

仮想空間における仮想手による 道具操作のための知識とモデル

舟橋健司^{*1, **} 安田孝美^{*2} 横井茂樹^{*2} 鳥脇純一郎^{*1}

Knowledge and Model for Manipulation Using Tools with a Virtual Hand in Virtual Space

Kenji FUNAHASHI^{*1, **}, Takami YASUDA^{*2}, Shigeki YOKOI^{*2}, and Jun-ichiro TORIWAKI^{*3}

Abstract – This paper describes a generalized data structure for virtual tools used in virtual world with a hand. The proposed model contains the knowledge, such as the shape of the tool, how to use the tool with a hand, and how to manipulate objects by the tool. Introducing this kind of data structure, we can separate the models for virtual tools from virtual manipulation system itself, so that any type of tools is introduced in a very simple manner.

Key Words : virtual manipulation, virtual hand, virtual tool, data structure of tool, knowledge of tool

1. はじめに

近年、仮想現実感(Virtual Reality; VR)に関する研究において、仮想空間に配置された仮想物体に対する対話操作(仮想物体操作)の実現が注目されている。仮想物体操作の方法は、図1のように大別できる。まず(a)は、マウス、キーボードにより操作対象の選択、操作の種類、量の指定を行うもので、従来から行われてきた操作方法である。この種の方法は、計算機環境に習熟していない操作者の場合、仮想空間操作を直感的に行うことは困難である。ここで図1(b), (c)などのように、実世界に近い感覚で仮想物体操作が可能となれば、VR技術の適用は広範囲におよぶものとなり得る。そのため(b)に示す、操作者の手に対応して動く仮想空間内に定義された手(仮想手)による、仮想物体操作に関する基礎技術を確立するための研究が多方面で行われている[1]-[6]。ここには、グローブ状などの入力装置、力覚帰還も可能な入出力装置の開発、および、仮想空間内での仮想手と物体との相互作用モデルの考案が含まれる。

さらに、手により直接物体を操作するのではなくて、図1(c)に示すような道具を使って操作する研究

も行われている[7][8]。様々な道具を仮想空間で利用する場合の、それぞれの道具と入力装置との関係を表1に示す。図1(c)の場合は、道具の形状や操作に対応したものを直接入力装置として用いるため、道具ごとに操作を用意する必要があり(表1(1))、例えば大きさや形状が異なる複数の道具を用いた物体の操作の実現は難しい。これに対して図1(d)のよう

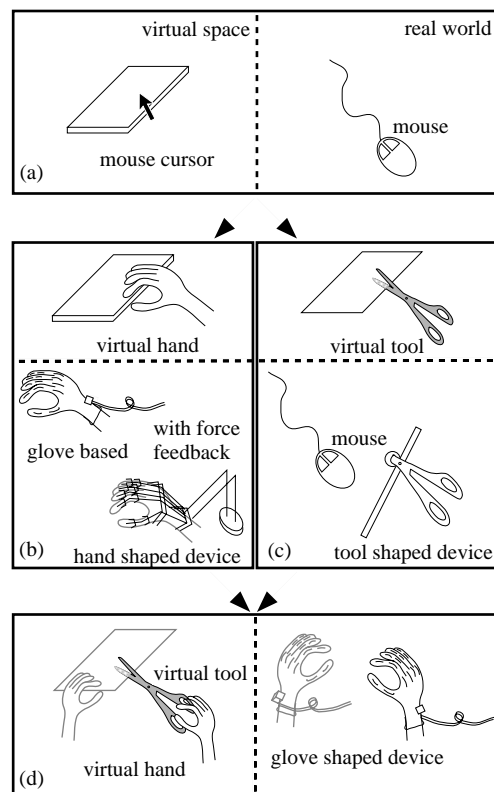


図1 仮想物体操作における指示方法
Fig.1: Operating method of virtual manipulation

*1: 名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻
 *2: 名古屋大学情報文化学部
 **: 現在 名古屋工業大学情報処理教育センター
 *1: Information Eng., Graduate School of Eng., Nagoya Univ., Japan
 *2: School of Informatics and Sciences, Nagoya Univ., Japan
 **: Educational Center for Information Processing, Nagoya Institute of Technology, Japan

に、道具は手によって操作されることに着目して、同図(b)と同様に手の動作の入力デバイスを用いて仮想手で操作する前提で、同図(c)での多様な仮想道具をソフトウェアのみにおいて実現することが考えられる(表1(2))。

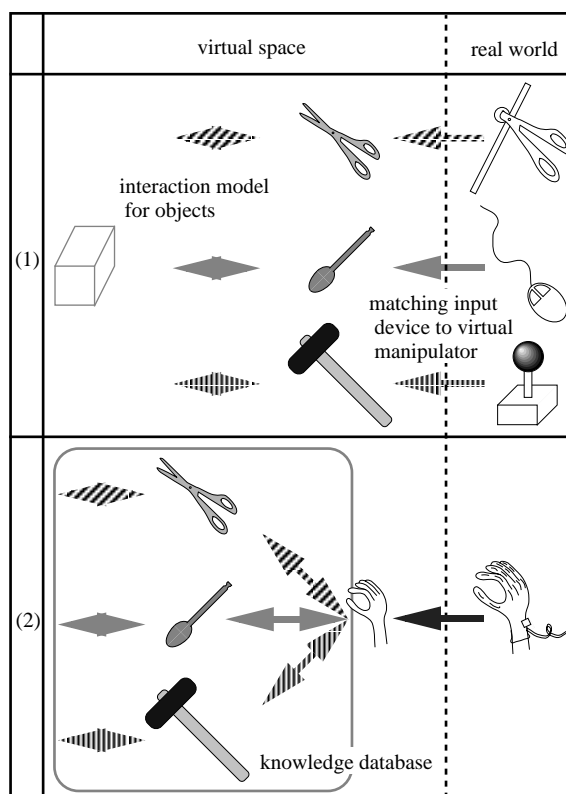
このような目的のために、表1(2)に示すように、手で操作する道具について、仮想手と道具、道具と物体との相互作用に関する知識を一般化できれば、一般的な仮想道具による仮想空間操作システムの重要な基本技術となり得る。

