

# VR空間での視覚操作による実物体サイズの触錯覚

加藤 陸<sup>1</sup> 水野 慎士<sup>1</sup> 船橋 健司<sup>2</sup>

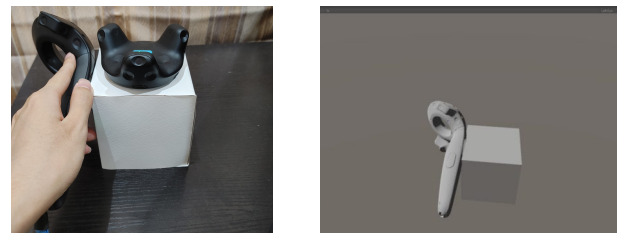
**概要:**近年ではVRを用いて、視覚や聴覚を中心に様々な技術が開発され、実用化されている。その中でも触覚に関して様々な研究が行われており、指先や手などに装着することで触覚を再現するものが開発されている。しかし、これらの多くは振動や圧力を用いており、実際の触覚を完璧に再現しているとは言えない。そこで、実物体を用いて触覚を再現する手法がいくつも提案されている。このとき、実物体とは形状や大きさが視覚的に異なっていても、触っているものと同じと感じる錯覚(触錯覚)を用いる手法に注目が集まっている。本研究ではサイズ変更に関する触錯覚についての手法を提案する。本研究で提案されている手法では、物体の視覚的なサイズ変更に加えて、仮想空間内で描写される手の位置も補正を行うことで、触覚VRとして違和感の少ないサイズ変更を目指す。

## 1. はじめに

近年ではVRを用いた様々な研究が増えており、視覚や聴覚を中心に様々な技術が開発され、実用化されている。その中でもVRにおける触覚は、仮想空間上の物体に実際に触れた感じさせることで、VRへの没入感を高めるという重要な要素の一つである。

触覚を用いた研究としては、南澤らによる指先に装着し、物を掴んだ際の圧力を指先の布を引っ張ることで再現する触力覚ディスプレイ [1] や永野らによる指先に装着した装置内部の空気圧を変化させることで触覚を再現する吸引触覚ディスプレイ [2]、篠田による空中超音波を用いて、手に対して音圧を提示することで触覚を再現する空中超音波触覚ディスプレイ [3] などが開発されている。しかし、これらの多くは振動や圧力を用いており、実際の触覚を十分に再現しているとは言えない。

そこで、触覚を再現するために実物体を用いる手法がいくつも提案されている。このとき、実物体とは形状や大きさが多少異なる視覚情報を与えても、触っている物の形状や大きさが見えているものと同じだと感じる錯覚(触錯覚)を用いる手法に注目が集まっている。例としては松本らによる正方形の形状を持つテーブルを仮想空間の映像内では三角形、五角形などと言った異なる形のテーブルに見せることで、映像内で提示された形状の机を触っていると感じさせる触錯覚 [4]、同じく松本らによる円形状の壁を真っ直ぐに見せることで円状の動きを真っ直ぐに感じさせる触錯覚 [5] や井上らによる、ぬいぐるみを用意し、仮想空間内



(a) 現実内

(b) 仮想空間内

図 1: 実空間で物体に触れた際の仮想空間内での視点

の映像では実空間内のぬいぐるみとは異なるデザイン及び大きさを提示することで、実物とは異なる形状のぬいぐるみの触覚を再現する研究 [6] が報告されている。

サイズに関する触錯覚では、触る対象の物体のサイズだけで視覚的に変更すると、視覚と触感に大きな矛盾が生じる。そのため、適切な触錯覚を実現するには、手の位置も視覚的に補正する必要がある。しかし、文献 [6] では手の位置の補正を行っておらず、物体が触れる前にVRでの手の表示なくすことで矛盾を解消していた。そのため、サイズ変更は小さい範囲に制限されており、違和感も感じる結果になっている。

