

# 高解像度力覚インタフェースを持つ物理ベース VR システムの開発

長谷川 晶一<sup>†</sup>      赤羽 克仁<sup>†</sup>      岩下 克<sup>†</sup>      馬場 次郎<sup>†</sup>  
 小池 康晴<sup>†</sup>      佐藤 誠<sup>†</sup>

Physics Based VR System with High Definition Haptic Interface

Shoichi HASEGAWA<sup>†</sup>, Katsuhito AKAHANE<sup>†</sup>, Masaru IWASHITA<sup>†</sup>, Jiro BABA<sup>†</sup>,  
 Yasuharu KOIKE<sup>†</sup>, and Makoto SATO<sup>†</sup>

あらまし VR 環境内の物体の運動を物理法則に基づいてシミュレートし、物に触れたときに手に加わる力の感覚 (= 力覚) を提示することで、高い現実感を持つ物体モデルを力覚を感じながら直接操作することができる。しかし、従来の力覚インタフェースと物理シミュレーションは更新頻度が低く、あいまいな力覚を感じながら操作することしか出来なかった。本研究では、高解像度力覚インタフェースと高速応答物理シミュレータを組み合わせ、精細な形状や物体の硬さが認知できるはっきりとした力覚を感じながら直接操作を行える仮想環境環境を実現する。

キーワード バーチャルリアリティ, 物理シミュレーション, 力覚インタフェース, 中間表現

## 1. はじめに

近年、計算機内に 3 次元モデルを構築し、設計、評価、教育、訓練などに利用することが盛んに研究されている。3 次元モデルに物理属性を含め、物体の運動を物理法則に基づいてシミュレートすることで、現実感のある動きを生成することができる。また、視覚聴覚に加え、物に触れたときに手に加わる力の感覚 (= 力覚) を提示することで、物体モデルの直接操作が実現できる。両者を組み合わせることで、高い現実感を持つ物体モデルを力覚を感じながら直接操作することができる。

手の動きを計測し、手に力覚を提示する装置を力覚インタフェースと呼ぶ。従来の力覚インタフェースは、制御が遅いため提示可能な物体モデルやモデルパラメータの制限が厳しく、思い通りの感覚を提示することができなかった。たとえば、精細な形状や硬い物体は提示できなかった。そのため、操作対象が柔らかく滑らかな形状の物体に限定されてしまい、操作感もあまりよくなかった。また、従来のリアルタイム物理シ

ミュレーションは映像提示を目的としていたため、更新周期が長く、操作入力に対する反応が遅い。そのため、力覚インタフェースと組み合わせた場合に、慣性など物体の性質を正確に提示することができなかった。

軽量の機構と高速制御により提示可能な物体のモデルやモデルパラメータの範囲を広げることができ、より精細な形状や硬い物体の材質感を提示できる。このような力覚インタフェースは、より高解像度な情報を提示できるので高解像度力覚インタフェース [1] と呼べる。本研究では、高解像度力覚インタフェースと高速応答物理シミュレータを組み合わせ、高解像度物理ベース直接操作環境を実現する。

## 2. システムの要件

高解像度物理ベース直接操作環境を構築するためには、

(1) 精細な形状や硬い物体の提示に必要な、10kHz 程度の更新周期で制御された応答の速い力覚インタフェース

(2) 正確な慣性の提示に必要な、1kHz 程度の更新周期を持つ物理シミュレーション

(3) 更新周期の異なる 2 つのシステムを結びつける情報伝達方法

の 3 つが必要となる。図 1 にシステム全体の構成を

<sup>†</sup> 東京工業大学精密工学研究所, 横浜市  
 Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of  
 Technology, 4259 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama-shi,  
 226 Japan

