

# 力覚ディスプレイをもつ動的な仮想世界のための 力積に基づくプロセス間通信

長谷川晶一, 石井雅博, 佐藤誠, 小池康晴

東京工業大学 精密工学研究所

神奈川県横浜市緑区長津田町 4259

TEL: 045-924-5050, FAX:045-924-5016 EMail:{hase,mishii,msato,koike}@pi.titech.ac.jp

本論文は動的な仮想世界を安定に更新するために、更新が低速な世界管理プロセスと更新が高速な力覚提示プロセスとの間の通信にユーザが仮想世界に加えた力積の情報を含めることを提案する。

力覚提示システムは、仮想世界を管理する世界管理プロセスと力覚提示を行う力覚提示プロセスに分けられる。力覚提示装置でばねダンパモデルを用いて硬い物体を表現するためには力覚提示プロセスの更新は高速 (1kHz 程度) でなければならない。一方世界管理プロセスは複雑で動的な仮想世界の管理を行うため多くの計算資源が必要となり、更新が低速になる。

両者の通信方式として世界管理プロセスがユーザの指近傍の形状特徴を力覚提示プロセスに送り、力覚提示プロセスがその形状を提示する方法が提案されている。しかしこの通信方式では動的な世界の安定な更新ができなかった。本研究では力積に着目することで動的な世界を安定に更新できる通信方式を提案する。

## Interprocess Communication for A Dynamic Virtual World with Haptic Display Based on Force Integration.

Shoichi HASEGAWA, Masahiro ISHII, Makoto SATO, and Yasuharu KOIKE

Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

This paper proposes a novel inter-process communication, between a virtual world manager with slow update rate and a haptic controller with fast update rate, which incorporates the integrated force given from the user to the virtual world. Haptic system can be divided into world manager and haptic controller. High-speed refresh rate, generally 1kHz, is required for haptic controller to present stiff virtual objects that have spring-damper character with haptic display. On the other hand, the managing of an interactive and rich virtual world that takes a lot of computational time makes the refresh rate of world manager slow.

Some methods of inter-process communication has been proposed. In those methods, the world manager sends features of shapes of the virtual world to the haptic controller, and the haptic controller presents the receiving shapes to the user.

Although those methods work well on condition that the virtual world is static, goes wrong on dynamic world. This paper proposes a novel inter-process communication for a dynamic virtual world that incorporates force integration.

### 1 はじめに

計算機の進歩に伴って 3次元 CAD システムなど計算機で 3次元の仮想物体を扱うシステムが多数開発されている。3次元仮想世界で仮想物体を容易に操作するために、直感的なインターフェイスが望まれている。

力覚提示システムは操作者に力を提示することで操作者に物体に触った感覚や物体を動かした感覚を提示するシステムである。力覚提示システムを用いると操作者は実際の物体を操作する場合と同じように仮想物体を操作することができる。また操作者が加えた力から操作の強さを計測でき、仮想物体の動作に反映させることができる。このように仮想世界を手で操作する場合、力覚提示

は非常に有効であり、CAD システムをはじめ、3次元仮想世界を操作するシステムに組み込まれることが期待される。

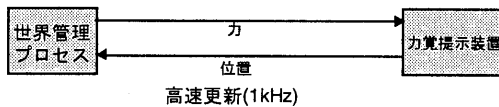
力覚提示装置で硬い仮想物体を表現するためには、力覚ディスプレイを 1kHz 程度の高い更新周期で制御する必要がある。Lonnie と Wayne [1] は安定な操作のためには、6.7kN/m の硬さで 100Hz、70kN/m の硬さで 1kHz の更新が必要だと報告している。仮想物体を操作するためには、仮想物体にある程度の硬さが必要となる。そのため力覚提示システムは力覚提示装置を高速に制御しなければならず、実際のシステムに組み込まれて用いられることは少なかった。

Chang と Colgate [2] は力覚提示装置を用いて、3つの固定物体と4つの移動物体からなる2次元の仮想世界を更新周期1kHzで構築した。このシステムは、指の位置を計測し、仮想世界を更新し、力覚を提示するというサイクルを同じプロセスで行っていた。そのため、より多くの計算資源を必要とする複雑な仮想世界を表現すると更新周期が遅くなってしまい硬い物体が表現できなくなってしまう。

