基礎論文

JVRSJ Vol.1 No.1, 1996

人工現実感システムにおける物体形状を提示する力触覚ディスプレイ

平田 亮吉*1 星野 洋*2 前田 太郎*2 舘 暲*2

A Force and Shape Display for Virtual Reality System

Ryokichi Hirata,*1 Hiroshi Hoshino,*2 Taro Maeda*2 and Susumu Tachi*2

Abstract – **We propose a force and shape display by making use of Active Environment Display(AED) that controls 3 positions and 3 postures (6 degrees of freedom). Shape Aprroximation Device(SAD) is installed on AED which has pantographic mechanism. Its positions and orientations are controlled by AED. The shape of the virtual object is generated by SAD which has many surfaces and edges, and virtual inertia, viscocity and stiffness are generated by controlling the mechanical impedance control of AED. Motion of the virtual object is generated by taking into consideration friction between the virtual object and the surface of the desk. Motions of virtual springs, pendulums, balls and valves are also generated.**

Keywords : **tele-existance,virtual reality, force and shape display, active environment display(AED), shape approximation device(SAD), impedance control**

1. はじめに

テレイグジスタンス (tele-existence) 技術 [1], [2] の目標は，実際に存在する遠隔の環境内にオペレータがロボットの力を借りて，あたかも自分自身がそこにいるかのような実時間臨場感を有して作業することを可能とすることであり，さらに、コンピュータの生成するいわゆる仮想環境の力を借りて、通信遅れが存在する状況下や直接人間の感覚では認識不可能な環境においての作業も可能にすることである．この場合，オペレータは安全な場所にいて遠隔環境のロボットを操縦することが可能であるので，オペレータは 3K 作業から解放される．

テレイグジスタンスにより，遠隔環境のロボットを用いて対象物体との接触作業，把持作業及びはめあい作業等を行う場合，オペレータが対象物体の作業ポイントを見ながら作業を行うことが可能であれば，反力のみのフィードバックでも作業を行うことができると考えられる．しかし，作業ポイントが死角に入っている場合やオペレータが対象物体を見ながら作業を行うこと自体が不可能 (視覚情報のフィードバックがない) である場合，対象物体の形状が分からないので作業を行うのが困難である．そこで，オペレータに視覚情報のみではなく力触覚情報のフィードバックも行うことにより，より臨場感を高めることが可能となりオペレータの精神的な負担も逓減すると考えられる．その際に，対象物体の面，エッジ情報のオペレータへのフィードバックが重要になってくる．

実環境へのテレイグジスタンスとコンピュータの生成する仮想環境へのテレイグジスタンスを組み合わせることにより時間と空間を越えた作業が可能となる．これらをふまえて筆者らは，実環境に仮想環境を介在させた力触覚ディスプレイの研究 [3]～[7] を行っている．ここでは、仮想環境を介在させることから、実環境をなんらかの方法で計測して、対象物体の形状などの力触覚情報が既知であるとして、仮想環境内で形状などの情報を再現することを前提として研究を進めている．

力触覚提示をするために考えられる方法は，実物と同一の模型をその都度即座に作ることである．しかし，実際と同一の模型を全空間にわたって作ることは費用の面からも技術的にも困難である．人間と仮想触空間との接点を例えば人間の指先の 1 点に限定すると，全ての仮想触空間を提示する必要はなく，指先の存在する場所の近傍の仮想触空間が操作の対象となる．

従来の触覚提示システムには，Feldmann らのジョイストリング型マスター・システム [1]，佐藤らの SPI-

*1: 東京大学先端科学技術研究センター
*2 東京大学工学部
*1: RCAST, the University of Tokyo
*2 Faculty of Engineering, the University of Tokyo

DAR [8]，岩田らのフォースフィードバック・マニピュレータ [9] 等が提案されている．

従来の力覚ディスプレイにおいては，ジョイストリング型マスター・システムのようにオペレータの指がワイヤや糸で吊られているために，オペレータが速い動作をしたとき，ワイヤや糸に拘束されるという問題点があった．また，従来型の力覚ディスプレイは，オペレータに反力を提示することにより触覚提示を行っているため，仮想環境においてオペレータが接触しているエッジ (凹凸)，オペレータが面上を触る感覚及びオペレータの指が壁に突き当たる感覚はフィードバック不可能であり，仮想物体の形状そのものをフィードバックするシステムはなかった．

McNeely らは，一枚の面を準備していて，曲面の提示方法について述べているが，特定の物体の提示しか行っていない [10]．

また，広田らは，同様の手法を用いて，曲面の提示，仮想粘土の変形を実現しているが [11]～[15]，微分不可能なエッジや頂点の提示には実現していない．本システムはこれらの課題を克服しようとするものである．

本論文では，能動型環境ディスプレイ (Active Environment Display(AED)) を用いた力触覚ディスプレイ装置を提案する．能動型環境ディスプレイに搭載された形状表現デバイス (Shape Approximation Device(SAD)) の位置と姿勢を制御して，オペレータに形状表現デバイスの面とエッジを接触させることにより，オペレータが仮想環境において連続的に接触した任意の物体の形状と特性 (慣性，粘性及び剛性) をフィードバックすることが可能であることを述べる．また，摩擦力，オペレータの指先の運動量及び力積を考慮することにより仮想物体の運動の再現も可能であることを述べる．

2. システム構成

2.1 全体システム

力触覚ディスプレイ装置の全体システム図を図 1 に示す．

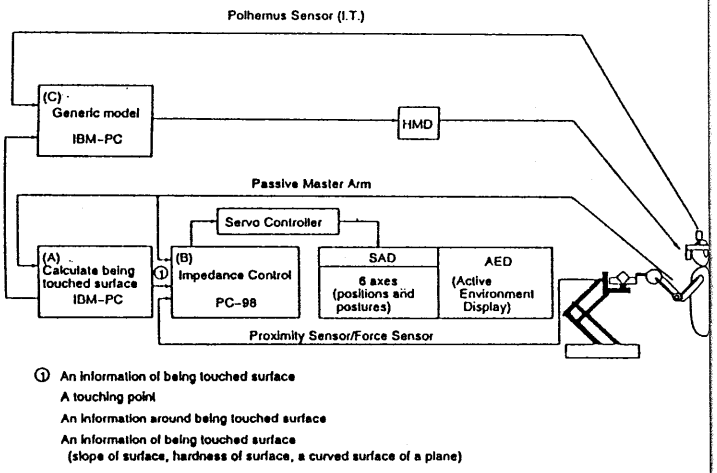


図 1 システム構成
Fig. 1 Block diagram of virtual visual and haptic space presentation system

