

教育・訓練システムに適した 仮想空間内におけるオブジェクト操作方法の検討

松宮正太[†] 鈴木雄介[†]

概要：高齢化に伴い産業現場での熟練者の引退が課題となっている。そのため、我々は仮想空間内での技能伝承を目的とした教育・訓練システムを研究開発しているが、複雑な作業の教育には、仮想空間内の 3D オブジェクトの操作が必要であると分かった。近年、3D オブジェクトの様々な操作方法が提案されているが、どのような操作方法が教育・訓練に適しているかは判明していない。本論では、専用の GUI を使用したオブジェクト操作手法を提案し、先行研究で提案された手法との比較実験について述べる。提案手法では、従来の位置/姿勢の 6 DoF 同時操作に加え、専用 GUI を使用することで回転軸を選択し、操作自由度を分離した操作が可能である。専用 GUI は、Fitts の法則に則った Pie Menu を応用した配置であり、ギズモなど比較して、回転軸を選択するための時間が短縮されることが期待できる。

1. はじめに

近年、高齢化を背景に産業現場から熟練技術者が引退し、減少すると予想されている。このような状態が続く、熟練技術者の後継者が決まらないまま、引退してしまった場合、熟練技術者の技術が失われる。

我々はこの問題に対処するために、熟練技術者の技能を保存し、新人技術者に提示する技能伝承システムの開発を進めている。開発中のシステムでは、モーションキャプチャシステムにより熟練技術者の動きを 3D データで保存し、可視化システムで保存したデータをもとに熟練技術者の動きを新人技術者に提示する[1]。また、新人技術者の動きを計測し、熟練技術者の動きに重畳させることで、動きの違いをフィードバックすることもできる。すなわち、仮想空間内で熟練技術者の動きを見ながら、技能のトレーニングをすることが可能なシステムである。しかし、新人技術者に提示することが可能なのは身体の動きのみであった。実際の工場現場を想定した場合、身体の動きのみで完結する作業は少なく、複数の物品を操作して作業をすることが多い。組立作業では、ドライバーやネジなどが使われ、特にネジなどの小さな部品は、両手を使って姿勢を変更し、正しい姿勢で組み付けるといった操作を行うこともある。仮想空間内でそのような作業をトレーニングしようとした場合、現実空間の物品を模した 3D オブジェクトを操作する技術が必要となる。

仮想空間内でのオブジェクト操作技術は、Virtual Reality (VR) 技術の発展に伴い、様々な手法が提案されている。しかし、どの手法が教育・訓練システムに適しているかは判明していない。

このような背景から、我々は Pie Menu を応用した新たなオブジェクト操作手法を検討した。提案手法では、従来の片手を使用した位置/姿勢の 6 Degrees of Freedom (DoF) 同

時操作に加え、専用の Graphical User Interface (GUI) を使用して、回転軸を選択し、両手でオブジェクトを指定した軸中心で回転させることが可能である。本論では、提案手法と先行研究で示された手法の比較実験について述べる。比較実験では、機械の組立作業を想定した抽象的なタスク対象に、提案手法と先行研究で示された手法のユーザビリティを評価する。

2. 先行研究

仮想空間内のオブジェクト操作手法としては以前から様々な手法が提案されている。我々は提案された手法を以下のように分類した。

2.1 Direct 手法

Direct 手法は現実空間の操作を模した手法のため、ユーザにとって自然な操作であることを特徴とする。6 DoF の位置/姿勢を同時に操作可能な手法であり、オブジェクトを掴む・離す・移動するといった操作が可能である。

Mendes ら[2]は両手を使用した Direct 手法を提案し、既存手法と比較した。片手で位置/姿勢を操作し、両手間の距離でスケーリング、すなわち大きさを操作する手法を提案した。他にも片手で位置を操作し、もう片方の手で姿勢 (2 DoF) を操作する Air TRS と呼ばれる手法も提案した。

Air TRS では、姿勢は 2 DoF のみの操作であったが、手首の回転を使用し、姿勢を 3 DoF 操作可能な Spindle + Wheel が提案された[3]。また、Spindle + Wheel は、Air TRS のように左右で操作自由度を分離することはせず、両手で把持した場合には、どちらの手でも 6 DoF の同時操作が可能である。

