

物理ボタンによる 3D 空間内のオブジェクトの操作 —動作方向の不一致と違和感との関連—

小川 大地^{†1} Vibol Yem^{†1} 蜂須 拓^{†2} 梶本 裕之^{†1}

概要: 本研究ではボタンを 3D コンテンツに利用するための基礎実験を行った。前報で我々が開発した多感触ボタンは 1 自由度の入力装置であり、3D コンテンツに適応させる場合、ボタンの動作（入力）とコンテンツ内のオブジェクトの動作（出力）に関して大きさも方向も一致しない場合があった。そこでボタンの入力に対して複数のオブジェクトの動作方向を用いて入力動作と出力動作の一致度と違和感との関連を調査した

Control of an Object in 3D Space using 1D Physical Button -Sense of Discomfort by Inconsistency of Motion Direction-

DAICHI OGAWA^{†1} VIBOL YEM^{†1} TAKU HACHISU^{†2} HIROYUKI KAJIMOTO^{†1}

Abstract: This paper shows basic experiments to use a button for 3D content. We have developed a Multiple Texture Button that can present vibrotactile sensation while pressing the button, and used it in 3D Space. However, effect of inconsistency of motion direction (i.e. button is pressed downward while the virtual object moves forward) was not considered. In two study, we surveyed of the degree of discomfort by the inconsistency of some motion directions.

1. はじめに

インタラクティブな 3D コンテンツにおいて、オブジェクトの操作はコンテンツ専用のデバイスや 3D コントローラ、身体全体のジェスチャ等数多くの手法が提案されている [1, 2, 3, 4, 5]。しかし、一般的なコントローラやマウス、キーボードなどの既存のデバイスに比べ未だ入手コストが高く、汎用性も高いとはいえないという課題があった。これに対して我々は、従来から多用されているが故に低コストで汎用性の高いボタンに着目し、これに動作に対応した高品位な振動触覚を付与する「多感触ボタン」を開発し、野球ゲーム等への応用を示した [6]。

しかし多感触ボタンはあくまで 1 自由度の入力装置であり、3D コンテンツに用いる場合、ボタンの動作（入力）とコンテンツ内のキャラクターや道具の動作（出力）は大きさ（移動感度）も移動方向も一致しない場合がほとんどである。例えばノコギリを切るコンテンツであれば、ボタンの動作は垂直方向（Up-Down, y 軸方向）の動作に対して、コンテンツ内のノコギリは前後方向（Forward-Back, z 軸方向）に動作する。擦る、撫でる（Right-Left, x 軸方向）などのインタラクションも同様にボタンの方向とコンテンツ内のオブジェクトの動作方向は一致していない。

そこで本稿では、我々が開発した多感触ボタンを 3D コンテンツに適用するための事前調査として、入力動作と出力動作の間で姿勢や動作方向が異なる場合の違和感の度合いの調査を行った。実験 1 ではボタンの入力に対してオブ

ジェクトの動作方向を 6 種類、移動感度を 3 種類用いて動作の違和感の調査を行った。実験 2 ではオブジェクトの姿勢も考慮し、6 種類の移動方向、6 種類のオブジェクトの姿勢を用いて違和感の調査を行った。この調査によって、違和感の少ない出力動作をもとに、より自然かつ没入感の高い 3D 空間内のインタラクションの設計が可能になると考えられる（図 1）。

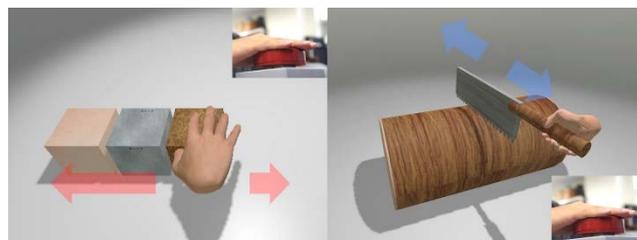


図 1 多感触ボタンを用いたインタラクション

2. 関連研究

3D コンテンツ内の操作のために、マウス、ゲームパッド、グローブタイプデバイスや 6 自由度入力デバイスを用いて、直感的かつ操作性の高いデバイス、手法が開発されている [1]。マウスやパッドを用いた場合、通常は動作の自由度が足りないため、自由度を他の操作（ドラッグやクリック）を用いて補っている。

