

# 仮想空間内操作における力覚表現システムの検討

郭 立新, 北林 行雄, 黒田 靖子,  
加藤 ジェーン, 川田 勉, 中山 剛

## A Study to Representation System of Force Sensation with Object Manipulation in Virtual Space

Lishing Guo, Yukio Kitabayashi, Yasuko Kuroda,  
Jien Kato, Tsutomu Kawata, Takeshi Nakayama

Methods of force sensation representation for the virtual object manipulation in virtual space produced by the ordinary computer device environment is investigated. It is considered that there are five main elements of giving the force sensation, when the object in virtual space is manipulated by the virtual hand. The 3-dimensional graphical virtual space in which the virtual hand raise an object where these five elements act independently. Twenty five subjects evaluated the gravity sensation accompanied by the operation. The validity analysis of the five force sensation elements is performed on the evaluated values. The validity and the reliability of each element is examined.

keyword : virtual space, object manipulation, force sensation elements, intermodality,  
evaluation score, validity analysis

### 1. ま え が き

仮想空間において仮想手による仮想物体の操作は基本的な課題である。この操作は人工現実感を高めるために自然な、臨場感の高い物体操作における力覚提示の必要性が要求される。従来仮想環境において仮想物体操作の力覚を提示するためには力覚マニピュレーター (Manipulator), データグローブ (Data Glove) や力覚ディスプレイ (Force Display) などの特殊な力覚フィードバックデバイスと表示装置を用いて行うのが殆どである [1, 2, 3]。しかし現実の一般的なコンピュータで作り出す仮想世界ではこのような特殊装置を取り入れるのは困難であると考えられる。そこで、このような特殊な装置を備えない普通のコンピュータデバイス環境で構築された仮想空間において仮想物体の操作過程の力覚の表現法とその有効性の研究を試みた。

この問題は、実際に操作者に直接的に力覚を与えることなしに、視覚あるいは運動感覚など、経験的に力覚に常に随伴している感覚を与えることにより、疑似力覚を発生させようとするものであり、基本的には心理学の世界で古くから研究されてきた共感覚あるいは通様相性 [4] といわれる現象を利用するものである。特殊な力覚フィードバックデバイスを持たない一般のコンピュータデバイス環

境で、人間は視覚によるディスプレイ上の3次元仮想物体のグラフィックスの変動状況と、マウスによる仮想物体の操作時の運動感覚によって力覚を感じるであろうと想定している [5]。そこで我々は仮想空間において仮想手による仮想物体の持ち上げ操作に対して仮想物体の重量感覚に影響を与えると考え、物体のつり上げ移動速度、仮想手と物体間を繋いでいるバネの伸長率、物体表面の濃度、物体の大きさと形状の五つの異なった単独条件変化にともなう力感覚表現要素について、25名の被験者を対象に評価実験を行った。評価実験の評価値の平均と分散を手がかりにして、この五つの心理学的な力覚の表現要素の効果を検討した。

## 2 仮想空間の操作環境

### 2.1 仮想空間の3次元CG

本研究の疑似心理力覚表現の評価実験で提示する仮想空間は普通のコンピュータデバイス環境に限定されたので、評価実験の入力装置としてはマウス、表示装置は16メガカラーパレットの17インチカラーモニターである。

本仮想空間を実行させると、現実性を少しでも高めるためにカラーモニターの全画面に3次元コンピュータグラフィックス(CG)仮想空間が表示される。五つの異なった力感覚表現要素が単独に作用する評価対象の仮想空間は図1、図2、図3、図4と図5に示すように、共に仮想テーブルの上に三つの仮想物体があり、現実性を高めるために、仮想物体の上に仮想手による持ち上げ操作の円環を設定し、また普通は矢印のマウスポインタを開いた仮想手の形に設定した。バネの伸長率を力感覚表現要素とした図1の場合は、仮想バネの他、バネの上方に持ち上げ操作の円環と仮想物体とバネを繋げる円環を二つ設定した。