### 1.1 力覚提示プロセスの分離

そこで、プロセスを世界管理と力覚提示の2つに分け、仮想世界の管理を低速で行い、力覚提示装置の制御を高速に行う方法が提案され、プロセス間の通信が提案された [3][4][5]。これらの研究の世界管理プロセスは、ユーザーの指近傍の空間の形状特徴を中間表現 (平面や球などの簡単な基本形状) に変換し、力覚制御プロセスに送る。また力覚制御プロセスは、中間表現に基づいてユーザーの指に働く力を高速 (1kHz) に更新する (図1)。この手法により複雑な仮想世界を表現可能な力覚提示システムが構築できるようになった。

初期の力覚提示システム



力覚提示プロセスを分割した力覚提示システム

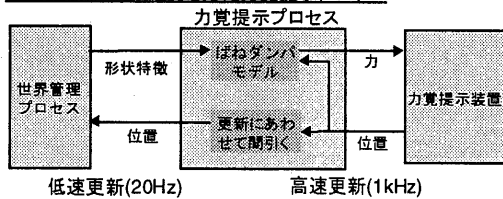


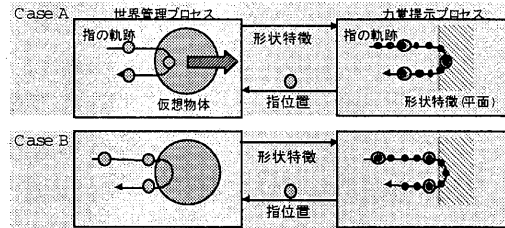
図1: プロセスの分割

### 1.2 従来の方式の問題

従来の分割手法は静的な仮想世界を上手く表現できるが、動的な世界が上手く表現できないという問題を持っている。

例として仮想世界に物体を置き、それを指で突付くことを考える。指で突付かれた後の物体の速度は指の位置計測のサンプリング時刻によって変化する。図2-Aと図2-Bの違いは世界管理プロセスが指の位置を受け取るサンプリング時刻だけである。A,Bどちらの場合にも指は同じように動き、ユーザーには同じだけの力が提示される。しかし、Aの場合には指が物体に衝突したことが世界管理プロセスに検出され物体は動くが、Bの場合には検出されず物体は動かない。このように従来方式では世界管理

プロセスのサンプリング時刻の影響で安定に仮想世界を更新できない。



- : 力覚提示プロセスが計測した指位置
- : 世界管理プロセスが受け取った指位置

図2: 問題の例

### 1.3 本研究の目的

従来の分割手法 [3][4][5] では世界管理プロセスは形状特徴という高度な情報を力覚提示プロセスに送っている。そして力覚提示プロセスは形状特徴に基づき力覚レンダリングを行ない、形状特徴をユーザに提示する力の情報に変換して力覚提示装置に送っている。しかし力覚提示プロセスは計測した位置情報に処理を加えずに、位置情報を世界管理プロセスに送り返している。

力覚提示プロセスが送り返す情報をより高度な情報に変換することにより、ユーザーの意図を世界管理プロセスに正確に伝えることができると考えられる。本研究は動的な仮想世界を安定に更新するために必要な情報を明らかにし、高度な情報を送り返す力覚提示プロセスを提案することで動的仮想世界を安定に更新可能な力覚提示システムを構築することを目的とする。

2では、問題が世界管理プロセスが受け取る情報の不足によって発生することと、物体の運動が力積によって求まることを示し、力積を用いた通信方式を提案する。さらに例をあげて提案手法の効果を示す。3では、提案する力覚提示システム全体の動作を示す。4では、シミュレーションによって提案手法の効果を確認するとともに、実験を行ない提案方式が仮想世界の操作性を改善していることを示す。

## 2 解決方法

### 2.1 問題の原因

サンプリング時刻の影響は、世界管理プロセスが受け取る位置情報のサンプリング周期が粗いために起こる。力覚提示プロセスが計測した指の軌跡をすべて世界管理プロセスへ送ることによりこの問題は避けられるが、それでは通信量が大幅に増えてしまう。そこで、物体の運動の安定な更新のために必要な情報について考える。

## 2.2 物体の動きと力

物体の運動は運動方程式で表される。運動方程式を積分すると、物体の速度の変化は物体に加えられた力積によって決定されることがわかる。

ここで:

- $m$ : 物体の質量.
- $I$ : 慣性行列 ( $3 \times 3$  行列).
- $v$ : 重心速度.
- $r$ : 重心位置.
- $\omega$ : 物体の角速度.
- $f$ : 物体に働く力.
- $p$ :  $f$  の作用点の位置.