示す。

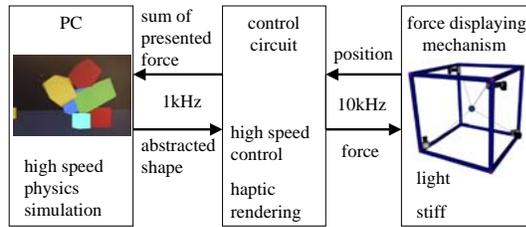


図1 システム全体の構成  
Fig. 1 system overview

表1に示すように、従来のシステムでは高解像度物理ベース直接操作環境に必要な更新周期や情報伝達が達成されていない。

表1 従来の直接操作環境と高解像度操作環境の制御周期，シミュレーション周期，情報伝達方法の比較

Table 1 comparison of direct manipulation environments

直接操作環境	力覚制御	シミュレーション	情報伝達方法
提案システム	10kHz	1kHz	中間表現
ペナルティ法 [2]	1kHz	1kHz	直結
解析法 1 [3] [4]	1kHz	20Hz	中間表現
解析法 2 [5]	1kHz	20Hz	バーチャルカップリング

## 2.1 力覚制御への要件

力覚インタフェースは、

- 機構の状態を計測し、指先位置を求める。
- 指先位置と提示対象との関係から提示力を求める。
- 力を提示する。

の処理を繰り返すことによって制御され、形状やテクスチャなどの情報を提示する。

力覚インタフェースの制御方法には、

(1) 軽い機構を力提示可能なアクチュエータで駆動するインピーダンス提示型

(2) カセンサで提示力を計測しながら、比較的重い機構の位置・速度を制御するアドミタンス提示型がある。

(1) は、指定の力を提示できるアクチュエータが必要となる。また、機構が十分軽く、アクチュエータが発生した力がそのまま指に伝わる必要がある。この方式では、外部から力が加わった際に機構が動かないようにする(=硬い物体を提示する)ために高速な制御が必要となる [6]。PHANToM [7]、岩田の Haptic

Master [8]、SPIDAR [9] などがこの方式をとっている。

(2) は、指にかかる力をセンサで計測し、指定の力が指に加わるようにフィードバックをかける。大きなアクチュエータや重い機構を使うことができるが、力を計測する必要がある。この方式では、外部から力が加わった際にすばやく機構を動かす(=軽い物体を提示する、または物体を提示しない)ために高速な制御が必要となる [6]。Van der Linde らの HapticMaster [10] などがこの方式をとっている。

(2) は、力を計測しなければならないが、力の計測を高速に行うことは簡単ではない。カセンサの応答速度は 1kHz 程度のものがほとんどであり、(2) はあまり応答速度をあげられない。一方、(1) は、DC コアレスモータのような応答の速いアクチュエータを用いることができる。しかし、提示機構の慣性はそのまま提示されてしまうので、慣性が小さくなければならない。また、機構が柔らかいと指先位置を正確に計測できないという問題も生じる。このため、(2) は、軽量で剛性の高い機構を必要とする。本システムでは、出来るだけ軽量で剛性の高い機構を (1) の方法で高速に制御することで、応答の速い力覚インタフェースを実現する。

## 2.2 物理シミュレーションへの要件

本システムでは、直接操作の対象として剛体をあつかう。運動のシミュレーションは、運動方程式の数値解を逐次的に求めることで実現できる。力覚インタフェースによる操作は、シミュレータ内の物体モデルの位置や物体に加わる力としてシミュレーションに反映させることができるが、操作が運動に反映されるためには逐次計算が1ステップ進む必要がある。このため、シミュレーションの時間刻みが細かいほど、入力の変化に対してすばやく反応することが出来る。時間刻みを細かくすると、同じ時間のシミュレーションに必要な計算の回数が増えてしまう。そのため1回の計算に必要な計算量を低く抑える必要がある。

運動方程式の数値解を求めるためには、物体に加わる力を求める必要がある。重力やバネの力などは、物体の位置などから簡単に求めることが出来る。これに対して、接触力など拘束による力を求めることはそれほど容易ではない。接触力の計算方法には、

解析法 拘束の式と運動方程式を連立させて解くことで、拘束を満たすために必要な力を計算する。Baraff [11] などが主に映像を作ることを目的に提案

した。

ペナルティ法 拘束を違反した度合いに応じて力を加えることで、シミュレーションを進めるうちに拘束違反を解消する方法。接触力を正確に求めたい場合などに用いられてきた。

がある。解析法は、拘束を満たす力を解くため、シミュレーションの時間間隔をある程度広くとっても正確なシミュレーションを行うことができる。しかし、物体と拘束の自由度の数の連立方程式を解く必要があるため、接触点が多い場合などに多くの計算時間を必要とする。ペナルティ法は、拘束が解消するまでシミュレーションを繰り返す必要があるが、拘束力は、侵入量 (= 拘束違反の量) と速度から直接もとまるため、接触点数にかかわらず少ない計算時間でとまる。

