

## 基礎論文

# Haptic Video

## —インピーダンス情報を活用した作業環境記録再生手法—

嵯峨 智<sup>\*1</sup>, 梶本 裕之<sup>\*1</sup>, 舘 暲<sup>\*1</sup>

### Haptic Video

—Recording and Playing System of Working Environment utilizing Impedance Information—

Satoshi Saga<sup>\*1</sup>, Hiroyuki Kajimoto<sup>\*1</sup>, and Susumu Tachi<sup>\*1</sup>

#### Abstract

Recent years there are many haptic devices in the world, though few working environments are archived. This is because the difficulty of composing these working environment. Examples of the difficulties are the target modeling, physical modeling and graphics creation based on modification of an object, etc. Then we propose a haptic recording and reproducing system for training that uses a very simple algorithm called “Haptic Video.” We use a visual camera, force sensor, impedance-based environmental reproducing algorithm and a trajectory displaying method. By using this system the operator has to do all is to operate his ordinal operation. In reproducing phase the displaying information are calculated from recorded one and the operator can feel the environmental visual and haptic information as it is and can train himself about the recorded handwork skills.

**Keywords** : Haptic Display, Impedance Model, Virtual Fixture, Haptic Video

#### 1 背景

現在、力覚提示装置を用いた訓練システムが実用を指向して開発されるようになってきた。しかしながら、実際の作業環境を構築することは時間と手間のかかるものになっている。力覚提示装置を用いた訓練のための作業環境を構築する手段は大きく二つの手法に分類される。一つはシミュレーションを用いる手法、もう一つは実際の環境の情報を記録し、これを加工して提示する手法である。

シミュレーションを用いる手法は対象のモデリングにはじまり、物理モデリング、対象の変形に基づくグラフィクス作成と、多くの工程を必要とする。このようなモデリングに利用される手法として、有限要素法を用いた物理シミュレーションに基づくものがはじめにあげられる。これは、対象に対する正しい物理モデルが存在すれば、逐次計算により現象を精度よく再現することができ、さらに変形に関しても物理シミュレーションに基づく変形結果をそのまま視覚情報として利用することができる [3]。しかしながら、反力計算に要する計算コストが高いことや、実装自体が煩雑であることから利用されるシーンは限定されたものとなっている。

一方、シミュレーションにおいてより簡便な手法のため多く用いられているものとして、インピーダンス情報を用いて反力を計算するモデルがある。これは、式1のようにバネ  $k$ 、マス  $m$ 、ダンパ  $d$  で表されるインピーダンス要素で物理的な性質を書きあらわすものである。

$$\vec{F} = m\ddot{\vec{x}} + d\dot{\vec{x}} + k\vec{x} + \vec{C} \quad (1)$$

これらのインピーダンス情報を用いたシミュレーションは簡便であるとはいえ、ある現実環境を作りこむためには、環境に存在する物体それぞれをモデリングし、それぞれの係数を定義する必要がある。また変形を視覚的に表現するためには変形自体を別途モデル化し表現する必要がある。さらに、環境が変化するたびにモデルを構築し直さなければならない。このため、簡便な方法とはいえ、相応のプログラム能力と時間を要するものとなっている。

また、現実環境を記録、再生する手法についても研究がなされている。Henmiら [1] 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。また、Yokokohjiら [7] は Computer Graphics(CG) による視覚と記録された力覚を組み合わせたさまざまな手法を提案している。手法の一つには CG による視覚手掛りと逆向きの力を用いた手法などもある。また、Kikuuweら [2] は提示装置の背面か

<sup>\*1</sup>東京大学大学院 情報理工学系研究科

<sup>\*1</sup>Department of Information Physics & Computing, Institute of Information Science and Technology, The University of Tokyo

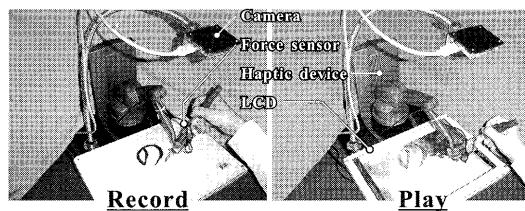


図1 Haptic Video  
Fig.1 Haptic Video

ら指を圧迫する力を利用することで、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。これらは環境を再現するという方向性より、技能教示の側面を強く持っている。そのため、通常の作業では現実には起こらない力覚的な現象を作り出すこととなる。この意味で環境を表現するという面ではやや不自然なものとなる。

また、実物体の物理的特性をとりこむシステムとして、Paiら[4]は、ロボットアーム、力センサ、3Dカメラを用いたシステムを提案している。これは実画像を用い、実際の力センサの出力を利用している。しかしながら、対象を一様な弾性体と仮定してグリーン関数から力情報を再現しており、対象を物体ひとつに限定したシステムとしては完成度は高いが、作業環境をとりこむという意味においては充分とはいえない。嵯峨ら[6]は記録された情報を逆向きに提示する手法を提案しているが、この研究も技能伝達の側面が強く、再生時の操作者の操作速度、加速度によらず同じ力を返す点、実作業環境の視覚的な手掛りが得られない点など、訓練のための作業環境を構築するという意味においては不足がある。