とすると、剛体の運動は:

$$m \frac{dv}{dt} = f \quad (1)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = (p - r) \times f \quad (2)$$

と表される。

式 (1) を  $t$  から  $t + \Delta t$  まで積分すると:

$$\int_t^{t+\Delta t} m \frac{dv}{dt} dt = \int_t^{t+\Delta t} f dt$$

更新後の物体重心の速度は:

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \frac{1}{m} \int_t^{t+\Delta t} f dt$$

となる。

式 (2) を  $t$  から  $t + \Delta t$  まで積分すると:

$$\int_t^{t+\Delta t} I \frac{d\omega}{dt} dt = \int_t^{t+\Delta t} (p - r) \times f dt$$

となる。ここで、 $\Delta t$  が十分小さく  $p$  と  $r$  が定数だとみなせるとすると:

$$\Delta\omega = I^{-1}((p - r) \times \int_t^{t+\Delta t} f dt)$$

となり、更新後の物体の角速度は:

$$\omega(t + \Delta t) = \omega(t) + I^{-1}((p - r) \times \int_t^{t+\Delta t} f dt)$$

となる。

以上から、物体の速度が力積によって決まることがわかった。

## 2.3 通信方式の提案 [6]

前の章で述べたように、物体にかかったある時刻での力は重要ではなく、ある期間にかかった力積が物体の運動を決める。

そこで、力覚提示プロセスと世界管理プロセスの通信に力積を用いることを考える。図 3 は、従来の通信方式 [3][4][5] と提案する通信方式を対比している。

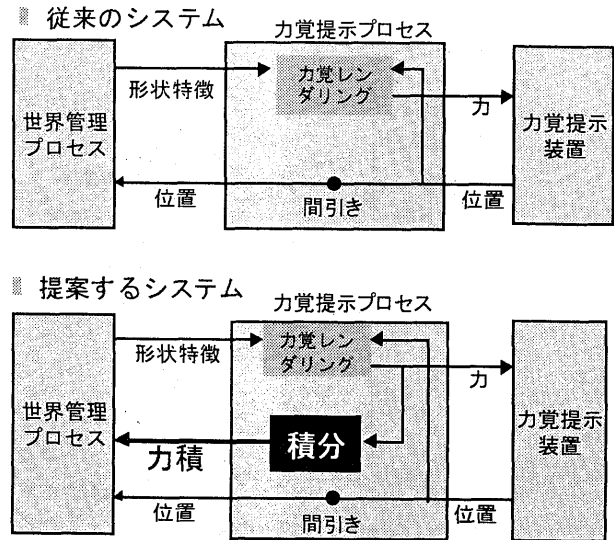


図 3: 従来手法と提案手法の比較

従来手法では、力覚提示プロセスは指の位置情報のみを世界管理プロセスに送っていた。提案手法では、力覚提示プロセスは、世界管理プロセスの 1 周期の期間、ユーザが仮想世界に加えられた力を積分し力積を求める。そして力積の情報を世界管理プロセスに送る。世界管理プロセスは仮想世界を力積に基づいて更新する。更新の手続きは以下の通りである。

1. 世界管理プロセス: 仮想世界の形状特徴を求める。
2. 世界管理プロセス: 形状特徴を力覚提示プロセスに送る。
3. 力覚提示プロセス高速更新部分:
  - (a) 指位置の計測する。
  - (b) 形状特徴を補間し、提示する形状を求める。
  - (c) 力覚レンダリングを行ない、形状を表すために提示する力を求める。
  - (d) 力を提示する。
  - (e) 提示した力の積分する。
4. 力覚提示プロセス: 力積、位置を世界管理プロセスに送る。
5. 世界管理プロセス: 力積に基づいて仮想世界を更新。