そこで、本研究ではVR空間内でのサイズに関する触錯覚について、物体の視覚的なサイズ変更に加え、手の位置補正を適用することで、触覚VRとして違和感の少ないサイズの変更を目指す。

## 2. サイズ触錯覚について

### 2.1 概要

本研究では、VRでの触覚を実現するための実物体を使

<sup>1</sup> 愛知工業大学

<sup>2</sup> 名古屋工業大学

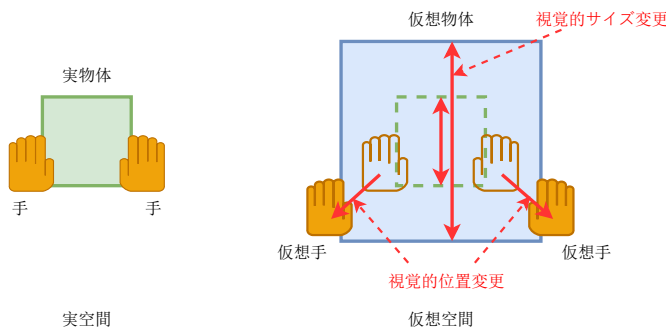


図 2: 触覚 VR におけるサイズ触錯覚

用する。まず、実空間と同様の VR 空間を再現して、ユーザは HMD を用いて VR 空間に没入する。この時、ユーザ自身の手を実空間の位置に合わせて仮想手として VR 空間に表示する。そして、実物体と同じ形状と大きさを持つ仮想物体を実物体に対応する VR 空間に配置すると、ユーザが実空間で物体に触れるときに VR 空間でも視覚的に同じ状態が再現される。実際に実空間で物体に触れている際の視点と様子を図 1 に示す。

サイズに関する触錯覚では、VR 空間で表示する仮想物体のサイズを実物体から大きくしたり小さくしたりすることで変更する。このとき、仮想手の位置がそのままだと、視覚では物体に触れているの触感がない、または視覚では物体に触れていないの触感がある、といった視覚と触覚との大きな矛盾が生じる。

そこで本研究ではサイズに関する触錯覚を行うときに、VR 空間で仮想物体のサイズを視覚的に変更するだけでなく、仮想手の位置も視覚的に補正する (図 2)。このとき、仮想物体のサイズを実物体より大きく見せる際には仮想手の位置を実物体の外側に向かってずらすことで、拡大された物体に触れている様みせ、縮小時には仮想手の位置を実物体の内側に向かってずらすことで、縮小された物体に触れている様に映像内で提示する。

これにより、視覚と触覚の矛盾をなくして、サイズに関する適切な触錯覚を示現する。次節以降では VR 空間での仮想手の位置の補正方法について説明する。

## 2.2 仮想手の位置の補正方法

図 3 に手の位置の補正方法に関する基本的な考えを示す。仮想手の位置の補正は仮想物体を中心とした球状の範囲内で行う。補正範囲外では補正は行わず、仮想手は実空間と同じ位置に表示される。手が補正範囲内に入ると仮想手の位置の補正を開始する。仮想手の位置の補正量は手が物体に近づくにつれて少しずつ大きくしていき、実空間で手が実物体に触れるとき、VR 空間でも仮想手が仮想物体に触れるように補正する。このように、仮想手の位置を徐々に補正することで、手の位置の違いによる違和感を防ぐ。