そこで、本システムでは、ペナルティ法を用いて接触力を計算し、シミュレーションのステップが小さく応答が高速なシミュレータを構築する。図 2 に、本システムで用いた手法 [2] と解析法 [12] で、図の右側のようにブロックを積んだ状態をシミュレーションした場合のブロック数と計算時間の関係を示す。

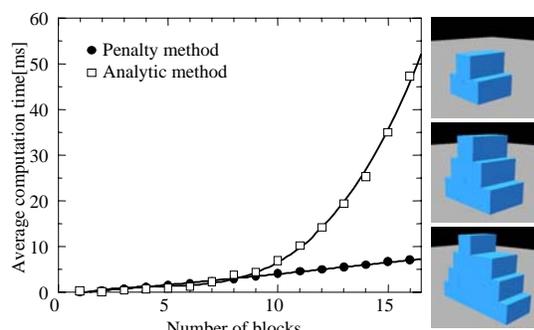


図 2 シミュレーションの計算時間の比較

Fig. 2 Comparison of computation time for simulation

### 2.3 情報伝達への要件

情報伝達方法のバーチャルカップリング [13] は、力覚インタフェースと対応する物体モデルをバネダンパモデルで接続する方法である。物体モデルの動きがバネダンパモデルを介して手に伝わるため、はっきりとした力覚を伝えることは出来ない。

ペナルティ法によるシミュレータでは、シミュレータ内にユーザの手に相当する物体モデル (以降、力覚ポイントと呼ぶ) を用意し、ユーザの手の位置に力覚ポイントを移動し、力覚ポイントに加わる力を力覚イ

ンタフェースで提示することで、シミュレータと力覚インタフェースを接続できる [2]。しかし、この方式では、力覚インタフェースの制御ループに物理シミュレーションの計算が含まれてしまうため、高解像度力覚インタフェースに必要な高速制御が実現できない。

中間表現 [14] は、シミュレータ側で物体モデルの形状の一部 (中間表現) を抽出し、制御側で中間表現に基づいて力覚を提示する方法である。この方法は、制御ループがシミュレーションループによらず高速に更新できるため、精細な形状や硬い物体の提示ができる。そこで、本システムでは中間表現を用いて情報の伝達を行う。

## 3. システムの実現

本節では構築したシステムについて、力覚インタフェース、物理シミュレーション、情報伝達の方法の順に説明する。

### 3.1 力覚インタフェース

2.1 節に記したように、本システムの力覚インタフェースは、軽い機構を力を提示できるアクチュエータで駆動することで力覚を提示する。図 3 に本システムのハードウェア構成を示す。

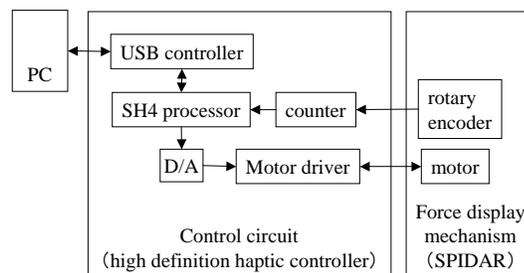


図 3 ハードウェア構成

Fig. 3 hardware configuration

#### a) 軽量で剛性の高い機構

高解像度力覚インタフェースの機構は、軽量性と剛性を兼ね備えていなければならない。リンク機構など材料に圧縮力がかかる機構では、挫屈に耐えるためある程度太い部材が必要になり機構が重くなる。糸を用いた機構は、材料に圧縮力がかからない構造になっているため、軽く剛性の高い機構を実現できる。そこで、本研究では糸を用いた力覚提示機構 SPIDAR [9] (図 4) を元に高解像度力覚インタフェースを実現した。

