

基礎論文

力覚の主体性を活用した教示手法に関する研究

嵯峨 智^{*1}, 川上 直樹^{*1}, 館 暲^{*1}

A Study on Teaching Methods utilizing a Proactivity in Haptics

Satoshi Saga^{*1}, Naoki Kawakami^{*1} and Susumu Tachi^{*1}

Abstract – We propose a haptic teaching system that uses haptic device to teach some handwork skills. Specifically, we chose some tasks with pencil-like devices and examined how to teach expert's handwork skills. We propose a new haptic teaching method, in which the haptic device produces force that is opposite in direction. The operator try to cancel the force and consequently, necessary force is “proactively” generated. Our hypothesis is that this “proactiveness” is essential for haptic teaching. We made a prototype system and compared our methods with existing teaching methods.

Keywords : Haptic Display, Haptic Teaching, Internal Force, Virtual Fixture

1 背景

近年のバーチャルリアリティ技術の発達により、力覚提示装置が単なるコンピュータユーザインターフェイスとしてだけでなく、実世界とバーチャルをつなぐ Mixed Reality のためのインターフェイスとして利用されるようになってきた。このような応用には二つの方向がある。一つは実環境での作業中に移動方向などをガイドするものである。もう一つはあらかじめ熟練者の動きを記録しておき、訓練するときにはその動きを操作者に伝え、技能伝達のためのバーチャルなトレーナとなるものである。本論文は後者の、力覚提示装置による技能伝達を扱う。

人が道具を操作するとき発揮される技能は、古来より徒弟制度などを通して長期にわたるトレーニングや指導により受け継がれてきた。一方、知識を伝える学習では比較的長期にわたるトレーニングは必要とされない。知識は文字や言語などを通して直接伝達することができるのに対し、技能を伝える学習は人の動き、力の使い方を伝えなければならないが、このための直接的な手段が存在しないためである。そのため徒弟制度においては、教師（以後熟練者）は生徒（以後訓練者）に動きを伝え、訓練者が実行する様子を熟練者が観測して力の使い方の間違いを見出し、これを訓練者にフィードバックする。このような技能伝達の最も伝統的な教示手段として、書道教室などでよく見られる、熟練者が訓練者の手をとって操作する方法がある（図1）。しかし、技能伝達の情報の精度に疑問が残る。

近年、学習のためのシステムとして、実作業環境を

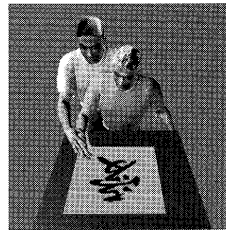


図1 伝統的手法

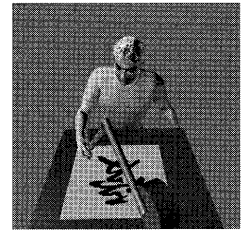


図2 従来手法

モデリングなどにより再現しシミュレーションするシステムは幾つか提案されている [4]。しかし我々の目標は熟練者の動きや力を記録し、これを伝えるシステムである。例えば医療分野における手術の手技は熟練者の動きを記録したビデオ教材があり、訓練者はこれを視聴することで学習する。このような記録、再生の可能なシステムとしての観点から、力覚提示装置を用いた技能伝達の研究として、Henmi ら [2] は、力覚教示として、熟練者の操作する筆の位置情報を記録、再生することで教示としている。しかし、これまでの力覚教示の研究には共通して、位置情報と同時に力情報を提示できないという問題点がある。この観点からの研究として下記のようなものがある。Yokokohji ら [6] は視覚と力覚を組み合わせたさまざまな手法を提案している。中には視覚手掛りと逆向きの力を用いた手法などもある。しかし、学習における効果までは測定されていない。また、Kikuuwe [3] は提示装置の背面から指を圧迫する力をこことで、力そのものを提示するかわりに皮膚感覚によって提示するシステムを試作している。