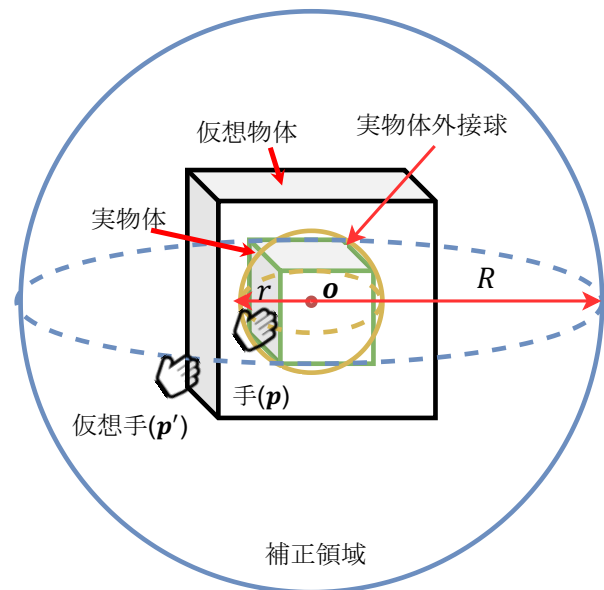


図 3: 本研究における手の補正方法の概要

具体的な補正方法は以下の通りである。まず、物体の中心座標を  $o$ 、補正前の手の座標を  $p$ 、補正後の手の座標を  $p'$  とする。また、物体の外接球の半径を  $r$ 、補正範囲の半径を  $R$ 、サイズ変更比率を  $k$  とする。補正を行う空間領域は、中心座標  $o$ 、半径  $R$  の球の内部となる。

$p'$  の補正量を  $a$  とすると、一般的には  $p'$  は以下の式によって求められる。

$$p' = o + a(p - o) \quad (1)$$

実空間で手で物体に触れたとき、仮想手が  $k$  倍にサイズ変更された仮想物体に視覚的に触れるには、仮想物体の中心点である  $o$  から実際の手の座標  $p$  までの距離が外接球の半径と同じになるときに  $(|p - o| = r)$ 、式 (1) で  $a = k$  とすればよい。

$$p' = o + k(p - o) \quad (|p - o| = r) \quad (2)$$

また、補正領域外  $(|p - o| > R)$  では実際の手の位置と仮想手の位置は同じであるため、式 (1) で  $a = 1$  とすればよい。

$$p' = p \quad (|p - o| > R) \quad (3)$$

$p$  が  $r < |p - o| < R$  を満たす範囲内のときを考える。例えば、式 (2) と (3) を線形補完すると  $a$  は以下の式となる。

$$a = \frac{(|p - o| - R)(1 - k)}{R - r} + 1 \quad (4)$$

ここで、式 (2)(3)(4) に基づいて  $p'$  を求めて  $|p - o|$  と  $|p' - o|$  の関係をグラフ化すると、図 4 のグラフ中の赤い線で示される。このグラフでは  $R = 70(\text{cm})$ 、 $r = 10(\text{cm})$ 、としており、図 4(a) は  $k = 2$ 、図 4(b) は  $k = 0.2$  の場合である。また、グラフ中の点線は仮想手の位置を補正しない

場合の動きを示しており、本来の手の移動速度と変わらないということを示している。

図4のグラフでは、傾きに注目することで仮想手の移動速度を知ることが可能となっている。 $k=2$ の場合のグラフ中、赤い線から、 $p$ が補正領域(グラフ中の点M)に入った途端に $p'$ の移動速度が最初は遅く動き、物体に近づくと急激に速度が速くなること分かる。これはユーザーが意図している動作とは異なってしまい、違和感を感じてしまう要因になってしまうことが考えられる。

違和感を小さくする方法として、補正領域内に入ったときの移動速度変化をできるだけ小さくすることが挙げられる。そこで、図4のグラフの青い線で示すように、点Mと点Nを通り、点Mでの傾きが1となるような二次曲線で補正をすれば、式(2)と(3)を満たしつつ、補正領域内に入ったときの移動速度は、入った瞬間は本来の手の動きとほぼ同じで、物体に近づくとつれて少しずつ速度が変化する様になっている。これは、線形補完を用いた手法よりも本来の手の動きに仮想手の動きが近づき、違和感の軽減が期待できる。これを満たす $a$ は以下の式(5)で求められる。