我々はこのような現状を踏まえ、シミュレーションなどによる手法に比べ、より簡便な方法で現実環境をとりこみ、これを再現する手法として、嵯峨ら[6]の手法を基礎として用いることで、視覚情報と力覚情報を同時に記録し再生することのできるシステム、Haptic Videoを提案する(図1)。

## 2 作業環境のための記録情報の再生

はじめに、我々が再現を目指す作業環境と、必要な情報を規定する。対象とする作業はペンによる筆記、ナイフや彫刻刀による切削など、限定された平面作業台上で道具を用いて行うものとする。これは、現存する力覚提示装置を利用した作業として最も適しており、なおかつ人が行なう作業の多くがこのように道具を用いた作業であるためである。

これらの作業は道具にかかる反力を知覚しながら、自らの操作による結果を目視確認しながら進める作

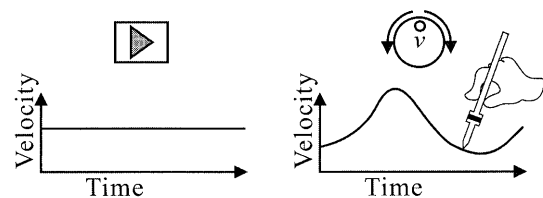


図2 道具の動きをトリガとした映像情報  
Fig.2 Visual information triggered by a movement of a tool

業であると言いかえることができる。すなわち、視覚と力覚の情報は必須の条件となる。そこで今回は上述のような作業環境として、視覚については有限要素法などの変形を伴うシミュレーションのように、作業に基づく形状変化を記録し再生すること、力覚についてはシミュレーションとして構築される最も単純な仮想環境である、インピーダンス情報に基づく環境と同等な情報を現実環境から記録し、再生することを目指す。

視覚や力覚を記録する手法については、作業環境から得られる情報として、作業対象の手元を写した映像情報と、道具を介して伝わる力覚情報を統合して利用することとした。これにより、CGなどの作り込みをすることなく実際の作業における対象の変化を画像として記録する。また、力覚情報を力センサを用いて記録することにより、力覚提示装置への提示情報として利用できる。

では、これらの情報をどのように提示すれば、自然な形での作業環境提示といえるだろうか。

### 2.1 視覚情報の再生

作業において対象や環境から与えられる情報を次のように分類して考える。

- 光、音など受動的な情報
- 道具を介して伝わる力などの能動的な情報

ここでの受動的、能動的という分類は、作業環境と操作者の入出力を考えたときの分類である。すなわち、何らかの作業において、環境への作用は操作者からの直接の能動的入力によりもたらされ、その結果としての環境の変化が視覚、聴覚などへの感覚となって伝わる。我々はこの点に着目し、取得された動画視覚情報を提示する際のトリガとして、能動的入力の結果としての道具の動きを利用する(図2)。すなわち、操作者が行った動作をジョグダイヤルでのビデオ操作になぞらえ、記録された映像情報の再生速度を変化させ、これにより再生時の操作者の動作と映像中の動作の同期をとる手法を提案する。このためのトリガ入力となる位置情報については、力覚提示装置の各関節のエン

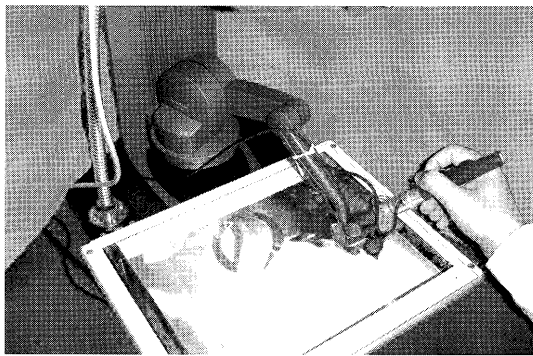


図3 再生時の様子  
Fig. 3 Overview of a playing phase

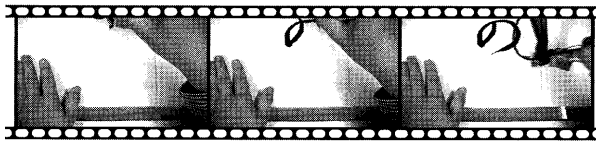


図4 再生される映像  
Fig. 4 Playing images

コード情報を用いる。これにより、位置情報と映像情報のリンクを作り、位置情報に基づく映像情報を提示する(図3,4)。

## 2.2 力覚情報の再生

力覚情報は力センサを用いて記録される。また、力覚提示装置のエンコーダ情報から、位置情報もあわせて取得される。これにより位置に基づく力情報を構成する。

### 2.2.1 環境のインピーダンス

記録されている力情報  $\vec{F}_r$  について検討する。力をインピーダンス情報で表現すると、式2のようになる。このときのインピーダンス情報は図5に示すように、環境側のインピーダンスを示すものとする。また、本論文での全てのベクトル同士の積はベクトルの要素ごとの積を表すものとする。すなわち、それぞれの式は空間3軸の各成分ごとに成立する独立な式を意味する。

$$\vec{F}_r(\vec{x}, t) = \vec{k}(\vec{x}) \cdot (\vec{x} - \vec{x}_0) + \vec{d}(\vec{x}) \cdot \dot{\vec{x}} + \vec{m}(\vec{x}) \cdot \ddot{\vec{x}} + \vec{C}(\vec{x}) \quad (2)$$