ところで、知識を標準化し、システムから分離することは一般的な考え方であり[9] 様々な分野において知識を分離することの有効性が述べられている(例えば[10][11])。CGにおける3次元形状定義に関してはDXF, VRMLなどの標準書式が普及している。またWWWに代表されるように分散オブジェクト技術は近年、急速に発展、普及してきている[12]。しかしVRにおいて、相互作用モデルなどの情報を知識ベース化し一般的に扱うなどのような、オブジェクト指向技術による分散管理の研究は報告されていない。

そこで本研究では、道具を構成する部品、利用方法に関する知識などを道具自身に持たせて、システムから分離することにより、図1(d)に示すような仮想道具の仮想手による操作を一般的に表現可能な基本モデルを考案した[13][14]。知識をシステム(実行プログラム)から分離することにより、プログラムを変更せずに、新たな道具に対する知識(データファイル)を付加することで新しい道具の利用が可能である。提案手法に従い、利用する各道具に対応した、仮想手と道具、道具と物体との相互作用モデルを構築することにより、仮想手で様々な道具を操作し、それらの道具により物体を間接的に操作することが可能となる。これらは、Javaなどのマルチプラットフォームなプログラム言語による実現も考えられる。またその場合、各言語の仕様の範囲において汎用性が保証される。一方、本文のように道具の実現のための機能に限定することにより、汎用性はいくらか低くなるが、記述の容易さが高くなり、また仮想道具の定義を支援するシステムの構築も可能となる。

以下、まず2節では、本研究の具体的な目的、および、方針について述べる。次に3節では、知識の構造、操作システムの実現方法について述べる。実現した実験システム、実際の操作の様子などについては4節で示す。最後に5節で今後の課題について論ずる。

表1 実世界の入力装置による仮想道具の駆動方法
Table 1: Manipulating virtual tools with input devices in real world



2. 仮想手による道具を介した物体操作

2.1 仮想空間における道具の利用

本文では、最終的に操作したい対象を物体と呼び、この物体を操作する目的で手で直接に扱う対象を道具と呼ぶ。

この道具の操作を仮想空間で実現する場合、マウスなどの通常のコンピュータ用の入力装置を用いる方法、および、仮想空間内で利用する道具と同一形状の実際の道具を入力装置として用いる方法がある。しかし、前者は実世界における道具の操作との差異が大きいため、直感的な操作が困難となる。後者によれば操作は直感的になるが、個々の装置ごとにシステムが構成されるため汎用性が乏しく、入力装置のみを簡単に交換することはできない。また、同じ種類の道具を使っても形状がことなれば操作は直感的でなくなる。例えば、ある形状のハサミの入力デバイスを用いたとすると、これと大きさや形が異なった仮想ハサミの操作は違和感を与えることになる。そこで、操作者の手に対応させた仮想手により仮想道具を操作することが可能となれば、入力装置の交換、仮想道具との形状の違いによる違和感という問題がなくなる。

本研究では、仮想空間に複数の道具が存在し、そ

これらのうち任意の道具を仮想手で利用することにより、物体操作が可能なシステムの構築を目的としている。具体的には、次節で述べるような道具を対象とする。ところで、例えば VRML で記述された仮想空間内をウォークスルー可能なシステムでは、データファイルを変更することにより他のシーンの体験が可能である。これと同様に、本システムにおいて新しい道具を利用する場合に、プログラムを変更するのではなく、新たな道具の知識ファイルを作成する、あるいは、他から入手することにより、道具の追加が可能となることを目的としている。

そのために、VRML などの 3 次元形状定義の書式のように、仮想道具のための知識の構造を定め、さらに、その道具の知識に基づく手による道具の操作、道具による物体の操作が可能なシステムを作成する。仮想道具の知識に含める情報について考察する意味で、次節では道具に関する性質について整理し、2.3、2.4 節では道具の手による操作、道具による物体操作の実現法について述べる。

また後述するように、道具は多面体により表現される剛体とする。また、物体も多面体による表現とするが、道具との相互作用により変形も可能とする。手に関しては、手を代表する点（手首）の座標と手の方向、および、各関節の角度が入力装置から得られるものとする。さらに、仮想手の形状モデルを有することにより、それに基づく手の描画を行うことができる。

