

バーチャルリアリティにおける 物体選択方法について

○川勝 大輔 中山 敦司 小堀 研一 久津輪 敏郎
大阪工業大学 電子工学科
大阪市旭区大宮5-16-1

あらまし バーチャルリアリティにおいて仮想世界で物体に移動や変形等の操作を行う場合、手で物体を把持するという操作が必要となる。この操作は処理がリアルタイムで行え、かつ目的とする物体を正確に把持できる必要がある。また、一般に物体を把持したとき、視覚と触覚によってこれを確認するため、仮想世界において自然な把持を実現するには、物体を把持したとき操作者の手に操作反力を与えることが重要である。そこで、本稿では最初に従来用いていた把持判定の問題点を解決する把持判定法について述べる。この方法においては従来提案されていなかった凹多面体に対する点の内外判定法についても述べる。次に、操作者の手に負荷をかけることで把持したことを提示する操作反力装置について述べる。提案する内外判定法のリアルタイム性を検討するために行った実験結果を示し、操作反力装置の有効性を検討するために行った実験結果について述べる。

キーワード : バーチャルリアリティ, 把持判定, 立体角, 操作反力, モデリング

A Method of Selecting An Object in Virtual Reality

○Daisuke KAWAKATSU Atsushi NAKAYAMA
Ken-ichi KOBORI Toshiro KUTSUWA

Dept. of Electronic Engineering, Osaka Institute of Technology
5-16-1 Ohmiya Asahi Osaka

Abstract : It is necessary to construct a good user interface in order to implement a 3D CADsystem by using Virtual Reality. In particular, force sensation is important for manipulating the objects. This paper describes a new approach of grasping an object. At first, we have proposed an input device (called PowerStick) with force feedback by using stepping motors. Second, we describe a fast method to determine if a point lies inside a polyhedron and experiments concerned with grasping an object.

key words : virtual reality, handling check, solid angle, force display, modeling

1. はじめに

近年、計算機の処理能力が著しく向上しリアルタイムで処理できる計算量が増加した。これに伴い従来の人間とコンピュータ間のインターフェイス方法が見直され、よりユーザフレンドリーなインターフェイスとしてバーチャルリアリティー（以下 VR）が注目されている。そこで、著者らは VR を 3 次元意匠設計に応用した新しいインターフェイスを持った 3 次元意匠設計モデラを開発している。この 3 次元モデルとはコンピュータ内に構築された仮想物体を粘土や発砲スチロールを加工するように変形させ設計していくものである。従来のように実際の粘土や発砲スチロールでは不可能であった加工や操作が仮想物体を用いることで実現でき、作業効率が向上すると考えられる。

ところで、VR において仮想世界で物体を移動や変形させるときに手で物体を掴む、つまり”把持”という操作が必要となる。この操作は実世界の把持と同様に違和感なく自然に行えなければならない。これを実現するには実世界の把持判定を正確にシミュレートすればよいと考えられるが、これは計算量が増加しリアルタイム性が失われ、結果的に自然な把持が不可能となる。そこで、リアルタイムに処理が行え、かつ操作者が目的とする物体を正確に把持できる把持判定が必要となる。

また、VR においてユーザに仮想世界を提示する方法として「視覚」「触覚・力覚」「聴覚」等があるが、とくに把持という操作においては視覚と触覚・力覚が重要な要素となる。現在は 3 次元コンピュータグラフィックスを処理するグラフィックワークステーションの性能向上により視覚的提示は進んでいるが、触覚・力覚を提示する装置の開発は遅れている^{[1][2][3]}。

本稿では、最初に著者らが従来用いていた把持判定法^[4]とその問題点を述べ、つづいてこれを解決するために提案する把持判定法と、これにおいて用いている凹多面体に対する点の内外判定について述べる。次に、物体を把持したとき操作者の手に反力を与える操作反力装置のプロトタイプを開発したのでこれについて述べる。最後に、本内外判定法の処理速度を検討するために行った実験とその結果、および操作反力装