## 2.4 提案手法の効果

提案手法の効果を示すため、例をあげる。図 4 は突付かれた後の物体の動きへの提案手法の効果を表している。従来方式では、世界管理プロセスが受け取った指位置に基づいて、指の仮想物体への侵入量 (= 図 4 上の長さ) に基づいて物体の速度を更新するため、サンプリング時刻

によって押された後の物体の速度が異なる。提案方式では、力覚提示プロセスが力積 (=図4下の面積) を計算するため、サンプリング時刻の影響がほとんどない。

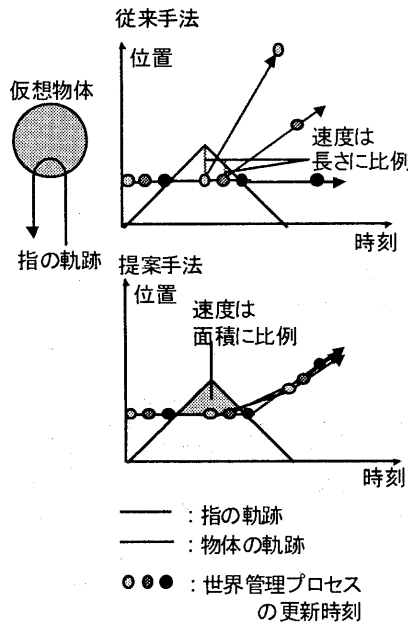


図4: 提案手法の効果

### 3 力覚提示システムの構築

提案した通信方式に基づいて、力覚提示システムを構築した。構築した力覚提示システムの詳細を述べる。

#### 3.1 形状特徴の求め方

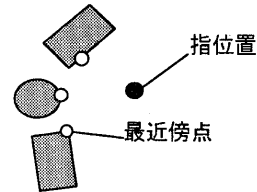
世界管理プロセスは仮想世界の形状特徴を求め、力覚提示プロセスに送る。構築したシステムでは形状特徴として複数の平面を用いた。

以下に仮想世界から形状特徴である平面を求める手続を示す。

1. 指を中心としたある半径内の物体を列挙する。
2. 1で列挙した物体1つ1つについて、指から一番近い点を求める。(図5を参照)。
3. 1で列挙した物体1つ1つについて、2で見つかった点を通り、法線が指位置に向きの平面を作る。(図5を参照)。

ここで、平面とは2で見つけた点と3で見つけた法線ベクトルの組のことを表す。

#### 2 最近傍点を求める



#### 3 面を作る

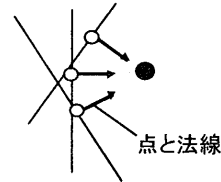


図5: 平面の準備

### 3.2 形状特徴の補間

力覚提示プロセスの更新は高速だが、形状特徴は世界管理プロセスの低速な更新にあわせて送られる。形状に変化があった場合、受け取った形状特徴をすぐにユーザに提示すると、形状へのユーザの指の侵入量が突然変化することがあるため、突然大きな力を提示してしまい、ユーザは不自然な力覚を感じることになる。そこで力覚提示プロセスは受け取った形状特徴を時間軸上で補間し、形状特徴が連続に変化するように形状提示する。

力覚提示プロセスは最後に受け取った形状特徴 (B) とその1つ前に受け取った形状特徴 (A) を利用して補間を行なう。2つの形状特徴の間を補間する方法として、AとBの間を補間する内挿とAとBから変化率を求め、変化分をBに足す外挿が考えられる。外挿を行なうとプロセス間の通信遅れを除去できるが、形状特徴の変化を線形に予測することになるため、予測が外れた場合に誤った形状を提示することになる。そこで構築したシステムではAとBを内挿した。

構築したシステムでは形状特徴として複数の平面を用いている。世界管理プロセスが更新する間に力覚提示プロセスが  $n$  回更新するものとする。世界管理プロセスの  $i$  回目の更新から  $i+1$  回目の更新の間に、力覚提示プロセスは  $ni$  回目の更新から  $ni+n-1$  回目の更新を行なう。