2.2 道具の分類

本節では、仮想手で様々な道具を扱うために、道具に関する性質について考察する。ここでは片手で把持して動かし、実際に操作したい物体に干渉させることにより移動、変形などを行う道具を対象とする。また干渉とは、道具を物体に接触させる、もしくは、近付ける（例えば、磁力によるもの）ことを意味する。その詳細は道具と物体の相互作用モデルによる（後述）。具体例として（1）スプーン（2）ナイフ（3）ハサミ（4）ピンセット（5）箸などが挙げられる。

[手と道具の相互作用] 一般に、道具の把持や操作方法が 1 種類とみなせるもの（上記の例の 4, 5）と複数考えられるもの（上記の例の 1, 2, 3）、に分類ができる。ところで、物体を手で直接に把持する場合は、手の形状、接触位置など様々な状態で行われることが予想される。それに対して、道具を用いる場合は限定された把持のしかたのみを可能とし、他を考慮せずに不可能としても問題は起こらないと判断できる。

[道具の形状] 道具に可動部分が存在しないもの（上記の例の 1, 2）と、存在するもの（上記の例の 3, 4, 5）がある（ここでは、箸は 2 つの部分が互いに独立した動きをしない 1 つの道具とみなしている）。可動部分が存在すると、描画における道具の姿勢が変化するだけでなく、次に述べる物体との相互作用に関係する、ピンセットの先端などの互いの位置が変化する。これについても、道具の形状が任意に変化するのではないため、道具を構成する変形しない部品の相対的な位置変化により表現できる。ここでは、例えば針金のように、任意に形状の変化する道具は考えないものとする。

[道具と物体の相互作用] さらに道具には、物体に対して変形操作を行うもの、主に移動操作を行うもの、および、この両方共に可能なものが存在する。この道具と物体との相互作用モデルは、仮想物体の性質、構造も関係する。

2.3 ジェスチャによる道具の把持

仮想空間における道具の使用を可能にするには、前節で述べた様々な仮想道具の、仮想手による把持、操作を実現する必要がある。ここでは、手のジェスチャによる指示を用いることにする。仮想手による物体操作の実現方法の一つに、ジェスチャを利用するものがある。これらは概して、ジェスチャの情報をシステム自身が持っており、任意の手の形状による把持に対応できない、などの問題点と、物理法則などによる実現方法に対して計算時間を少なくできる、という利点がある。

仮想手による道具を利用した物体操作システムの実現には、手と道具の関係だけでなく、道具と物体との相互作用に関しても処理を行う必要がある。また前節で述べたように、道具毎に把持を行う手の形状は異なるが、あらゆる手の形状による把持に対応する必要はない。そこで、各道具ごとに 1 つ、ないし、複数のジェスチャを知識として持たせることにより、任意の道具の把持、操作を実現した。

実際の把持判定では、まず道具および手を内包する球、立方体等が互いに干渉するか否かを判定（境界判定）する（図 2）。次に、各関節の角度によるジェスチャの判定を行う。これは、手の大小の違いにより指先などの座標値は変化の影響を受けないこと、および、操作者の手の形状を入力する装置は主に各関節の角度を測定していること、による。ジェスチャの判定は、各関節に対し上限と下限を指定することにより、しきい値による判定を行う。各ジェスチャ毎に手に対する道具の位置に関する知識も持たせておき、ジェスチャにより把持と判定された場

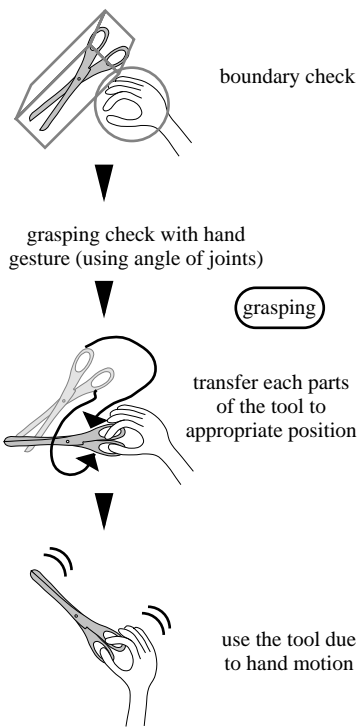


図2 道具の把持判定
Fig.2: Grasping check for tool

合、道具の位置、方向を補正する。また、道具を把持したまま手全体の位置、方向を変化させた場合、その道具は手との相対位置が変化しないと考え、手の動きに追従し移動させる。

2.4 道具による物体操作の実現

上述した手で操作されている道具による、物体の操作も実現する必要がある。道具と物体との関係は手と道具との関係と比較して多様であり、道具と物体の組合せにより様々な状況が考えられる。本研究では、道具による干渉、操作の計算、および描画の高速性を考慮し、仮想物体は多面体モデルとする。また、道具を構成する部品も、同様に多面体モデルとする。

一般に相互作用を考える場合、まず干渉が存在するか否かを判定し、その状況により様々な作用を加える。干渉に関して物体に注目した場合、多面体を構成する頂点、稜線、面に対する干渉、および物体の内部に侵入しているか否か、等あらゆる状況に対応する必要がある。しかし、特定の目的を持つ道具の場合、あらゆる部分における干渉を考慮する必要性は低い。そこであらかじめ、図3に示すように、道具の部品を構成する多面体の頂点に基づいて、物体との干渉等の判定を行うための判定点、判定線分、判定面を設定しておく。これらは、道具に固定された頂点だけでなく、2頂点の中点を判定点とする、