置の有効性を検討するために行なった実験とその結果について述べる。

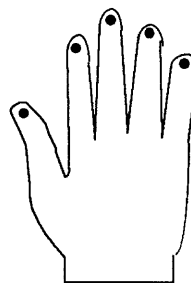
2. 把持判定

2. 1 従来の把持判定法と問題点

仮想世界において手で物体を掴んだかどうかを判定する把持判定は従来いくつか提案されている^{[5][6]}が、著者らは把持判定に必要な条件として、「違和感なく自然に把持できる」「目的の物体を正確に把持できる」「把持判定がリアルタイムで行える」の 3 点を考えている。この条件を満たす把持判定として、

『親指を含む 2 本以上の指が物体の内部に入れば把持したとする』

という方法を用いていた。ここで、指が物体の内部に入ったかどうかの判定は、指と物体の集合演算を行なうと計算量が多くなり把持判定がリアルタイムで行えないため、図 1 に示すように指先にサンプリング点を作り、その点が物体の内部に入ればその点を含む指が物体の内部に入ったとするという方法をとっている。



● サンプリング点

図 1 指のサンプリング点

しかしこの方法では大きな物体を把持するとき、手を素早く動かすと図 2 に示すように手全体が物体の内部に入り込んでしまうことがあり、指が物体の外部に出ず、手から物体が離れなくなるという問題点があった。

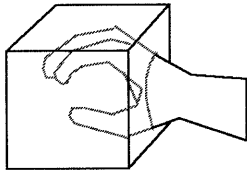


図2 従来法の欠点

これは手を素早く動かすと手の位置を測定するサンプリングが追いつかないことが原因であり、従来の把持判定法ではこの状態を考慮していなかった。

また、指が物体の内部に入ったかの判定において物体に対する点の内外判定を用いているが、従来2次元においては点と多角形の各頂点を結ぶベクトル同士の角度の和が 2π ならば点は多角形の内部、0ならば外部として判定する方法が提案されている。この方法は凸多角形と凹多角形の両方に対して行える。3次元では、凸多面体に対する内外判定は提案されており^[7]、これは物体を構成するポリゴンの法線を用いるもので、

『物体を構成する全てのポリゴンに対し、
点が法線と逆方向にあればこの点は物体
の内部にある』

とする方法である。しかし、凹多面体に対する具体的な方法は提案されていない。従って、凹多面体に対しては図3に示すようにあらかじめ凸多面体に分割しておく必要があった。しかし、複雑な形状物体の場合、凸多面体に分割するのは処理時間がかかる。

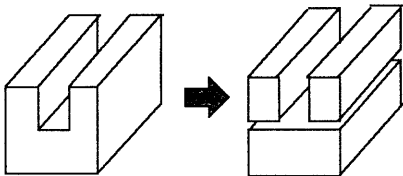


図3 凹多面体を凸多面体に分割

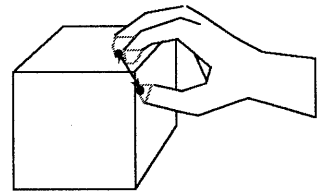
そこで、2次元でベクトル同士の角度を用いる内外判定を3次元に拡張し、“立体角”を用いることで凸多面体と凹多面体の両方に対して

点の内外判定を行える方法を開発した。

2.2 本把持判定法

従来法において、手が物体の内部に入り込んでしまい指を広げても手から物体が離れない場合、操作者は更に大きく指を広げる傾向があった。これは、把持しているときよりも指を大きく広げて物体を離すというのは人間の直感的行動である。

そこで、図4に示すように、手が物体を把持した瞬間に把持している指（親指を含む2本の指）のサンプリング点の間の長さを測定し、これよりサンプリング点の間の長さが大きくなれば、つまり把持した瞬間より指が大きく広げられれば、手がいったん物体の外部に出るまで離れた状態を続けるという条件を、本手法では従来法に付け加えた。



● サンプリング点

図4 本把持判定

2.3 立体角を用いた点の内外判定

いま、図5に示すように空間上に点Oがあり、これを中心とする半径rの球上に面積Sの閉じた領域があった場合、点Oから見たこの領域の立体角 Ω は、

$$\Omega = \frac{S}{r^2} \quad (1)$$

で表される。

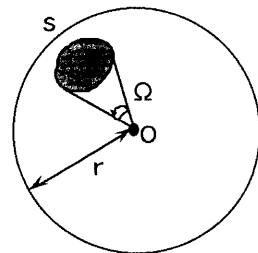


図5 立体角

これを物体を構成するポリゴンに対応させると、内外判定する点（以下判定点）から見たとき、物体を構成するポリゴンの立体角は図6に示すように、判定点を中心とした半径 r の球の表面にポリゴンを投影した像の立体角に対応する。