こうした操作の評価手法としてフィッツの法則が多く用

^{†1} 電気通信大学
The university of Electro-Communications
^{†2} 筑波大学
University of Tsukuba

いられている[7]. 従来は2次元空間での入力手段の比較等に多く利用されているが、これを3次元空間の操作評価に拡張した例も見られる[8]. ただし筆者らの知る限り、座標軸が全く異なる場合の評価はHMDを装着した際のタッチパッドを操作する姿勢に関する調査[9]など限定的である.

実際の手の動きと画像中の動きが顕著に異なる例として腹腔鏡手術が挙げられ、実際の動きと画像中の角度のずれとタスクパフォーマンスとの関係を調査している [10, 11].

以上のようなタスク遂行に基づく評価とは異なる主観的な評価に関連する現象として、視覚的に提示された手が自分の手のように感じられる Rubber Hand Illusion (RHI)が知られている[12]. 一般的に RHI は本物の自分の手の横に偽物の手を置き、触覚手がかりなどを与えることによってその偽物の手が自己の手のように感じられる (自己所有感: Ownership) 錯覚を指す. RHI は手が鏡に映っているような場合[13], 90度角度が異なる場合 [14], サイズが異なる場合[15], 腕が非常に長い場合[16], 自己運動を伴う場合[17]についても検討されている.

以上の例より、我々が考えている「異なる運動方向、姿勢で表示された場合の違和感」と Rubber Hand Illusion で測定されている自己所有感が関連している可能性は高い. ただし運動方向、手の姿勢に関して網羅的に検証されていない. 本実験では3軸すべての軸に対して方向、姿勢を変化させて、違和感の調査を行う

3. 実験1: 移動方向と移動感度に関する調査

本実験では前報で開発した多感触ボタンを入力装置として用いた. ボタンの入力に対して3Dコンテンツ内のオブジェクトの出力動作を図2に示したグローバル座標における6種類の動作方向 (Up, Down, Right Left, Forward, Back), 3種類の移動感度 (移動量), 計18種類の動作出力を用いて、入力動作と出力動作の違和感の調査を行った.

3.1 実験環境

Unity(<http://unity3d.com/jp/>)を用いて実験環境を構築した. ボタンの入力に対して3D空間内に設置されたオブジェクトがグローバル座標における6方向の内、特定方向に動くコンテンツを作成した (図2). 使用した6方向は、Up (y軸にプラスの方向), Down (y軸にマイナスの方向), Right (x軸にプラスの方向), Left (x軸にマイナスの方向), Forward (z軸にプラスの方向), Back (z軸にマイナスの方向) であった.

使用した多感触ボタンは内蔵されたフォトリフレクタにより最大15mmの押しこみ距離が計測される. 内蔵されたパネによって最大9Nの反力を提示する. 3D空間内に設置されるオブジェクトの位置はボタンの押し込み量に線形に対応させた. 入力量に対するオブジェクトの移動感度に関しては3種類 (小, 中, 大) を用意した. 予備的な実験によって違和感の少ない感度を基準量 (中) とし、小を基

準量の1/10倍とし、大を基準量の2倍とした. オブジェクトには右手のモデルを用いた. 被験者は17名 (男性12名, 女性3名, 21-30歳) であった.



図2 3D空間内の実験環境

3.2 実験手順

被験者には右手でボタンを自由に押しもらいランダムな順序で18種類 (6方向×3移動感度) のオブジェクトの出力動作に対して違和感があるか評価させた (図3). 加えて、実際にオブジェクトが移動した方向を6方向の中から回答させ、3D空間の方向の認識調査も行った.