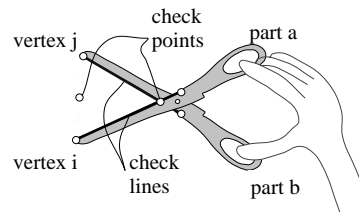


図3 判定点、判定線分
Fig.3: Check points and check lines for interference

あるいは交点、射影点等による決定も可能なものとする。

実際に相互作用を行う場合、(1)干渉判定、(2)各種演算、(3)分岐処理、およびその結果による(4)物体の操作が必要である。そこで、それぞれについて以下に挙げる処理を考慮する。

- (1) 判定点、判定線分、判定面と、物体の面、物体の稜線、物体の頂点との各組合せの判定、および物体に対する内外判定
 - (2) スカラー変数、ベクトル変数に対する代入、各種算術演算、大小判定等を含む論理演算
 - (3) 真偽判定の結果による処理の実行、あるいは、非実行
 - (4) 道具に追従した移動、頂点を移動することによる変形、平面による物体の切断
- これらの組合せにより、道具と物体との相互作用モデルを構築する。

3. 知識のプログラムからの分離

3.1 道具に関する知識

2節で述べた事項をもとに、各道具に関する知識の構造の一形式について提案する(図4)。

[道具自身] 可動部分が存在する道具に対応するため、道具の形状データは、道具を構成する変形しない部品(多面体)の集合として表現する。ただし、各部品の位置関係、拘束の方法についてはここには記述しない。

[道具 - 手] 次に道具の把持操作に関しては、1つの道具に対して複数の把持、操作方法が存在し得るため、操作方法の集合として表現する。この各要素は、可動部分の存在しない道具の操作方法に関しては、1組の道具把持における手のジェスチャ、および手全体の位置に対する相対的な各部品の位置、方向を知識として持つ。道具の可動部分を動かす操作方法の場合、複数組のジェスチャ、および各部品の相対位置をリスト表現による知識として持ち、隣り合う要素間を補間することにより、ジェスチャの変化に対応して道具の可動部分の状態を連続

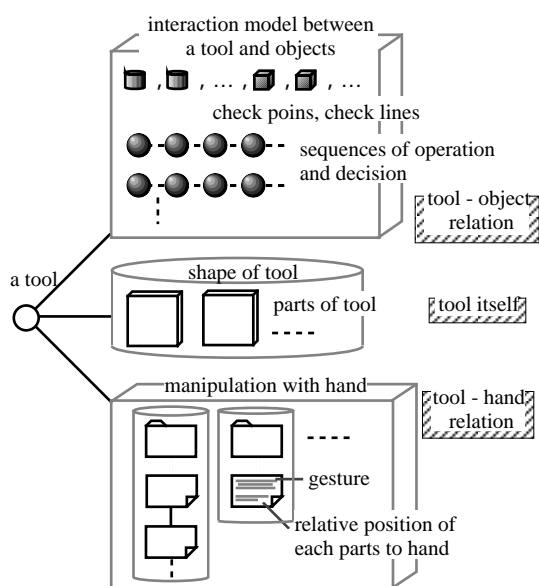


図4 仮想道具に関する知識
Fig.4: Knowledge for virtual tools

に変化させる。またこれにより、各部品的位置、拘束の関係が決まる。

[道具 - 物体] さらに、道具と物体との相互作用モデルとして、まず判定点、判定線分、判定面の集合を、道具形状データの頂点座標の演算として表現する。この判定点などに対して、どのような判定、演算を行い、その結果どのような影響を物体に与えるかを、リストとして表現する。操作方法が複数ある場合は、このリストの集合となる。

図5, 6 にスプーンとピンセットの道具に関する知識の構成例を示す。スプーンは1つの部品からなり、スプーンの持ち方は2通りとした。それぞれの持ち方に対し、それぞれ1組のジェスチャと、手に対するスプーンの相対位置を知識として持つ。判定点をスプーンの先の部分に設定し、物体が判定点に干渉している場合はスプーンに追従して移動させることにより、物体をのせること、および、押すことを可能とした。また、可動部分を持つピンセットは、2つの部品により構成し、使用方法は1通りとした。使用方法の表現は、ピンセットを閉じた状態と大きく開いた状態それぞれの手のジェスチャと、各部品の相対位置による。物体との相互作用モデルは、以下に示す3つの判定点と2つの操作方法を有するものとした(図7)。

[判定点の設定]

- 部品0の先端(頂点*i*)を判定点0とする
- 部品1の先端(頂点*j*)を判定点1とする
- 上記判定点0, 1の中点*p*を判定点2とする

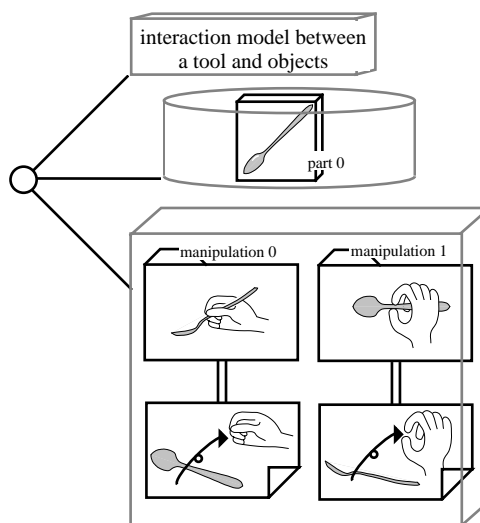


図5 スプーンの知識ベースの例
Fig.5: Illustration of knowledge base for a virtual tool(1) (spoon)