各インピーダンス情報を知ることにより、提示すべき力覚情報として正しい提示が可能となる。このとき式2をみると、 $\vec{k}(\vec{x})$ ,  $\vec{d}(\vec{x})$ ,  $\vec{m}(\vec{x})$ ,  $\vec{C}(\vec{x})$  に加え、 $\vec{x}_0$  が未知数であり、これも  $\vec{x}$  の関数であると仮定すると、 $\vec{x}_0$  が求められない。そこで、計算を簡略化するため、式2を時間微分した式3を利用する。

$$\frac{d\vec{F}_r(\vec{x}, t)}{dt} = \vec{k}(\vec{x}) \cdot \frac{d\vec{x}}{dt} + \vec{d}(\vec{x}) \cdot \frac{d^2\vec{x}}{dt^2} + \vec{m}(\vec{x}) \cdot \frac{d^3\vec{x}}{dt^3} \quad (3)$$

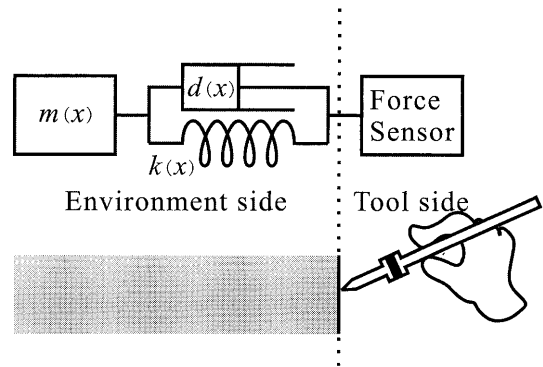


図5 環境のインピーダンス  
Fig. 5 Impedance of an environment

ある時間間隔  $\Delta t$  の間は  $\vec{k}(\vec{x})$ ,  $\vec{d}(\vec{x})$ ,  $\vec{m}(\vec{x})$ ,  $\vec{x}_0(\vec{x})$ ,  $\vec{C}(\vec{x})$  が一定であると仮定し、 $\Delta t$  内の時間  $t = t_0, t_1, t_2$  での値を用い、式3を連立して  $\vec{k}(\vec{x})$ ,  $\vec{d}(\vec{x})$ ,  $\vec{m}(\vec{x})$  を解く。

再生時に提示すべき力  $\vec{F}_p$  を算出するためには、得られた  $\vec{k}(\vec{x})$ ,  $\vec{d}(\vec{x})$ ,  $\vec{m}(\vec{x})$  における  $\vec{x}_p$  に最も近い  $\vec{x}_r$  での値を用い、さらに  $\vec{k}(\vec{x}_p) = \vec{k}(\vec{x}_r)$ ,  $\vec{d}(\vec{x}_p) = \vec{d}(\vec{x}_r)$ ,  $\vec{m}(\vec{x}_p) = \vec{m}(\vec{x}_r)$  を仮定すると、式5を得る。

$$\begin{cases} \vec{F}_r(\vec{x}_r, t) = \vec{k}(\vec{x}_r) \cdot (\vec{x}_r - \vec{x}_0) + \vec{d}(\vec{x}_r) \cdot \dot{\vec{x}}_r \\ \quad + \vec{m}(\vec{x}_r) \cdot \ddot{\vec{x}}_r + \vec{C}(\vec{x}_r) \\ \vec{F}_p(\vec{x}_p, t) = \vec{k}(\vec{x}_p) \cdot (\vec{x}_p - \vec{x}_0) + \vec{d}(\vec{x}_p) \cdot \dot{\vec{x}}_p \\ \quad + \vec{m}(\vec{x}_p) \cdot \ddot{\vec{x}}_p + \vec{C}(\vec{x}_p) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \vec{F}_p(\vec{x}_p, t) &= \vec{F}_r(\vec{x}_r, t) \\ &\quad + \vec{k}(\vec{x}_r) \cdot (\vec{x}_p - \vec{x}_r) \\ &\quad + \vec{d}(\vec{x}_r) \cdot (\dot{\vec{x}}_p - \dot{\vec{x}}_r) \\ &\quad + \vec{m}(\vec{x}_r) \cdot (\ddot{\vec{x}}_p - \ddot{\vec{x}}_r) \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2.2 提示力の意味

得られる力情報の意味するところを考える。 $\vec{F}_r$  は、記録時の操作者の加えた力である。 $\vec{F}_r$  には、拮抗する環境からの反力と、環境に仕事をする力が含まれる。拮抗する環境からの反力は内力と呼ばれるものであり、環境に仕事をする力は外力と呼ばれるものである。

我々の目標は、訓練のための環境を再現することであるので、この記録された操作者の力を反転させ、環境からの反力と環境に対して仕事を行った力を用い、内力と外力を再生時に操作者に提示する。これが式5の第1項の意味である。この記録された力の反転が環境の反力になる性質が力覚の主体性 [6] であり、これを利用する。

$$\vec{F}_p(\vec{x}_p, t) = \vec{F}_r(\vec{x}_r, t) \quad (6)$$

しかし、内力と外力の和を位置の関数として提示する場合、記録時と再生時の操作者の速度、加速度の違い

がある場合でも、再生時の操作者の位置により力が生成されるため、速度や加速度に応じた適切な環境再現にならない。

この問題を解消する一つの手段として、今回は補助的な情報として、記録時の操作者の速度情報をポイントとしてCGを用いて提示している。再生時に操作者はこれを追うことで記録時、再生時の速度情報をあわせることができる。