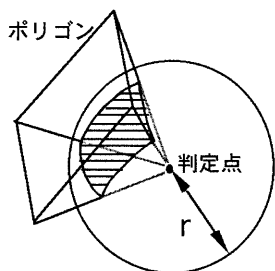


図6 ポリゴンの立体角

なお、ポリゴンには表裏があるので、立体角 Ω は判定点が法線と逆方向の場合 $\Omega > 0$ 、判定点が法線と同方向の場合 $\Omega < 0$ となる。物体が m 個のポリゴンで構成されていたとすると、この物体全体の立体角 Ω_{all} は、

$$\Omega_{all} = \sum_{j=1}^m \Omega_j = \begin{cases} 4\pi & \text{判定点は内部} \\ 0 & \text{判定点は外部} \end{cases} \quad (2)$$

となる。ただし、 Ω_j は物体を構成する j 番目のポリゴンの立体角である。よって、物体全体に対する立体角を求めることによって点の内外判定が可能となる。

ポリゴンを球に投影した像の面積を求めるために本稿では”球面三角法”を応用した^[6]。

いま、図7に示すように半径 r の球面上に3点 A, B, C があり、これらの直径の他の端をそれぞれ A', B', C' とすると、

$$\begin{aligned} & \text{月形 } ABA'C'A \text{ の面積} \\ & = ABC \text{ の面積} + A'B'C \text{ の面積} = 2\theta_a r^2 \\ & \text{月形 } BCB'A'B \text{ の面積} \\ & = ABC \text{ の面積} + B'CA \text{ の面積} = 2\theta_b r^2 \\ & \text{月形 } CAC'B'C \text{ の面積} \\ & = ABC \text{ の面積} + C'AB \text{ の面積} = 2\theta_c r^2 \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ただし、 θ_a は点 A, B, O によって作られる平面と、点 A, C, O によって作られる平面のなす角、すなわち球面三角形の頂点 A の角度であり、 θ_b, θ_c も同様である。ところで、 ABC と $A'B'C'$ 、 $B'CA$ と $BC'A'$ および $C'AB$ と $CA'B'$ とはそれぞれ対極三角形であるから面積は等しい。従って、

$$\begin{aligned} & ABC + A'B'C' + B'CA + C'AB \\ & = A'B'C' + A'BC + A'BC' + A'B'C \\ & = \text{半球の面積} \end{aligned} \quad (4)$$

となり、 ABC の面積を S とすると式 (3) (4) より、

$$2(\theta_a + \theta_b + \theta_c)r^2 - 2S = 2\pi r^2 \quad (5)$$

となる。この式から、

$$S = (\theta_a + \theta_b + \theta_c - \pi)r^2 \quad (6)$$

となり、 ABC の面積 S を得ることができる。

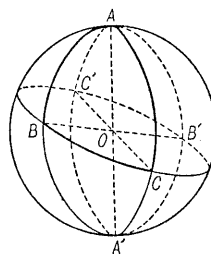


図7 球面三角法による面積算出

これを物体のポリゴンに対して対応させると、図8に示すようにポリゴンの頂点 a, b, c と判定点 O を結ぶ線と球面との交点 A, B, C が図8の点 A, B, C に対応している。

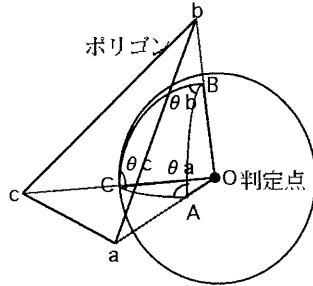


図8 ポリゴンと球面三角法の関係

ところで、この手法では3角形ポリゴンに対してしか適用できないが、物体を構成するポリゴンののは3角形だけとは限らない。そこで、式(6)を図9に示すようなn角形のポリゴンに対して拡張すると、

