両立が難しい [5] ため、ロボットのインピーダンスをどのように変化させるかという研究 [6]~[17] が多く行われている。

人間・機械協調系においてインピーダンスを可変にすることにより操作性を向上する研究には、池浦らの時間に応じてインピーダンスを変化させる手法 [6]~[9]、山田らの位置に応じて変化させる手法 [10] [15] や、加速度や力から作業フェーズを判別して変化させる手法 [11]~[14]、力に応じて変化させる手法 [4] [14] [16] などがある。これらの成果は多くの知見を与えるとともに、すでに組立工場などで実用化されている技術もある [12] [18]. しかし、制御・判別アルゴリズムが複雑化する傾向があり、さらなる適用範囲の拡大を考えた場合、保守性や低コスト化という面でも、より簡便な手法が望まれる。

本研究の目的は、簡便なインピーダンス可変則により、人と機械が協調して位置決め作業を行う際の操作性を向上させるこ

とである。従来の研究により、人が任意の目標位置へ位置決めする状況において、良い操作パターンの特徴がいくつか知られている。そこで本論文では、その操作パターンを力学的にとらえなおすことにより、速度プロファイルと操作力プロファイルから、抵抗力プロファイルを見出す。そして、その抵抗力を操作力情報をもとにした可変ダンピング制御により実現する手法を提案する。本手法は、作業フェーズを判別することなく、また時間や位置の関数でもないため、非常に簡便なものとなる。

以下に本論文の構成を示す。第 2 章では、本論文で対象とする位置決め作業および実験装置について簡単に述べる。第 3 章において機械インピーダンスの違いが位置決め作業の操作感にどのような関係があるかを予備実験により確認する。第 4 章では、従来研究で知られている操作パターンを力学的にとらえなおし、新たな操作力依存ダンピング制御を提案する。第 5 章において位置決め作業実験を行い、本提案手法が操作性とともに位置決め精度・時間の向上にも有効であることを示す。第 6 章では他研究との比較および考察を行う。第 7 章で本論文を総括する。

## 2. 位置決め作業タスクおよび実験装置

## 2.1 位置決め作業タスク

本論文において想定する位置決め作業タスクについて述べる。Fig. 1 のように、操作者はロボット手先に取り付けられたハンドルを持って x 軸方向に操作する。Fig. 2 に示すようにハンドルには力覚センサが取り付けられており、その操作力に応じてロボットが移動するようにインピーダンス制御されている。操

原稿受付 2006 年 8 月 1 日

<sup>\*1</sup>名古屋工業大学

<sup>\*2</sup>アイシン精機株式会社

<sup>\*1</sup>Nagoya Institute of Technology

<sup>\*2</sup>Aisin Seiki Co., Ltd.

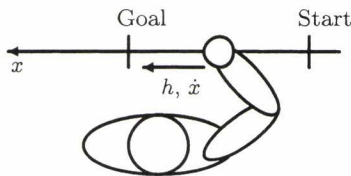


Fig. 1 Positioning task

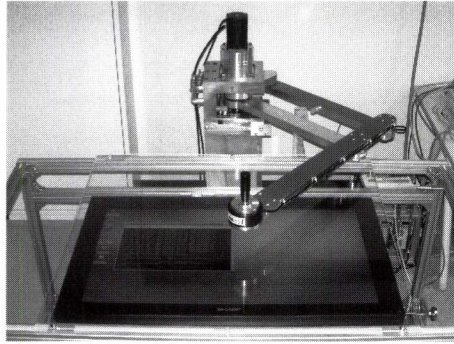


Fig. 2 Picture of manipulator

作者はハンドルを操作することによって、例えば重量物などの対象物をスタート位置から目的の位置まで搬送する。つまり、スタート位置から起動し、搬送し、位置決めして停止するという作業を行うものとする。ただし、目的の位置は作業者には見えているが、ロボットには未知であり、既知目標位置への位置決め [22] とは異なる。

この作業において、必ずしも人間と機械が協調しているとは必要はなく、人がこの作業を遂行しやすい環境を実現するための道具としてロボットを用いると考えることもできる。

## 2.2 実験装置

本研究で用いる平行 2 リンク型マニピュレータを Fig. 2 に示す。関節間距離（リンク長さ）は 0.6 [m] であり、おおむね 0.8 [m] × 0.6 [m] の可動範囲を持つ。可動域の下に大型液晶モニタを配置し、作業タスクに応じた表示が可能となっている。

アクチュエータには減速比 1:50 の 32 型ハーモニックドライブ<sup>®</sup>を有する AC サーボアクチュエータ（（株）ハーモニック・ドライブ・システムズ製）を二つ用いている。最大トルクは 220 [N・m]、最高回転速度は 90 [rpm] であるが、本論文の実験では、最大スペックの 1/10 程度のモータ出力トルクで十分である。