世界管理プロセスが  $i$  回目の更新時に送る平面の位置を  $P_{W_i}$ 、法線ベクトルを  $N_{W_i}$ 、力覚提示プロセスが  $ni+j$  回目の更新時に補間する平面の位置を  $P_{H_{ni+j}}$ 、法線ベクトルを  $N_{H_{ni+j}}$  とすると補間した平面は

$$P_{H_{ni+j}} = \frac{j}{n} P_{W_i} + \frac{n-j}{n} P_{W_{i-1}}$$

$$N_{H_{ni+j}} = \frac{j}{n} N_{W_i} + \frac{n-j}{n} N_{W_{i-1}}$$

と表せる。実際には複数の平面が送られるので、各平面についてこの計算を行なう。

### 3.3 力覚レンダリング

力覚提示プロセスは補間した形状特徴と計測したユーザの指位置からユーザに提示する力を決定する。構築したシステムでは、ばねダンパモデル [7] を用い、ユーザの指が平面に侵入した量とその微分に比例した力を提示している。

ユーザの指位置を  $C_j$ 、すべての平面の外側の点でユーザ指位置に最も近い点を  $D_j$  とすると提示する力を  $f_j$  は、

$$f_j = k_p(D_j - C_j) + k_d \frac{((D_j - C_j) - (D_{j-1} - C_{j-1}))}{\Delta t}$$

( $k_p$ : ばね定数,  $k_d$ : ダンパ定数,  $\Delta t$ : 更新周期) と表される。

### 3.4 力の積分

世界管理プロセスの 1 周期の間、力覚提示プロセスはユーザが仮想世界に加えた力を積分する。ユーザが加えた力と、力覚提示装置が発生した力は、大きさが等しく向きが反対である。世界管理プロセスの  $i$  回目の更新時に力覚提示プロセスが送る力積を  $F_i$ 、力覚提示プロセスの  $ni + j$  回目の更新時にユーザに提示する力を  $f_{ni+j}$  とすると、

$$F_i = \sum_{j=0}^{n-1} f_{n(i-1)+j}$$

となる。

### 3.5 仮想世界の更新

世界管理プロセスは受け取った力積に基づいて物体の運動を更新する。構築したシステムでは仮想物体として剛体を扱った。

剛体の質量を  $m$  慣性テンソルを  $I$  速度を  $v_i$  角速度を  $\omega_i$  重心位置を  $r$  衝突点の位置を  $p$  とすれば、更新後の物体の運動は

$$v_i = v_{i-1} + \frac{1}{m} F_i$$

$$\omega_i = \omega_{i-1} + I^{-1}((p - r) \times F_i)$$

となる。

## 4 評価

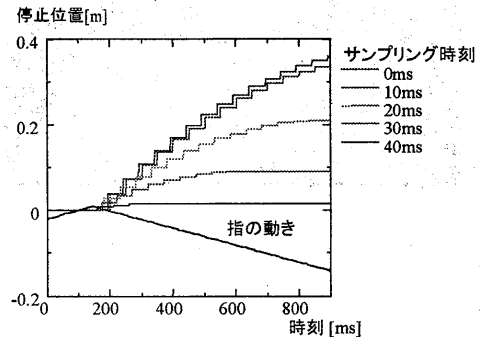
### 4.1 シミュレーション

摩擦のある床の上に置かれた仮想物体を指で押した後の仮想物体の動きを計算機上でシミュレートした。同じ状況を 5 つのサンプリング時刻についてシミュレートし、従来手法と提案手法を比較した。

図 6 は仮想物体の動きを比較したグラフである。仮想物体の位置更新はサンプリング時刻に行なわれるため、動きは階段状になる。

グラフ上の 5 本の線は、仮想物体の動きを表す。5 本の違いは世界管理プロセスのサンプリング時刻だけである。シミュレーションの結果から、提案手法を用いた B の場合には従来手法に比べてサンプリング時刻の影響が小さくなっていることがわかる。

A: 押された物体の動き(運動計算に指位置を用いた場合)



B: 押された物体の動き(運動計算に力積を用いた場合)

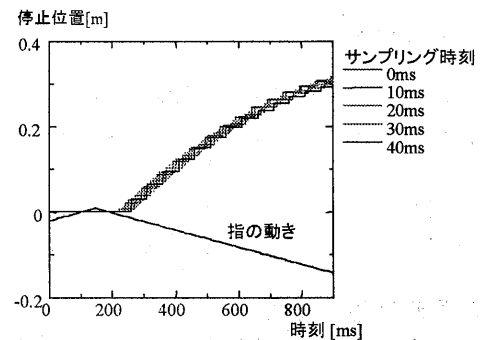


図 6: シミュレーション結果

### 4.2 実験

#### 4.2.1 実験のためのシステム

実験のための仮想世界は 3 次元の物理シミュレータ上に構築した。物理シミュレータは重力、空気抵抗、物体の衝突、物体同士の摩擦を考慮したものであった。実験のためのシステムの詳細を以下に示す。