### 2.2 仮想手による仮想物体の操作

マウスポインタが仮想物体と繋がっている上方の円環(仮想バネが繋がっている場合は仮想バネの上の円環)の領域に入ってマウスの左ボタンをドラッグすると、マウスポインタ仮想手は開いた状態からこの円環を握ったような図6に示す仮想手の形に変わって、仮想テーブルの上でドラッグされた物体をつり上げる。ドラッグを解除されると物体が自然にテーブルの面上に落下する、すなわち擬似的に手が物体を持ち上げる操作の仮想空間を提示するように設定してある。

### 2.3 力覚表現要素の設定

1. バネの伸長率：仮想物体上に繋がっている仮想バネの伸長率により物体の重量を感じさせる。仮想手がバネの上の円環を握ったら、左ボタンを押し、上にドラッグして移動すると、バネが伸長していく。バネの伸長率の力が仮想物体の仮想重量に到達すると仮想バネと繋がっている仮想物体が移動しはじめる。すなわち、この物体はバネや円環と一緒に仮想手に握られて持ち上げられる。また同一の仮想バネを用いて仮想空間の三つの異なる重量を持つ仮想物体の持ち上げ操作を行うため、仮想空間内にバネは一つしか設定しなかったが、仮想手でこのバネを握って左右移動することができる。移動先物体の領域でドラッグを解除するとバネがこの物体と連結される。この状態で持ち上げ操作ができるようになる。この三つの物体の持ち上げ操作に対して、それぞれの繋がったバネが基準値と同じ、基準値の2倍、4倍の異なる伸長率を示すので、この伸長率が重量を表現する要素となっている。
2. 物体の移動速度：物体の相対移動速度により重量を感じさせる。物体上の円環を握って、持ち上げ操作をする仮想手と物体のつり上げ移動速度はマウスポインタの移動速度に比較して、同