手先には定格 400 [N] ( $x, y$  軸方向)、800 [N] ( $z$  軸方向) の力覚センサ（ニッタ（株）製）が固定されており、操作力の検出が可能である。操作力をもとに手先位置の目標値を計算し、さらに逆運動学よりアクチュエータの角度目標値を求め、位置制御系を構成している（アドミッタンス制御）。

## 3. 機械インピーダンスと操作感の予備実験

前章で示したロボットの手先での目標インピーダンスは次式のように摩擦力を付加した慣性・粘性系 [19] とする。

$$M\ddot{x} = h - D\dot{x} - f(\dot{x}, h) \quad (1)$$

ここで、 $M$  は仮想慣性、 $D$  は仮想粘性、 $x$  は操作位置、 $h$  は操

Table 1 Evaluation at starting

		Viscosity $D$ [N·s/m]					
		0	5	10	20	30	40
Inertia $M$ [kg]	5	A	A	A	B	B	D
	10	A	A	A	B	C	D
	20	B	B	B	D	D	D
	30	D	B	D	D	D	E
	40	D	D	E	E	E	E

Table 2 Evaluation during moving

		Viscosity $D$ [N·s/m]					
		0	5	10	20	30	40
Inertia $M$ [kg]	5	A	A	A	D	E	E
	10	A	A	B	B	D	E
	20	A	A	B	B	D	E
	30	A	A	A	D	D	E
	40	A	A	B	D	D	E

Table 3 Evaluation at positioning

		Viscosity $D$ [N·s/m]					
		0	5	10	20	30	40
Inertia $M$ [kg]	5	D	B	B	B	A	A
	10	D	B	B	A	A	A
	20	D	D	D	B	A	A
	30	E	E	D	D	B	B
	40	E	E	E	D	C	B

作力、 $f$  は摩擦力である。本研究では、停止時における手ぶれやゆらぎを抑えるために、事前実験より決定した 3 [N] の摩擦力を付加することとする。なお、一般に摩擦力の再現は難しいが、ここでは、筆者らの提案する rigid admittance 型の仮想摩擦モデル [23] [24] を実装した。

このとき、慣性および粘性の組み合わせにより、操作感にどのような差異が現れるかを予備実験により明らかにする。摩擦力を 3 [N] として、慣性  $M$  を 5 から 40 [kg] までの 5 通り、粘性  $D$  を 0 から 40 までの 6 通り変化させた。被験者は 3 名で、慣性・粘性の組み合わせはランダムに変化させ、一つの組み合わせを 2 回行った。評価する特性は「起動のしやすさ」、「動かしてやすさ」、「思ったところへの止めやすさ」の 3 項目である。また、得点は「良い」、「割合良い」、「どちらともいえない」、「割合悪い」、「悪い」の 5 段階である。

3 名の平均評価結果を Table 1～3 に示す。表中の A は「良い」、B は「割合良い」、C は「どちらともいえない」、D は「割合悪い」、E は「悪い」にそれぞれ対応する。

Table 1 の「起動のしやすさ」に関しては、慣性と粘性の両方とも小さいほうが評価が高い傾向があることが分かる。

次に、Table 2 の「動かしてやすさ」は、慣性にはあまり関係なく、粘性によってのみ決まるといえる。これは、ある運動速度における負荷が軽いほうがよいということであり、粘性が高いと高速移動時には負担が大きくなるため評価が下がる。

また、Table 3 の「止めやすさ」では、慣性が低く、粘性は高いほうが評価が高くなる。慣性と粘性の比率 ( $M/D$ ) が小さければ良好な評価が得られる傾向が見られる。この値は摩擦力を無視したときの、操作力  $h$  から速度  $\dot{x}$  までの伝達関数の時定数に対応する。

これら三つの評価項目をすべて同時に満たすには、やはり機械インピーダンスを状況に応じて変化させる必要がある。しかし今回の場合、慣性が10[kg]以下であれば、粘性係数の調整により、上記の評価をすべて満足させることができると考えられる。そこで、慣性の値は10[kg]に固定して、いかに粘性係数を可変にする制御則を見出すかという課題を次章で考える。

#### 4. 操作力依存ダンピング制御

前章の予備実験の結果から、粘性係数の可変則を考える。

##### 4.1 従来研究からの検討

従来研究の一つとして、池浦らの研究[6][7]では、粘性を動的に変化させることで操作性が向上することを示している。起動時には大きな粘性を、動き出したら時間に応じて減少させる手法を提案している。人の運動の速度プロファイルを滑らかなベル形[25]~[27]として、提案手法の結果を考察している。

一方、山田らの研究[12]では、初動時に慣性的で、終動時に粘性的であることがよいとされている。加速度の極値から、作業を三つのフェーズに分け、作業フェーズに応じて慣性と粘性を変化させている。

このように従来研究では、時間によって粘性を変化[9]させたり加速度によりフェーズを判別してインピーダンスを切り換えたり[11][12]、位置に応じて粘性を切り換えたり[10][15]、といった手法が提案されていた。しかし、加速度の大域的なピークによりフェーズを判別させるのは簡単ではなく、また、位置や時間によって変化させるのは作業への依存性が高く汎用的ではない。