本システムは，

- 以下に示す処理を行うコンピュータ

  1. 予め対象物体の位置情報に基づく接触面情報を記憶していて，オペレータの指先の位置と姿勢を検出するセンサ (パッシブマスターアーム (詳細は 2.4 で述べる)) の入力に基づく接触面情報の送出処理 (A)

  2. 上記接触面情報を逐次入力していて，オペレータの指先の位置と姿勢を検出するセンサ (パッシブマスターアーム) と近接センサと力センサの入力により能動型環境ディスプレイ (詳細は 2.2 で述べる) の先端に搭載された形状表現デバイス (詳細は 2.3 で述べる) の位置・姿勢のメカニカルインピーダンス制御の処理 (B)

  3. 予め対象物体と，オペレータの身体モデルを記憶していて，オペレータの頭部及び腕部の位置と姿勢を検出するセンサ (ポヒマスセンサ，パッシブマスターアーム) の入力に基づく視覚情報の送出処理 (C)

- 演算出力により駆動指令を送出するサーボコントローラ
- このサーボコントローラからの駆動指令に従い形状表現デバイス (SAD) を 3 次元空間内において自由にその位置と姿勢を制御する能動型環境ディスプレイ
- オペレータに視覚情報を提示する視覚提示装置

(Head Mounted Display(HMD))
により構成されている．

実環境において人間が何か物体に接触する場合，物体に接触した瞬間からその物体の形状や特性を感じる．従って，人間が物体に接触していない間 (フリーな状態のとき) は自由に腕を動かすことができるほうが自然である．本システムでは，人間の腕部の動きの検出を行う装置と物体の形状及び特性のフィードバックを行うマニピュレータ即ちパッシブマスターアームと能動型環境ディスプレイ (AED) に分けることにより，非接触時にはオペレータが自由に腕を動かすことができる．また，面やエッジに突き当たる感覚も実際にその位置に物体が存在し待機しているので接触した瞬間の衝突現象のフィードバックも可能である．図 2に本システムの外観写真を示す．

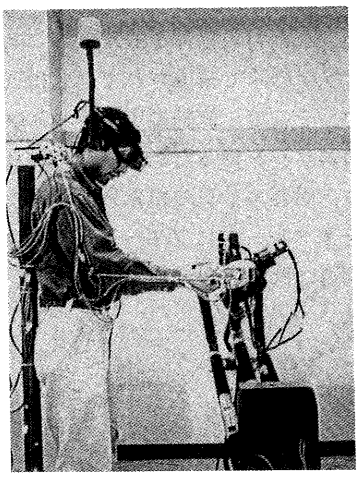


図 2 システム外観
Fig. 2 General view of the experimental hardware system

本研究の概念図を図3に示す．これは例えば，マニピュレータが球状の物体に接触しているときマニピュレータの指先近傍の触空間をオペレータの指先近傍に能動型環境ディスプレイと形状表現デバイスにより作りだしている図である．

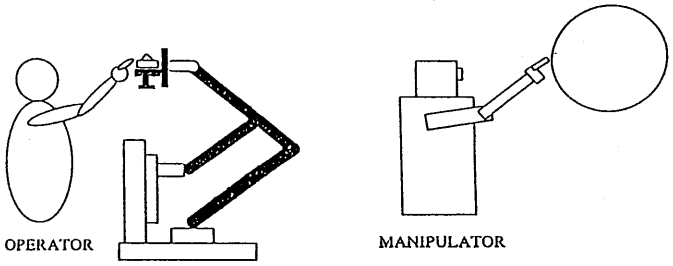


図 3 システムの概念図
Fig. 3 Concept of a shape and force display

1つの平面もしくは曲面をなぞる作業をする場合，接触点での接平面になるように位置，姿勢を制御した形状表現デバイスのある1つの面の中心をオペレータに接触させることにより，オペレータは1つの平面もしくは曲面の形状を感じることができる．

エッジをなぞる作業をする場合，接触点での接線になるように位置，姿勢を制御した形状表現デバイスのある1つのエッジの中心をオペレータに接触させることにより，オペレータはエッジの形状を感じることができる．

直方体をなぞる作業をする場合，コーナーが存在するが形状表現デバイスを静止させることにより，実際に形状表現デバイスにコーナーが存在しているのでオペレータはコーナーの形状を感じることができる．面とエッジに関しては上述したようにすることにより，オペレータは直方体の形状を感じることができる．

以降で，本システムの個々の要素について詳しく述べる．

2.2 能動型環境ディスプレイ (Active Environment Display(AED))

図 4にオペレータに力感覚をフィードバックする能動型環境ディスプレイを示す．能動型環境ディスプレイは，位置を決定する 3 自由度のアーム部と姿勢を決定する 3 自由度の姿勢 3 軸の合計 6 自由度から構成されている．能動型環境ディスプレイの特徴は，位置姿勢分離型パンタグラフ機構をしていて，リンク比が 1 : 3 になっているので移動量は x 軸，y 軸方向が 3 倍に，z 軸方向が 4 倍に拡大される．逆に力は，x 軸，y 軸方向が 1/3 倍に，z 軸方向は 1/4 倍になる．x 軸，y 軸方向に移動するときに先端の姿勢が変化するので補助リンクを y 軸，z 軸方向にオフセットを持たせて取り付けることにより能動型環境ディスプレイがどの位置に移動しても先端の姿勢が不変である．また，直動関節，ジンバル機構により計算が容易であり，特異点が少ない．能動型環境ディスプレイは，対抗据置型であり，オペレータの指先が面に突き当たるような衝突現象のリアルな再現が可能である．

非接触状態のとき，いつでも面やエッジを準備できるように奥行き方向にオフセットを持たせてオペレータの指先の位置に能動型環境ディスプレイを追従させることにより，オペレータが形状表現デバイスと接触していないため，速い動作をしてもほとんど抵抗を感じることがない．

接触状態のとき，モデルの面を触っているときはモデルの接触面近傍を接平面近似により表現し，モデルのエッジを触っているときはモデルの接触エッジ近傍を接線近似により表現してモデル全体の形状をオペレータにフィードバックすることが可能である (詳細は 2.3 で述

べる).