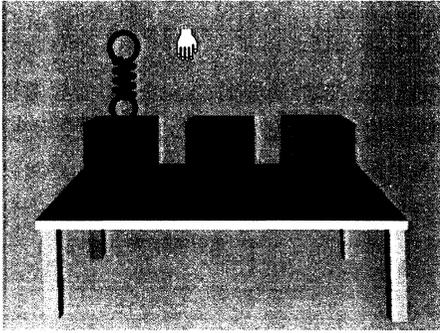


図1：バネの伸長率による力覚評価仮想空間

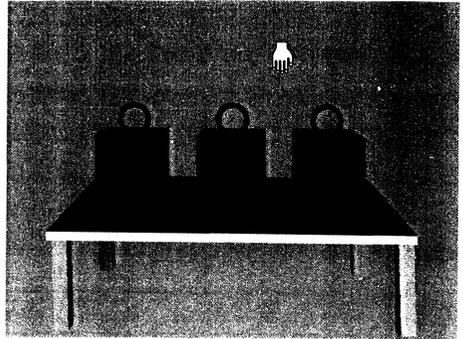


図2：上昇速度による力覚評価仮想空間

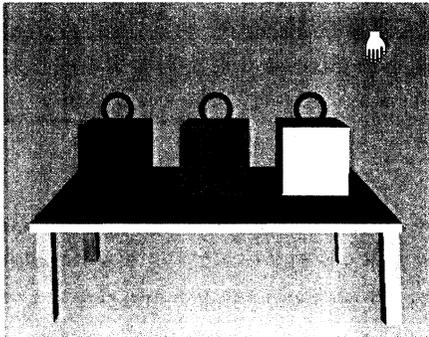


図3：表面濃度による力覚評価仮想空間

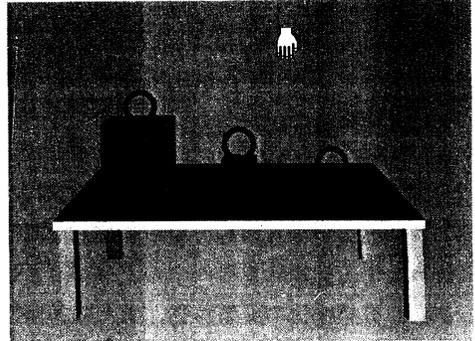


図4：大きさによる力覚評価仮想空間

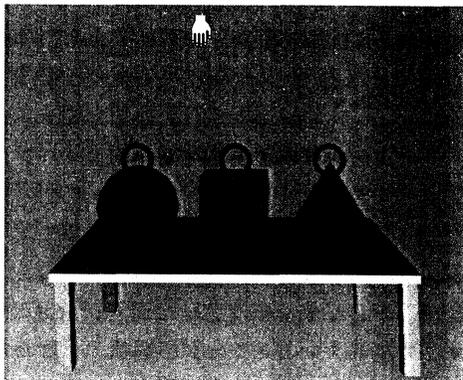


図5：形状による力覚評価仮想空間

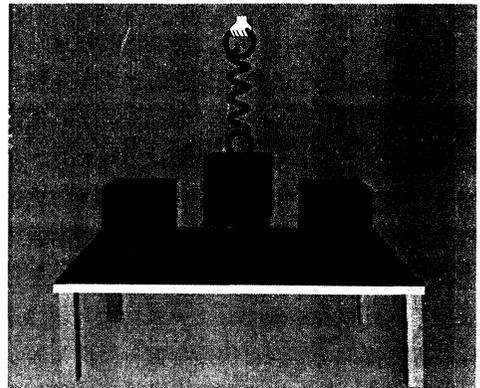


図6：仮想手による仮想物体の持ち上げ操作

- じ、半分、または二倍という異なった上昇速度を設定している。
3. 仮想物体の表面濃度、大きさと形状：これを力覚表現要素としている場合、仮想物体の操作法は上の物体の上昇移動の操作法と同様であるが、操作される三つの物体の操作速度はマウスポインタの上昇移動速度に相対的に同一に設定してある。表面濃度の場合は図3に示すように三つの物体の表面が完全黒を1として、左からは黒（完全黒の90%）、中間（完全黒の50%）とほぼ白（完全黒の10%）の表面濃度に設定してある。大きさの場合は図4に示すように三つの物体の体積が右の小さい立方体を1として、左からは64, 8, 1の大きさ、すなわち、一辺の長さが4倍、2倍に設定してある。形状の場合は図5に示すように三つの物体が左から同じ体積

の球体、立方体と円錐体に設定した。

力覚の表現効果を高めるため、表面濃度と形状要素を除いて、各評価要素ごとに三つの評価サンプルの物理量の相対値を対数的に等間隔にとった。表面濃度の場合は表現の困難な表面濃度の両極端の0と1を除いて濃度を0.1、0.5と0.9に設定した。形状要素の場合は同一体積で形状が著しく異なるものとした。全体として各評価要素の三つの評価サンプルの相対値、相対形状は物体間の重量差を最大限に表現することを目標に設定した。

### 3 仮想空間の構築

#### 3.1 構築環境

本研究では Windows NT/95 の環境上で、Visual C++ を基本的な開発ツールとして、3次元グラフィックスライブラリ OpenGL を取り入れ [6]、上記の五つの異なった力覚表現要素を取り入れた仮想空間を構築した。

#### 3.2 仮想空間の設計

仮想空間の表現は五つの仮想空間ごとに五つのモジュールのほか、仮想テーブルと仮想手のモジュール、マウスで仮想物体を操作するイベントとして、マウス左ボタンのドラッグ、ドラッグの解除とドラッグした仮想物体の上下移動、または各仮想空間の描画と仮想物体の表示などのモジュールで構成した。効果的に仮想空間を構築するために、標準の OpenGL グラフィックス関数ライブラリを用いて、数学の公式や複雑なソースコード攻めに会うことなく3次元物体を作成することができた。さらに、Visual C++ の強力なプログラミングインターフェイスのおかげで、仮想物体はプログラムに記述したルールによって動く。各ルールには、どの入力イベントに反応するか、その結果としての振る舞い、出力イベントを発生させるか否かを指定する。