今までのよいとされる作業データ[6][12]~[14]を見てみると、操作力自体も速度と同様に滑らかなベル形をしており、しかもそのピークは速度のピークよりも先に来ていることに気付く。すなわち、加速時には操作力は大きくなることを示している。逆に減速し、停止させようとするときには、操作力はそれほど大きなものとはなっていない。

##### 4.2 運動方程式からの検討

式(1)の粘性項と摩擦力項をまとめて抵抗力 $e$ と考えると、慣性 $M$ の物体を加減速させる力は、人が加える操作力 $h$ と環境からの抵抗力 $e$ であるといえる。ここでは $e$ を環境からの抵抗力と述べたが、協調者やロボットのアシスト力ととらえる[8]こともできる。

運動方程式を時間積分すると、

$$M\dot{x} = \int h dt + \int e dt \quad (2)$$

と表される。ここで、左辺は運動量となる。上式より、速度ゼロの物体が一度動き出し、速度 $\dot{x}$ が再びゼロとなるには、右辺第一項である操作力の時間積分(力積)と右辺第二項である抵抗力の時間積分の合計がゼロになる必要がある。

人の運動の速度プロファイルを滑らかなベル形として、以下の例を考えてみる。

仮想インピーダンスが慣性的な場合( $M > 0$ ,  $e = 0$ )の例をFig. 3に示す。図のような速度プロファイル(実線)に対して、加速度 $\ddot{x}$ は図の点線のように正負の値をとる。すなわち、

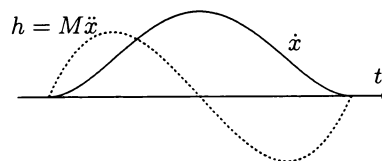


Fig. 3 Profiles of velocity, acceleration and force in case of inertial-impedance

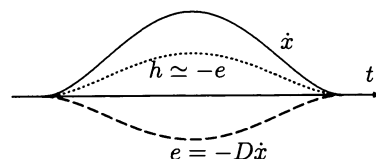


Fig. 4 Profiles of velocity and forces in case of visco-impedance

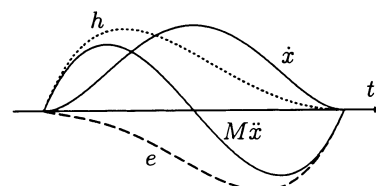


Fig. 5 Profiles of velocity, acceleration and forces in case of desirable impedance

加えた操作力 $h$ もこの加速度と同じ波形となり、正の部分の面積と負の部分の面積は等しくなる。

次に粘性的な場合( $M \approx 0$ ,  $e = -D\dot{x}$ )の例をFig. 4に示す。この場合は、速度に比例した粘性抵抗力(破線)が生じる。操作力はその抵抗力と逆向きの同じ波形(点線)となる。抵抗力は図中の負側になり、操作力による正の面積と抵抗力による負の面積は等しい。

Fig. 3の例では、加速する際に加えた力積を、減速する際に自分の力で減じており、加えたエネルギーを自分で吸収しなくてはならない。一方、Fig. 4の例では、力を加えたその瞬間に粘性抵抗力が反対方向に働いており、加えたエネルギーがその瞬間で消散している。粘性的な場合、速度の増加に伴って操作力も増加するため、速度と力の積であるパワーが増大し、人の筋肉特性的にも負荷が大きくなる。

前章の結果からも、起動時(加速時)には粘性が小さいほうが良い。これは加えた力に対応して対象物の運動エネルギーが増えることになる。一方、位置決め時(減速時)には粘性を大きくすることにより、操作者が減速させなくても環境(ロボット)が減速させてくれることになる。

前節に述べたように、今までに知られている良い操作パターンにおける特徴である「速度プロファイルはベル形」、「操作力プロファイルもベル形(ピークは速度より先)」を運動方程式の上から考えると、抵抗力として、Fig. 5に破線で示すようなピークが後ろにある負のベル形となる( $e = M\ddot{x} - h$ )。この抵抗力波形を速度で除したものが可変粘性の候補となる。

速度ゼロで除した場合、値が不定になってしまうため、速度ゼロ近傍は省いて描くと、Fig. 6の一点鎖線のようになる。この極小値は速度のピークよりも時間的に先であり、むしろ操作力のピークに近い。