$$a = \frac{A|p - o| + B + C}{|p - o|} \quad (5)$$

$$A = \frac{r(k-1)}{(r-R)^2},$$

$$B = 1 - 2AR,$$

$$C = AR^2 + (1-B)R$$

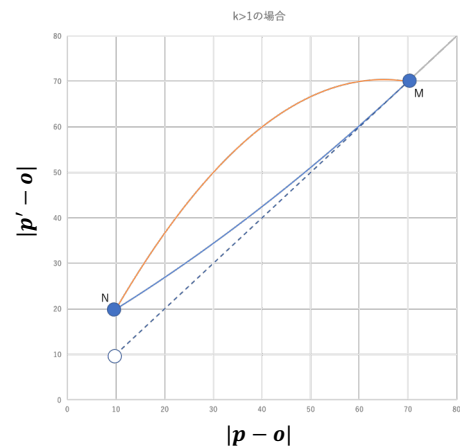
### 2.3 物体の外接球の動的変化

本研究で提案している手法は外接球の表面に手が当たった時点で手が物体に触れているという假定で行っている。しかし、外接球の半径が固定の状態であるとき、そして、外接球の内部には手が入り込まないことが前提となっている。

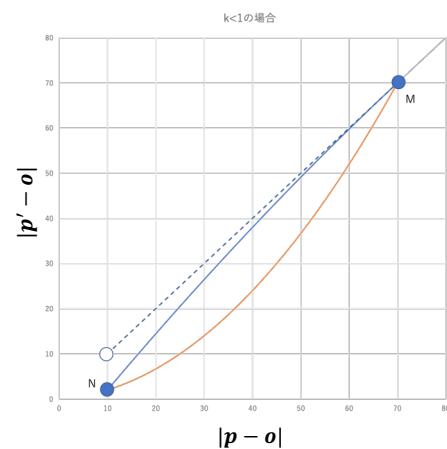
その為、対象物体の形状は球体か、立方体などの球体に近い形状に限られている。ぬいぐるみなどの複雑な形状を対象とした場合、対象物体の外接球をそのまま補正に用いた場合には手が外接球の内部に入ることになり(図5)、場所によっては適切な補正が行われない。また、補正の為の球を実際の外接球よりも小さくした場合でも、手が対象物体に触れたときの仮想手の位置が不適切になる。

そこで、対象物体が複雑な形状の場合でも、実物体に対して手が触れた時点で外接球に手が触れる様に、外接球のサイズを動的に変化させる。本研究では図6の様に実際の手の座標 $p$ から物体の中心点の座標 $o$ を結ぶ直線を考え、直線と物体の表面との交点を取得し、中心から交点までの距離を外接球の半径 $r$ として外接球を動的に変化させる。