能動型環境ディスプレイの各リンクに取り付けられた6つのロータリーエンコーダにより並進3軸と位置3軸の測定が可能である．姿勢3軸の基部に取り付けられた6軸力センサによりオペレータが加えた力を検出し，能動型環境ディスプレイをメカニカルインピーダンス制御することにより，力感覚 (仮想物体の特性 (慣性，粘性及び剛性)) をオペレータにフィードバックすることが可能である．

能動型環境ディスプレイは，以下に示す仕様のように広い面の再現と十分な接触力提示を可能としている．

- x 軸:±300mm
- y 軸:±300mm
- z 軸:±300mm
- T 軸回転角:±180°
- B_1 軸回転角:±90°
- B_2 軸回転角:+90°，−45°
- x，y，z 軸方向推力:30N(max)
- T，B_1，B_2軸トルク:1.3Nm(max)

ロータリーエンコーダの分解能は，位置3軸はいずれも1024P/R，姿勢3軸はいずれも2048P/Rである．いずれも4逓倍して取り込みコンピュータで処理を行っている．能動型環境ディスプレイを制御しているコンピュータの制御周期は4msecである．

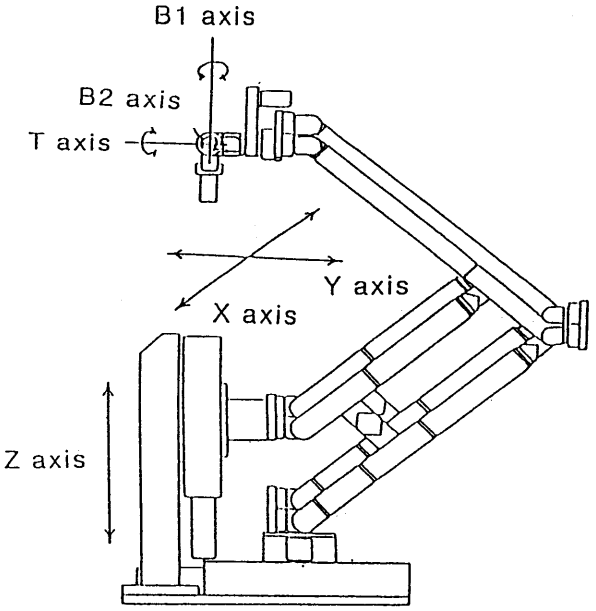


図4 能動型環境ディスプレイ

Fig. 4 Active Environment Display(AED)

2.3 形状表現デバイス (Shape Approximation Device(SAD))

2.3.1 形状表現デバイスについて

人間が指先の1点で物体に接触する点接触を考えた場合，人間が触覚として感じることができるのは，接触点とその近傍のみである．従って，オペレータの指先の動きにあわせて連続的に指先近傍空間を実現することにより，仮想環境においてオペレータが接触した任意の物体全体の形状をフィードバック可能である．仮想環境内の対象物体が滑らかな曲面のみで構成されているならば，1枚の平面を準備してオペレータの指先の動きにあわせて接触近傍面を接平面近似により表現してオペレータに接触させることで対象物体全体の形状をフィードバック可能である．

しかし，エッジは不連続で微分不可能であり接平面近似できないので，1枚の平面では直方体のような面とエッジが組み合わされた対象物体を表現することが不可能である．凸のエッジのみで構成されていれば凹のエッジは表現できない．そこで，能動型環境ディスプレイに複数の面や凹凸のエッジを持った形状表現デバイスを搭載することにより，面とエッジの組み合わされた任意の対象物体の形状をオペレータにフィードバックすることが可能である．図5に形状表現デバイスを示す．

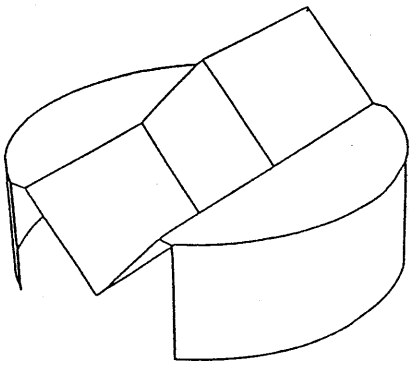


図5 形状表現デバイス

Fig. 5 Shape Approximation Device(SAD)