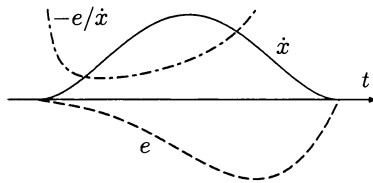


Fig. 6 Prospect of variable damping coefficient

### 4.3 操作力依存可変ダンピング制御

前節で述べた特徴に着目し、操作力が大きいときには粘性係数を小さくし、操作力が小さいときには粘性係数を大きくすればよいのではないかと考える。抵抗力を次式のようにおくと、

$$e = -D(h)\dot{x} \quad (3)$$

操作力に依存した粘性係数は

$$D(h) > 0, \quad \frac{dD(h)}{dh} < 0 \quad (4)$$

と記述できる。操作力に依存した粘性係数として、例えば、

$$D(h) = D_0 \frac{A}{|h| + A} \quad (5)$$

$$D(h) = D_0 \frac{A^2}{h^2 + A^2} \quad (6)$$

$$D(h) = D_0 \exp(-A|h|) \quad (7)$$

といったものが考えられる。ここで、 $A$  は操作力の大きさによって粘性係数がどれだけ減少するかを決める正の値である。上式における粘性係数  $D(h)$  は、操作力がゼロのときに  $D_0$  であり、操作力が大きくなるに従って、 $D_0$  から 0 の間で単調減少する正の値であるため余分な条件式は必要としない。また、設定すべきパラメータは、操作力がゼロのときの粘性係数  $D_0$  と操作力に対する粘性係数の感度を表す  $A$  の二つだけである。

力情報を用いた可変インピーダンス制御手法は、Al-Jarrah ら [4]、山田ら [14]、積際ら [16] によっても提案されている。Al-Jarrah らは、搬送物体を把持しているロボット手先力に応じてインピーダンス全体のゲインを適応的に変化させている。後者二つはいずれもフェーズ判別や力の最大値を必要としたり、いくつかの条件分けが記述されている。一方ここで提案した操作力依存可変ダンピング制御は、操作者の力により直接的に粘性を変化させる手法である。

## 5. 実験

### 5.1 動作確認実験

本論文では次式のように、粘性項に式 (5) を用い、さらにクーロン摩擦項を付加することにする。

$$e = -D_0 \frac{A}{|h| + A} \dot{x} - f(\dot{x}, h) \quad (8)$$

式 (8) の抵抗力によって位置決め作業実験を行った結果を Fig. 7 に示す。また、粘性係数の時間的変化を同図に示す。ただし、 $D_0 = 70$  [N·s/m]、 $A = 10$  [N]、 $F_c = 3$  [N] とした。図から分かるように、操作力  $h$  は初動時に大きなピークを持ち、その後反転することなく小さくなっている。速度  $\dot{x}$  のピークは操

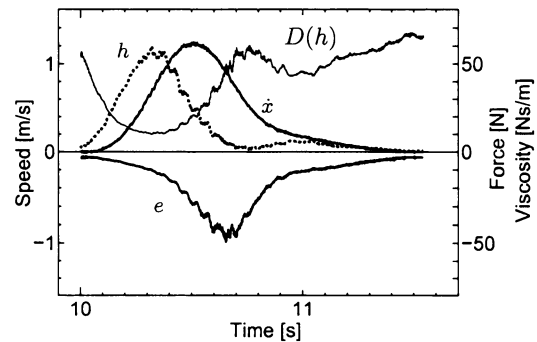


Fig. 7 Time responses of proposed method

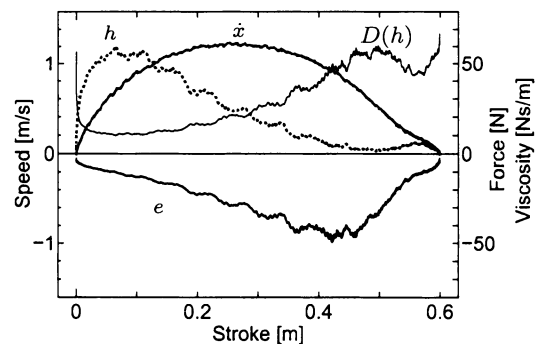


Fig. 8 Responses dependent on position

作力のピークの後に現れ、全体として滑らかなベル形となっており、位置決めを行っている終盤では長く尾を引いた形になっている [27]。そして、抵抗力  $e$  のピークは、速度のピークの後に現れ、終動時の減速を助けている。この手法では操作力という作業者の意図を抽出し、インピーダンスを変化するために用いているということもできるだろう。

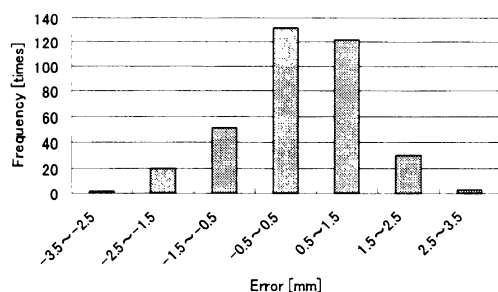
同じ実験結果を、移動位置に対する速度・力の波形として Fig. 8 に示す。図の横軸は移動位置であり、本研究のタスクでは、0 から 0.6 [m] へと移動する。

速度  $\dot{x}$  は丸い山のような波形（躍度最小パターンではこのような波形となる）であり、目標位置近くでは直線的に減少していく（これは指数関数的に減少していることを表す）。操作力  $h$  は移動開始の 0.1 [m] 付近でピークを持ち、その後なだらかに減少していく。この操作力  $h$  に基づいて求めた粘性係数  $D(h)$  を見ると、操作力とは逆に目標地点手前で大きな値となっている。これは後で示すように、山田らの提案している FIE 手法 [10] [15] と同等の結果である。この粘性係数と移動速度から計算される抵抗力  $e$  は、逆に停止手前に当たる 0.4~0.5 [m] 付近でピークを持っており、停止時の減速力を担っている。