では、より効果的な力覚提示装置を用いた位置情報、

^{*1}東京大学大学院 情報理工学系研究科

^{*1}Institute of Information Science and Technology, The University of Tokyo

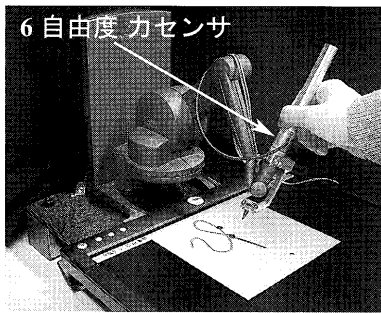


図3 システム概観

力情報の提示手法は考えられないだろうか。また提示手法の学習における効果はどの程度あるのだろうか。

Gibson[1]は触覚を“Active Touch”と呼んだ。これは触覚自体の感覚だけではなく、人間の主体的触知行為自体も触覚において重要であるという考え方である。我々は、力覚も同様に主体性があるこそ意味を持つと考える。そこで我々は、訓練者の主体性を活かした教示について検討し、作業における必要な力の使い方を主体的な操作を通じて修得できるシステム(図3)を作成し、さらに作成したシステムの学習における効果について測定する。

2 力覚教示システム

まず、我々が以後用いる「主体的」という言葉の意味を定義する。熟練者が操作に要する力を F_e とするとき、「主体的」な操作とは、訓練者が、本来操作に必要な力 (F_e) と等しい力を出力して操作することをさすものとする(式1)。本節では、この主体的な操作により、訓練者が熟練者の作業における力の使い方を修得できる手法について検討する。

$$F_t = F_e \quad (1)$$

加えて、外力と内力についても述べる。対向する2つの力 F_a, F_b ($|F_a| > |F_b|$) が物体にかかっているとき、「外力」 $F_{external}$ とは、物体を動かすために作用した力(ベクトル) $F_a + F_b$ であり、「内力」 $F_{internal}$ とは拮抗により打ち消された力(スカラー) $|F_b|$ である(図4)。

$$F_{external} = F_a + F_b \quad (2)$$

$$F_{internal} = |F_b| \quad (3)$$

ここで、いくつかの教示方法における力および主体性について考えてみる。はじめに、「熟練者の操作における情報を訓練者に知覚させる」方法として、伝統的な技能伝達がある(図1,5)。これは、書道教室などで

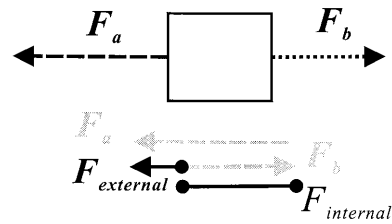


図4 外力と内力

よく見られるように、熟練者が訓練者の手にとって操作する方法である。この手法における力の主体性について考えてみると、伝統的な技能伝達においては力の主体性が熟練者に存在する(図5の灰色部分)。そのため訓練者は熟練者の動きに導引されることになる。

訓練者を主体性のない剛体かつ位置センサであるとみなせば、訓練者は、熟練者が訓練者を經由して操作されるデバイスにかけている外力の結果としての位置の時間的変位を知覚できる。しかし、本来の操作に必要な内力を知覚する手段はなく、また、熟練者にとっては、操作すべき負荷が普段と異なるため、作業に要する力が変化する。加えて、訓練者が主体的に力を出すと熟練者にとって外乱となるという問題がある。

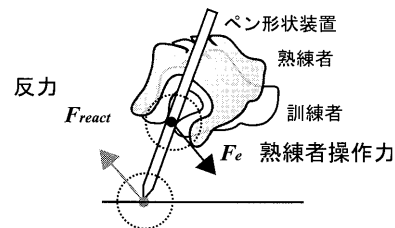


図5 伝統的手法

次に、「熟練者の操作における情報を正確に訓練者に知覚させる」方法として、力覚提示装置を用いた従来の手法があげられる(図2,6)。これは、外力の結果として操作されるデバイスの位置の時間的変位を記録し、これを各時刻で再現し、動きとして提示するものである。本手法の主体性について考えると、熟練者の動きを記録する時には力の主体性は熟練者にあるが、訓練者が操作をするときには力の主体性は力覚提示装置にあり(図6の灰色部分)、訓練者は力覚提示装置の動きに導引されることになる。