[操作0] として以下による各判定、計算、把持操作

- (1) しきい値の設定(5cm)
- (2) 判定点0, 1間の距離*d*を計算
- (3) 距離*d*がしきい値以下か判定
- (4) 判定点2が物体内部か判定
- (5) 上記(3)(4)が共に真ならば物体を把持、移動

および [操作1] として類似な方法による物体の頂点の選択、移動による変形操作とした。このピンセットの実際の知識構成を図8に示す。実際のデータ(手続き)はテキストで表現されており、容易に記述、変更が可能である。また、道具と物体との相互作用アルゴリズムの記述は簡易インタプリタ言語的な表現とする。後述する実験システムでは2.4節(1)~(4)に示す約50の命令が用意してある。左中央のデータファイル `tweezers.ktf` により、道具と手、道具と物体との相互作用モデルのファイル `tweezers.kth` (左下), `tweezers.kto` (右上) を指定する。また、道具の形状として指定されたファイル `tweezers.kof.list` (右中央) は、各部品の形状データのファイル `tweezer_R.kof`, `tweezer_L.kof` (右下) を指定する。このピンセット自身のデータは `ex.ktf.list` (左上) 等から参照される。図中、「%」以降、行末まではコメント文である。

3.2 道具の把持、操作の実現

上述の知識構造により道具の知識をシステムから分離し、仮想手による道具を介した物体操作を実現する。従来のように、それぞれの把持対象に対してシステムに設定されたジェスチャによる判定を行うのではなく、道具毎に1つ、ないし、複数のジェス

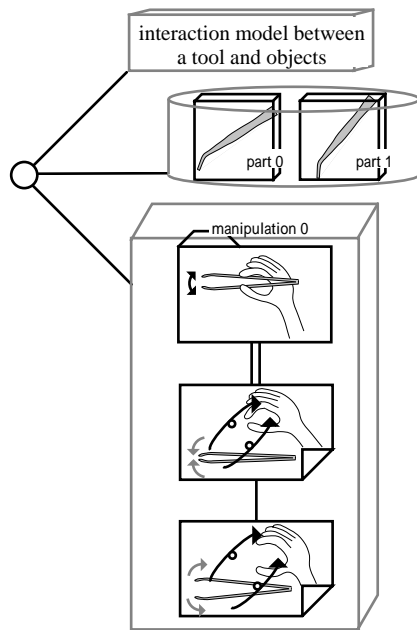


図6 ピンセットの知識ベースの例

Fig.6: Illustration of knowledge base for a virtual tool(2) (tweezers)

チャを知識として持たせておくことにより、道具の形状、実際の操作に対応した把持を実現する。また、道具の可動部分の状態が変化する操作方法に対しても、複数のジェスチャと道具を構成する各部品の手に対する位置を知識として持たせ、隣り合う要素間を補間することにより、手の形状の変化に対応した道具の可動部分の状態の連続的な変化を実現する。具体的には、図6におけるピンセットを閉じた状態と大きく開いた状態の間を補間することにより、図9に示すようなピンセットの開閉動作が可能となる。また、道具を把持したまま手を動かした場合、その道具は手との相対位置が変化せず手の動きに追従し移動させることにより、把持した道具の移動を行う。さらに、道具と物体の相互作用モデルに応じた物体操作を実現する。これらのことから、本モデルにより2.2節で挙げた道具の把持、操作を行うことができる。

4. 実験例

4.1 実験システムの構成

上述した知識構造、操作モデルを用い、道具に関する知識を分離した仮想空間操作システムを、グラフィックワークステーション (SGI Onyx RE2, R8000) 上で、約10000行のC言語により実現した(図10)。道具と物体との相互作用実現のためのインタプリタ部分は、約500行で実現されている。本システムは前述の知識の入力、解釈、および処理が可能なもので

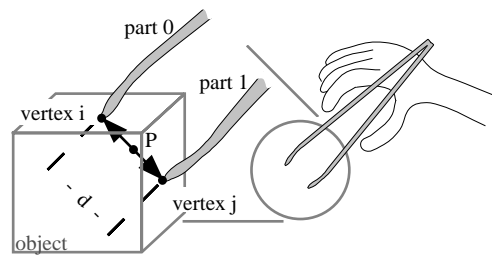


図7 ピンセットと物体との相互作用

Fig.7: Interaction model between tweezers and object

ある。また、操作者の各指の関節の角度、手首の角度等はグローブ状の入力装置により入力される。これは18個のセンサを有し、それぞれ8bit (0-255) の値を得ることが可能であり、測定制度は0.5 degree/value に設定されている。手の位置および方向は低周波の磁界を利用したモーションセンサにより入力される。これは位置、角度データに関してそれぞれ、静的精度: 0.08cm, 0.15°, 分解能: 0.0005cm, 0.025° の測定値が得られる。さらに、液晶シャッタを利用したステレオグラスおよびHMDによる立体視も可能である。

本システムでは、複数の道具、複数の物体が存在する状況で、自由に道具を選び、物体に対するインタラクションを行うことが可能である。また、物体データを作成するだけで新しい物体に対する操作が可能のように、システムの改良なしに道具に関する知識を作成するだけで新たな道具の利用が可能である。