2.2 Widgets 手法

Widgets 手法は合計 6 DoF の操作自由度を分離し、同時に操作可能な自由度が 6 DoF 以下であることを特徴とする。

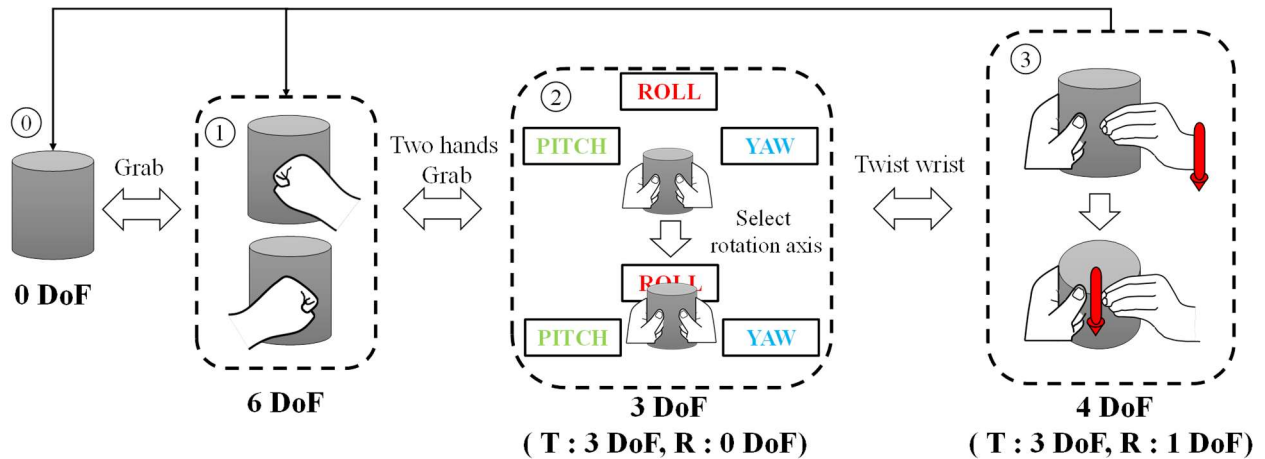


図1 提案手法におけるオブジェクト操作の概要図

そのため、6 DoF の操作を行う場合は、複数回順番に操作する。自由度は専用の GUI を使って分離される。

代表的な GUI は、ギズモである。ギズモは 3D モデリングソフトウェアなどで多く採用される手法である[4]。形状は様々なものが存在するが、一般的なものはオブジェクトのローカル座標系を可視化したような形状である。ギズモでは、表示された軸をクリックやジェスチャなどで選択することで、操作自由度を分離する。位置/姿勢のうちいずれか 1 DoF を選択して操作することができる。

Mendes らは Direct 手法と Widgets 手法を比較し、Widgets 手法は操作精度に優れると主張した[5]。一方、Direct 手法は操作速度に優れるとし、今後の課題として後述する Direct 手法と Widget 手法を組み合わせた手法を検討することをあげた。

2.3 Direct + Widgets 手法

Direct + Widget 手法は、一般的に操作速度に優れる Direct 手法と、操作精度に優れる Widgets 手法を組み合わせた手法である。Direct 手法による操作と Widgets 手法による操作を切り替えながらの操作が特徴である。

Mendes ら[6]は、任意軸回りの回転を特徴とする MAiOR を提案した。MAiOR では、6 DoF の同時操作も可能だが、オブジェクトを操作している手をしっかり握る、ジェスチャを行うなどして操作自由度を制限できる。

Gloumeau ら[7]は、オブジェクトの表面にピンを配置して操作自由度を分離する手法を提案した。MAiOR 同様、6 DoF の同時操作も可能である。また、オブジェクトの表面に配置したピンの数によって、回転操作の自由度を分離できる。

3. 回転軸選択 UI を使用したオブジェクト操作

我々の提案手法は、前述した Direct+Widgets 手法に分類される。片手での操作時は Direct 手法と同様に 6 DoF 同時操作が可能である。両手での操作時は回転軸選択 UI が表示され、回転軸を選択することで、選択した軸回りの 1 DoF

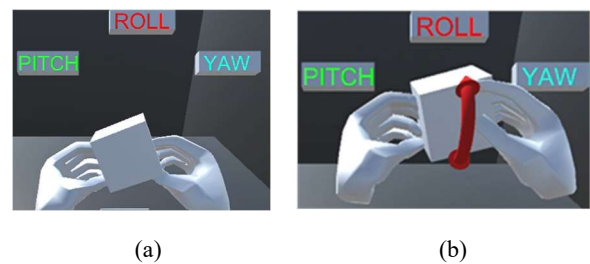


図2 提案手法の回転軸選択 UI (a) : 両手でオブジェクトに触れた時に表示される回転軸操作 UI の外観, (b) : 回転軸選択前にユーザへ回転方向を通知する UI

の回転操作ができる。図1に提案手法の切り替え図を示す。提案手法では、図1に示すように操作自由度の分離を切り替えながらオブジェクトを操作する。以下に提案手法の特徴である回転軸の選択について詳細に述べる。