伝達される情報の精度について考えると、この手法では、技能記録時の熟練者の負荷は普段と変わらない。よって熟練者による操作も普段と同じであるため、正確な技能が記録可能である。しかし技能再生時には、実際に訓練者に提示される力を F_{disp} 、操作されるデバイスの質量を m とすると、このシステムは熟練者の位置変化を再現するので、式4のように表され、訓

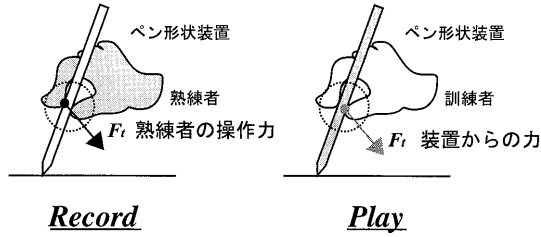


図6 従来手法

練者の力 F_t を想定していない。このため、訓練者が記録された位置情報の時間的変位 $x(t)$ を正確に知るためには $F_t = 0$ としなければならない。そのため、正確な情報を取得するためにも主体的な訓練は抑制する必要がある。また、内力が無視されている点や、知覚された情報から動きを再現する過程がない点などの検討の余地がある。

$$F_{disp} = F_e = m\ddot{x} \quad (4)$$

$$F_t = 0 \quad (5)$$

ここで、触るという行為について考える。Gibson[1]は“Active Touch”という、感覚における主体性を考慮にいたれた触覚を提案している。これは、触覚においては、その触覚を生起するであろう人間が能動的に対象に触れようとする運動そのものも同時に考慮に入れることが重要であるとする考え方である。すなわち、触るという行為には運動を伴うため、そのときに生起する運動指令も含めて考える必要があると主張している。我々はこの“Active Touch”の考え方に基づいて、技能学習においても訓練者の主体性が重要であるという仮定をおく。

我々の提案手法では、技能伝達を「熟練者の操作における情報を正確に訓練者が再現可能にする」とことと考える。そこで我々は、訓練者による主体的な訓練が可能で、作業における正しい力の使い方を修得できる教示手法を Haptic Teaching として提案し、このようなシステムを実現するため次にあげる訓練者操作時の2つの手法を組み合わせることを考える。

● 熟練者操作時

熟練者操作時の動作と内力 F_e を、力覚提示装置と力センサにより記録する。力覚提示装置は位置計測装置としてのみ用いる。

● 訓練者操作時

次の二つの方式を組み合わせる。

1. 熟練者の内力を逆方向に提示 (F_{opp})

事前に記録された熟練者の内力を、方向を

反転して提示する(図7)。

$$F_{opp} = -F_e \quad (6)$$

2. Virtual Fixtures(F_{vf})[5] を用いた軌跡提示

熟練者の軌跡情報 x_e を与える(図8)。

$$F_{vf} = -k(x - x_e)^3 \quad (7)$$

$$F_{disp} = F_{opp} + F_{vf} \quad (8)$$

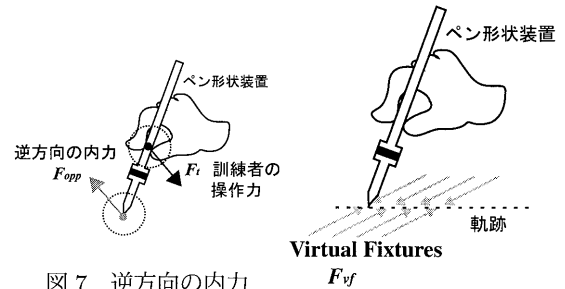


図7 逆方向の内力

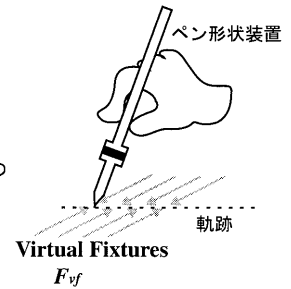


図8 Virtual Fixture

Virtual Fixtures[5]とは、実現したい空間移動に対するガイドとして働く力覚全般のことである。この手法では、力覚を利用して熟練者の移動する空間的位置情報を与えることができるため、訓練者が軌跡上を自由に操作できる。