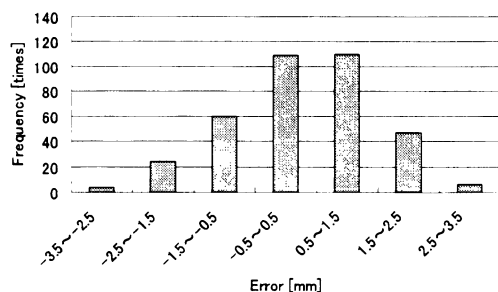
### 5.2 位置決め作業実験

3 名の被験者それぞれにおいて、位置決めしやすい粘性係数  $D_0$  および感度係数  $A$  を調整したのち、目標距離 0.6 [m] において 30 回の位置決め作業を 4 セットを行った。提案手法と固定インピーダンス（第 3 章の予備実験で評価のバランスが良かった  $M = 10$  [kg]、 $D = 20$  [N·s/m] を用いた）においてそれぞれ実験した結果の最終位置決め誤差を Fig. 9 に示す。

提案手法による停止位置の平均値・標準偏差は 0.26 [mm]、



(a) Proposed method



(b) Fixed impedance

**Fig. 9** Results of positioning task (positioning errors) for distance of 0.6 [m]

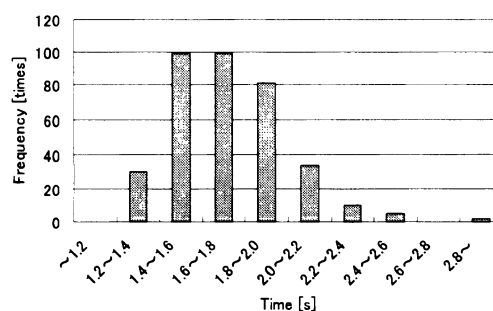
0.96 [mm] となり、固定インピーダンスでの平均値・標準偏差は 0.32 [mm], 1.17 [mm] であった。

いずれの平均値も、目標値であるゼロとの間に有意な差が見られた (提案手法では  $t(359) = 5.19$ ,  $p < 10^{-3}$ <sup>†</sup>, 固定インピーダンスでは  $t(359) = 5.22$ ,  $p < 10^{-3}$ ) これは操作部と表示部の視差や LCD モニタの表示分解能が影響しているものと思われる。両者の平均値間には有意な差が見られなかった ( $t(692) = 0.74$ ,  $p = 0.23$ )<sup>††</sup>。

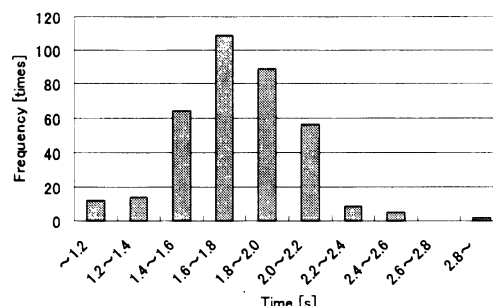
また、提案手法と固定インピーダンスにおける分散に有意な差が見られた ( $F(359, 359) = 1.48$ ,  $p < 10^{-3}$ )。つまり、提案手法による位置決め作業の方が、ばらつきが抑えられ、精密さが向上していると考えられる。

次に位置決め時間の結果を **Fig. 10** に示す。提案手法による位置決め時間の平均値・標準偏差は 1.726 [s], 0.269 [s] となり、固定インピーダンスでの平均値・標準偏差は 1.773 [s], 0.278 [s] であった。分散には有意な差は現れず ( $F(359, 359) = 1.07$ ,  $p = 0.27$ )、平均値には有意な差が見られた ( $t(718) = 2.26$ ,  $p = 0.01$  (片側))。つまり、提案手法の方がより短い時間で位置決めできたと考えられる。

さらに、目標距離を半分の 0.3 [m] にし、30 回の位置決め作業を 4 セットを行った。実験結果を **Fig. 11** および **Fig. 12** に示す。提案手法による停止位置の平均値・標準偏差は 0.03 [mm], 1.21 [mm] となり、固定インピーダンスでの平均値・標準偏差は