各仮想空間はメニューバーの選択により指定され、描画モジュールで選択された仮想空間モジュールの設定通りに仮想空間を画面に表示する。各イベントモジュールは仮想物体を操作するイベントを検知し、仮想空間モジュールが仮想物体の表示位置をプログラムに記述したルールに従って変動させ、操作された仮想物体の画面上の表示位置を新たに設定して、この変動状況を描画モジュールで素早く再描画することにより、仮想物体が動的に変動している状況が表示される。

仮想手も同様に描画モジュールにより仮想空間内に仮想手モジュールを設定した通りに表示され、物体を握る操作の場合は円環を握った形に表示され、マウス左ボタンのドラッグを解除、すなわち物体の開放操作イベントを起動させると、仮想手が開いた形に戻る。バネを握る操作については、仮想手がバネを握った形になり、バネと上下の円環を左右に移動させ、移動先の仮想物体上で開放操作をするとバネと上下の円環がこの物体と連結されて、仮想手がまた開いた状態に戻る。仮想手が仮想物体を持ち上げた場合は仮想手の位置が物体と連動しているように設定され、再描画される。

仮想物体の持ち上げ操作イベントの発生はマウス左ボタンのドラッグとそのドラッグした位置によって指定される。例えば、マウスポインタが物体の上の円環の設定された領域内でマウス左ボタンをドラッグすると、仮想手が円環を握るイベント発生させ、さらに上下へドラッグして行くと、仮想手が仮想物体と連結して、仮想手により仮想物体の持ち上げと持ち下げイベントが起こる。マウス左ボタンのドラッグを解除すると仮想物体が仮想テーブルの面上に落下するイベントを発生する。仮想物体の持ち下げは仮想テーブルの面上の位置になると持ち下げイベントを停止させ、仮想物体がテーブルの面上に停止する。仮想手が握っている仮想物体の持ち上げイベントを発生した場合、他の仮想物体

は持ち上げられないように設定してある。

各仮想空間内の各物体の力覚表現要素値が各仮想空間のモジュールで指定される。仮想バネの伸長率と上昇速度の場合は持ち上げイベントが発生すると、各物体が指定した異なった力覚表現要素値のとおり変動状況のイベントが提示される。この異なった変動状況により、被験者が各物体の重量の力覚を感じる。

表1：力覚評価尺度

評点	カテゴリー
5	非常に重さを感じる
4	重さを感じる
3	やや重さを感じる
2	微かに重さを感じる
1	全く重さを感じない

表2：力覚評価サンプルと評価データの平均値と分散

番号	力覚評価サンプル	相対量	平均	分散
1	バネの伸長率大	伸長率4	4.44	0.340
2	バネの伸長率中	伸長率2	3.38	0.318
3	バネの伸長率小	伸長率1	2.28	0.377
4	物体の上昇速度小	速度1	4.32	0.643
5	物体の上昇速度中	速度2	2.80	0.583
6	物体の上昇速度大	速度4	1.68	0.560
7	物体の表面濃度大	濃度0.9	2.92	0.827
8	物体の表面濃度中	濃度0.5	2.52	0.593
9	物体の表面濃度小	濃度0.1	2.02	0.635
10	物体の体積大	体積64	3.16	0.890
11	物体の体積中	体積8	2.32	0.643
12	物体の体積小	体積1	1.56	0.423
13	物体の形状が球体	体積1	2.92	0.993
14	物体の形状が立方体	体積1	2.52	0.510
15	物体の形状が円錐体	体積1	2.80	1.250

#### 4 力覚評価実験

以上に述べたような重量を表現する五つの単一要素変化条件で、25名の被験者を対象として評価実験を行った。評価実験はアンケートの形式で行った。被験者が各力覚表現要素を単独作用する五つの仮想空間内の三つの仮想物体に対して、マウスを用いて向上持ち上げ