2.3.2 面とエッジのフィードバック

オペレータを形状表現デバイスに点接触させることにより，仮想物体の形状をフィードバックするが，点接触により

(1) 面内での並進

任意の大きさの面を提示することができる．

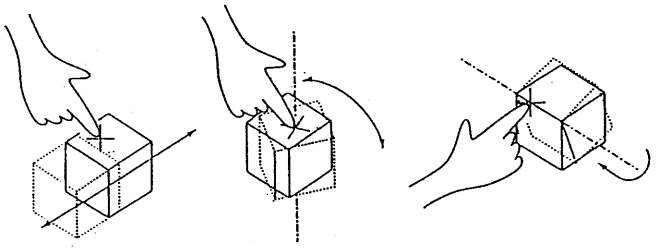
(2) 面内での回転

任意の輪郭を表現できる．

(3) エッジを軸とした回転

任意の角度のエッジを表現できる．

を実現することが可能である．

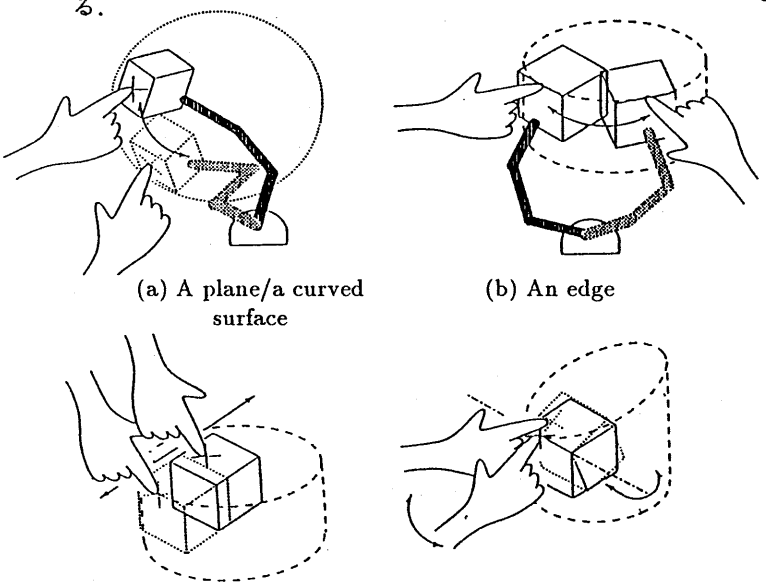


(1) Translation in a surface　(2) Rotation in a surface　(3) Rotation around an edge

図 6 形状を表現する SAD の運動

Fig. 6 Thing which is approximated by SAD

これらのことにより，以下に示すことが表現可能である．



(a) A plane/a curved surface　(b) An edge

(c) From a surface to a convex/concave edge　(d) From an edge to a surface

図 7 SAD による形状提示

Fig. 7 Shape approximated by SAD

(a)　平面や曲面を表現する場合

形状表現デバイスの 1 つの面を用いて接触点における対象物体の接平面になるように (接平面近似)，形状表現デバイスの位置と姿勢を制御することにより表現可能である．

(b)　エッジを表現する場合

形状表現デバイスの 1 つのエッジを用いて接触点における対象物体の接線になるように (接線近似)，形状表現デバイスの位置と姿勢を制御することにより表現可能である．

(c)　面から凹または凸のエッジを表現する場合

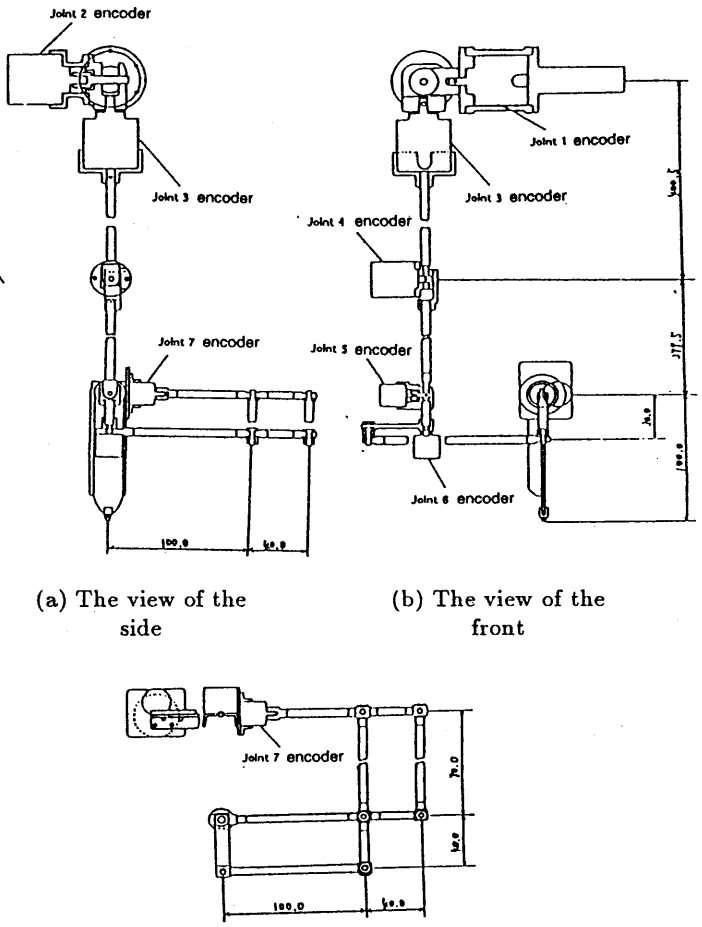
オペレータが接触している面を接平面近似を行いながら，接触面の接線に対して並進または接触面の法線のまわりに回転させることにより，面に付随する凹または凸のエッジを任意の位置と姿勢に準備するように，形状表現デバイスの位置と姿勢を制御することにより表現可能である．

(d)　エッジから面を表現する場合

オペレータが接触しているエッジに隣あう面の向きを対象物体にあわせるように，形状表現デバイスの位置と姿勢を制御することにより表現可能である．

2.4　パッシブマスターアーム

図 8にパッシブマスターアームを示す．



(a) The view of the side　(b) The view of the front

(c) The view of the bottom

図 8 パッシブマスターアーム

Fig. 8 Passive master arm

パッシブマスターアームはオペレータの腕の運動を計測する装置であり，肩に 3 自由度，肘に 1 自由度，手首に 3 自由度の合計 7 自由度より構成されている．肩の 3 自由度と手首の 3 自由度はいずれも直交しているので特異点が少ない構造になっている．先端部分はボールペン状になっていて，形状表現デバイスと点接触するようになっている．また，重量も軽量で長時間パッシブマスターアームを操作しても疲れない．ロータリーエンコーダの分解能は，肩の 3 自由度はいずれも 2500P/R，肘の 1 自由度は 1500P/R，手首の 3 自由度はいずれも 500P/R

である．いずれも4逓倍して取り込みコンピュータで処理を行っている．

3. 仮想物体の特性と運動

3.1 仮想物体の特性 (慣性，粘性及び剛性)