この機構は、ユーザの指先から伸びる 4 本の糸を 4 面体の頂点に配置されたモータで巻き取ることで、力

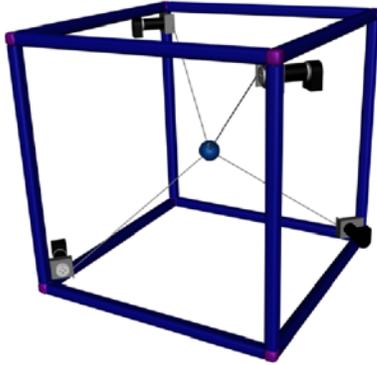


図 4 力覚提示機構 SPIDAR  
Fig. 4 force display mechanism SPIDAR

の提示と指先位置の計測を行なう。外枠の立方体は 1 辺が 40cm の大きさであり、4 頂点にモータが取り付けられている。

本システムで使用した糸の断面積は約  $0.04\text{mm}^2$  であり、材質は高強度ポリエチレンである。この材質は、弾性率約 100GPa、比重 0.97 であり、鋼鉄（弾性率約 200GPa、比重 7.8）とくらべると、半分の弾性率を 8 分の 1 の質量で実現している。また、本システムでは機構の慣性を出来るだけ小さくするために、モータには DC コアレスモータを使用した。

これらにより、モータのローターの慣性などを含めた機構の慣性は、手先位置での質量に換算して約 50g となった。また、糸を張った状態でモータのローターを固定したときの手先位置での弾性は約  $20\text{kN/m}$  となった。

#### b) DC コアレスモータによる駆動

DC コアレスモータは、ローターが巻き線だけで構成されており鉄心を持たない。鉄心がないためローターが非常に軽量な上、インダクタンスが小さくヒステリシスによる遅れもないため高速に応答する。SPIDAR では、アクチュエータに Maxon 社製のコアレスモータ RE25(118746) を用いた。

#### c) モータ駆動回路

従来力覚インタフェースでは、PWM 駆動によってモータを電流制御しているものもあるが、応答性を考えるとアナログ電流制御回路を用いる方が望ましい。

そこで、高解像度力覚インタフェースでは、駆動回路に図 5 のようなアナログ電流制御回路を用いた。この回路は、D/A コンバータで指令した電圧と、モータとグラウンドの間の電流検出用抵抗の電圧が等しくな

るようにモータに電流を流す。図 6 にこの回路の周波数応答を示す。計測はモータをつないだ状態で行っているため、モータのコイルにこの電流が流れてトルクが発生したと考えてよい。

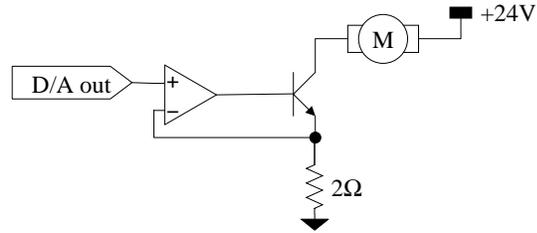


図 5 モータ駆動回路  
Fig. 5 motor driver circuit

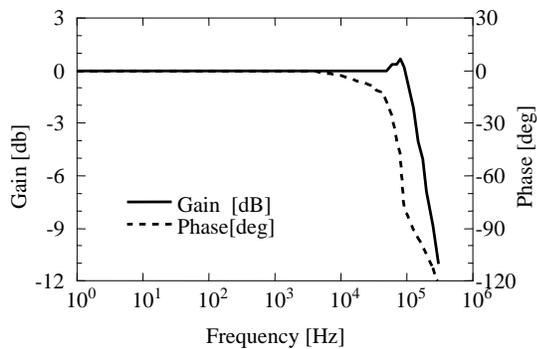


図 6 周波数応答  
Fig. 6 frequency response

#### d) 高速制御のためのプロセッサ

高速制御を実現するためには、計測データからモータのトルクを求める計算までを高速に行う必要がある。最近の PC はこの計算を 10kHz の周期で行うことのために十分な計算速度を持つ。しかし、Windows や Linux といった通常の PC 用の OS の上で正確に 10kHz 周期で処理を行うことは難しい。そこで、高解像度力覚インタフェースでは、PC とは別に制御専用のプロセッサを用意し、制御回路に組み込んだ。プロセッサには SH4 200MHz を使用した。

PC と制御用プロセッサは USB2.0 で結び、1kHz 程度の周期での更新と大容量の情報転送を可能にした。これにより、ユーザは PC と制御回路を USB でつなぐだけで、高解像度力覚インタフェースを使用できる。図 7 に製作した制御回路を示す。