しかし、環境再現という側面からみた場合、速度、加速度を規定してしまう状況は好ましくない。そこで、外力を操作速度により変化させる役割を果たすものが式5の第2項以降である。 $\Delta t$ 時間間隔でのインピーダンス情報が等しいことを仮定し、予め記録された情報から  $\vec{k}(\vec{x})$ ,  $\vec{d}(\vec{x})$ ,  $\vec{m}(\vec{x})$  を算出する。このインピーダンス情報をもとに、再生時の操作に応じた適切な外力を生成する。

また、位置情報から、記録時の操作者の道具の軌跡情報が得られるので、この情報を積極的に利用する。我々の考えるシステムは、ある作業をそのまま記録し、再生するシステムである。そのため、記録された軌跡における情報は持っているが、それ以外の情報を持っていない。そのため、この軌跡情報を利用し、軌跡以外のルートを辿らないようにする必要がある。このために利用するのが Virtual Fixtures [5] というものである。Virtual Fixtures 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、力覚を利用して記録時の操作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、再生時に操作者が目標動作軌跡上を自由に操作できる。

同時に、記録された位置情報をCGを用いて実画像に重畳し、視覚情報としても軌跡を表示する。これにより、操作者は実画像に重畳された軌跡を参照しながら、これを辿ることにより作業環境を再現する。

提案モデルは単純なインピーダンスモデルを用いていることから、クーロンの摩擦モデルに代表される最大静止摩擦力と動摩擦力の切り替えのような、力の条件により動的に変化する力覚生成はできない。しかしながら位置の条件によるインピーダンスの切り替えをしているので、通常の動摩擦や、粘性摩擦のような性質を包含することは可能である。

提示する力についてまとめると下記のようなになる。

### 1. 操作時の力を逆方向に提示

事前に記録された操作時の力を、方向を反転して提示する。

$$\vec{F}_d = -\vec{F}_r \quad (7)$$

### 2. インピーダンス情報による力補正

得られた  $\vec{k}(\vec{x})$ ,  $\vec{d}(\vec{x})$ ,  $\vec{m}(\vec{x})$  と、再生時の位

置、速度、加速度に基づき補正すべき力  $\vec{F}_c$  を計算する。

$$\begin{aligned} \vec{F}_c = & \vec{k}(\vec{x}_r) \cdot (\vec{x}_p - \vec{x}_r) \\ & + \vec{d}(\vec{x}_r) \cdot (\dot{\vec{x}}_p - \dot{\vec{x}}_r) \\ & + \vec{m}(\vec{x}_r) \cdot (\ddot{\vec{x}}_p - \ddot{\vec{x}}_r) \end{aligned} \quad (8)$$

### 3. Virtual Fixtures [5] を用いた軌跡提示

記録時の軌跡情報  $\vec{x}_r$  を与える。

$$\vec{F}_{vf} = -K \cdot (\vec{x}_p - \vec{x}_r)^3 \quad (9)$$

$$\vec{F}_d = -\vec{F}_r + \vec{F}_c + \vec{F}_{vf} \quad (10)$$

なお、1. および 3. の手法に関しては [6] と同じ手法を用いた。

### 3 システム試作および記録、提示の流れ

これまでに提案した作業環境を記録する手法として、力センサとカメラ、力覚提示装置を用い、力、位置、画像情報を得ることとした。今回は CPU Pentium4 2.8GHz, メモリ 512MB のPCを用い、カメラは IEEE1394 カメラとして PointGray 社 DragonFly を、力センサとしてビーエルオートテック社の 6 軸力センサ NANO SENSOR を、力覚提示装置として SensAble 社の PHANToM Desktop を用いた。また、 $\Delta t = 100$  [ms] として、 $t_2$  を中心に  $t_1 = t_2 - 50$  [ms],  $t_3 = t_2 + 50$  [ms] としてインピーダンス情報を算出した。あわせて、空間的連続性を確保するため、得られた各位置でのインピーダンス情報の前後  $\pm 250$  [ms] 分を各パラメータごとに平均化して利用した。各インピーダンス情報は 100 [Hz] で取得している。力覚の制御ループは 1 [kHz] であるので、得られたインピーダンス情報を補間して用いる。また、式9の  $K$  として今回は  $\frac{|\vec{F}_r(\vec{x}_r)|}{30}$  を用いた。すなわち、その場所における記録された力の 1/30 を係数とする反力が距離の三乗に応じてかかることになる。さまざまな道具を用いた作業環境を取得できるよう、力覚提示装置の先端に各種デバイスを付加できるようにし、また、力センサが環境と操作者の内力を測定できるよう、力センサを配した(図6)。再生時には力覚提示装置と液晶ディスプレイを用い、それぞれの情報を提示した。以上のような構成により位置、力、操作者の視覚情報を記録し、作業環境の情報を再現する。

このとき、記録時に得る視覚情報は記録時の操作者の視点が理想的であるが、記録時に操作者の作業の妨げにならないよう、視点に十分近い位置にカメラを設置した(図1,7)。また、記録時にも力覚提示装置を用い