図3 実験の様子

3.3 実験結果

実験の結果を表1に示す. 表内の数値はオブジェクトの動作に対して違和感があると回答した被験者全体の割合を示す. 違和感を生じたかを検証するため、それぞれの条件に対して両側符号検定を用いて統計処理を行った. 違和感がないと認められた出力動作は、オブジェクトの方向がDown, 移動感度が中の動作 ($p^{**}<0.01$), オブジェクトの方向がForward, 移動感度が中の動作 ($p^{**}<0.01$) であった. また、違和感があると認められた条件はオブジェクトの方向がLeft, 移動感度小の動作 ($p^{*}<0.05$), オブジェクトの方向がUp, 移動感度大の動作 ($p^{*}<0.05$) であった.

表 1 実験 1 の結果
 オブジェクトの動作に違和感があると回答した割合
 感度

	小	中	大
Up	0.58	0.64	0.76*
Down	0.52	0.11**	0.35
Right	0.70	0.35	0.35
Left	0.82*	0.47	0.47
Forward	0.64	0.11**	0.29
Back	0.52	0.29	0.41

3.4 考察

実験の結果よりオブジェクトの移動方向の正答率は99%であったことより、すべての被験者が3D空間内の方向を正しく認識していたと考えられる。

実験の結果及び被験者の内観報告より移動感度が小さい条件の際、違和感が強くなる傾向があった。被験者はオブジェクトの移動感度が小さい場合、抵抗感を感じていた。また、Right, Leftの水平方向の動作に関する違和感は、感度が増加するにつれて違和感が減少していく傾向があった。また、ボタンの入力方向に対して反対の方向であるUpの方向では違和感があった被験者がそれほど多くなかったことから、違和感の少ない移動感度に調節することにより6方向すべてに対して多感触ボタンが使用できることが示唆された。

4. 実験 2 : 移動方向とオブジェクトの姿勢に関する調査

実験 1 では手の姿勢を固定した条件(手のひらをDown方向に向ける)で実験を行っていた。本実験では手の姿勢も考慮し、6種類のオブジェクトの姿勢と6種類の動作方向を組み合わせた計36種類の動作出力を用いて、オブジェクトの動作の違和感について考察を行う。

4.1 実験環境

実験 1 と同様の3D空間、ボタンを用いた(図3)。使用したオブジェクトの移動感度は実験 1 で用いた中の感度を用いて、グローバル座標系における6方向(Up, Down, Right, Left, Forward, Back)に対してオブジェクトを動かした。オブジェクトの姿勢に関してはグローバル座標系における6方向用意した(図4)。Up, Down, Right, Left, Forward, Back, それぞれ各方向に向くもの6種類であった。被験者は12名(男性9名, 女性3名, 21-25歳)であり、被験者全体の中で実験 1 を経験した被験者は10名であった。

実験手順

被験者には実験 1 と同様、右手でボタンを自由に押ししてもらいランダムな順序で36種類(6移動方向×6オブジェクトの姿勢)のオブジェクトの出力動作に対して違和感があるか回答させた。実験 1 とは異なり、違和感の大きさを定量化させるため0から100のビジュアルアナログスケール(0:違和感がない-100:違和感がある)で評価させた。

4.2 実験結果

全36条件の違和感の強度の平均値の結果を図5に示す。図内のエラーバーは標準偏差、横軸は各出力動作(分類が姿勢, 系列が方向を示す)、縦軸は各動作の違和感の強度を示す。全36条件の違和感の強度の平均値を4グループ(違和感の最も少ないグループ, 違和感の少ないグループ, 違和感の大きいグループ, 違和感の最も大きいグループ)に分けるため、最近隣法によるクラスタ分析を行った。最も違和感の小さい動作条件は姿勢がDown, 移動方向がDownの動作であった。この動作は実際のボタンを押す手の姿勢と押す方向が等しい動作である。一方、最も違和感の大きい動作条件は姿勢がRight, 移動方向がLeftの条件と姿勢がBack, 移動方向がRightの条件であった。この動作は、実際の手で行う場合に抵抗感を感じる動作である。

4.3 考察

実験 2 ではオブジェクトの姿勢と移動方向について実験を行った。実験の結果、違和感の強度は移動方向よりもオブジェクトの姿勢に強く影響されることがわかった。また、姿勢と移動方向組み合わせ次第では違和感を少なくできることも示唆された。例えばForwardの姿勢の手のオブジェクトであれば、総じて悪い評価ではあるがDownやForwardの移動方向であれば違和感が小さくなることがわかった。