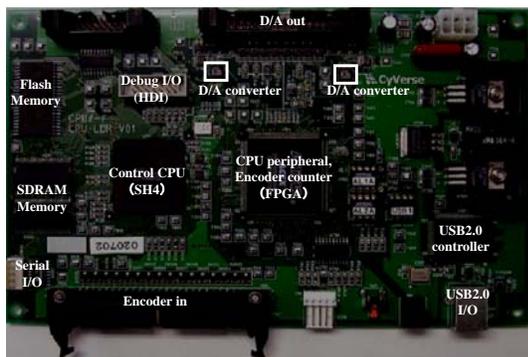


図 7 制御回路  
Fig.7 control circuit

### 3.2 物理シミュレーション

2.2 節に記したように、本システムではベナルティ法を用いて接触力を計算する。

#### e) 接触領域と接触力の計算

本システムのシミュレータは、物体同士の接触領域と侵入の深さを求め、接触領域内の点に侵入量に応じた力を与えることで接触力を求める。これを実現するためには、接触判定、接触部分の3次元形状の解析、接触力の積分の3つの処理を行う必要がある。本システムでは、物体形状を凸多面体の和集合として表し、GJK アルゴリズム [15] で接触判定を、Muller と Preparata の方法 [16] で接触部分の3次元形状を求める。そして各点に働く接触力を三角形ごとに積分することで、接触力を求める。

#### 3.3 情報伝達の方法

2.3 節に記したように、本システムでは中間表現を用いてシミュレーションと力覚制御の間で情報を伝達する。図 8 にシステムのソフトウェア構成を示す。

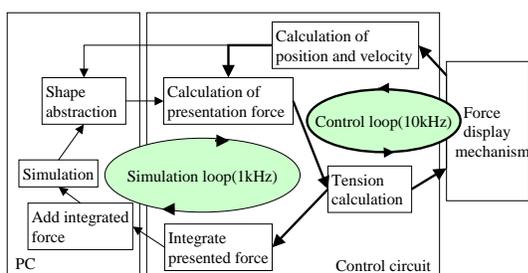


図 8 ソフトウェア構成  
Fig.8 software configuration

#### f) 形状の抽出

シミュレータが力覚ポイントに接触する可能性のある物体形状を抽出する。制御ループ内では抽出した形状だけについて提示力計算をおこなう。これにより提示力計算の負荷を軽減し、制御ループを高速化できる。本システムでは、まず力覚ポイントの近傍の物体を抽出し、物体を構成する凸多面体ごとに、力覚ポイントの中心 (図 9  $p_p$ ) にもっとも近い点の位置 (図 9  $p_1, p_2, p_3$ )、速度とその点から力覚ポイントに向かう向き (図 9  $n_1, n_2, n_3$ ) を求めて中間表現とする。この計算は GJK アルゴリズム [15] によって高速に行うことができる。なお力覚ポイントの形状には球を用いた。

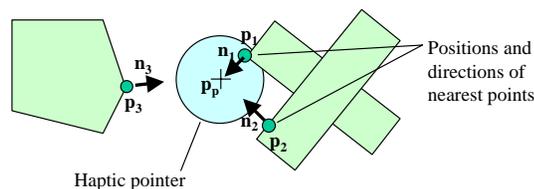


図 9 形状の抽出  
Fig.9 shape abstraction

#### g) 提示力計算

抽出した最近傍点の位置と向きに平面を考え、平面を力覚提示することで提示力を求める。平面の提示のための力覚提示は、指先が平面に侵入した場合に、平面と指先位置の間にバネダンパモデルを仮定することによって行った。力覚ポイントが侵入している平面の位置を  $p_i$ 、速度を  $v_i$ 、向きを  $n_i$ 、力覚ポイントの位置を  $p_p$ 、速度を  $v_p$ 、バネ係数、ダンパ係数を  $K_i, B_i$  とすると、提示力  $f$  は、

$$f = \sum_i K_i ((p_i - p_p) \cdot n_i) n_i + B_i ((v_i - v_p) \cdot n_i) n_i \quad (1)$$

となる。 $K_i, B_i$  は、提示物体の材質感を左右するパラメータなので、物体モデルの材質ごとに異なる値をとるが、安定に力覚提示可能な範囲に制限する必要がある。