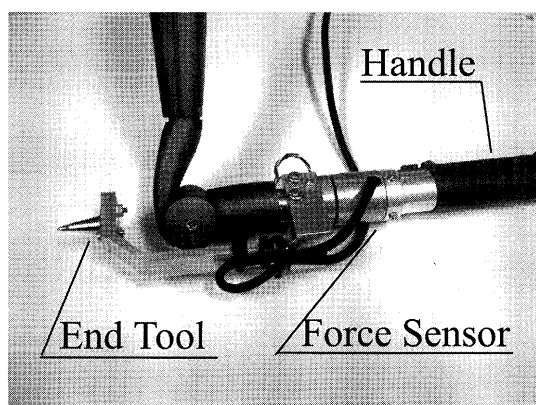


図6 力覚提示装置先端

Fig. 6 The tip of the haptic display

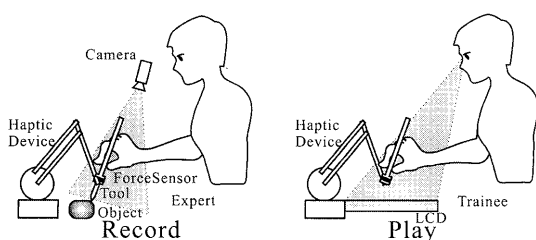


図7 装置の構成

Fig. 7 Components of the system

ているが、このときは力覚提示装置自体の自重をキャンセルするだけの力を働かせるほかは位置取得のためのエンコーダとしてのみ動作させる。

記録、再生の流れを順を追って説明する。

#### ● 記録時

1. 操作者はツールのついた力覚提示装置を用いて、通常どおり作業を行う。
2. カメラ、力センサ、力覚提示装置はそれぞれ記録時の作業中の操作者の手元画像、力覚情報  $\vec{F}_r$ 、位置情報  $\vec{x}_r$  を取得する

#### ● 再生時

1. 記録された位置情報から記録時の操作速度  $\dot{\vec{x}}_r$ 、加速度  $\ddot{\vec{x}}_r$  を計算する
2.  $\Delta t$  近傍の点で環境のインピーダンス情報  $\vec{k}(\vec{x})$ ,  $\vec{d}(\vec{x})$ ,  $\vec{m}(\vec{x})$  が等しいと仮定し,  $\vec{k}(\vec{x})$ ,  $\vec{d}(\vec{x})$ ,  $\vec{m}(\vec{x})$  を計算する
3. 再生時の位置情報  $\vec{x}_p$  から, 速度  $\dot{\vec{x}}_p$ , 加速度  $\ddot{\vec{x}}_p$  を計算し,  $\vec{k}(\vec{x})$ ,  $\vec{d}(\vec{x})$ ,  $\vec{m}(\vec{x})$  を用いてインピーダンス情報による補正すべき力  $\vec{F}_c$  を計算する。
4. 再生時の位置情報  $\vec{x}_p$  に最も近い記録時の位置  $\vec{x}_r$  から得られる  $\vec{F}_r$  と, 再生時の位

置情報  $\vec{x}_p$  から計算される  $\vec{F}_{vf}$  と  $\vec{F}_c$  をあわせ, 操作者に力覚提示装置を介して提示する。

5. 位置 ( $\vec{x}_p$ ) に最も近い記録時の位置 ( $\vec{x}_r$ ) から得られる画像情報を LCD を介して操作者に提示する。

## 4 記録情報の再現性

視覚情報と力覚情報のそれぞれについて, 記録された情報を提案手法を用いて再生したときの情報を, 実環境との比較を通して再現性を確認する。

### 4.1 視覚情報の再現性

提案手法における視覚情報の再現性について, 実際の視点での画像と比較する。平面上の作業として, 書道を用いて実環境と比較した。図8,9をみると, 再生



図8 記録時の視点映像

Fig. 8 The image from the operator's viewpoint in a recording phase

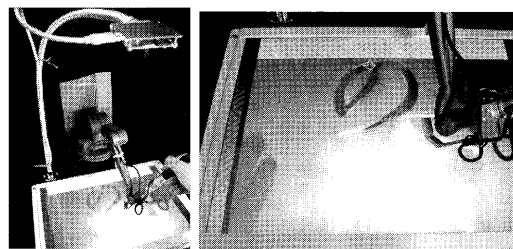


図9 再生時の視点映像

Fig. 9 The image from the operator's viewpoint in a playing phase

時に記録時の環境を模した視覚情報を得られていることがわかる。しかし明るさに関しては今回用いた LCD パネルが薄型の輝度の低いものを用いたため, 実環境と比べると暗くなっている。また, 今回のカメラ画像のフレームレートは平均 11 [fps] であり, 再生時の操作者の動きにあわせて画像は変化するものの, ややコマ送りの視覚情報になり時間的に十分なめらかな視覚情報再現には至っていない。これらの問題に関しては, LCD やカメラ, 計算機などのハードウェアの個々の性能を向上することで解決することができると考え

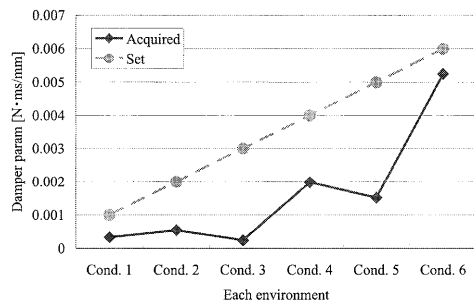


図 10 バーチャル粘性環境でのダンパ定数  
Fig. 10 Damper constant in the virtual viscous environment