また、違和感の小さい条件は手を使ったインタラクションを連想できる動作であると考察できる。例えばLeftの姿勢であれば、握手やペンを握る動作を連想できる。また、姿勢がForward, 移動方向がUpの動作は手を上げる動作に連想できる。一方で連想の難しい姿勢であるRight, Backの方向は違和感の大きい評価であったと考えられる。

多感触ボタンを用いてオブジェクトを使ったインタラクションを設計する場合、ボタンを押すユーザがオブジェクトの動きをある程度連想できるかが、違和感の少なく、没入感の高いインタラクションを設計するために重要である。

5. アプリケーション

本実験の結果をもとに、多感触ボタンを用いた違和感の少ないインタラクションの例を紹介する。加えて、ボタンに内蔵された振動子による触覚フィードバックも用いた応用例も考察する。

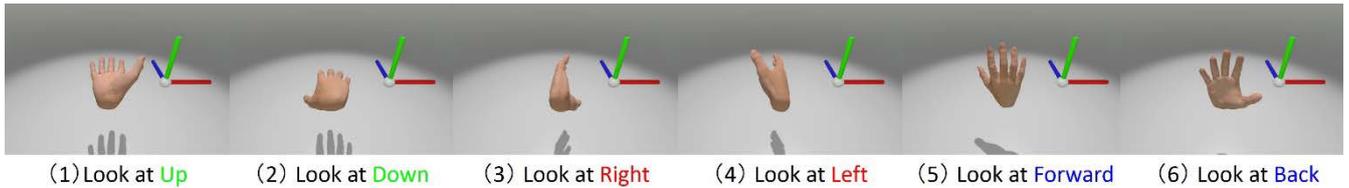


図 4 実験 2 に用いたオブジェクトの姿勢

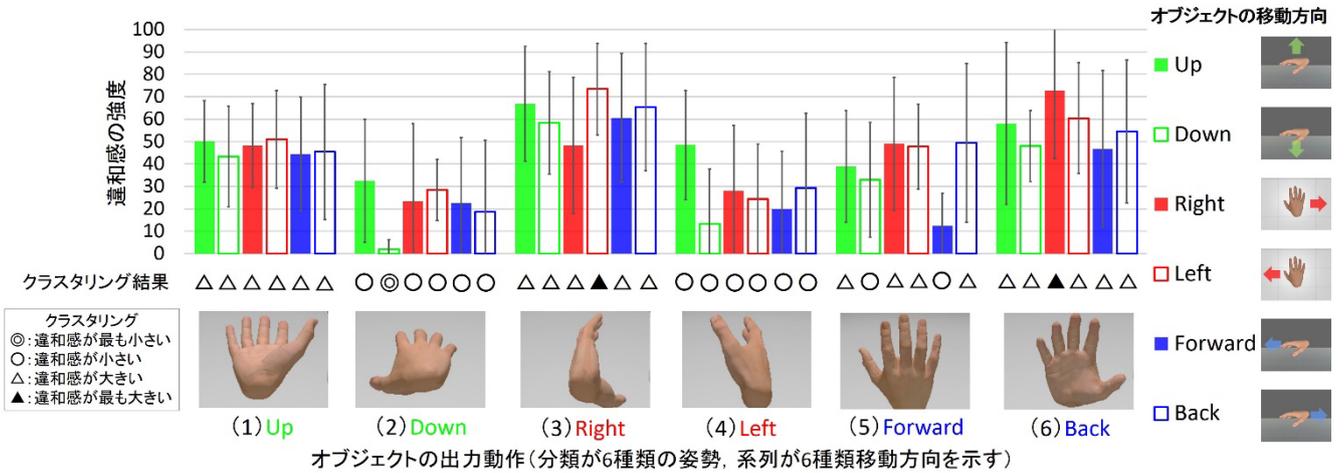


図 5 実験 2 の結果及びクラスタ分析結果

(1) 擦る, 触る

ボタンの入力に対してオブジェクトの姿勢を Down の姿勢に、水平 (x 軸, または z 軸) 方向に動作させることによって、擦る, 触るインタラクションが可能になる. オブジェクト同士の衝突に対して、事前に記録した振動波形を提示することにより、図 6 のような材質感表現や物を触れることができる.