能動型環境ディスプレイに搭載された形状表現デバイスの位置と姿勢をメカニカルインピーダンス制御 [16]〜[19] することにより，オペレータが仮想環境において接触した物体の特性 (慣性，粘性及び剛性) をフィードバックすることが可能である．また，外力 F_e に対して目標インピーダンス (目標慣性 m_0，目標粘性 b_0，目標剛性 k_0) を調整することにより仮想物体の特性を変えることができる．

メカニカルインピーダンス制御の式は次式で与えられる．

$$m_0\ddot{x} + b_0(\dot{x} - \dot{x_0}) + k_0(x - x_0) = F_e \qquad (1)$$

次の3種類の仮想物体の特性を実現した．

1. 位置制御のみ
2. メカニカルインピーダンス制御
(m_0=1.0[kg],b_0=80.0[N/(m/s)],k_0=100.0[N/m])
3. メカニカルインピーダンス制御
(m_0=1.0[kg],b_0=30.0[N/(m/s)],k_0=60.0[N/m])

仮想物体の形状は，平面，直方体，円筒とした．それぞれの形状について，上述した3種類の物体即ち硬い物体 (1:位置制御)，やや軟らかい物体 (2:メカニカルインピーダンス制御 ($m_0 = 1.0$[kg], $b_0 = 80.0$[N/(m/s)], $k_0 = 100.0$[N/m]))，軟らかい物体 (3:メカニカルインピーダンス制御 ($m_0 = 1.0$[kg], $b_0 = 30.0$[N/(m/s)], $k_0 = 60.0$[N/m])) を実現した．また，直方体の場合のみ回転のインピーダンス ($m_0 = 0.2$[kg], $b_0 = 1.6$[N/(m/s)], $k_0 = 2.0$[N/m])) を考慮して，仮想物体の重心付近をオペレータが押したときは回転しないように，仮想物体の端をオペレータが押したときよく回転するようにした．また，以下に示すようにオペレータが接触している面の法線ベクトルとオペレータの指先のなす角も考慮した．

オペレータは，仮想物体に力を加えているとき，パッシブマスターアームの先端部分で，形状表現デバイスと点接触しているので，力はオペレータの指先の方向に加えられていると考えて，6軸力センサの検出値にオペレータの指先方向のベクトルを各軸方向成分に分解して規格化し乗じることにより，オペレータが各軸方向に加える力とした．

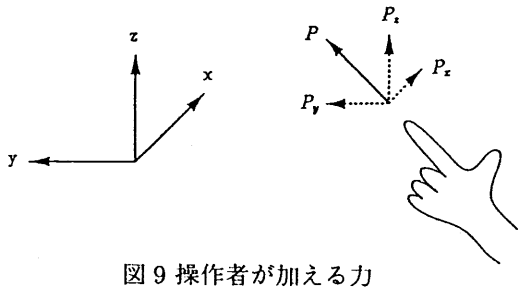


図9 操作者が加える力

Fig. 9 Force that an operator exerts

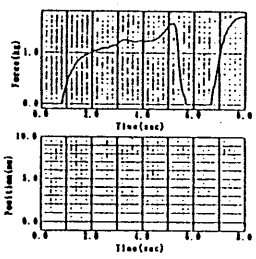
x軸方向に加える力 F_x　$F_x = F_s x|P_x/|P||$
y軸方向に加える力 F_y　$F_y = F_s y|P_y/|P||$
z軸方向に加える力 F_z　$F_z = F_s z|P_z/|P||$

ここで，

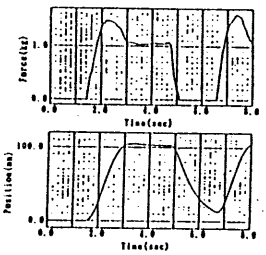
$F_s x$: x軸方向の力センサ値
$F_s y$: y軸方向の力センサ値
$F_s z$: z軸方向の力センサ値
P: 指先方向のベクトル，
P_x: 指先方向のベクトルのx成分
P_y: 指先方向ベクトルのy成分
P_z: 指先方向ベクトルのz成分

である．

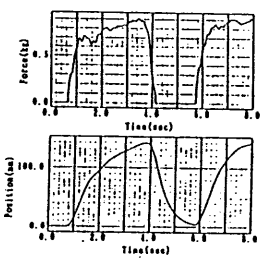
図10にオペレータが仮想物体に接触したときの特性を示す．硬い物体をいくら指先で押しても位置制御になっているため，ほとんど仮想物体の位置は変わらない．しかし，やや軟らかい物体と軟らかい物体を指先で押すと2次のメカニカルインピーダンス制御になっているため，仮想物体は目標インピーダンスのダイナミクスを満たすような運動をする．やや軟らかい物体においては1.0[kg] 以上の力を仮想物体に加えると 100[mm] 変位しているが，軟らかい物体においては仮想物体に加える力が 1.0[kg] 未満でも 100[mm] 変位しているのが分かる．また，指先で直方体の端を押したとき 10[kgm] 以下のモーメントを加えて 20[deg] 程度直方体が回転しているのに対し，指先で直方体の重心付近を押したときほとんど回転していない．



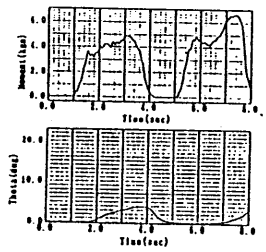
(a) A hard object



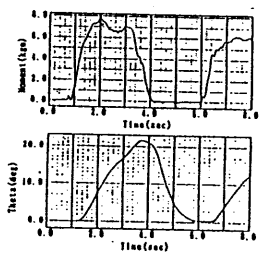
(b) A soft object



(c) A softer object



(d) A block(near the center of the gravity)



(e) A block(near the corner)

図 10 仮想物体の機械インピーダンス特性
Fig. 10 Characteristic of the mechanical impedance cotrolled AED while an operator pushs