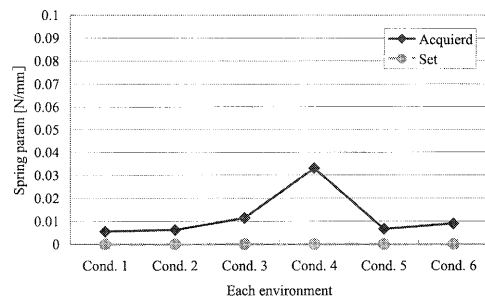


図 11 バーチャル粘性環境でのバネ定数  
Fig. 11 Spring constant in the virtual viscous environment

る。また、記録時のカメラ中心と、再生時の操作者の視点は一致していないため、得られる画像は厳密には異なるが、今回作業対象とした平面上作業においては大きな支障を及ぼすことはなかった。

#### 4.2 力覚情報の再現性

提案手法における力覚情報の再現性について検証する。バーチャル環境下での実験として、バーチャルシミュレーション環境をつくり、この環境内での操作により提案手法を用いて得られるインピーダンスパラメータと、シミュレーション設定値とを比較し、値の類似性を調べる。実環境下での実験として、インピーダンス情報の特徴的な実環境をつくり、この環境内での操作により提案手法を用いてインピーダンスパラメータを得る。このパラメータを用いて操作条件を変えたときの力覚情報と、実際に操作条件を変えたときの力覚情報とを比較し、値の類似性を調べる。簡単のため、今回は式 1 のうち、弾性と粘性を実装したものをを用いた。

##### 4.2.1 バーチャル環境での再現性

バーチャルシミュレーション環境として、一定粘性環境と、一定反力環境の移動作業を選んだ。作業としては、左から右にツールを動作させるだけの単純なものとし、このときのバーチャル環境におけるバネ定数、ダンパ定数と、提案手法により作業で得られたバネ定数、ダンパ定数を比較する。

まず、一定粘性環境として、式 11 で表せる環境をシミュレーションにより力覚提示装置で生成し、この環境中を左から右にツールを 250 [mm] 程度動作させる。今回はダンパ定数  $D$  を 0.001 [N·ms/mm] から 0.006 [N·ms/mm] まで変化させる。このときの条件をそれぞれ 0.001 [N·ms/mm] を条件 1、0.006 [N·ms/mm] を条件 6 とし、0.001 [N·ms/mm] 刻みに間をそれぞれの数字であらわした条件下で実験を行う。このときに式 3 に基づき、バネ定数  $\vec{k}(\vec{x})$ 、ダンパ定数  $\vec{d}(\vec{x})$  が得られる。得られた定数の速度の安定したと考えら

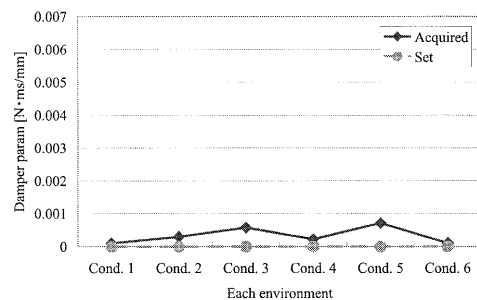


図 12 バーチャル一定反力環境でのダンパ定数  
Fig. 12 Damper constant in the virtual constant reactive force environment

れる作業中盤 1/3 における行程の最大値をとる。設定した条件を横軸、条件における設定値と、計算により得られた定数を縦軸として、それぞれをプロットした (図 10, 11)。

図 10 より、完全にダンパ定数を再現するまでは至らないものの、条件の変更に伴いダンパ定数が増加していく様子を再現できている。また、図 11 より、バネ定数についても完全には値を再現していないが、0 付近から逸脱しない様子が再現できている。

$$\vec{F} = -D \frac{d\vec{x}}{dt} \quad (11)$$

続いて、一定反力環境として、式 12 で表せる環境を力覚提示装置で生成し、この環境中を左から右にツールを 250 [mm] 程度動作させる。今回は定数  $E$  を 0.1 [N] から 0.6 [N] まで変化させる。このときの条件をそれぞれ 0.1 [N] を条件 1、0.6 [N] を条件 6 とし、0.1 [N] 刻みに間をそれぞれの数字であらわした条件下で実験を行う。このときに式 3 に基づき、バネ定数  $\vec{k}(\vec{x})$ 、ダンパ定数  $\vec{d}(\vec{x})$  が得られる。得られた定数の速度の安定したと考えられる作業中盤 1/3 における行程の最大値をとる。設定した条件を横軸、条件における設定値と、計算により得られた定数を縦軸

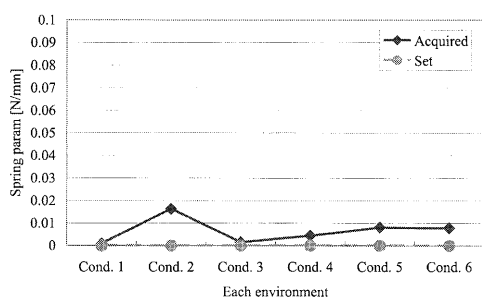


図 13 バーチャル一定反力環境でのバネ定数

Fig. 13 Spring constant in the virtual constant reactive force environment

として、それぞれをプロットした (図 12,13).