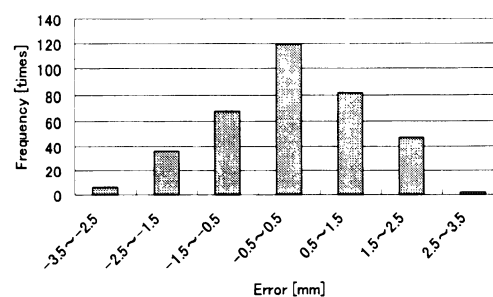


(a) Proposed method

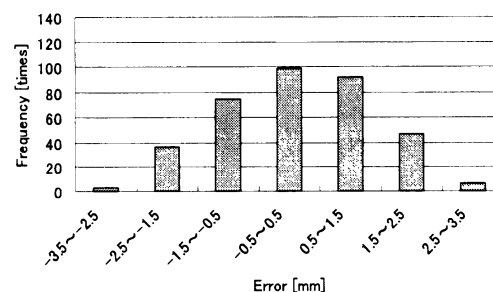


(b) Fixed impedance

**Fig. 10** Results of positioning task (positioning times) for distance of 0.6 [m]



(a) Proposed method



(b) Fixed impedance

**Fig. 11** Results of positioning task (positioning errors) for distance of 0.3 [m]

0.15 [mm], 1.25 [mm] であった。位置決め停止位置の分散には有意な差は見られず ( $F(359, 359) = 1.19$ ,  $p = 0.31$ )、また平均値にも有意差は見られなかった ( $t(718) = 1.25$ ,  $p = 0.11$ )。いずれも目標位置近傍で同じように位置決めされているものと考えられる。

一方、位置決め時間については、提案手法での平均値・標準偏差は 1.663 [s], 0.286 [s] となり、固定インピーダンスでの平

<sup>†</sup>例えばこの場合、帰無仮説は「位置決めの母平均はゼロである」である。 $t(359) = 5.19$  とは、この帰無仮説のもとで自由度 359 の  $t$  分布に従う  $t$  値が、実験結果では 5.19 になったことを示す。自由度 359 の  $t$  分布において  $|t| > 5.19$  となる確率は  $p < 10^{-3}$  であるので、有意水準 5% で検定を行えば、「母平均はゼロではない」(統計的に有意にゼロとは異なる値をとる) となる。以後の検定も同様。

<sup>††</sup>分散が等しいと仮定できない場合の Welch の  $t$  検定を用いたため、自由度は 718 ではなく、692 となった。

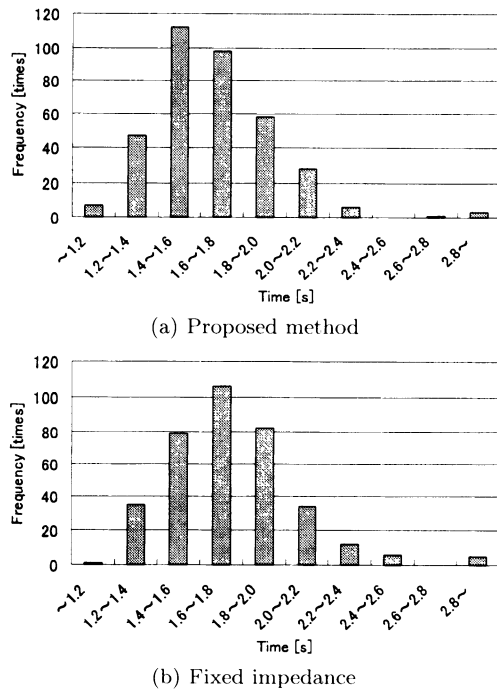


Fig. 12 Results of positioning task (positioning times) for distance of 0.3[m]

均値・標準偏差は 1.761 [s], 0.328 [s] であった。分散に有意差が見られ ( $F(359, 359) = 1.31, p = 0.01$ ), また, 平均値にも有意な差が見られた ( $t(705) = 4.27, p < 10^{-3}$ )。目標距離にかかわらず, 提案手法のほうがより早く位置決めができると考えられる。

## 6. 考 察

### 6.1 時間に対する粘性係数の変化

池浦らの最適可変インピーダンス制御では, 起動時の粘性係数の変化則を提案している。本実験結果の起動時における粘性係数の変化を比較すると, Fig. 13 のようになる。実線は Fig. 7 に示した粘性係数であり, 点線は次に示す池浦らの式 [7] よりフィットさせた粘性係数である。

$$C(t) = 55 \exp(-8t) + 5 \quad (9)$$

ここで,  $t$  [s] は開始時からの時刻である。パラメータに若干の差はあるがオーダーは同じであり, また, 0.4 [s] までの変化という点も一致している。

### 6.2 位置に対する粘性係数の変化

次に, 山田らは加速度のピークにより作業フェーズを判別しインピーダンスを変化させているが, 加速度の大域的なピークを判別するには複雑な手法が必要となる。一方, 位置によって粘性係数を変化させる FIE の手法 [10] [15] であれば, 追試が容易であるため, FIE と比較する。被験者に対して幾度か試行して調整した粘性フィールドとの比較を Fig. 14 に示す。また, そのときの抵抗 force  $e$  を同図に合せて示す。実線は Fig. 8 に示したものであり, 破線は FIE によるものである。