2.のVirtual Fixturesの空間的位置情報を与えることのできる点を利用し、これと1.の内力の逆提示を加算して提示する。2.のVirtual Fixturesでは、今回は3乗のバネを用いている。これは、1.との力の独立性の確保および、自由度のある訓練を目的としている。力の独立性の確保とは、訓練者が熟練者軌跡上からはずれると、 F_{vf} は距離の3乗で力を発生するため、 F_{opp} とは明瞭に区別できることをさす。例えて表現するならば、 F_{vf} で敷かれたレールの上で、レールに沿った“力”と、レールという“軌跡”を学習するイメージである。また、自由度のある訓練とは、 k を選ぶことで、軌跡からのずれを認識させながらも、ある程度水平方向の動きを許容しながらの訓練を促すことを指す。レールの例でいうと、硬いV字のレールではなく、幅のあるU字溝をたどるイメージとなる。

1.の内力の逆提示の手法は[6],[2]らの研究に類似するが、方向を垂直方向に限定しない点、時間方向に対する自由度の点において先行研究と異なる。逆にいうと、提案手法では時間方向に対する自由度があるため、熟練者の動作を完全に再現するものとはなっていない。そこで今回は対象を書画などのように、視線が手元にある動作に限定することで視覚情報を補助情報

として利用する. すなわち, 熟練者の動作指標を訓練者の手元に表示した. これにより, 訓練者は, 表示される指標を目標とした主体的動作を行うことで, 時間方向に対する情報を得ることができる.

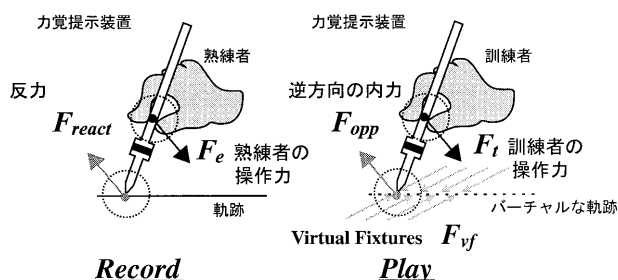


図9 提案手法

提案手法では, 技能記録時の熟練者の操作は普段と同じであり, 操作中に力センサを用いた内力記録を行う. 技能再生時には, 記録された内力を用いて熟練者の力情報を逆方向に提示する. また, 外力の結果として操作されるデバイスの位置変化を記録し, Virtual Fixtures を利用して軌跡として提示する (図 9).

我々のシステムでは, 訓練者の主体性に重点をおいている. そのため, 訓練者にはある目標をもった操作を促す. すなわち, 訓練者にはこの発生する内力を打ち消すように操作するように伝えられる. 1. 訓練者は発生する力を打ち消しながら操作を行うことにより, 結果として熟練者と同じ内力を主体的に発生させながら操作を再現することになる. また, 2. 軌跡からはずれた場合には Virtual Fixtures により軌跡に戻ろうとする力が加わり, 軌跡に関する情報も同時に訓練者には与えられる. これにより, 訓練者に主体性をもたせつつ, 軌跡情報と同時に熟練者の力情報を提示することが可能になる.

3 システム試作

これまでに述べてきたシステムのプロトタイプとして, 力覚3自由度の PHANToM Desktop と6軸力センサを用いた装置を作成した (図 3,10). この試作装置

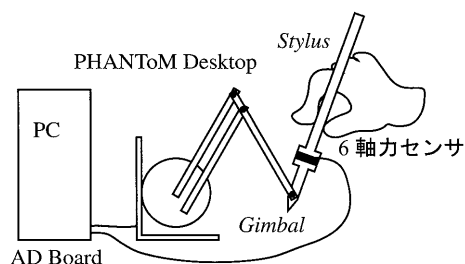


図10 プロトタイプシステム

を用い, 提案する教示手法として, 式 6,7を加算した

式 8を実装した. 軌跡提示には, 熟練者軌跡から垂直な方向にバネ定数 $k = 0.35 \times 10^{-3} [\text{N/m}]$ のバネ成分の力を働かせ, 力情報として, 力センサから得られる内力を用いた. 内力情報はあらかじめ装置座標系に変換したものをを用いた. また, 比較のための従来手法として, 先に述べた導引的手法, すなわち, 熟練者の動作を記録し, そのまま再生することで, 熟練者の位置, 時間情報を訓練者に伝える手法を実装した.