操作をして、合計15個の評価サンプルに対して表1に示す5段階の重量感覚評価尺度に当てはまる評点を付ける。すなわち、被験者は各重量表現要素の仮想空間内の個々の物体の重量感覚についての絶対評価をする。15個の力覚評価サンプルの重量要素の相対量と25名の被験者の評価データの平均と分散を表2に示す。画像内物体の提示の左右の順序は個人ごとにランダムとした。

#### 5 力覚表現要素の有効性分析

##### 5.1 分析の手がかり

上に記述したように、評価実験は五つの重量感覚要素が単独に作用する仮想空間内で操作される3個の物体を対象とするため、有効性分析もそれに従って、各重量感覚要素ごとに3個の評価サンプルに対しての評価データの平均と分散を重視して行った。表2の評価サンプルと同様な番号を用いて、五つの仮想空間の被験者の評価データの平均値とそれぞれの物理量の相対値の折れ線図を図7, 8, 9, 10と11に示す。

五つの仮想空間内の3個の評価サンプルの評価平均値の分布幅の大きさは25名の被験者の各仮想空間内の3個の仮想物体に対しての重量感覚差である。例えば、バネの伸長率の仮想空間の場合、評価サンプル1番に対して被験者は4.44の高い平均評価値を与えたので、25名の被験者が平均してこの

評価サンプルに対して大きな重さを感じたと言える。逆に評価サンプル3番に対しては2.28の低い平均評価値が得られたので、被験者がこの評価サンプルに対してあまり重さを感じなかったと言える。従って、五つの仮想空間内の3個の評価サンプルの評価平均値の最大分布幅の大きさは仮想物体の持ち上げ操作の力覚の評価の手がかりであると考えられる。

また、評価値の分散は被験者の評価サンプルに対しての力覚の一致度である、これは力覚表現要素の信頼性を反映する。

この五つの仮想空間内の3個の評価サンプルの評価平均値の最大分布幅と評価値の分散が力覚表現要素の有効性分析の手がかりになることから、バネの伸長率 (Spring), 物体のつり上げ移動速度 (Speed), 物体の表面濃度 (Density), 物体の大きさ (Volume) と形状 (Shape) の五つの仮想空間内の3個の評価サンプルの評価平均値の最大分布幅と3個ごとの評価分散値の平均を図12に示す。