$$S = \left(\sum_{i=1}^n \theta_i - (n-2)\pi \right) r^2 \quad (7)$$

となる。ただし、 θ_i はポリゴンを構成するi番目の頂点における角度である。

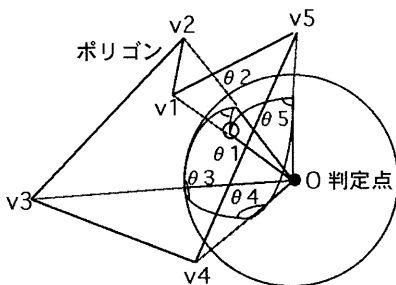


図9 任意多角形の球面上の面積

3. 操作反力

3.1 操作反力装置"PowerStick"の構造

人間は物体を把持するとき視覚と触覚によって把持したことを知る。よって、仮想世界の把持においても、手に反力を与える、いわゆる"操作反力"が重要な要素である。そこで、物体を把持したとき操作者の手に負荷をかけることで操作反力を与える装置"PowerStick"の開発を行った。

PowerStickの外観は写真1に示すとおりである。

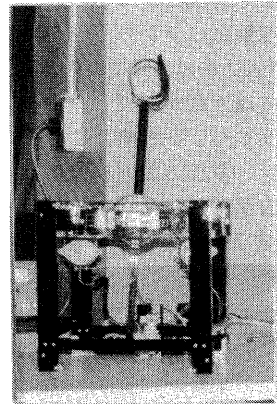


写真1 PowerStickの外観

この装置の基本構成は図10に示すように中央に直径10cmのプラスチック製の球があり、この球は上下から丸い穴のあいたプレートで固定されている。この球に長さ17cm、直径1.7cmの亚克力製のスティックが固定されている。さらに、そのスティックの内側に長さ17cm、直径1.2cmのスティックがあり、この内側スティックは垂直方向に動かすことができる。内側スティックの先端にはベルトがついており、ここに操作者の手首を固定する。

球の部分はX,Y,Z軸にそれぞれ1自由度ある。内側スティックは上下方向に1自由度あり、15cm動かすことができる。スティック全体は垂直軸から約45度傾けることができる。

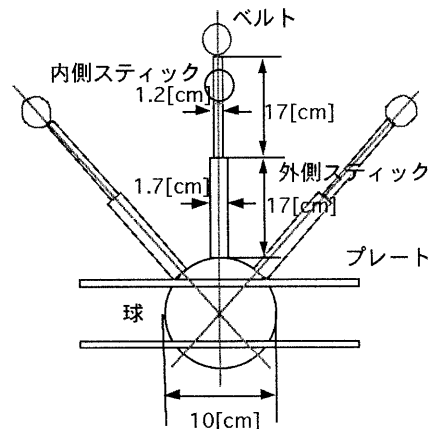


図10 PowerStickの基本構成

3. 2 ブレーキの構造

物体を把持したときに手に負荷を与える方法として、可動部にブレーキをかけている。ブレーキをかける方法は、球は両側から、内側スティックについては片側からブレーキ板で締め込み、これによって生じる摩擦力によって行っている。なお、ブレーキ板の表面には摩擦力を強くするためにゴムが貼られている。ブレーキの構造は図11に示すように、ブレーキ板がモータにワイヤーで接続されており、物体を把持したときモータでワイヤーを引っ張ることでブレーキ板がレール上を動き、球を押さえる。物体を離れたときはモータを逆回転させワイヤーをゆるめると、ブレーキ板はバネの力によって元に戻る。

モータは球にブレーキをかけるために2個、内側スティックにブレーキをかけるために1個、計3個使用しており。ブレーキをかけている間、力を保持しなければならないため静止トルクが強いことと、回転角度の制御が容易で、制御回路が簡単になることからステップモータを採用した。