3.2 机上面に存在する仮想物体の運動

オペレータが水平方向に仮想物体を押す場合，最大摩擦力以下の力を加えたとき仮想物体は運動しないが，最大摩擦力以上の力を加えたとき仮想物体は運動を開始して，運動方向とは逆向きの動摩擦力が常に働く．動摩擦力を考慮した机上面に存在する運動方程式は，

$$m\ddot{x} + F_R = F \tag{2}$$

F_R:動摩擦力　F:外力

で表される．

一方，AED のダイナミクスは，

$$\tau = M\ddot{x} + V + G \tag{3}$$

M:慣性　V:速度項　G:重力項

で表される．

机上面に存在する仮想物体の運動を以下の 2 通りの方法で実現した．

(1) 動摩擦力が仮想物体の速度に依存すると仮定

$$(\text{動摩擦力}) = b_0(\dot{x} - \dot{x_0}) \tag{4}$$

と考えてインピーダンス制御により実現した．従って，(1) 式の仮想物体の運動方程式は

$$m\ddot{x} + b_0(\dot{x} - \dot{x_0}) = F \tag{5}$$

のようになる．

(2) 動摩擦力が仮想物体の速度に依存しないと仮定

$$(\text{動摩擦力}) = \mu_1 mg \tag{6}$$

と考える．従って，(1) 式の仮想物体の運動方程式は

$$m\ddot{x} + \mu_1 mg = F \tag{7}$$

のようになる．以下に示すように，オペレータが加えた力に対する加速度が求まるので加速度を積分して移動距離を求める．(7) 式を変形すると

$$\ddot{x} = \frac{F - \mu_1 mg}{m} \tag{8}$$

従って，移動距離は

$$(\text{移動距離}) = \sum \frac{1}{2}\ddot{x}t^2 \tag{9}$$

m:質量　F:外力　t:制御周期

である．

静止摩擦力と動摩擦力を考慮することにより，オペレータが机上面に存在する仮想物体を押して移動させて，一度指を離しても仮想物体はその場に静止しているような仮想物体の運動の再現が可能である．また，オペレータが接触している面の法線ベクトルとオペレータの指先とのなす角を計算することによりリアルな仮想物体の運動の再現が可能である．本報の実現例では，静止摩擦係数μ_0=0.33，動摩擦係数μ_1=0.15 とした．図 11に摩擦力を考慮した机上面に存在している仮想物体を指で押したときの運動特性を示す．オペレータが静止摩擦力より大きな力を加えてから仮想物体が運動を開始している．以下に示すようにオペレータの指先の運動量及び力積も考慮することにより，オペレータの指先と仮想物体とが衝突した瞬間の仮想物体の運動の再現も可能である．オペレータが仮想物体に力を加えるとき，次の 2 通りの

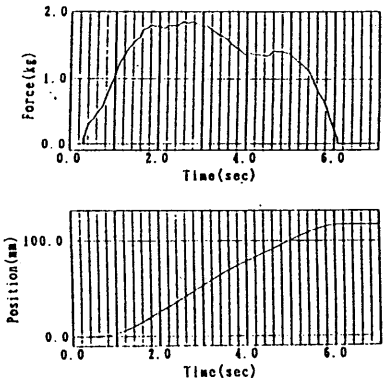


図 11 摩擦面上の仮想物体の運動 (m=1.0[kg])
Fig. 11 Motion of a virtual object on a frictional surface(m=1.0[kg])

場合が考えられる．

(1)(外力)≦(最大摩擦力) のとき

仮想物体は静止したままである.

(2) (外力)>(最大摩擦力) のとき

力を瞬間的に加えた時間をΔTとすると，運動量と力積の関係より

$$(F - F_R)\Delta T = Mv_0 \tag{10}$$

が成り立つ. (10) 式を変形すると

$$v_0 = \frac{(F - F_R)\Delta T}{M} \tag{11}$$

F:外力 F_R:動摩擦力 M:質量 v_0:初速度

である. 仮想物体の速度が 0 になる時間を t_1 とすると

$$v_0 - \mu_1 g t_1 = 0 \tag{12}$$

が成り立つ. (12) 式を変形すると

$$t_1 = \frac{v_0}{\mu_1 g} \tag{13}$$

v_0:初速度 μ_1:動摩擦力 g:重力加速度

である.

従って，時間 t_1 の間に仮想物体が移動した距離を s とすると

$$s = v_0 t - \frac{1}{2}\mu_1 g t^2 \tag{14}$$

が成り立つ. (11) 式と (13) 式を (14) 式に代入すると

$$s = \frac{1}{2\mu_1 g}\left(\frac{F - \mu_1 M g}{M}\Delta T\right)^2 \tag{15}$$

である.

3.3 その他の仮想物体の運動

その他の仮想物体の運動として，ばね，単振り子，ドリブル及びバルブをいずれもインピーダンス制御により実現した.

1. ばね

力を加えていない位置から単振動をすると仮定して，インピーダンス制御の式 (1) において粘性の係数 b_0=0 として，机上面に存在しているばねの付いた物体の運動を実現した.

$$m_0\ddot{x} + k_0(x - x_0) = F_e \tag{16}$$

2. 単振り子

水平方向の変位は，力を加えていない位置から単振動をすると仮定して，インピーダンス制御の式 (1) において粘性の係数 b_0=0 として，単振り子の運動を実現した. また，鉛直方向の変位と回転は糸の長さが既知であるので (500[mm])，水平方向の変位量により計算で求めた.