ただし、この手法を適用するには事前に対象物体の形状を三次元的に計測しておく必要がある。



(a)  $k=2$  の場合



(b)  $k=0.2$  の場合

図4: 補正曲線グラフ

## 3. 実験及び評価

### 3.1 検証及び評価方法

提案手法を用いたサイズ触錯覚手法の有効性を検証するためにシステムを実装して検証を行った。

実装環境にはUnityを使用し、デバイスはHTC Viveを使用する。仮想手としてViveコントローラ、そして物体のトラッキングにViveトラッカーを使用する。

1つの目の実験は同形状、同サイズの物体を2つを被験者に映像内で提示した上で、片方は実物と同じサイズ、も



図5: 外接球への手の入り込み

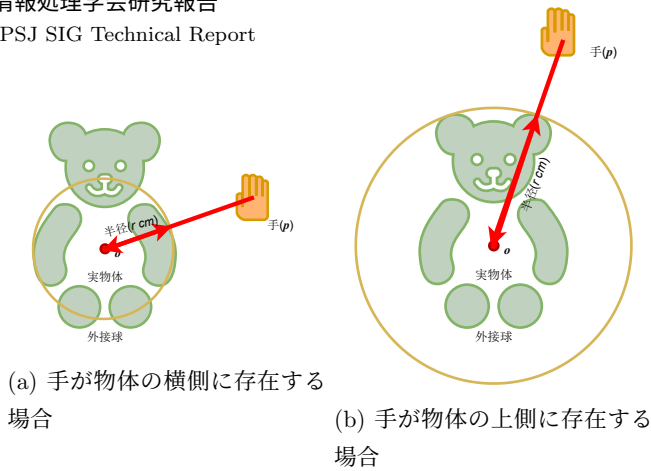


図 6: 外接球の動的変化

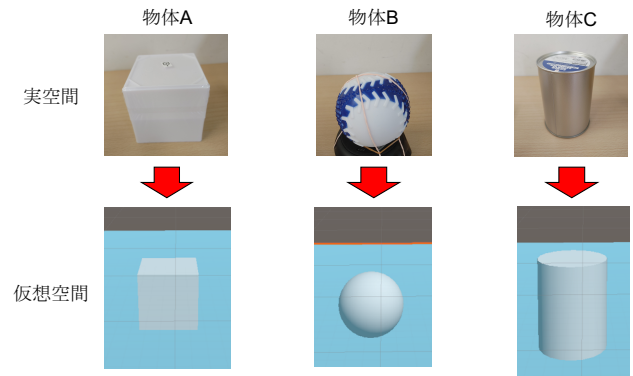


図 7: 使用する実物体

う片方は実物とは異なるサイズであるとき、触れたり、持ち上げたときに感じ方に違いがあるのか検証を行う。実物体に触れる際には VIve コントローラーを掴んだ状態で手で直接物体に触れる形で物体に触れる、持ち上げる形式で行ってもらふ。この検証での評価方法は、両方の物体に触れてもらった際に、それぞれの物体が異なるサイズの物体として違和感なく触れることができたかどうかで評価を行ってもらふ。

2つ目の実験では、被験者の目の前で徐々にサイズを変更させていく場合のサイズ触錯覚の検証を行う。仮想物体は初めに実物体と同じサイズ（サイズ変更比率:1倍）から0.1～2.0倍までの範囲で行い、サイズ変更は0.25倍刻みで行う。被験者はHMDを被った状態で、仮想物体に対して実物体よりも大きな物体もしくは小さな物体に触れている様に違和感なく感じるかを評価してもらふ。

3つ目の実験では、HMDを被った状態でサイズが最初から変更されているものを渡した場合、サイズに関してどのように感じるかを検証する。

4つ目の実験ではサイズの異なる立法形状の物体を複数個用意し、中から2つの実物体を仮想物体として描写し、片方の仮想物体を実物体と同じサイズのものとして描写し、もう一方を片方の実物体のサイズと同じとして、被験者にはHMDを被った状態で触れる、持ち上げる等の行為を行ってもらふ、評価をしてもらふ。

被験者の人数は1つ目の検証である2つの仮想物体を用いた比較の検証は9人、2つ目と3つ目のサイズ変更の検証は10人で、4つ目の検証である複数の実物体を用いた検証では6人であり、いずれも20代の男性である。

### 3.2 同形状物体を2つ提示した場合

この検証では、仮想空間上に同じ形状を持つ実物体2つを仮想物体として被験者に提示する。このとき、一方の仮想物体は実物体とは異なるサイズにして、もう一方は実物体と同じサイズの仮想物体として提示する。使用する物体は図7内の実物体Aを使用する。ここでの片方の仮想物

体のサイズ変更比率は2.0倍で固定とし、補正領域空間は半径60cmとする、また実物体の外接球は2.3節の手法で動的に変化するものとする。

被験者には両方の仮想物体にそれぞれ触れてもらい、それぞれの物体が違うサイズの物体に触れている様に感じるかどうかを検証する。なお、ここでの評価方法は被験者に片方の物体がもう片方の物体とは異なるサイズに違和感なく感じるかを評価してもらふ。