ユーザが物体に与えた力をシミュレーションに反映させるため、ここで提示した力を積分し、1シミュレーションループの間に物体に加わった力をシミュレータ内の物体モデルに加える。

### 3.4 機構の制御

#### h) 張力計算

目的の力を提示するためには、各モータが発生する糸の張力を求めなければならない。算出する各糸の提示張力を  $\tau_i$ 、指先から各モータへの方向の単位ベクトル  $(\frac{q-p_i}{|q-p_i|})$  を  $\phi_i$  としたとき、提示される力ベクトル  $f'$  は

$$f' = \sum_{i=1}^4 \tau_i \phi_i \quad (2)$$

となる。

モータが出せる張力の最大値を  $\tau_{max}$ 、糸が弛まないための張力の最小値を  $\tau_{min}$  とすると、張力には次の制約が与えられる。

$$\tau_{min_i} \leq \tau_i \leq \tau_{max_i} \quad (3)$$

このとき目的の力ベクトル  $f$  を得るために、次の目的関数を最小にする張力  $\tau_i$  を算出する。

$$\text{目的関数: } J = \|f - f'\|_{Q_F} + \lambda \|\tau\|_{Q_T} \quad (4)$$

( $\|x\|_Q$  は  $x$  のノルム  $x^T Q x$  を意味する)

$\tau$  は各糸の張力を成分とするベクトルである。目的関数に第2項目を入れることによって、出来るだけ張力の総和が小さく、張力の変化が連続となるような  $\tau$  を選ぶようになる。 $\lambda$  は各項の比重を決める係数である。

#### i) 位置計算

エンコーダとモータから計測できるのは糸の長さなので、そこから指先位置を計算する必要がある。4つのモータの位置を  $p_i$ 、指先の位置を  $q$ 、糸の長さを  $l_i$  とすると、

$$|p_i - q|^2 = l_i^2 \quad (5)$$

となる。この4本の式から  $|q|^2$  の項を消去すると、

$$-2p_4 \cdot q + 2p_3 \cdot q + |p_4|^2 - |p_3|^2 = l_4^2 - l_3^2 \quad (6)$$

$$-2p_3 \cdot q + 2p_2 \cdot q + |p_3|^2 - |p_2|^2 = l_3^2 - l_2^2 \quad (7)$$

$$-2p_2 \cdot q + 2p_1 \cdot q + |p_2|^2 - |p_1|^2 = l_2^2 - l_1^2 \quad (8)$$

を得る。整理すると、

$$\begin{pmatrix} -2p_4 + 2p_3 \\ -2p_3 + 2p_2 \\ -2p_2 + 2p_1 \end{pmatrix} q = \begin{pmatrix} l_4^2 - l_3^2 - |p_4|^2 + |p_3|^2 \\ l_3^2 - l_2^2 - |p_3|^2 + |p_2|^2 \\ l_2^2 - l_1^2 - |p_2|^2 + |p_1|^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

となり、指先位置  $p$  が求まる。

## 4. システムの評価

構築した高解像度物理ベース直接操作環境が、精細な形状や硬い物体を提示できること、物理シミュレータ内の物体モデルを直接操作できることを確認するため2つの実験を行った。

### 4.1 剛性の高い面の提示

構築したシステムが、従来の力覚インタフェースに比べて硬い物体を提示できることを確かめるため、制御周期を 1kHz, 5kHz, 10kHz とした場合について次の実験を行った。

様々なダンパ定数について水平面を提示し、被験者の上に触れさせた。被験者は右手でマウスを操作し、提示面のバネ係数をスライダーで調整しながら、左手で力覚インタフェースを介して提示面に触れた。被験者には、平らな面に感じられる最大のバネ定数を探そう指示した。

被験者が選んだバネ定数が最大となったときのバネ定数とダンパ定数を表2に示す。10kHzのときの

表2 バネ定数の最大値  
Table 2 maximum value of spring coefficient

制御周期	バネ係数 K	ダンパ係数 B
1kHz	7.0kN/m	10N/ms <sup>-1</sup>
5kHz	25.5kN/m	75N/ms <sup>-1</sup>
10kHz	28.5kN/m	100N/ms <sup>-1</sup>