$$m_0\ddot{x} + k_0(x - x_0) = F_e \tag{17}$$

3. ドリブル

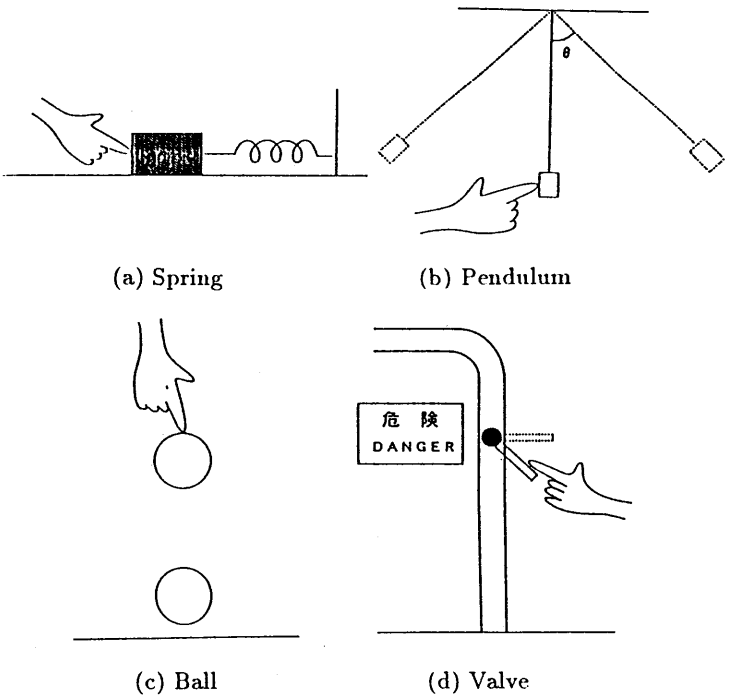
力を加えていない位置から単振動をすると仮定して，インピーダンス制御の式 (1) において粘性の係数 b_0=0 として，ドリブル (ゴムヨーヨーを突いているような感覚) の運動を実現した.

$$m_0\ddot{z} + k_0(z - z_0) = F_e \tag{18}$$

4. バルブ

バルブを回しているような感覚をフィードバックするためには，接触近傍面を形状表現デバイスにより表現して，バルブの回転の変位はインピーダンス制御の式 (1) において剛性の係数 k_0=0 として，バルブを実現した. バルブの回転中心からの長さは 300[mm] とした. g なお，この場合は，力覚センサから得られた値を，そのまま，オペレータが加える力とした.

$$m_0\ddot{\theta} + b_0(\dot{\theta} - \dot{\theta_0}) = F_e \tag{19}$$



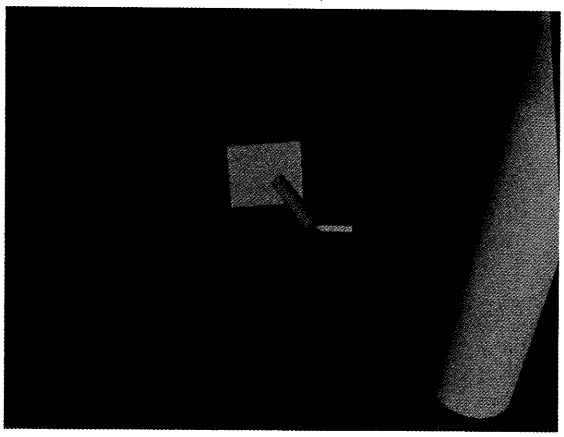
(a) Spring (b) Pendulum

(c) Ball (d) Valve

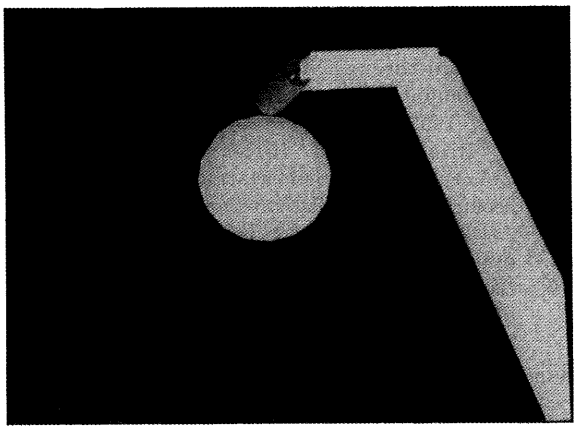
図 12 仮想物体の提示例

Fig. 12 Examples of virtual objects

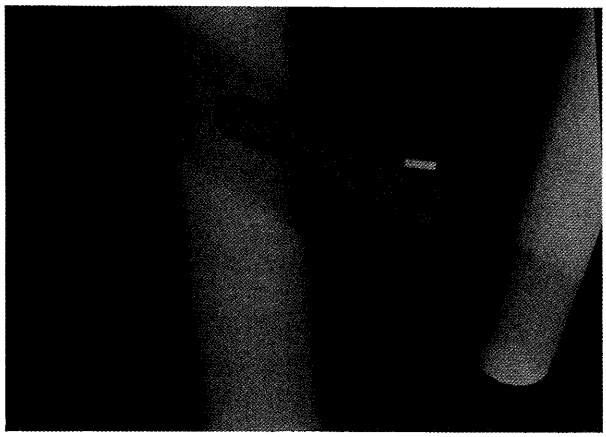
また，単振り子，ドリブル及びバルブの仮想環境内での映像を図 13に示す.



(a) Pendulum



(b) Ball



(c) Valve

図 13 仮想物体の画像例

Fig. 13 Views of virtual objects

図 14にその他の仮想物体の運動特性を示す．ばねに関しては 0.7[kg] の力で 100[mm] 程度変位している．単振り子に関しても水平方向の変位 (x 方向) は，目標インピーダンスがばねと同一なのでばねと同様であるが，鉛直方向の変位 (最大 82[mm]) と回転の変位 (最大 23[deg]) も加わっている．ドリブルに関しては 0.5[kg] 程度の力を加えると 100[mm] 以上変位している．バルブに関しては 10[kgm] 以上のモーメントを加えて回転を始め，後は等速に回転量が増加している．

4. まとめ

能動型環境ディスプレイ (AED) による力触覚ディスプレイを提案した．

能動型環境ディスプレイ (AED) に搭載された形状表現デバイス (SAD) の位置と姿勢を制御して，形状表現デバイスの面やエッジ (凹凸) をオペレータに接触させることにより，オペレータが仮想環境において接触した任意の物体の力触覚をフィードバックすることが可能であることを報告した．

また，仮想物体の運動方程式を立て，能動型環境ディスプレイ (AED) をインピーダンス制御することにより，仮想物体の運動の再現が可能であることを報告した．

全体システム図で示したように接触面情報を送出するコンピュータ (A) との通信が実現していないため，能動型環境ディスプレイ (AED) をインピーダンス制御するコンピュータ (B) と視覚提示を行うコンピュータ (C) がそれぞれ独立してモデルを記憶していて，視覚提示を行うコンピュータに能動型環境ディスプレイ (AED) のインピーダンス制御における変位量を逐次通信により送出して仮想物体の特性と運動を実現した．

今後の課題は，より複雑な形状の仮想環境モデルの力触覚フィードバックを行うことである．

最後に，本研究を進めていく上で，多大なご協力を頂いた株式会社安川電機基礎研究所ロボット第 2 研究室の安田賢一氏に感謝の意を表します．

参考文献

[1] 舘，廣瀬: バーチャル・テック・ラボ．工業調査会，1992.