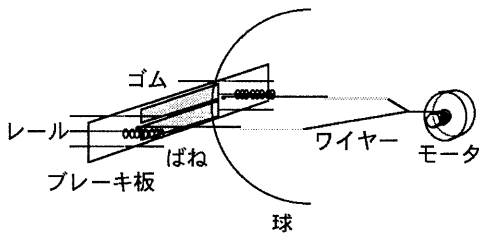


図11 ブレーキ構造

4. 把持実験

4. 1 実験装置

2. 3章で述べた点の内外判定法と操作反力装置の有効性を検討するために実験を行なった。

この実験には図12に示すように、手の位置・姿勢および指の曲げ角度の入力にはDataGlove (VPL社製)を用いた。表示は液晶シャッター方式の立体眼鏡によって立体視を行った。立体映像の生成およびDataGlove, PowerStickの制御にはグラフィックワークステーションのIRIS Indigo (Silicon Graphics社製)を用いた。なお、DataGlove およびPowerStickはRS232C

によってIndigoに接続されている。

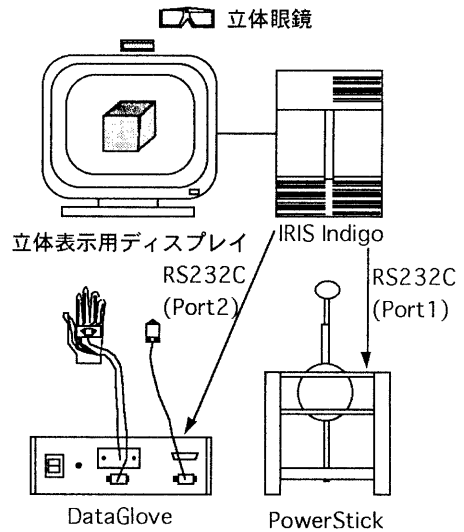


図12 システム構成

4. 2 点の内外判定の実験

立体角を用いた点の内外判定 (以下本手法) と、従来のポリゴンの法線を用いる内外判定 (以下従来法) との差異をみるため、2. 2で提案した本把持判定法を用いて従来法と本手法の2種類に対して実験を行った。

実験方法はディスプレイ上に実世界の手と同期して動く仮想の手と、凸多面体である12角柱 (ポリゴン数14) 4個を立体視で表示し、任意に指定した物体を把持させ、この操作に要する時間を測定した。把持したことは物体の色を変化させることによって被験者に提示した。これを1人当たり3回行った。

実験の被験者は4名で、実験を行う前に数分間練習をさせた。

実験結果を表1に示す。なお、時間は物体を1個当たり把持するのに要した時間で4名の平均値をとっている。

表1 点の内外判定の実験結果

方法	時間 (秒)	比率
従来法	3.09	1.0
本手法	3.31	1.07

実験の結果により本手法は従来法に対して把持に要する時間は約7%の増加にとどまっていることがわかる。これは本手法は従来法に比べ計算量は増加するが、この増加分の処理時間は把持という操作を行ううえではリアルタイム性を失わない程度であると考えられる。また、本手法を用いれば凸多面体だけでなく凹多面体にも適用できる利点がある。以下の実験では点の内外判定に本手法を用いた。

4.3 操作反力装置の実験

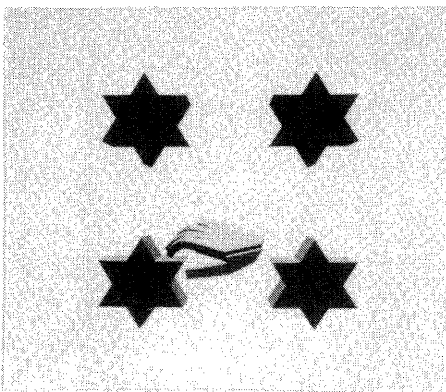
物体を把持したとき操作反力を与える装置の評価を行うために以下の実験を行った。

実験方法は4.2の実験とほぼ同様であるが、ディスプレイに表示する物体は写真2(a)に示すような凹多面体を用いた。また、写真2(b)に示すように被験者にはPowerStickを手に装着させ、次の4種類に対して実験を行った。

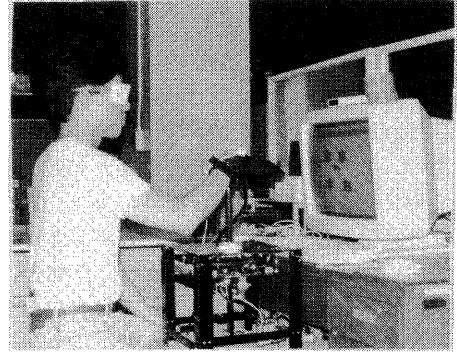
物体を把持したとき

- 方法1：物体の色の変化なし
操作反力なし
- 方法2：物体の色の変化あり
操作反力なし
- 方法3：物体の色の変化なし
操作反力あり
- 方法4：物体の色の変化あり
操作反力あり