4 予備実験 -情報の伝達能力-

それぞれの手法による情報提示により, 記録された熟練者の操作時の位置情報および力覚情報が正しく訓練者に伝わるかどうかを調べるため, 試作装置を利用して下記の予備実験を実施した.

約 5cm 四方のギリシア文字の鏡文字一文字 (例: 図 11) を用意し, これを健常な二十代男性 1 名が筆記したときの位置および力情報を記録し, これを熟練者のデータとする. その後, 健常な二十代男性 4 名に同じ文字を提示し, これを提案手法と従来手法それぞれの方法により 5 回ずつ利き腕を使って訓練者として書字してもらった. このとき, 教示のためのそれぞれの手法を用いて訓練をしているときの力の履歴を記録し, これと熟練者の力の履歴とを比較する. 装置のペン先はボールペン形状とし, 熟練者のデータは普通紙紙面と同程度の摩擦面で記録した. 訓練者の訓練中のデータは, 従来手法では同じ摩擦面で, 摩擦を含めた力を再現する提案手法では摩擦のほとんどないガラス面で記録した.

得られた訓練中の力の時系列データと, 熟練者の力の時系列データをそれぞれ, 図 12のように軌跡に対し接線方向成分と, 法線方向水平成分, 法線方向垂直成分に分解する. その後それぞれに相関係数を算出し, これらを全ての被験者について平均をとり比較した結果が図 13である. 係数が 1 に近いほど熟練者の力と被験者の力の履歴が類似していることを示す. グラフを見てわかるとおり, 従来手法ではほとんど正確に伝わらなかった接線方向の力や, 法線方向水平成分の力も比較的伝えることができていることがわかる. このことから, 提案手法では熟練者の力情報も含めて訓練者に伝えることができることを確認した.

5 実験 -学習効果-

前節では提案手法を用いることにより, 熟練者の力情報が訓練者に伝達することが可能なことを確認した. そこで本節では, 伝えられた情報が訓練者に学習情報として伝わっているか, 言い換えれば, 訓練者に力情報が学習されたかを確認するため, 提案手法の学習効果についての実験を行う.

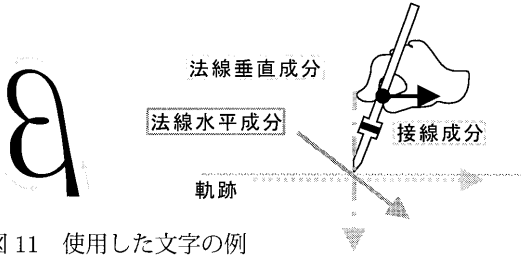


図 11 使用した文字の例

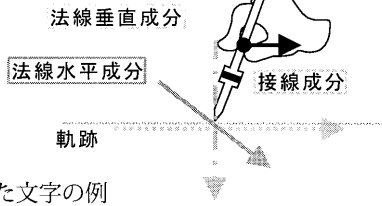


図 12 力の分割

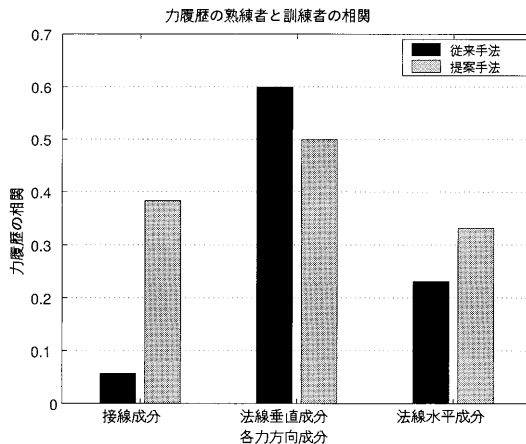


図 13 力履歴の相関

学習に用いる文字は、予備実験と同じものを用いた。すなわち、普段書き慣れないが、形を容易に覚えらるる文字として、ギリシア文字の鏡文字一文字とした。大きさは、約5cm四方を用いた。また、学習効果を正しく見積れるよう、被験者は利き腕ではない腕(右ききなら左腕)を用いて書字する。実験手順は以下のようにした。被験者は、実験前にまず提示装置自体および、今回利用した教手法それぞれについて3分ほど慣らされる。予備実験と同様に、装置のペン先はボールペン形状とし、熟練者のデータは紙面と同程度の摩擦面で記録した。訓練者の訓練は、各手法で最も効果の期待される状況を想定し、従来手法では同じように摩擦面で行い、摩擦を含めた力を再現する提案手法では摩擦のほとんどないガラス面で実施した。訓練者の訓練後のデータは熟練者と同じ摩擦環境で記録した。