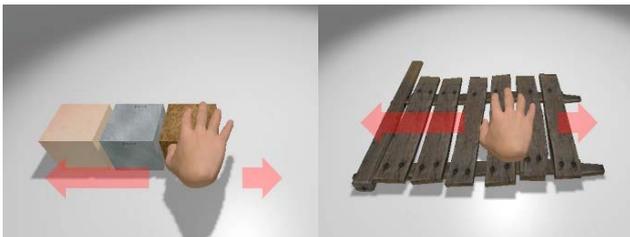


図 6 “擦る, 触る” を表現するインタラクション
 左: 材質感表現 (左から木, 金属, コルクの材質を表現)
 右: オブジェクトに擦る, 触るインタラクション

(2) 押す

図 7 左のように、実際のボタンの押す方向 (y 軸方向) と 3D コンテンツ内のボタンを押す方向 (z 軸方向) が一致せずとも違和感なく使用できることわかった. クリック感などを提示することによってバーチャルなボタンを押すという没入感が増加すると考えられる.

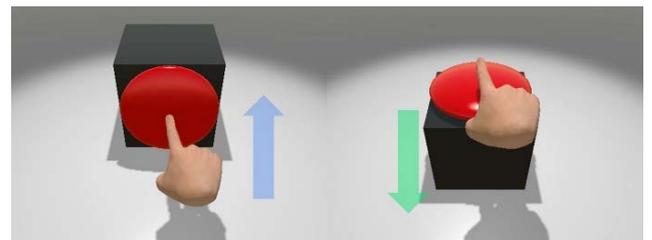


図 7 “押す” を表現するインタラクション
 左: z 軸プラス方向 (Forward) に押す
 右: y 軸マイナス方向 (Down) に押す

(3) 握る

図 8 は実験 2 の Left 方向にオブジェクトの姿勢を傾けて使用することを想定したインタラクションである. 握手や物を握って動かしたりすることができる. 図 8 右のノコギリであれば、木を切る振動を提示することにより臨場感が増加すると考えられる.

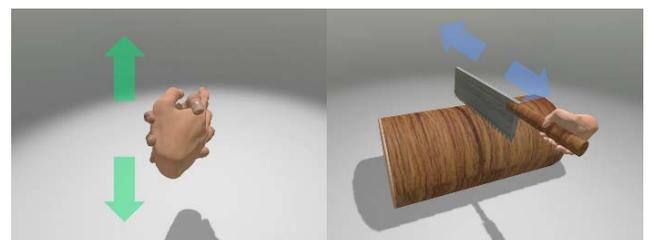


図 8 “握る” を表現するインタラクション
 左: 握手, 右: ノコギリを引く

6. おわりに

本稿では下向き (Down, y 軸マイナス方向) に押すボタンを 3D コンテンツ内の動きに適応させるため, 移動方向およびオブジェクトの姿勢がどのように違和感に結びつくのか検証した. 実験 1 では 6 種類の方向と 3 種類の移動感度を用いて, 出力動作の違和感の調査を行い, 小さな移動感度に際して違和感があったと回答する割合が高かった. 動作方向に対しては移動感度を適切に設定すれば違和感なく動作することが示唆された. 実験 2 では 6 種類の移動方向と 6 種類のオブジェクトの姿勢, 計 36 種類のオブジェクトの出力動作を用いて違和感の調査を行った. オブジェクトの動作を連想できる出力動作が違和感の少ない出力動作であることがわかった.

本実験の結果を用いてボタンの押す方向とは一致しないインタラクシオン, 撫でる, 擦る, 引くなどのインタラクシオンの可能性が示唆された. 一方で, 使用したオブジェクトがバーチャルな手であるがゆえに違和感があったという報告も得られた. 手を連想させないオブジェクトであれば結果が異なる可能性がある. またカメラの角度, 位置, キャプチャカメラの角度も含め実験環境による影響も検討する必要がある. 今後はより詳細な実験環境を構築し再実験するとともに, 多感触ボタンで触覚フィードバックを与えた場合の臨場感の調査を行っていく予定である.