バネ定数 28.5kN/m は、Sensible Technologies 社の製造する力覚インタフェース PHANTOM Premium 1.0 [17] が提示可能な硬さ 3.5kN/mm の8倍にあたる。

SPIDAR の機構のバネ定数が 20kN/m であり、指先に提示されるバネ定数は機構と制御によるバネを直列につないだものになると考えられるので、指先には約 12kN/m の硬さが提示されたと考えられる。

### 4.2 精細な形状の提示

提案システムがより詳細な形状を提示できることを確かめるため、物体形状をなぞった際の力覚ポイントの軌跡を計測する実験を行った。実験では、提案システムと制御周期の低速な従来システムで同じ形状(歯車)を映像と力覚で提示し、被験者に形状をなぞるように指示した。被験者には、抗力のほかに摩擦力 ( $\mu = \mu_0 = 0.5$ ) を提示した。このときの、力覚ポイントの軌跡を図10に示す。

力覚インタフェースで摩擦力を提示すると面の向き判別が難しくなるため、形状を把握することが難し

くなる．このため従来システムでは，軌跡と物体形状が一致しておらず，被験者は詳細な形状を把握できていない．一方，提案システムでは形状と軌跡がほぼ一致しており，摩擦力の提示と詳細な形状の提示が両立していることが分かる．

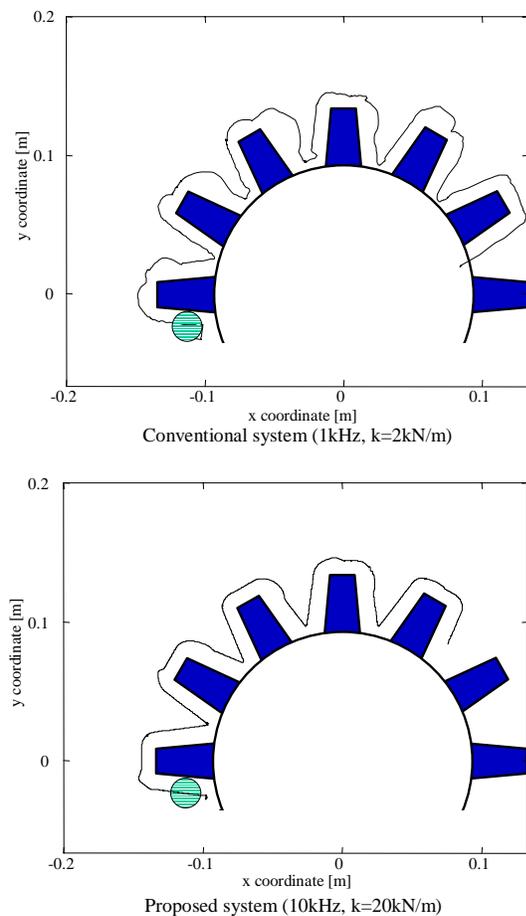


図 10 提案システムと従来システムでの力覚ポイントの軌跡

Fig. 10 trajectories of haptic pointer in proposed and previous system

#### 4.3 物理ベース VR 環境の直接操作

構築したシステムを用いて，床と3つの積み木からなるVR環境を構築した．床の上の積み木に触れ，積み木を崩すなどの操作をしたところ，積み木の角の形状がはっきりと感じられたほか，積み木の慣性や床との摩擦の様子を感じることができた．図 11 に操作の様子を示す．

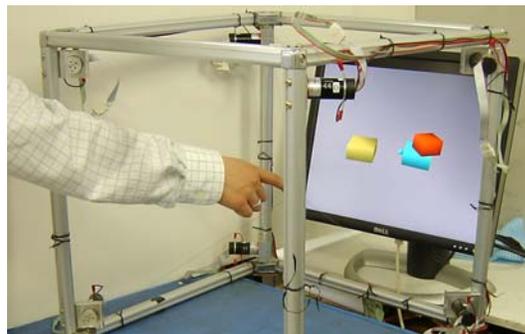


図 11 開発したシステムによる直接操作の様子

Fig. 11 direct manipulation by the developed system

## 5. おわりに

本研究は，高解像度力覚インタフェースと高速応答物理シミュレータを組み合わせることで，物体の形状，硬さ，慣性をはっきりと感じることができるVRシステムを構築した．現在のPC(Pentium4 2.8GHz)では，1kHzでシミュレーションを行うためには，物体の数を数個に抑えなければならず，実用的なアプリケーションを構築することは難しい．シミュレーションと情報伝達の方法を工夫し，より多くの物体を扱えるようにすることが今後の課題に挙げられる．