はじめに文字形状のみを提示し、被験者はこれを10回ほどなぞり、視覚、体性感覚で形を覚える。直後に同じ字を3回ずつ書く。これは学習をしていない状態として1回目のデータとする。以降被験者は提案手法もしくは従来手法にて10回ずつ練習し、その後、練習で得られた情報をもとに3回ずつ同じ字を書く。これを1セットとして5セットくりかえし、各セットの練習後のデータを2~6回目のデータとする。練習時には、いずれの手法とも力覚情報に加えて、手本とし

ての熟練者の文字情報と、自らの書いた文字情報を視覚情報としても提示する。これらのデータをもとに学習効果の段階的成果を比較した。なお、記憶の影響を排除するため、それぞれの手法は3~4日以上おいて測定した。以上の実験を健康な二十代男性7名について行った。

熟練者情報と訓練者の情報の時間的整合性をとるため、位置情報に基づくDPマッチングを行う。DPマッチングとは、音声認識などに使われる手法であるが、今回は熟練者情報と訓練者情報の時系列の整合性をとるために用いる。熟練者、訓練者のそれぞれの動作から得られる位置情報に基づきDPマッチングを行い、得られたマッチングパス上での位置および力の平均誤差を1試行ごとに算出した(図14はマッチングの一例)。誤差は発揮される力により異なるため、それぞれの時間における力に対する誤差の割合を見積ることを目的として、力に対する誤差の比をとり、この平均および分散をプロットした。

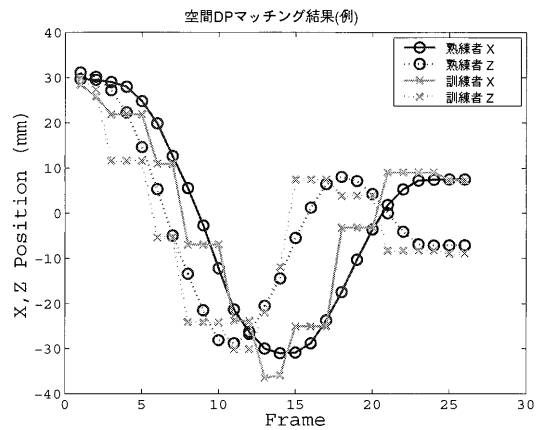


図 14 パス上での X,Z 位置変化例

結果を以下(図15,16,17,18)に示す。それぞれ縦軸にDPマッチング後のパス上でのフレームごとの誤差、横軸に実験前を含む1セットごとの書字結果となる。×点線が従来手法を示し、○実線が提案手法を示している。図15は位置誤差の推移、図16は法線方向垂直成分の力の誤差の推移、図17は法線方向水平成分の力誤差の推移、図18は接続方向成分の力誤差の推移を示す。この図では、試行回数とともに誤差の比が減少しているとき、学習が進んだことを示している。