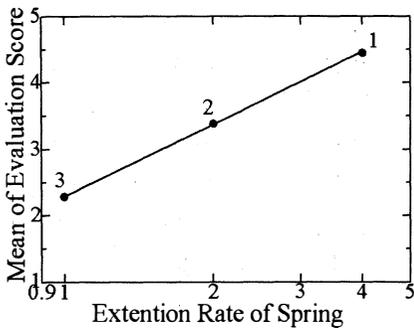


図7：バネの相対伸長率と評価平均値の関係

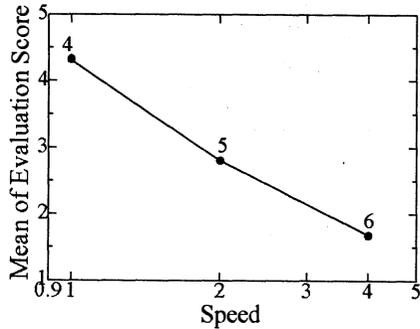


図8：仮想物体の上昇速度と評価平均値の関係

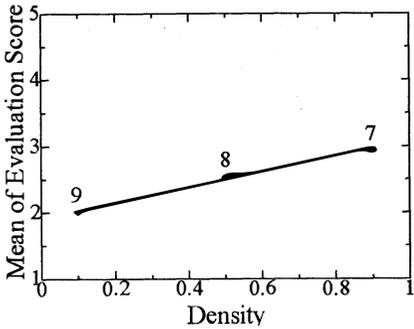


図9：仮想物体の表面濃度と評価平均値の関係

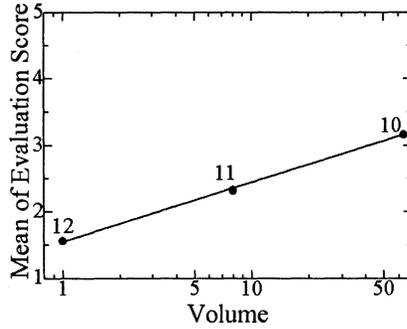


図10：仮想物体の体積比と評価平均値の関係

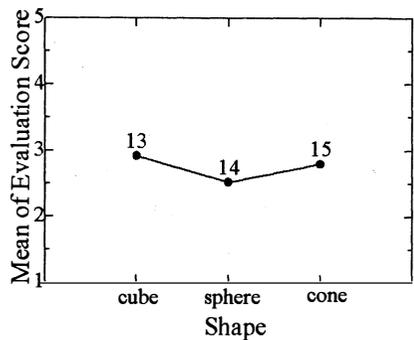


図11：仮想物体の形状と評価平均値の関係

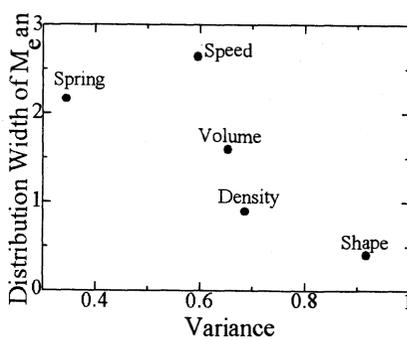


図12：仮想空間ごとの評価平均値の最大分布幅と仮想空間3個ごとの評価データ分散の平均値

## 5.2 評価結果の分析

バネの伸長率が力覚表現要素とした評価サンプル1, 2と3番の評価平均値分布は図7に示したように、線形的で大きい分布幅を示している。また、図12に見るように、バネの伸長率の仮想空間(Spring)内の3個の評価サンプルの評価データの分散は平均して0.345と五つの要素の中で一番小さい値を示している。これは被験者がバネの伸長率の力覚表現要素に対して、一致した感覚的判断をしたことを表わすものと考えられる。すなわち、被験者は平均評価値が大きいバネの相対伸長率4の評価サンプル1番の仮想物体に対して一致して、大きい重みを感じ、逆に平均評価値が小さいバネの相対伸長率1の評価サンプル3番の仮想物体に対して一致して、小さい重みを感じたと言える。これらのことから、物体と繋がっているバネの伸長率を力覚の表現要素とする場合はその力覚表現の有効性と信頼性が高いと分析される。

物体の上昇速度による評価サンプル4, 5と6番の評価平均値分布は図8に示したように、目立つ大きい分布幅を示している。すなわち、相対上昇速度1の評価サンプル4番の仮想物体に対しては、平均評価値が大きく、逆に相対上昇速度4の評価サンプル6番の仮想物体に対しては、平均評価値が小さい。また図12に示したように、表現要素が上昇速度(Speed)の3個の評価サンプルの評価データの分散は平均して0.595の比較的小さい値を示しており、被験者の物体の上昇移動速度による、物体の重さの力覚はほぼ一致していると言える。図8と図12の結果から物体の相対移動速度も力覚表現要素として有効性と信頼性が高いと言える。

物体の表面濃度と体積による評価サンプル7, 8, 9と10, 11, 12番の評価平均値分布は図9と図10に示したように、物体表面濃度大と物体体積大の場合の平均評価値が大きい、逆に表面濃度小と体積小の平均評価値が小さくなる順序で評価サンプルの平均評価値が分布しているが、評価平均値の分布幅はあまり大きくない。また物体の表面濃度(Density)と体積(Volume)の仮想空間内のそれぞれの3個の評価サンプルに対して、図12に示したように、評価データの分散値は平均して0.685と0.652で、やや大きい値を示している。従って、物体の表面濃度と体積による力覚の評価は被験者でばらつきが大きく、力覚の感覚要素にとって、その有効性と信頼性がやや低いと考える。