参考文献

- 1) S. Zhai: User performance in relation to 3D input device design, *Journal of ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Volume 32, Issue 4, pp.50-54, 1998
- 2) W. Park, L. Kim, H. Cho and S. Park: Design of haptic interface for brickout game, *IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games (HAVE) 2009*, pp.64 - 68, 2009.
- 3) A. Martini, L. Colizzi, F. Chionna, F. Argese, M. Bellone, P. Cirillo and V. Palmieri: A novel 3D user interface for the immersive design review, *IEEE Symp. on 3D User Interfaces(3DUI) 2015*, pp.175-176, 2015
- 4) N. Sidorakis, G. A. Koulteris and K. Mania: Binocular eye-tracking for the control of a 3D immersive multimedia user interface, *IEEE 1st Workshop on Everyday Virtual Reality (WEVR) 2015*, pp.15-18, 2015
- 5) S. Beckhaus, K. J. Blom and M. Haringer: Intuitive, Hands-free Travel Interfaces for Virtual Environments, *IEEE Virtual Reality(IEEE VR)2005, Workshop on New directions in 3D User Interfaces*, pp.57-60, 2005
- 6) D. Ogawa, V. Yem, T. Hachisu and H. Kajimoto: Multiple texture button by adding haptic vibration and displacement sensing to the physical button, *ACM SIGGRAPH Asia 2015, Workshop on Haptic Media and Contents Design*, Article No. 12, 2015.
- 7) R. J. Jagacinski and D. L. Monk: Fitts' Law in Two Dimensions with Hand and Head Movements, *Journal of Motor Behavior*, Volume 17, No.1, pp.77-95, 1985
- 8) A. Murata and H. Iwase: Extending Fitts' law to a three-dimensional pointing task, *Journal of Human Movement Science*, Volume 20, Issue 6, pp.791-805, 2001
- 9) X. Zeng, A. Hedge and F. Guimbretiere: Fitts' Law in 3D Space with Coordinated Hand Movements, *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Human Factors and Ergonomics Society*

- Annual Meeting 2012, Volume 56, No.1, pp.990-994, 2012
- 10) B. Thomas, K. Grimmer, J. Zucco and S. Milanese: Where Does the Mouse Go? An Investigation into the Placement of a Body-Attached TouchPad Mouse for Wearable Computers, *Journal of Personal and Ubiquitous Computing*, Volume 6, Issue 2, 2002
- 11) G. B. Hanna, S. M. Shimi, and A. Cuschieri: Task performance in endoscopic surgery is influenced by location of the image display, *Journal of Annals of Surgery*, Volume 227, No.4, pp.97-112, 1998
- 12) P. Breedveld, M. Wentink, L. P. S. Stassen and P. A. Wieringa: Eye-hand coordination in laparoscopy, *Journal of Minimally Invasive Therapy and Allied Technologies*, Volume 10, Issue3, pp.155-162, 2001
- 13) M. Botvinick and J. Cohen: Rubber hands 'feel' touch that eyes see, *Journal of Nature*, Volume 391, pp.756, 1998
- 14) M. Tsakiris and P. Haggard: The rubber hand illusion revisited: Visuotactile integration and self-attribution, *Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance*, Volume 31, Issue 1, pp.80-91, 2005
- 15) F. Pavani and M. Zampini: The Role of hand size in the fake-hand illusion paradigm, *Journal of Perception*, Volume 36, pp.1547-1554, 2007
- 16) K. Kilteni, J.-M. Normand, M. V. Sanchez-Vives and M. Slater: Extending Body Space in Immersive Virtual Reality: A Very Long Arm Illusion, *Journal of PLoS ONE*, Volume 7, Issue 7, 2012
- 17) 原正之, 難波江裕之, 山本晃生, 樋口俊郎: 行動主体性がヒトの身体所有感に及ぼす影響, 第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2013), pp.1559-1562, 2013