6 考察

予備実験の結果(図13)より、提案手法では熟練者の力情報も含めて訓練者に伝えることができることを確認した。

また、本実験のそれぞれの結果について考察を加える。まず、全体に多く見られる従来手法における誤差

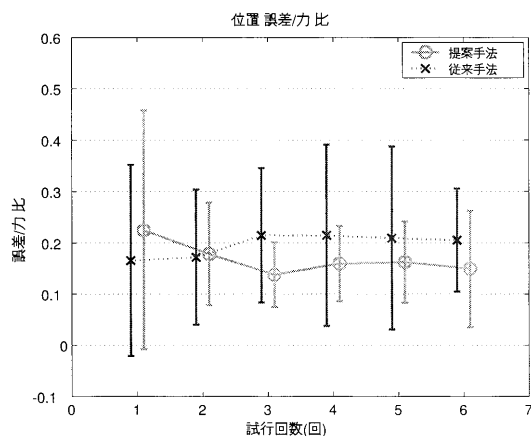


図 15 位置についての学習曲線

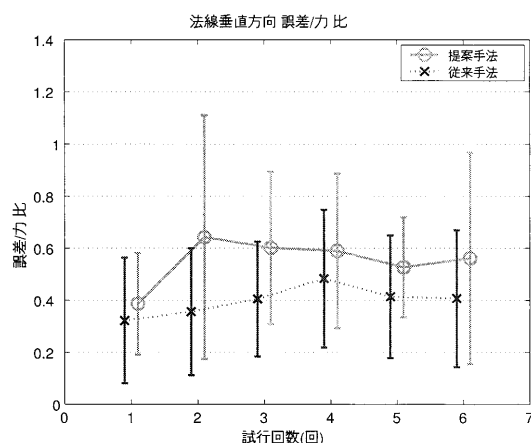


図 16 法線垂直力についての学習曲線

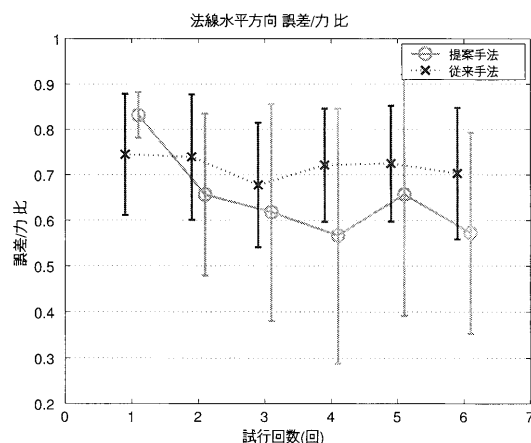


図 17 法線水平力についての学習曲線

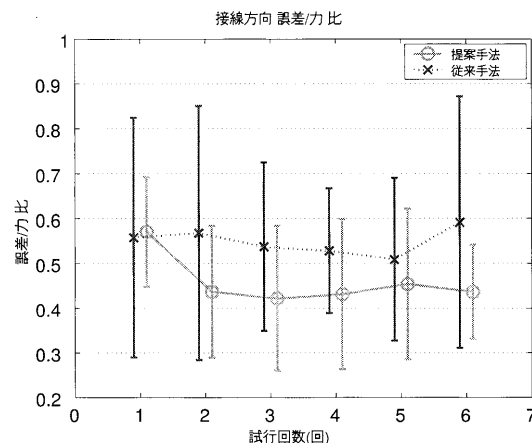


図 18 接線力についての学習曲線

の増加傾向は一考する必要がある。これは本実験を利き腕ではない方の腕により実施したために発生したものと考える。すなわち、器用に動かすための動作モデルの確立していない腕による学習のため、従来手法では動作を再現すること自体が難しい課題であったということである。

図 15をみると、位置に関して、学習が進行していることがみてとれる。これは、もともと位置制御の難しい課題にもかかわらず、提案手法では主体的な動作を実現したことにより、体性感覚による記憶が進んだためと考えられる。

法線方向垂直成分の力に関しては、減少傾向を示さず被験者ごとに学習にばらつきがみられた(図 16)。これは、垂直方向に関しては、文字の描画ガラス面上にペンを押しつけさせながら学習を行ったので、提示される反力よりも押しつける度合を強くしてしまったなど、被験者による操作のばらつきの自由度が存在したためと考えられる。

図 17,18から、法線方向水平成分および、接線方向成分の力に関しては学習が進行していることがみてとれる。これは、従来手法では熟練者の動作情報に導引される形となるため、法線方向水平成分および、接線方向成分に関しては力の情報は与えられない。一方、提案手法では力の情報が得られること、得られた情報に基づく主体的動作による訓練を行うことにより、力そのものの直接的な使い方に関して学習が進んだことの結果と考えられる。一般に、書画は2次元運動であることから、運筆作業においては水平方向の力の使い方の占める割合が大きいと考えられる。その意味においてこの結果は、書画における提案手法の有効性を示したものと考える。