さらに、仮想手で物体に直接干渉することによる物体の移動操作も可能であり、全く干渉を受けていない物体は重力、慣性に従った挙動を示す(実現方法は[5]を参照)。

4.2 実験結果

上記システムで解釈、処理可能な書式で、実際にいくつかの道具を構築した。ピンセットの知識ベースは図8に示すとおりである。

本システムによるこれらの道具の操作例を図11に示す。図11(a)は左手で物体を把持し、右手でピンセットにより物体を変形している状況のシステムの概観である。同図(b)には同じ道具(スプーン)に対して、2通りの異なる持ち方が実現されていることが示されている。また同図(c)に示すように、可動部分のある道具(ピンセット)の操作も実現できた。同図(d)では、箸、ナイフ、ハサミを利用している様子を示す。ここでは、個々の道具と物体との相互作用モデルについて議論するわけでは無いため、各々のモデルを以下のように簡単なものとした。

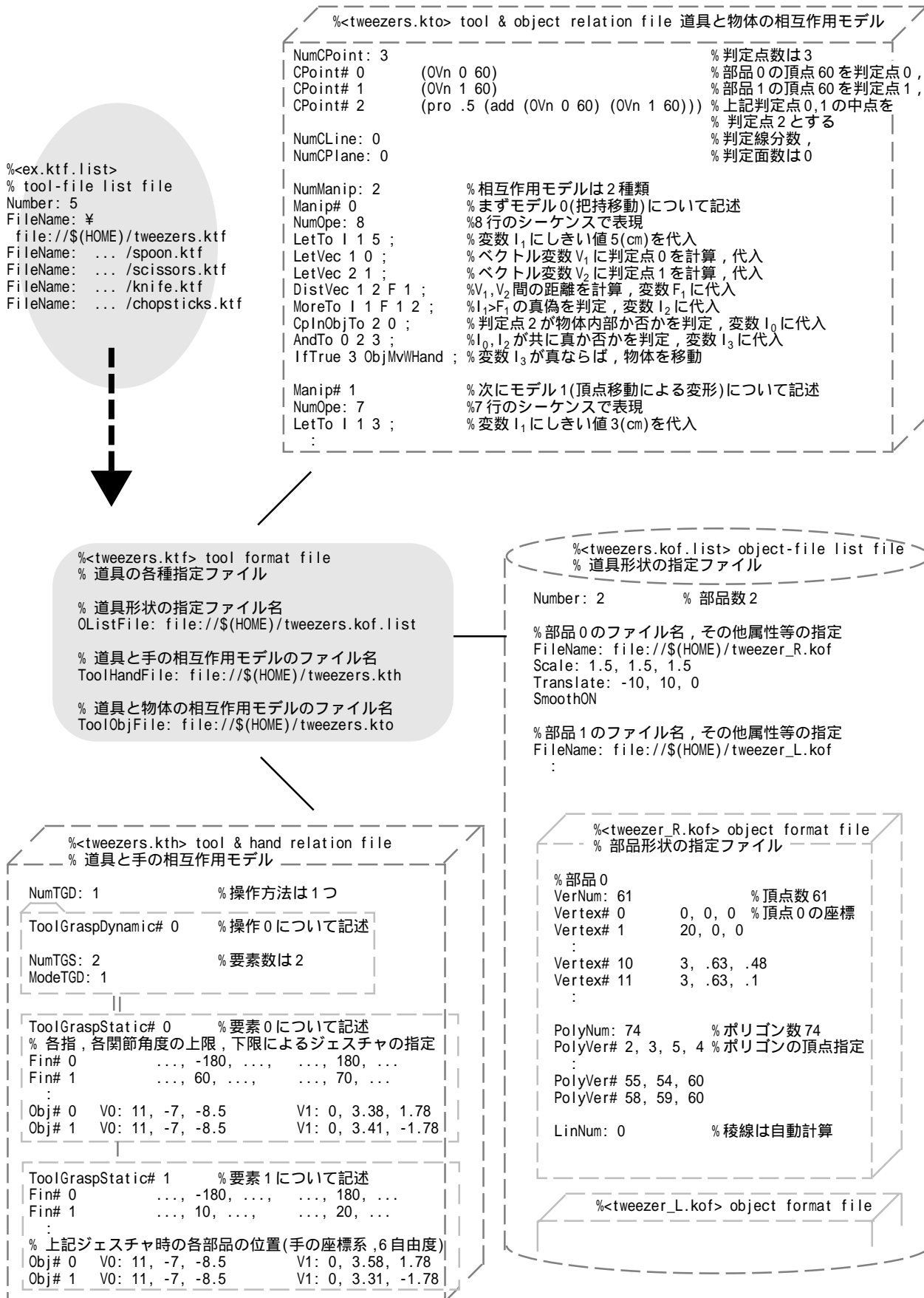


図8 仮想道具のデータ構造の一例 (ピンセット)

Fig.8: An example of data structure for virtual tool (tweezers)