力覚提示装置	SPIDAR [8]
計算機	PC Pentium-II 300MHz
世界管理プロセスの更新周期	20Hz
力覚提示プロセスの更新周期	1kHz
ばねモデルの係数	2kN/m

#### 4.2.2 実験の作業

図 7 は実験時に被験者に提示する画面である。仮想物体は、距離目盛として横縞に模様がつけられた床の上に

置かれている。実験の作業は、仮想物体を手前から奥に向かって一度だけ指で押し、目標位置である 30cm の目盛まで仮想物体を動かすことである。被験者はこの作業を従来手法と提案手法について 30 回行った。

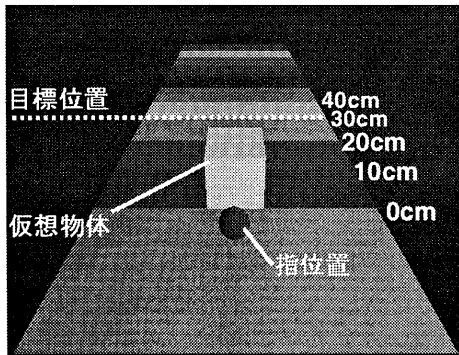
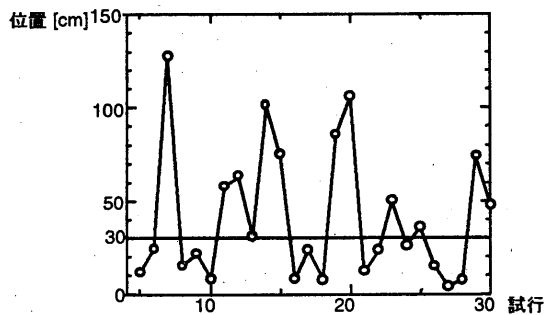


図 7: 実験の作業の画像

#### 4.2.3 実験結果

立方体の停止位置を被験者 1 人分について図 8 に示した。提案手法を用いることで従来手法に比べて停止位置のばらつきが小さくなっていることが分かる。図 9 は作業に十分慣れた後の 20 試行の誤差の偏差を表す。実験結果から提案手法が操作の正確性を改善することが分かる。

##### 従来手法を用いた場合



##### 提案手法を用いた場合

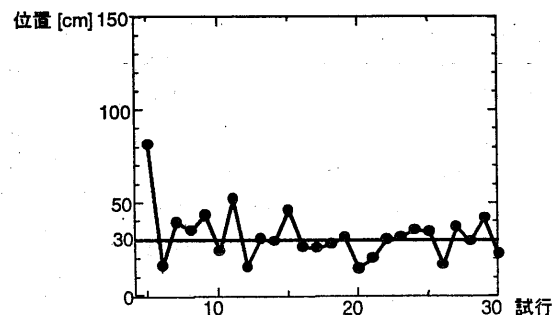


図 8: 仮想物体の停止位置

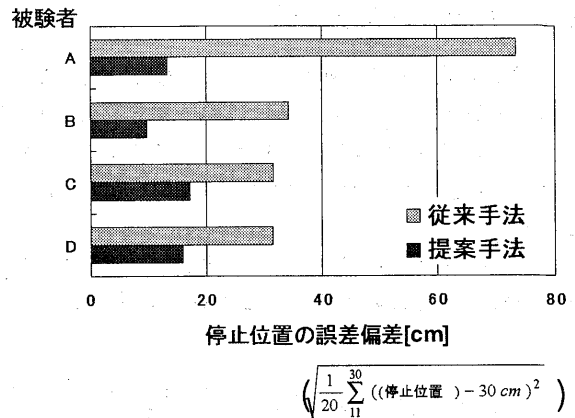


図 9: 作業精度の比較

## 5 考察

### 5.1 力覚提示と画像提示の違い

3次元の仮想世界を画像提示するシステムでは、従来から仮想世界管理と画像提示を分割し、画像提示をハードウェアで行なうなどの分担を行なっている。

そこで、世界管理プロセスと力覚提示プロセスの分割を、画像提示システムの分割と比較する。

#### 5.1.1 画像提示システムの分割

画像提示装置はユーザに情報を提示する出力装置であるが、ユーザの意図を仮想世界に伝える入力装置ではない。そのため図 10 のように情報は仮想世界からユーザに向かって流れる。