残るもう一つの方向に関して、今回の実験では法線垂直方向成分に関してはガラス面への押し付けという

方法を用いたが、これがゆえにこの方向に関する力提示の正確性を失ったと考えられる。このような方法を用いた理由は、この方向の力は比較的強く、安定した力であり、我々の力覚提示装置では能力を越えていたためである。本来であれば提案手法は力覚提示装置だけでも表現可能であるため、力覚提示装置のみによる表現が可能になれば、この方向に関する力提示もより改善すると考える。

ここで、データの信頼性を検証するため、に接線方向成分に関するデータを分散分析し、有意差検定を行った。6回目のデータから、表1のような結果となり、 $F_{0.05}(1, 32) = 4.149$ であるから、両学習手法の効果に有意な差があることがわかる。同様に法線水平方向成分についても有為であることを確かめた。

表1 6回目のデータによる分散分析表

要因	平方和	自由度	平均平方	F 値
学習手法	$S_A = 0.1959$	$\nu_A = 1$	$V_A = 0.1959$	$F = 4.3481^*$
誤差	$S_e = 1.4414$	$\nu_e = 32$	$V_e = 0.0450$	
計	$S_T = 1.6372$	$\nu_T = 33$		

7 まとめ

力覚における教示に主体性を導入し、訓練者の主体性を重視する Haptic Teaching を提案し、これを実装した。また、これまでの学習で実現が難しかった力情報と位置情報の同時提示を実現した。このための力覚提示手法として 1. 熟練者力情報の逆提示, 2. Virtual Fixtures の利用について述べた。そして、これらの教示システムを用いた実験を通じて、位置情報と力情報の伝達が可能であること、形状だけではなく、力覚を含む学習が可能であり、力覚教示における主体的動作が有効であることを示した。

今後は実作業の応用として、筆記などの 2 次元的作业にとどまらず、ナイフや彫刻刀などによる物体の切削など、3 次元空間を利用した作業、6 自由度力覚提示装置を利用したときのトルクの利用方法についても検討したい。

参考文献

- [1] J. J. Gibson. Observations on active touch. *Psychol. Rev.*, Vol. 69, pp. 477-491, 1962.
- [2] Henmi K. and T. Yoshikawa. Virtual lesson and its application to virtual calligraphy system. In *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998.
- [3] Ryo Kikuuwe and Tsuneo Yoshikawa. Haptic display device with fingertip presser for motion/force teaching to human. In *Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 868-873, 2001.

- [4] Y. Kuroda, M. Nakao, T. Kuroda, H. Oyama, M. Komori, and T. Matsuda. Interaction model between elastic objects for accurate haptic display. In *Proc. of 13th International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pp. 148-153, 2003.
- [5] L. Rosenberg. Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation. In *Proc. of IEEE Virtual Reality Int'l. Symposium*, pp. 76-82, 1993.
- [6] Y. Yokokohji, R. Hollis, T. Kanade, and K. Henmi. Toward machine mediated training of motor skill. In *Proc. of the IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 32-37, 1996.

(2005 年 4 月 16 日受付)

[著者紹介]

嵯峨 智 (学生会員)



2000 年東京大学大学院工学系研究科修了。同年セコム株式会社研究員、2004 年東京大学大学院システム情報学系研究科博士課程入学、現在に至る。力覚教示に関する研究に従事。

川上 直樹 (正会員)



平 8 東工大・理工・電気電子修士課程終了。平 11 東大・工・先端学際工学博士課程終了。工博。同年同大学院・工・計数工助手。平 14 同大学院・工・計数工講師。バーチャルリアリティの研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会会員。

館 暲 (正会員)



昭 43 東大・工・計数卒。昭 48 同大学院博士課程了。工博。同年同大助手。昭 50 通産省工技院機械技研研究員、マサチューセッツ工科大学客員研究員を減て平 1 東大先端科学技術センター助教授、平 4 同センター教授。平 6 同大学院・情報理工・システム情学先行教授。トレイグジスタンス、人工現実感の研究に従事。IEEE/EMBS 学会賞、通産大臣賞、国際計測連合 (IMECO) 特別勲功賞など受賞。IMEKO ロボティクス会議議長、SICE フェロー、日本バーチャルリアリティ学会初代会長。