検証の結果として、実験に参加した被験者の9人中9人全員が片方の物体がもう片方の物体とは異なるサイズだと違和感なく感じると評価した。

ここから本研究の提案手法を使用することで、違和感の少ない物体のサイズ変更が可能であると考えられる。

### 3.3 物体サイズの変更

実物体のサイズを変更した仮想物体をHMDを通して被験者に提示し、HMDを装着した状態で物体に対して触れる、持ち上げる等の行為を行う様に指示する。このとき、仮想物体のサイズ変更比率は実物体とは変わらない1倍から開始し、0.25刻みでサイズの変更を行う。被験者には仮想物体ごとにサイズ感が仮想物体のものを触れている様に感じるか評価を行ってもらふ。なお、本検証ではサイズ変更比率は初めに2倍に向けて大きくし、その後には仮想物体のサイズを0.75倍から小さくしていく形とする。

実物体は次の図7で示された物体を使用する。それぞれ立方体形状、球状、円柱状の物体であり、立方体は一辺が8.5cm、球は半径4cm、円柱は半径4.5cmで高さ11cmの物体となっている。なお、補正領域の半径はすべての物体で半径60cmとし、実物体の外接球の半径は2.3節の手法で動的に変化するものとする。

検証の結果、仮想物体Aでは、仮想物体のサイズを実物体よりも大きくしていったとき、サイズ変更比率が1.25～1.75倍の範囲では被験者の10人中10人全員が仮想物体が実物体よりも大きいサイズの物体として違和感なく感じると評価した。しかし、サイズ変更比率が2.0倍になった時点で、違和感なく感じるという評価が10人中8人となり、感じ



ないと評価した2人は実物体に対して極端に大きくなりすぎて少し違和感を感じるという評価をした。3.2節の実験1では、サイズを2倍にしても違和感を感じる人は少なかったが、この実験では2人が違和感を感じた。これは、サイズ変更前の状態を知っている為、それと比較して違和感を感じてしまったと考えられる。

仮想物体を実物体よりも小さくしていった場合では、サイズ変更比率が0.75倍の時点で仮想物体が実物体よりも小さいサイズの物体として違和感なく感じると評価した人数が10人中8人で、変更比率が0.5倍、0.25倍そして0.1倍とすると、違和感を感じない人は6人、1人、0人と大きく減っていった。サイズ変更の絶対量はサイズを大きくしたといった場合と変わらないが、比率の変更の大きさの方が違和感に大きく関係する可能性がある。また、サイズ拡大よりサイズ縮小の方が違和感を感じられる可能性がある。

次に実物体Bを使用した際の検証結果を述べる。仮想物体のサイズを実物体よりも大きくしていった際には、1.25倍の時点で被験者の10人中8人が実物体よりも大きい物体として違和感なく感じると評価し、立方体形状よりも違和感なく触れられた人数が少し減っている、サイズ変更比率1.5~1.75の範囲でも違和感なく感じると評価した人数が10人中8人と1.25倍のときとは変わらない結果となった。サイズ変更比率が2.0倍となったときには違和感なく触れることが出来たのが10人中7人という結果になった。中でも1名はサイズ変更比率が2.0倍となった時点で明らかに映像内で提示されているものを触れているとは感じない、と答えた。これは物体Aの結果より違和感を感じる人が多い結果になった。物体Bは物体Aより小さく、サイズ変更に対する違和感に影響を与える結果となった可能性があるが、より詳細な検証が必要である。

この実物体を小さく見せた場合は、サイズ変更比率0.75倍の時点で実物体よりも小さい物体として違和感なく感じる、と回答した被験者の人数は10人中8人となった。その後0.5倍の時点で、10人中7人、0.25~0.1倍で10人中0人という結果になった。

次に実物体Cを使用した際の検証結果を述べる。仮想物体のサイズを実物体よりも大きくしていった際には、1.25倍の10人中7人という結果になった。その後1.5倍で10人中10人、1.75倍で10人中9人、2.0倍で10人中10人という実物体A、Bの結果と比べるとばらつきが大きい結果となった。