若干の違いはあるものの位置による粘性係数の変化具合や,

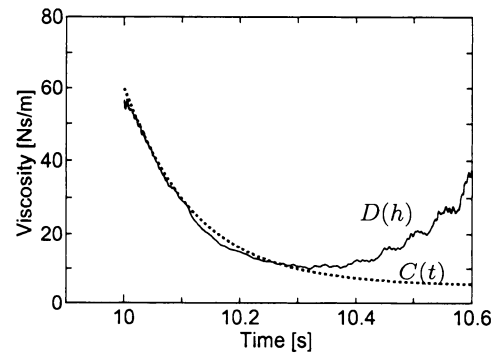


Fig. 13 Comparison between proposed method and variable damping control [7]

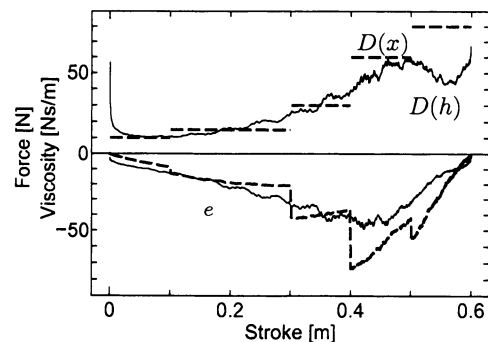


Fig. 14 Comparison between proposed method and FIE [10] [15]

それに伴う抵抗 force の変化も同様な傾向が確認できる。

## 7. ま と め

本研究では, 操作力によって粘性係数を変化させる簡便な可変ダンピング手法を提案した。位置決め作業実験を行い, 正確さの向上と位置決め時間の短縮において, 本提案手法の有効性が示された。

人間・機械協調系における可変インピーダンス制御では, 時間や位置, 加速度, 作業フェーズなどをもとにインピーダンスの可変則が提案されているが, 本提案手法により, 切り換えや時間関数でパラメータを変化させていく必要がなく, 作業汎用性の高い人間・機械系を構築することができる。また, 今まで提案されている可変インピーダンス手法とほぼ同様の特性が, より簡便な可変ダンピング手法により得られているのも興味深い点といえよう。

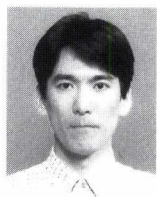
謝 辞 本研究はトヨタ自動車(株)の支援を受けて行いました。関係各位に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- [1] H. Kazerooni: "Human robot interaction via the transfer of power and information signals," IEEE Trans. on SMC, vol.20, no.2, pp.450-463, 1990.
- [2] 福田敏男, 藤澤佳生, 新井史人, 室英治, 星野春夫, 宮崎貴志, 大坪和彦, 上原和雄: "マン・ロボット協調作業型マニピュレータの基礎的研究 (第 1 報, マン・ロボット協調マニピュレータの機構と制御)", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.57, no.541, pp.2944-2952, 1991.
- [3] 小菅一弘, 藤澤佳生, 福田敏男: "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), vol.60, no.572, pp.1337-1343, 1993.
- [4] O.M. Al-Jarrah and Y.F. Zheng: “Arm-Manipulator Coordination for Load Sharing Using Variable Compliance Control,” Proc. of the 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.895-900, 1997.
- [5] 小菅一弘, 風村典秀: “人と協調するロボットの運動生成”, 第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.393-394, 1997.
- [6] R. Ikeura, A. Morita and K. Mizutani: “Variable damping characteristics in carrying an object by two humans,” Proc. of 6th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.130-134, 1997.
- [7] 池浦良淳, 小澤治明, 水谷一樹: “人間とロボットによる協調運搬動作の実験的評価”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, 2A111-3(1)-(2), 1998.
- [8] M.M. Rahman, R. Ikeura and K. Mizutani: “Investigating the Impedance Characteristics of Human Arm for Development of Robots to Cooperate with Human Operators,” Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp.676-681, 1999.
- [9] 池浦良淳: “ロボット—人間協調システムのモデリング”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.3, pp.331-336, 2000.
- [10] 山田陽滋, 平澤康宏, 酒井隆之, 大東治宜, 鴻巣仁司, 梅谷陽二, 津坂祐司: “安全と意図に基づく人間/ロボットの協調作業”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, 2B111-2(1)-(2), 1998.
- [11] 鴻巣仁司, 山田陽滋, 森園哲也, 梅谷陽二: “作業条件変動を考慮した手動操作型動力補助ロボットの制御手法に関する研究”, 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.947-948, 1998.
- [12] Y. Yamada, H. Konosu, T. Morizono and Y. Umetani: “Proposal of Skill-Assist: A System of Assisting Human Workers by Reflecting Their Skills in Positioning Tasks,” Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp.11-16, 1999.
- [13] 山田陽滋, 佐藤公博, 鴻巣仁司, 森園哲也, 梅谷陽二: “スキルアシストの提案 (第 1 報: 作業過程のフェーズに基づく可変インピーダンス制御)”, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.431-432, 1999.
- [14] 山田陽滋, 鴻巣仁司, 佐藤公博, 齋藤康之, 森園哲也, 梅谷陽二: “スキルアシストの提案 (第 2 報: 操作力を利用した可変インピーダンス制御のパラメータ調整手法の提案)”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1381-1382, 2000.
- [15] 森園哲也, 山田陽滋, 高野博之: “自動調整可能な Field Impedance Equalizer (FIE) の提案”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2P1-H-15(1)-(4), 2004.
- [16] 積際徹, 横川隆一, 原敬: “人間—機械協調作業システムにおける可変インピーダンス制御に関する研究”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1357-1358, 2000.
- [17] 積際徹, 横川隆一, 原敬: “人間とロボットによる協調作業における人間の手先剛性の推定に基づく可変インピーダンス制御”, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.425-426, 2001.
- [18] 池浦良淳, 加藤寛之, 野口真平, 水谷一樹, 中村久: “産業用パワーアシスト装置のインピーダンス制御”, 第 10 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.191-196, 2005.
- [19] 武居直行, 佐野明人, 望山洋, 菊植亮, 澤田英明, 藤本英雄: “仮想摩擦特性の実現およびそれを利用した人間—機械系”, 第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2D11, 2004.
- [20] N. Hogan: “Impedance Control Part 1 – Part 3,” Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.107, pp.1-24, 1985.
- [21] 小菅一弘, 古田勝久, 横山竜昭: “ロボットの仮想内部モデル追従制御系—メカニカル・インピーダンス制御への応用—”, 計測自動制御学会論文集, vol.24, no.1, pp.55-62, 1988.
- [22] R. Kikuuwe, T. Yamamoto and H. Fujimoto: “Low-Force Kinesthetic Guidance For Accurate Positioning and Tracking,” Proc. of the 14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (Haptics 2006), pp.491-498, 2006.
- [23] 菊植亮, 武居直行, 佐野明人, 望山洋, 藤本英雄: “有限時間で零速度に収束する不連続摩擦モデル”, 第 10 回ロボティクスシンポジウム予稿集, 2005.
- [24] R. Kikuuwe, N. Takesue, A. Sano, H. Mochiyama and H. Fujimoto: “Fixed-Step Friction Simulation: From Classical Coulomb Model to Modern Continuous Models,” Proc. of the 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2005), pp.3910-3917, 2005.
- [25] T. Flash and N. Hogan: “The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model,” J. Neuroscience, pp.1688-1703, 1985.
- [26] Y. Uno, M. Kawato and R. Suzuki: “Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement — Minimum Torque-Change Model,” Biological Cybernetics, vol.61, pp.89-101, 1989.
- [27] 川人光男: 脳の計算理論, pp.235-258, 産業図書, 1996.