### 文 献

- [1] 赤羽克仁, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤誠: “10kHz の更新周波数を実現する高解像度ハプティックコントローラの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.9, No.3, 2004
- [2] 長谷川晶一, 藤井伸旭, 赤羽克仁, 小池康晴, 佐藤誠: “力覚インタラクションのための多面体の接触体積に基づく実時間剛体運動シミュレーション”, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.2, 2004
- [3] S. Hasegawa, M. Ishii, Y. Koike, M. Sato: “Inter-process communication for force display of dynamic virtual world”, Proc. of ASME Dynamic Systems and control division, pp.211-218, 1999
- [4] P.J. Berkelman, R. L. Hollis: “Lorentz magnetic levitation for haptic interaction: Device design, performance, and integration with physical simulations,”, International Journal of Robotics Research, Vol. 19, No. 7, July 2000, pp. 644-667.
- [5] N. Tarrin, S. Coquillart, S. Hasegawa, L. Bouguila, M. Sato: “The Stringed Haptic Workbench: a New Haptic Workbench Solution”, Proc. of Eurographics, September 2003
- [6] R. J. Adams, M. R. Moreyra, B. Hannaford “Stability and Performance of Haptic Displays: Theory and Experiments”

- [7] T. H. Massie and J. K. Salisbury: "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects". Proc. of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Nov. 1994.
- [8] T. Asano, H. Yano, H. Iwata: "Basic Technology of Simulation System for Laparoscopic Surgery in Virtual Environment with Force Display", Medicine Meets Virtual Reality, IOS Press, pp.207-215, 1997.
- [9] M. Ishii, M. Sato, "A 3D Spatial Interface Device Using Tensed Strings", Presence Vol. 3, No. 1, Winter 1994, pp.81-86
- [10] R.Q. Van der Linde, P. Lammertse, E. Frederiksen, B. Ruitter: "The HapticMaster, a new high-performance haptic interface", Proc. of Euro Haptics 2002
- [11] D. Baraff: "Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies", Computer Graphics Proceedings(SIGGRAPH 89) Vol. 23, pp. 223-232, 1989.
- [12] R. Smith: "Open Dynamics Engine"  
<http://opende.sourceforge.net/>
- [13] J. M. Brown, J. E. Colgate: "Passive implementation of multibody simulations for haptic display", Proc. of the 1997 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Vol. DSC-61, pp. 85-92.
- [14] Y. Adachi and T. Kumano, K. Ogino: "Intermediate Representation for Stiff Virtual Objects", Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium '95, pp.203-210
- [15] E. G. Gilbert, D. W. Johnson, S. S. Keerthi: "A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space", IEEE Journal of Robotics and Automation 4(2), pp.193-203, 1988
- [16] D. E. Muller, F.P.Preparata: "Finding the intersection of two convex polyhedra", Theoretical Computer Science, 7(2), pp.217-236 1978
- [17] PHANTOM Premium 1.0 Technical Specification  
<http://www.sensable.com/>

(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)

#### 長谷川晶一

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. パーチャルリアリティ, 力覚インタフェース, ヒューマンインタフェースの研究に従事.

#### 赤羽 克仁

2002 年東京工業大学工学部情報工学科卒業, 2004 年同大学院知能システム科学専攻修士終了, 同年同大学院博士課程在学中. 力覚インタフェースに関する研究に従事.

#### 岩下 克

2003 年, 東京工業大学工学部情報工学科卒業. 現在, 同大学院博士前期課程(知能システム科学). 移動インタフェース, 力覚インタフェースの研究に従事.

#### 馬場 次郎

現在, 東京工業大学工学部情報工学科. 物理シミュレーションの研究に従事.

#### 小池 康晴 (正員)

1987 年東京工業大学工学部情報工学科卒業, 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, 現在にいたる. パターン認識, 画像処理の研究に従事. 工学博士.