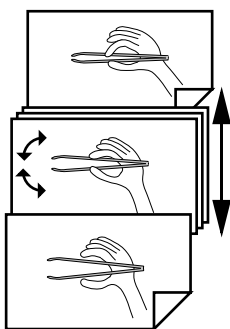


図9 ピンセットにおけるデータ補間の様子
Fig.9: Data interpolation for manipulating tweezers

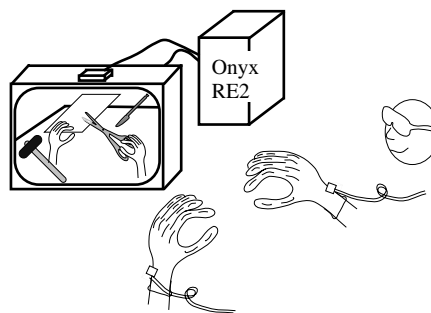
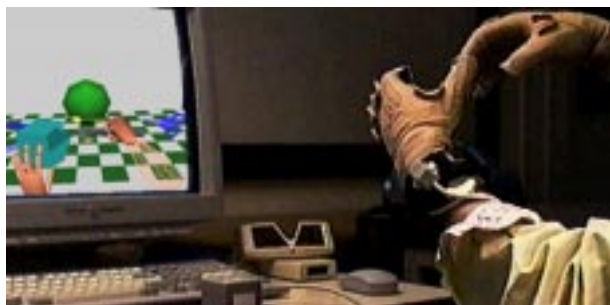
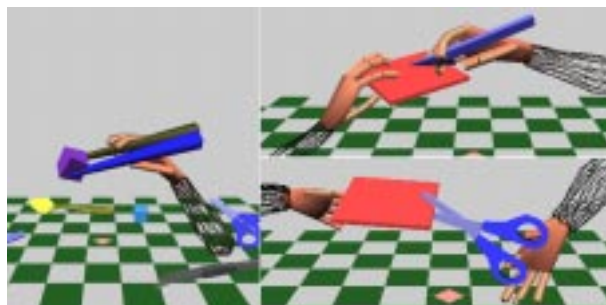


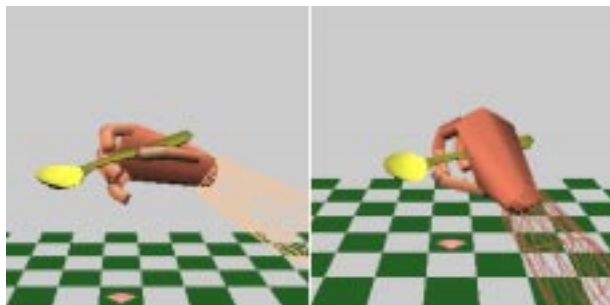
図10 実験システムの構成
Fig.10: Configuration of experiment system



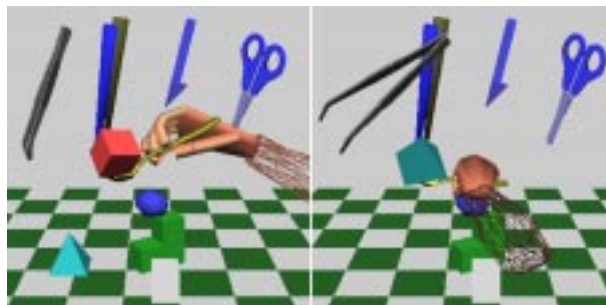
(a) 実際の操作の様子



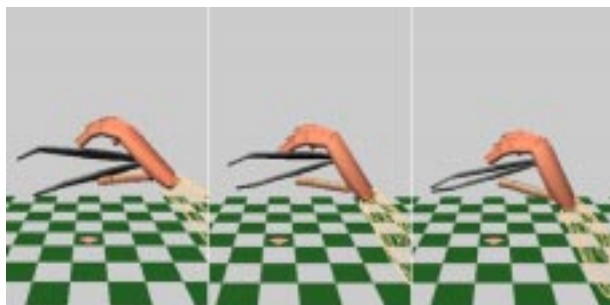
(d) 箸, ナイフ, ハサミの操作の様子



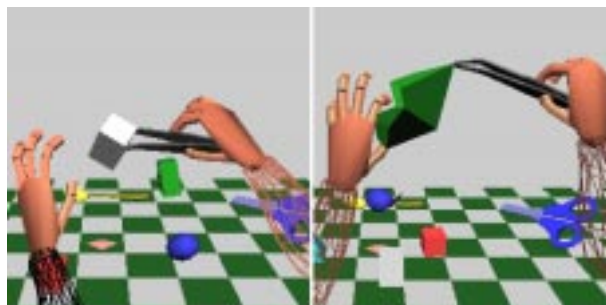
(b) スプーンに対する2種類の把持の様子



(e) スプーンによる物体の移動操作



(c) ピンセットに対する開閉操作の様子



(f) ピンセットによる物体の移動, 変形操作

図11 仮想手による仮想道具を利用した仮想空間操作の例
Fig.11: Examples of virtual manipulation using virtual tool with virtual hand

箸：ピンセットと同様な操作

ナイフ：刃（判定線分）が物体と干渉した場合、刃を含む平面で物体を切断

ハサミ：刃の交わった点を判定点とし、刃と閉じたことにより判定点が物体と干渉した場合、刃を含む平面で物体を切断

さらに同図(e), (f)からは、複数存在する道具から希望する道具を選び、物体操作が可能なのかわかる。

また、体験実験において被験者から「手で操作されている道具が見えるため、計算機上のデータ変更ではなく、実際に操作している感じがする」などの積極的評価が得られた。また、「奥行きが把握しにくい、手応えがない」などの立体視、力覚フィードバックに関する問題点の指摘があった。