この実物体を小さく見せた場合には、サイズ変更比率0.75~0.5倍の時点で実物体よりも小さい物体に触れていると違和感なく感じたと回答した被験者の数が10人中8人という結果になり、0.25倍で10人中2人、0.1倍で10人中0人という結果になった。

### 3.4 サイズを変更した状態で渡した場合

3.2節の実験と3.3節の実物体Aを2倍にした実験は、使用した実物体と被験者に提示した映像は同じである。しかし、3.2節の実験では違和感を感じる人がいなかったのに対して、3.3節の実験では10人中2人が違和感を感じた。そこで、次の実験では仮想物体のサイズを少しずつ変更するのではなく、最初から仮想物体のサイズを変更した状態で被験者に提示する。被験者にはその物体に触れる、持ち上げる等の行為をしてもらいサイズの変化を評価してもらう。

使用する実物体と、補正領域の半径等の数値は3.3節の実験と同じとし、サイズ変更比率は2.0倍の場合、0.75倍の場合、0.5倍の場合を検証する

検証の結果、実物体Aでは、サイズ変更比率が2.0倍の場合には、10人中10人の被験者が違和感なく触れることが出来たと回答しており、3.2節の実験結果と同じであった。一方、サイズを小さくした場合に違和感を感じなかった人は、サイズ変更比率が0.75倍のときに10人中8人、0.5倍のときに10人中6人、となり、3.3節の実験結果と同じになった。

実物体Bでは、サイズ変更比率が2.0倍の場合には、10人中9人が実物体よりも大きい物体であると違和感なく感じると回答。一方、サイズを小さくした場合に違和感を感じなかった人は、サイズ変更比率が0.75倍では10人中6人、0.5倍で10人中6人と、3.3節の実験より悪い結果となった。

実物体Cでは、サイズ変更比率が2.0倍の場合には、10人中10人が実物体よりも大きい物体であると違和感なく感じると回答し、3.3節の実験より良い結果となった。一方、サイズを小さくした場合に違和感を感じなかった人は、サイズ変更比率が0.75倍では10人中8人、0.5倍では10人中8人と、3.3節の実験結果と同じになった。

以上の実験をまとめると、サイズ拡大の場合はサイズ変更の様子を見せない方が見せるよりも違和感を感じにくいという結果が得られた。一方、サイズ縮小の場合にはサイズ変更の様子を見せる場合と見せない場合で違和感の感じ方にあまり変化は見られなかった。

### 3.5 サイズが異なる実物体を同じサイズに見せた場合

次に、図8で示されたそれぞれサイズの異なる立法形状の物体を利用する。図に示された物体のサイズはそれぞれ、物体Dは一辺が8.5cm、物体Eは10.0cm、物体Fは12.0cm、物体Gは15.0cmとなっている。また、補正領域、実物体の外接球の半径は3.3節の実験と同じとする。これらの実物体から2つを仮想物体として被験者に提示し、片方を実物体とは同じサイズ、もう一方を片方と同じサイズの物体として描写する。このときに両方の物体のサイズが

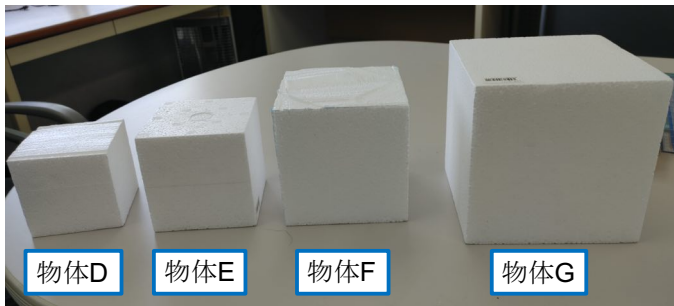


図 8: 使用する実物体

同じに感じるかを検証する。使用する物体の組み合わせは、DとE、DとF、DとG、EとF、EとG、FとG、の6パターンで行い、それぞれの組み合わせを仮想物体として被験者に提示する際に、どちらか一方の仮想物体のサイズを片方の実物体のサイズと同サイズにする。以下に6人の被験者に対する実験結果を示す。