武居直行 (Naoyuki Takesue)

1972 年 12 月 20 日生。2000 年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士後期課程修了。2000 年大阪大学助手。現在、名古屋工業大学寄附講座助教授。博士 (工学)。ロボットの運動制御、触覚テクノロジー、人間・機械系などの研究に従事。2004 年日本ロボット学会研究奨励賞受賞。日本機械学会、計測自動制御学会、電気学会、精密工学会、IEEE の会員。  
(日本ロボット学会正会員)



佐野明人 (Akihito Sano)

1963 年 2 月 8 日生。1987 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。現在、名古屋工業大学大学院工学研究科教授。触覚テクノロジー、人間-機械系、受動歩行の研究に従事。日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門一般表彰 (ROBOMECH 表彰)、計測自動制御学会論文賞・友田賞などを受賞。2004・2005 年度本学会評議員。日本機械学会 (フェロー)、計測自動制御学会等の会員。博士 (工学)。  
(日本ロボット学会正会員)



澤田英明 (Hideaki Sawada)

1981 年 2 月 5 日生。2005 年名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。現在、アイシン精機株式会社勤務、工機工場メカトロ G 所属。



菊植 亮 (Ryo Kikuuwe)

1975 年 7 月 17 日生。2003 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程研究指導認定退学。現在、名古屋工業大学寄附講座助手。博士 (工学)。触覚センシング、作業支援ロボティクスなどの研究に従事。2005 年日本ロボット学会研究奨励賞受賞。計測自動制御学会、日本機械学会、IEEE の会員。

(日本ロボット学会正会員)



望山 洋 (Hiromi Mochiyama)

1970 年 5 月 28 日生。1998 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報システム学専攻博士後期課程修了。現在、名古屋工業大学寄附講座助教授。博士 (情報科学)。触覚情報処理メカニズムの研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、IEEE の会員。  
(日本ロボット学会正会員)



藤本英雄 (Hideo Fujimoto)

1947 年 7 月 7 日生。1970 年名古屋大学工学部機械学科卒業。現在、名古屋工業大学教授。ものづくりテクノセンター長。医学工学、生産システム、ロボットなどの知能化、バーチャルリアリティ・感性の工学に興味を持つ。JUFAS 最優秀論文賞、グッドデザイン賞など多数受賞。スケジューリング学会会長、文部省科学技術・学術審議会文化資源委員会委員など歴任。現在、愛知県ものづくり人材育成協議会座長、日本機械学会フェロー・評議員。工学博士。  
(日本ロボット学会正会員)