被験者は4.2の実験と同じである。



(a)実験画面



(b)実験風景

写真2 操作反力装置の実験

実験結果を表2に示す。なお、時間は被験者が物体を1個当たり把持したと判断するのに要した時間で4名の平均値をとっている。

表2 操作反力装置の実験結果

方法	時間 (秒)
方法1	4.31
方法2	3.41
方法3	3.17
方法4	2.64

方法1を1.0としたときの他の方法に対する比率を図13に示す。

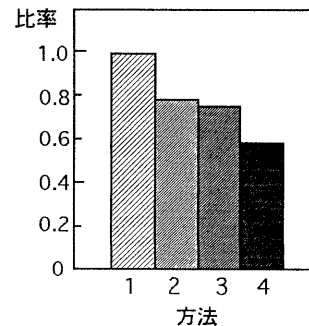


図13 操作反力装置の実験結果のグラフ

4. 5 考察

方法1と方法2を比較した場合、方法1は把持したことを判断するためには手を動かしてそれに同期して物体が動くことを確認しなければならないため、手を動かしても物体が動かなかった場合、再び手を物体のある位置まで戻し、把持をやり直さなければならない。一方、方法2は色の変化で確認できるため、方法1より方法2が速い。方法2と方法3を比較した場合、時間の差は少ない。この原因として次のことが考えられる。方法3はブレーキを動かしてから実際にブレーキがかかるまでに時間遅れがある。このため方法2の方が速くなると考えられるが、実際には方法2において物体を正面から把持した場合、物体が手に隠れて見えなくなるため方法1と同様に手を動かさなければならなくなり、遅くなる場合がある。このため方法3と方法2は時間的にはあまり差が現れないと考えられる。方法3と方法4を比較した場合、方法4はブレーキの時間遅れを色の変化で補ったため、方法3より速くなったのではないかと推測される。

5. おわりに

本稿で提案した把持判定法によって物体の内部に手が入り込んで、物体が手から離れなくなるという問題点を解決した。また把持判定において、物体に対する点の内外判定でこれまで提案されていなかった凹多面体に対する点の内外判定を立体角を用いることで可能にした。また、この方法の処理時間を検討する実験によって、把持という操作においてはリアルタイム性が失われないことが明らかになった。

さらに、物体を把持したときに操作者の手に負荷をかけることによって把持したことを提示する装置の開発を行った。また、把持における操作反力の必要性を検討する実験によって、手に負荷をかけるだけでも把持したことを提示できることが明らかになった。

今後の課題として、操作反力装置の操作範囲を拡大してCADのモデリングへの応用を図りたい。また、把持したときのブレーキが動き始めてから実際にブレーキがかかるまで時間遅れがあるため、モータの速度の改善が挙げられる。

参考文献

- [1] 水田, 猿渡, 平田, 佐藤: " 仮想作業空間における力覚フィードバック", 第8回ヒューマンインターフェイスシンポジウム論文集, pp.27-32 (1992)
- [2] 岩田: " 非装着力覚帰還環境", 第8回ヒューマンインターフェイスシンポジウム論文集, pp.23-26(1992)
- [3] 岸野: " 臨場感通信会議", 計測と制御, 30, 6, PP.485-489 (1991)
- [4] 川勝, 長田, 小堀: " 人工現実感における物体の把持判定アルゴリズム", 第37回システム制御情報学会講演論文集, pp.617-618 (1993)
- [5] 木島, 廣瀬: " 人工現実感に於ける動作入力の研究", 第8回ヒューマンインターフェイスシンポジウム論文集, pp.399-404 (1992)
- [6] 平池, 篠原: " 仮想作業スペースにおける物体把持方法", 情処第45回全大, 1D-4 (1992)
- [7] 安居院, 中島: " コンピュータグラフィックス", 昭晃堂, pp.56-57 (1992)
- [8] 穂刈: " 平面球面三角法", 共立出版, pp.158-178 (1972)