物体DとEの組み合わせでは、Dを拡大してEのサイズとして提示した場合、及びEを縮小してDのサイズで提示した場合のいずれも、6人全員が違和感なく2つの物体が同じサイズであると感じた。

物体DとFの組み合わせでは、Dを拡大してFのサイズで提示した場合、全員が同じサイズだと感じた。一方、Fを縮小してDのサイズで提示した場合は、1人は見かけが一緒でもFが大きいと感じた。

物体DとGの組み合わせでは、Dを拡大してGのサイズで提示した場合、2人が見かけは一緒でもDが小さいと感じた。一方、Gを縮小してDのサイズとして提示した場合は、2人は見かけは一緒でもGが大きいと感じた。

Dに対してEは約1.2倍、Fは1.4倍、Gは1.8倍である。実験の結果、見かけのサイズを1.5倍程度拡大しても、ほとんどの人は触覚と視覚の乖離に気づかない可能性が示唆された。そして、視覚的な拡大の方が縮小よりも気付きにくい傾向が見られた。

#### 4. まとめ

本研究では、VRを用いて視覚的な物体のサイズ変化に加えて、VR空間内に手を位置補正した上で描写することで触覚VRとして違和感の少ない物体のサイズに関する触覚錯覚を生じさせる手法の提案と開発を行った。

今回行った実験結果から、本研究の手法を用いることで比較的違和感の少ない状態で実物体の視覚的サイズを変更し、ユーザーに実物体とは異なるサイズの物体に触れていると錯覚させることが可能であることが確認できた。

また、文献[6]ではサイズの変更範囲は0.8~1.2倍の範囲で行われており、0.8や1.2倍になった際にはスケールに対する違和感が大きいと報告されている。本研究の手法で視覚的に手の位置も補正を行うことでより広い範囲のサイズ変更が可能となった。

今後の課題として、補正領域同士が干渉した際の対処法の開発、そして、触れた際の物体の変形や外見の材質の変化による重さの錯覚などのより多彩なインタラクションへの対応などが挙げられる。また、ぬいぐるみといったより複雑な形状を持つ実物体に対する触覚錯覚の検証も課題として挙げられる。

#### 参考文献

- [1] 南澤孝太, 深町聡一郎, 根本裕之, 川上直樹, 館暉: バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力型ディスプレイ, 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 15-24 (2008).
- [2] H. Nagao, K. Sase, M. Konyo, S. Tadokoro: Wearable Suction Haptic Display with Spatiotemporal Stimulus Distribution on a Finger Pad, 2019 IEEE World Haptics Conference(WHC), pp. 389-394 (2019).
- [3] 篠田 裕之: 超音波を用いた空中触覚提示, 日本音響学会誌, 76 巻, 1 号, pp. 38-45(2020).
- [4] K. Matsumoto, T. Hashimoto, J. Mizutani, H. Yonehara, R. Nagao, T. Narumi, T. Tanikawa, M. Hirose: Magic table: deformable props using visuo haptic redirection, SIGGRAPH Asia 2017 Emerging Technologies. (2017).
- [5] K. Matsumoto, Y. Ban, T. Narumi, Y. Yanase, T. Tanikawa, M. Hirose: Unlimited Corridor: redirected walking techniques using visuo haptic interaction, ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies July 2016
- [6] 井上亮文, 石河竜太, 山本 光良: 仮想的な外見を有するぬいぐるみ型玩具の提案. 情報処理学会研究報告, Vol. 2020-DCC-26, No. 24, pp. 1-6 (2020).