ディスプレイと仮想世界の間グラフィックスエンジンが入り作業を分担すると、仮想世界が送り出す情報がより高度になる。

#### 5.1.2 力覚提示システムの分割

力覚提示装置は形状と力の提示の他に、ユーザの指位置とユーザが加えた力を仮想世界に入力する機能がある。そのため図 11 のように情報が仮想世界とユーザの間で双方向に流れる。

従来の複雑な世界のためのシステムでは、力覚提示装置と仮想世界の間力覚提示プロセスが入り作業を分担すると、仮想世界が送り出す情報はより高度な情報へと変化する。しかしユーザから仮想世界への情報は変化しないため、ユーザの意図を仮想世界に伝えることができなかった。

提案手法では仮想世界が受け取る情報が力積という高度な情報になるため、ユーザの意図を正確に伝えることができたと考えられる。

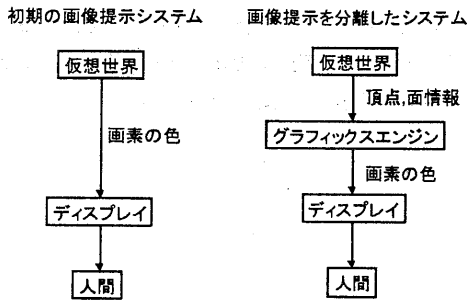


図 10: 画像提示処理の階層化

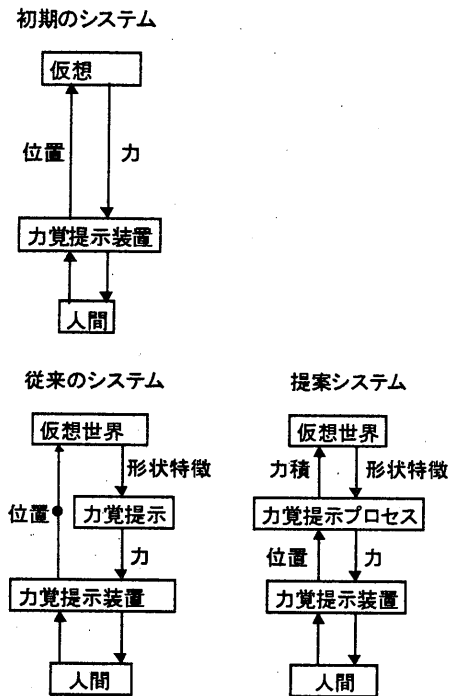


図 11: 力覚提示処理の階層化

## 5.2 画像提示プロセスによる時間補間

世界管理プロセスの更新周期を 10Hz にしたところ、画像中の仮想物体の更新が滑らかでなくなったが、仮想物体を触ったり押したりする感覚はそれほど不自然にはならなかった。この場合、画像描画プロセスが、力覚提示プロセスと同じように物体の位置を時間補間して表示することで、画像更新の滑らかさを改善できると考えられる。

## 5.3 摩擦の表現

力覚提示装置は面の位置を補間する。このときの面の位置は、物体と指の衝突点を表すため、面の位置の速度は面が表す物体の速度とは異なる。摩擦力を計算するためには、物体と指の相対速度が必要となる。摩擦を表現するために世界管理プロセスは、面の位置とは別に物体の速度の情報を力覚提示プロセスに伝達する必要がある。こ

の考えを実装したところ、摩擦が表現できることが確かめられた。

## 5.4 プロセス分割の階層性

本研究は力覚提示プロセスの機能を少し増やし、通信内容を少し高度にすることで仮想世界の更新周期が低くても自然な更新ができることを示した。力覚提示プロセスの機能を更に増やし、それにあわせてより高度な情報を通信すれば、より自然な仮想世界の更新ができると考えられる (図 12)。