図 12 より, 完全にダンパ定数を再現するまでは至らないものの, 0 付近から逸脱しない様子が再現できている. また, 図 13 より, バネ定数についても完全には値を再現していないが, 0 付近から逸脱しない様子が再現できている.

$$\vec{F} = -E \frac{d\vec{x}}{dt} \quad (12)$$

#### 4.2.2 実環境での再現性

実際の環境としては, バーチャル環境と対応がとれる作業として, 粘性流体中と, 摩擦板上の筆記作業を選んだ. 作業としては, 左から右にツールを 250 [mm] 程度動作させるだけの単純なものとし, インピーダンス情報を取得する. 得られたインピーダンス情報に基づき, 移動方向について速度を変化させ, 速度に対する力覚の再現性を検証する. 具体的には, 実際にある平均速度で動かしたときの力覚の平均値と, ある速度におけるインピーダンス情報に基づいたバーチャルに作られた力覚の平均値を比較する.

はじめに, 粘性流体中の移動における力覚を測定する. 粘性流体として, 水 200 [g] に対し, 200 [g] の小麦粉 (薄力粉) を溶いたものを用いた (図 14).

メトロノームのリズムに基づき, 平均速度から約 4 倍程度の速度まで左から右へツールを動作させる作業を行う. このときのそれぞれの速度における実際の粘性流体移動中の力覚を測定し, 速度の安定したと考えられる作業中盤 1/3 における行程の平均をとった.

また, 平均速度におけるデータに基づき, インピーダンス情報を算出し, これを用いてバーチャルな環境を構築した. この環境中でメトロノームのリズムにあわせ, 平均速度から約 4 倍程度の速度までのバーチャルな粘性流体移動中の力覚を測定し, 速度の安定したと考えられる作業中盤 1/3 における行程の平均をとった. これらをプロットしたものが図 15 である.

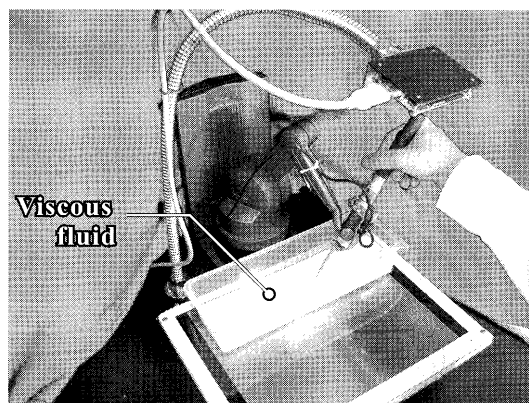


図 14 粘性流体中の移動作業の様子

Fig. 14 Overview of the moving operation in the viscous fluid

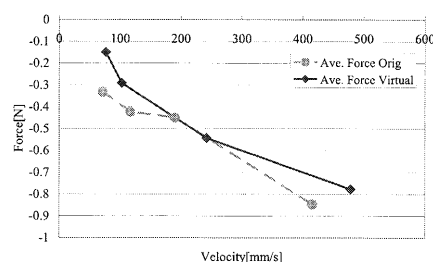


図 15 粘性流体中の力覚再現性

Fig. 15 Force reproduction in the viscous fluid

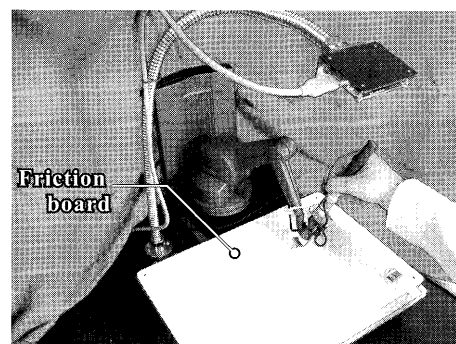


図 16 摩擦板上の移動作業の様子

Fig. 16 Overview of the moving operation on the frictional board

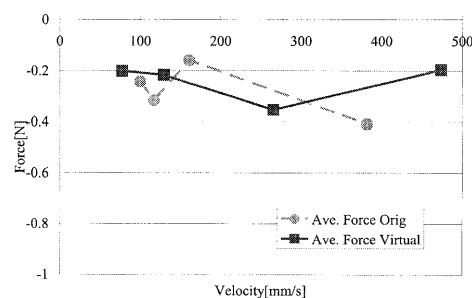


図 17 摩擦板上の力覚再現性

Fig. 17 Force reproduction on the frictional board



続いて、摩擦板上中の移動における力覚を測定する。筆記作業対象として、普通紙程度のざらつきを持つプラスチックボードの表面を用いた (図 16)。

メトロノームのリズムに基づき、平均速度から約 4 倍程度の速度まで左から右へツールを動作させる作業を行う。このときのそれぞれの速度における実際の粘性流体移動中の力覚を測定し、速度の安定したと考えられる作業中盤 1/3 における行程の平均をとった。