計算時間に関する評価については、図12に示すように、複数存在する道具のいずれも操作せず、手による物体への直接的な干渉も行わない状況で、約20 frame/sec.での描画更新が可能であった。次に、手で道具を操作しているが、物体への干渉は全く行っていない状況で（手と道具の相互作用のみ）、約19 frame/sec.での描画更新が可能であった。そして、道具を利用した物体操作を行っている状況では（手と道具、道具と物体の相互作用）、約18 frame/sec.での描画更新が可能であった。これらは、図11の何れの道具に関しても、ほぼ同じ結果が得られた。一般には、対話操作の実現には12 frame/sec程度が必要であるといわれており、本システムによる、道具を利用した対話的な仮想物体操作が可能であると判断できる。厳密に言えば、仮想物体の形状、道具の形状、および道具と物体との相互作用モデルが非常に複雑な場合は、描画、干渉時の処理時間が増加することが予想される。そのため、本結果は十分であるとは断定できない。今後、手と道具、道具と物体の相互作用に関する処理の高速化を行う必要性も考えられる。

5. むすび

本文では、仮想道具の知識構造を提案し、知識をシステムから分離することにより、仮想手による仮想道具を介した物体操作を容易に表現可能とした。またこれにより、仮想手による道具を介した物体操作システムを実現した。本システムでは、システム自体の改良を行わずに、様々な道具を利用することが可能である。さらに、仮想道具の知識ベースを構築することにより、ネットワークへの対応など様々な応用が可能となる。

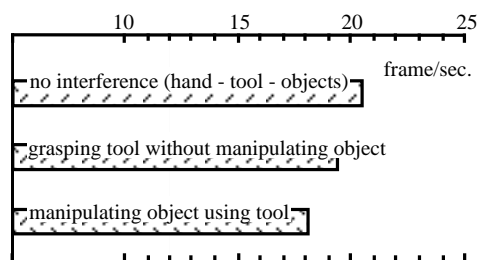


図12 単位時間当たりの描画フレーム数
Fig.12: Rendering frame rate for three conditions

本システムは現在、基本機能を実現した段階にあり、実際に知識を記述する際の書式の分かり易さ、記述の容易さについてさらに検討する必要がある。この点に関しては、仮想道具定義用エディタの開発も望まれる。また、具体的問題を含むさまざまな状況における仮想空間操作の体験実験により、本システムによる道具を介した仮想空間操作の実現の容易さおよび問題点を検証することも必要である。

謝辞 研究を進めるにあたり、有益な議論を頂いた鳥脇研究室諸氏に感謝する。なお、本研究の一部は文部省科研費、股関節振興財団、および柏森情報科学振興財団の研究助成による。

参考文献

- [1] Z. Huang, R. Boulic, N. Magnenat and D. Thalmann: A Multi-sensor Approach for Grasping and 3D Interaction, Computer Graphics: Developments in Virtual Environments (Proc. Computer Graphics International '95), Academic Press, pp.235-253 (1995)
- [2] H. Iwata: Artificial Reality with Force-feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator, Computer Graphics, Vol.24, No.4, pp.165-170 (1990)
- [3] 平田幸広, 水口武尚, 佐藤誠, 河原田弘: 組立作業のための仮想作業空間, 信学論 D-II, Vol.J76-D-II, No.8, pp.1788-1795 (1993)
- [4] 木島竜吾, 廣瀬道孝: Virtual Physics: 仮想空間の物体拳動計算, 信学技報, Vol.95, No.83, pp.105-112 (1995)
- [5] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 3次元仮想空間における仮想手による物体操作モデルと一実現法, 信学論D-II, Vol.J81-D-II, No.5, pp.822-831 (1998)
- [6] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想空間における両手による協調操作モデル, 情処論, Vol.39, No.5, pp.1334-1342 (1998)
- [7] 北川英志, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想空間操作を利用した対話型手術シミュレーションシステムの基本機能の実現, 情処論, Vol.37, No.6,

- pp.1088-1098 (1996)
- [8] 野口博和, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想ハサミによる切断操作のモデル化と実現, NICOGRAPH 論文集, pp.22-31 (1996)
 - [9] 大須賀節雄, 有川節夫, 波多野誼余夫, 志村正道, 西尾章治郎, 大槻説乎: 知識科学の展開, オーム社 (1996)
 - [10] 鈴木秀智, 本田祐司, 鳥脇純一郎: 画像処理手順開発支援システム SDIP における処理手順に関するコンサルティング機能の開発, 情処論, Vol.29, No.1, pp.29-37 (1988)
 - [11] 飯国洋二: 再構成可能な知識データベースに基づく非線形信号処理, 信学論 A, Vol.J78-A, No.2, pp.178-185 (1995)
 - [12] ティモシー・ライアン: 分散オブジェクトテクノロジー, プレンティスホール出版 (1997)
 - [13] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想物体操作における両手による協調操作および道具操作のモデルの検討, 計測自動制御学会 第39回パターン計測部会研究会資料, 97PG0006, pp.17-24 (1997)
 - [14] 舟橋健司, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 仮想空間における手による道具操作の支援のための知識データベース, 日本バーチャルリアリティ学会第2回大会講演論文集, pp.250-253 (1997)

(1997年12月22日受付)