本論文の力覚提示プロセスは、力積の計算を行ない、力積を通信することで操作の正確性を改善した。剛体の運動計算の一部を力覚提示プロセス行ない、剛体の情報の一部を通信に含めたところ、世界管理プロセスの更新を低く押さえた場合の力覚提示の感覚が改善された。

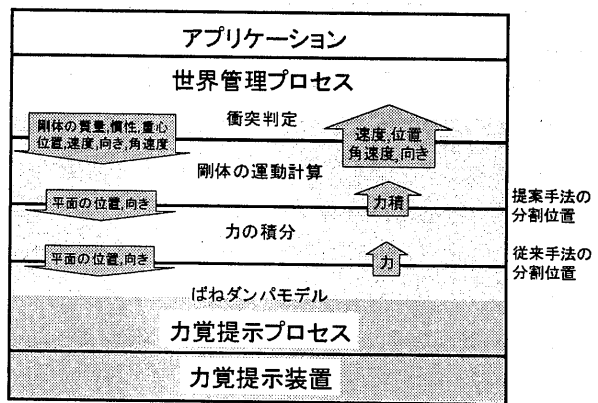


図 12: 力覚提示プロセスの役割と通信内容

## 5.5 物体の変形

力覚提示装置で物体の変形を行う方法はいくつかあるが、それらは指と物体の重なりに基づいて物体を変形している [9]。提案手法を用いれば、力積に基づいて物体を変形することでより自然な変形を実現できる可能性がある。この考えを確かめるための実験を行なう予定である。

## 6 結論

世界管理プロセスと力覚提示プロセスに分割された力覚提示システムのプロセス間通信に力積を含めることを提案し、提案手法が動的な仮想世界を安定に更新できることを示した。

従来の力覚提示プロセスは仮想世界の形状特徴情報を力情報に変換してユーザに提示していたが、ユーザが仮想世界に加えた力を仮想世界に伝えておらず、単純な位置情報だけを仮想世界に送り返していた。そのため、サ

ンプリング時刻の影響により仮想物体の運動にばらつきが発生した。

提案手法では、力覚提示プロセスがユーザが力覚提示装置に加えた力を積分し力積を求め、世界管理プロセスに送り返すことでユーザの操作を仮想世界に伝えることができ、サンプリング時刻の影響が解消した。実験を行なったところ提案手法が操作の正確性を改善することが分かった。

## 参考文献

- [1] Lonnie Love and Wayne Book, "Contact Stability Analysis of Virtual Walls", Proc. of Dynamic Systems and Control Division ASME 1995, pp.689-694
- [2] Beeling Chang and J. Edward Colgate, "Real-time impulse-based simulation for haptic display", Proc. of the 1997 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition
- [3] Adachi Y., Kumano T., and Ogino K., "Intermediate Representation for Stiff Virtual Objects", Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium '95, pp.203-210.
- [4] William R. Mark, Scott C. Randolph, Mark Finch, James M. Van Verth, and Russell M. Taylor II, "Adding Force Feedback to Graphics Systems: Issue and Solutions", SIGGRAPH 96 Conference Proc. 1996 ACM
- [5] Juli Yamashita, Cai Yi, and Yukio Fukui, "Feature-Based Haptic Rendering and Protocol", Proc. of the Virtual Reality Society of Japan Second Annual Conference, 1997, pp.195-197.
- [6] Shoich Hasegawa, Masahiro Ishii, Makoto Sato, and Yasuharu Koike, "Haptic interface protocol for complex dynamic virtual world", Proc. of International Conference on Artificial Reality and Tele-existence, 1998, pp.83-89
- [7] Hogan, N., "Stable execution of contact tasks using impedance control", Proc. of IEEE Robotics and Automation Conference, 1987, pp.1047-1054
- [8] Masahiro Ishii and Makoto Sato, "A 3D Spatial Interface Device Using Tensed Strings", Presence Vol. 3, No. 1, Winter 1994, pp.81-86
- [9] Kenji YAMAMOTO, Akio ISHIGURO, and Yoshiki UCHIKAWA, "A Development of Dynamic Deforming Algorithm for 3D Shape Mod-

eling with Generation of Interactive Force Sensation", Proc. 1993 IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, pp.505-511