[2] 舘: 人工現実感．日刊工業新聞社，1992.

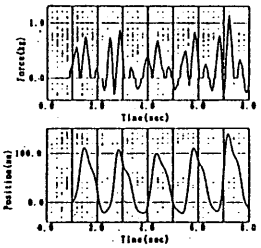
[3] S. Tachi, T. Maeda, R. Hirata and H. Hoshino: "A Construction Method of Virtual Haptic Space", Proceedings of the fourth International Conference on Artificial Reality and Tele-existence(ICAT '94), pp. 131–138, Tokyo, Japan, July, 1994.

[4] 舘，前田，平田，安田: "バーチャルハプティックスペースの研究 (第 1 報)"，第 33 回計測自動制御学会学術講演会予講集，pp. 203–204，1994.

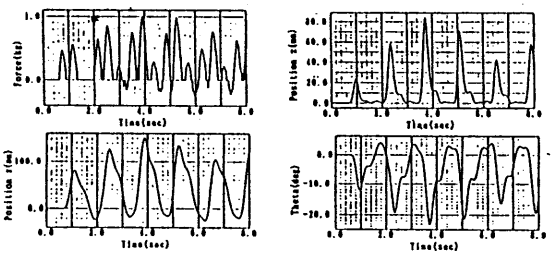
[5] 星野，平田，前田，舘: "バーチャルハプティックスペースの研究 (第 2 報)"，第 33 回計測自動制御学会学術講演会予講集，pp. 691–692，1994.

[6] 平田，星野，前田，舘: "バーチャルハプティックスペースの研究 (第 3 報)"，第 12 回ロボット学会学術講演会予講集，pp. 149–150，1994.

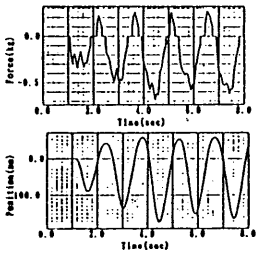
[7] 星野，平田，前田，舘: "バーチャルハプティックスペースの研究 (第 4 報)"，第 12 回ロボット学会学術



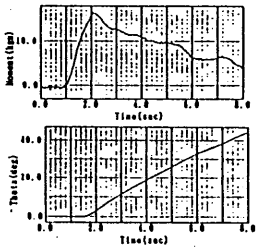
(1) Spring(m_0=1.0[kg],b_0=0.0[N/(m/s)],k_0=50.0[N/m])



(2) Pendulum(m_0=1.0[kg],b_0=0.0[N/(m/s)],k_0=50.0[N/m])



(3) Ball(m_0=1.0[kg],b_0=0.0[N/(m/s)],k_0=50.0[N/m])



(4) Valve(m_0=1.0[kg],b_0=10.0[N/(m/s)],k_0=0.0[N/m])

図 14 仮想物体の力–位置の特性図

Fig. 14 Force-Position chracteristics of virtual objects

講演会予講集, pp. 147–148, 1994.

[8] 佐藤, 平田, 河原: "空間インターフェイス装置 SP-IDAR の提案", 電子情報通信学会論文誌, D–II, Vol. J74–D–II, No. 7, pp. 887–894, 1991.

[9] 岩田, 中川, 矢野: "広可動範囲フォースディスプレイの開発", 情報処理学会, 情処研報, Vol. 92, pp. 47–54.

[10] William A.McNeely: " Robotic Graphics: A New Approach to Force Feedback for Virtual Reality", Virtual Reality Annual International Symposium '93, pp. 336–341, 1993.

[11] 広田, 廣瀬: "仮想触覚環境の開発", 第 9 回ヒューマン・インターフェース部会予講集, pp. 41–48, 1993.

[12] 広田, 廣瀬: "局所面の提示の考え方にもとづく触覚ディスプレイ", 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予講集, pp. 355–356, 1993.

[13] 広田, 廣瀬: 面提示型触覚ディスプレイのための曲面表現デバイス", 第 10 回ヒューマン・インターフェース部会予講集, pp. 193–196, 1994.

[14] K. Hirota and M. Hirose: "Simulation and Presentation of Curved Surface in Virtual Reality Environmant through Surface Display", Virtual Reality Annual International Symposium '95, pp. 211–216, 1995.

[15] K. Hirota and M. Hirose: " Surface Display: Concept and Implementation Approaches", Proceedings of the fifth International Conference on Artificial Reality and Tele-existence(ICAT '95), pp. 185–192, Chiba, Japan, November, 1995.

[16] 舘, 榊: "インピーダンス制御型マスタ・スレーブシステム (I)", 日本ロボット学会誌, 8 巻, 3 号, pp. 241–252, 1990.

[17] 舘, 榊: "インピーダンス制御型マスタ・スレーブシステム (II)", 日本ロボット学会誌, 8 巻, 3 号, pp. 253–264, 1990.

[18] 榊, 舘: "サーボ系をベースとしたインピーダンス制御における接触安定性の改善方法 (第 2 報: 多自由度における考察)", 第 33 回計測自動制御学会学術講演会予講集, pp. 343–344, 1994.

[19] 榊, 舘: "サーボ系をベースとしたインピーダンス制御における接触安定性の改善方法 (第 3 報: 多自由度アームによる接触作業実験)", 第 12 回ロボット学会学術講演会予講集, pp. 39–40, 1994.

(1996年 7 月 8 日受付)