また、平均速度におけるデータに基づき、インピーダンス情報を算出し、これを用いてバーチャルな環境を構築した。この環境中でメトロノームのリズムにあわせ、平均速度から約 4 倍程度の速度までのバーチャルな摩擦板上移動中の力覚を測定し、速度の安定したと考えられる作業中盤 1/3 における行程の平均をとった。これらをプロットしたものが図 17 である。

以上の実験より、次のことがわかる。実環境における粘性流体中の実験より、速度に応じた力覚変化を生成可能であり、その値は実測値に類似した分布を持っている。摩擦板上の実験より、提案手法により全ての環境について速度に対して力覚が増加するのではなく、各環境に応じたインピーダンス情報を取得できている。また、バーチャル環境における議論と実環境における議論より、提案手法により正確なインピーダンス情報の再現までの精度は得られないものの、今回目標とした単純な仮想環境であるインピーダンス情報に基づく環境と同等な情報を現実環境から記録し再生することで環境の性質の一部を再現することは可能なことが示された。

## 5 まとめ

本論文では、これまで作成が困難であった、視覚と力覚を用いた訓練のための作業環境の再現手法として、記録、再生というごく簡便な手法を提案した。

提案手法では、視覚的には記録される情報を、能動的な動作をトリガとして再生することで視覚情報を再現した。力覚については、ある時間内におけるインピーダンス情報を一定と仮定することで、記録された情報から環境のインピーダンスを再構成する手法を提案した。同時に、記録された軌跡を提示する手法として Virtual Fixtures を利用した。これにより、訓練のための作業環境として必要な目標動作周辺のみには視覚情報と力覚情報を限定することで、簡便な作業環境の記録再生手段を構築した。

また、提案した手法を用い、記録された視覚情報により実際の作業の視覚情報を模した情報を作成可能なことを確認した。力覚についてはバーチャル環境における各インピーダンス情報の再現性を確認した。そして、実際に記録される力覚情報と比較することで、速

度変化に関して再現性のあるインピーダンス情報が得られていることを確認した。バーチャル環境における議論と実環境における議論より、正確なインピーダンス情報の再現までの精度は得られないものの、単純な仮想環境であるインピーダンス情報に基づく環境と同等な情報を現実環境から記録し再生することで環境の性質の一部を再現することは可能なことが示された。

これまでの情報記録型の研究と比較しながら提案手法の位置付けを確認する。技能教示を指向した Henmi ら [1] の手法では作業に要する方向の限定された力自体を伝えることを目指したが、本研究では作業環境自体を再現し、再生時には操作者が記録時と同じ環境を力覚的に体感しながら操作する手法を実現した。シミュレーションに基づき作業環境を構築した Kuroda ら [3] の手法では、正確な形状と正確な力覚シミュレーションを目指し、プログラミングとモデリングにより時間をかけて環境を構築し、また、Pai ら [4] の手法では、計測に十分な時間を要することで、計測された物理量の精度や操作の際の自由度を確保しているが、提案手法では、これらの方法に比べ計測精度に関しては劣るものの、記録に要する時間は一操作に要する時間と同じになり、シミュレーションや精度のよい計測による手法では実現しにくい簡便な記録システムを実現した。これにより、さまざまな作業環境における視覚情報と力覚情報を短時間で記録、再生することができる。

今後は提案手法のインピーダンス情報として加速度情報を用いたときの効果を測定するなど、より詳細な環境再現の手法について検討したい。

## 参考文献

- [1] K. Henmi and T. Yoshikawa. Virtual lesson and its application to virtual calligraphy system. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998.
- [2] R. Kikuuwe and T. Yoshikawa. Haptic display device with fingertip presser for motion/force teaching to human. In *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 868–873, 2001.
- [3] Y. Kuroda, M. Nakao, T. Kuroda, H. Oyama, M. Komori, and T. Matsuda. Interaction model between elastic objects for accurate haptic display. In *Proceedings of 13th International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pp. 148–153, 2003.
- [4] D. Pai, K. Doel, D. James, J. Lang, J. Lloyd, J. Richmond, and S. Yau. Scanning physical interaction behavior of 3d objects. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 87 – 96, 2001.
- [5] L. Rosenberg. Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation. In *Proceedings of IEEE Virtual Reality International Symposium*,



pp. 76-82, 1993.

- [6] 嵯峨智, 川上直樹, 舘暲. 力覚の主体性を活用した教示手法に関する研究. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 363-369, 2005.
- [7] Y. Yokokohji, R. Hollis, T. Kanade, and K. Henmi. Toward machine mediated training of motor skill. In *Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 32-37, 1996.

(2006 年 7 月 3 日受付)

# [著者紹介]

## 嵯峨 智 (学生会員)



平 10 東大・工・計数卒. 平 13 同大大学院修士課程了. 同年セコム株式会社研究員, 平 16 東大大学院博士課程入学, 現在に至る. 力覚教示に関する研究に従事. 日本バーチャルリアリティ学会学生会員.

## 梶本 裕之 (正会員)



平 10 東大・工・計数卒. 平 13 同大大学院修士課程了. 現在同大学・情報理工・システム情報学専攻助手. 博士(情報理工学). 触覚ディスプレイ, 触覚センサ, 人工現実感システムなどの研究に従事. 日本バーチャルリアリティ学会会員, 日本 ME 学会会員.

## 舘 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 同大大学院・情報理工・システム情学先行教授. テレインテグジスタンス, 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.