物体形状の評価サンプル13, 14と15番の評価平均値分布は図11に示したように、この三つの評価サンプルの評価平均値は共に2.52から2.92までであり差がなく、13と14番の評価平均値の差はその最大分布幅で、わずかに0.4である。図12に示したように、物体形状(Shape)の3個のサンプルの評価データの分散値は平均して、0.9以上の大きな値をとっている。すなわち、この物体の形状要素を用いた、仮想物体の力覚表現は非常に曖昧で、個人的なばらつきが大きいことを意味している。従って、物体の形状は力覚の表現要素として、有効性と信頼性がほとんどないと考える。

## 5.3 結果分析のまとめ

以上の分析により、バネの伸長率と仮想物体の持ち上げ速度のような動的な要素が力覚表現するには効果的で、その有効性と信頼性が高いと言える。

物体の表面濃度と大きさのような静的な視覚の要素は心理的な長期記憶に強く依存する。言わば見た目の第一印象に強く影響されるこの両力覚表現要素は力覚表現には、有効性と信頼性がやや低いと考える。

最後は三つの同体積で、異なった形状を持つ仮想物体に対して、被験者がほぼ同様な平均評価値を与えたこと、またその三つの評価サンプルの評価値の分散が大きいことから、この力覚表現要素の有効性と信頼性は共に低いと言える。

## 6 おわりに

普通のコンピュータデバイス環境を用いて構築された仮想空間内での仮想物体の操作における力覚を表現すると仮定された五つの単独に作用する要素について、25名の被験者を対象に仮想物体の重量感覚の評価テストを行わせた。評価テストの結果について有効性と信頼性分析を行い、その分析した結果として、仮想手で操作された仮想物体の移動速度要素と仮想手で仮想物体と繋がっている仮想バネで物体を釣り上げる操作の際の仮想バネの伸長率の要素が力覚を表現するのに効果であることが分かった。操作される仮想物体の大きさ要素と表面濃度要素については評価平均値が相対的小さく、やや大きい分散を示すことで、この両要素は力覚の表現にとって有効性がやや低いと云える。最後に物体の形状要素に対しては被験者の評価値が非常に大ききなばらつきを示しているほか、仮想空間中の3個の評価サンプルの平均評価値の分布幅も非常に小さかった。従って、仮想物体の形状による力覚の効果が一番低いと考えられ、この要素について重量力覚の判断をするのは困難である。

以上のまとめで、仮想空間内での仮想物体の操作における力覚表現の効果は視覚との共感覚だけでなく、操作に伴う運動感覚が異なる場合に力覚を感じ易いことが分かった。例えば、仮想物体の上昇速度とバネの伸長率の要素は力覚を表現するのに効果的である。逆に、ただ視覚的な差異があっても、操作による感覚が同じであれば、力覚の表現効果が低いといえる。仮想物体の表面濃度、大きさと形状要素がこれに入る。

研究では主に力覚表現要素を単独に変化させる場合について仮想空間内での仮想物体の操作に伴う力覚表現法と操作された仮想物体の重量感覚の評価テストの結果により、その力覚表現の有効性と信頼性の研究を行った。今後の課題として、評価結果の因子分析を行い、力覚表現要素の独立性と関連性、および複数の要素が複合的に作用する場合の力覚の表現法およびその有効性について研究を進める必要がある。

## 参考文献

- [1] 岩田洋, “力感覚に対応した人工現実感—仮想空間の構築”, 第5回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.1-4, 計測自動制御学会, 1989.
- [2] 広田光一, 広瀬通孝, “仮想触覚環境の開発”, ヒューマン・インタフェース研究論文集, pp.41-48, 計測自動制御学会, 1993.
- [3] 北村喜文, 野間春生, 宮里勉, 岸野文郎, “視覚と力覚のフィードバックを利用した仮想物体操作補助”, 信学論(D-II), Vol.J80, No.1, pp.256-266, January 1997.
- [4] 桜林仁, “心理学事典”, p.137, 平凡社, 1957.
- [5] Hesel, S.K. and Roth, J.P, “Virtual Reality : Theory, Practice and Promise”, Meckler Publication, 1991.
- [6] Clayton Walnum, 松田晃一(訳), “3-D Graphics Programming with OpenGL”, pp.4-10, 株式会社プレントリスホール出版, 1996.