3.1 回転軸選択 UI

回転軸選択 UI は、片手で 6 DoF の同時操作中に、もう片方の手でオブジェクトに触れると表示される。図2 (a) に回転軸選択 UI の外観を示す。回転軸選択 UI は図2 (a) のように三つの回転軸の選択肢が、オブジェクトから等距離に配置される。これは、Pie Menu[8]を参考にした UI である。Pie Menu は、二次元 UI のユーザビリティ評価の指標に使用される Fitts の法則[9]に則った UI である。Fitts の法則は、ポインタを動かし、特定のオブジェクトを選択する際にかかる時間を示すモデルであり、選択肢までの距離が短く、選択肢の幅（大きさ）が大きいほど、選択するまでの時間が短くなる。Pie Menu は、円形に選択肢を配置することで、選択肢までの距離を短くし、かつ選択肢の大きさも大きくすることができる。そのため、提案手法はギズモなどの Widgets 手法よりも軸を選択する際にかかる時間を短縮可能であると期待できる。

回転軸選択 UI が表示されると、回転操作ができなくなり、3 DoF の位置操作のみが可能になる。ユーザは 3 DoF の位置操作で選択肢までオブジェクトを移動し、選択肢にオブジェクトに触れさせることで回転軸を選択する。しか

表 1 比較対象のオブジェクト操作手法の分類と
同時操作可能な自由度

手法名	分類	操作自由度 (同時)
提案手法	Direct + Widgets	6 / 3 / 4
Both Hands 6 DoF	Direct	6
ギズモ	Widgets	1

し、文字で軸の名前が表示された選択肢ではユーザが回転方向を認識できない可能性がある。よって、提案手法では、軸を選択前にユーザに回転方向を通知する。例えば図 2 (b) は ROLL を選択するときに表示される UI である。このように、ユーザが選択肢にオブジェクトを近づけると、軸の選択前に矢印が表示され、回転方向を認識できる。

3.2 手首のジェスチャによる回転制御

回転軸選択 UI で回転方向を選択後、ユーザは手首をひねることで回転操作を開始する (図 1 ③)。手首をひねっている間だけ、オブジェクトが一定速度で選択軸回りに回転する。このとき操作できるのは、位置 3 DoF、姿勢 1 DoF の合計 4 DoF である。さらに、手首をひねる向きによって、回転の正負を指定することができる。例えば図 1 ③は ROLL 軸を中心として正方向にオブジェクトを回転させたときの例だが、図 1 ③と逆方向に手首をひねることで、オブジェクトを逆回転、すなわち負方向に回転させることができる。また、手首をひねる手は最後にオブジェクトを触れたほうの手とする。例えば、右手で 6 DoF の操作時に左手でオブジェクトに触れて回転操作を開始した場合、左手の手首をひねって回転を制御する。回転を止める際は、いずれかの手をオブジェクトから離し、手を開くことで、回転を停止させることができる。

4. 実験

今回の提案手法について、二段階の実験により評価することを予定している。まず、後述するペグインホールのような抽象的なタスクで、先行研究で示された手法と比較し、基本的なユーザビリティを評価する (一段階目)。その結果を踏まえ、各手法で具体的な組立作業を仮想空間内でトレーニングし、教育効果を比較する。そして、どのオブジェクト操作手法が教育・訓練に適しているか評価する (二段階目)。本論では、一段階目の抽象的なタスクでの実験について述べる。

4.1 比較手法

今回の実験では、提案手法を含め三種のオブジェクト操作手法を比較する。表 1 に三種の比較手法の特徴を示す。提案手法の同時操作可能な自由度が複数あるのは、片手での操作、両手での操作、回転軸を選択したときの操作で、

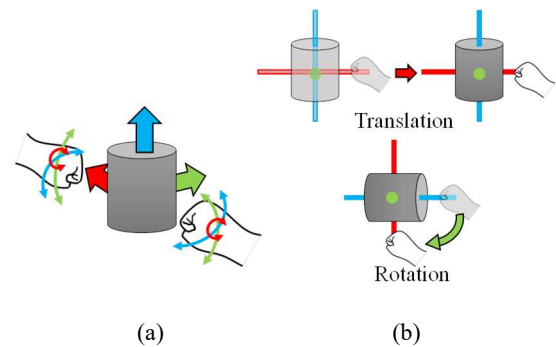


図 3 比較対象の操作概要図

(a) : Spindle + Wheel[3], (b) : ギズモ[5]

同時操作可能な自由度が切り替わるためである。比較対象の分類としては、Direct 手法と Widgets 手法を対象とした。

先行研究で示された、Direct + Widgets 手法は、提案手法に比べて分離できる自由度の種類が多いが、その切り替えが難しく操作の習熟に時間がかかり、教育・訓練の効率が大きく阻害される可能性がある。そのため、訓練を支援するという目的に照らして、今回は比較対象からは除外した。以下に、提案手法と比較する二つの手法について示す。

4.1.1 Both Hands 6 DoF (Direct 手法)

この手法は Spindle + Wheel[3]を参考に筆者らが実装した Direct 手法である。Spindle + Wheel は、両手の中間位置にオブジェクトを配置し、位置 3 DoF を操作する。回転 3 DoF はどちらの手でも操作可能である。また、両手間の距離でスケーリング、すなわち大きさも操作可能であり、合計 7 DoF の操作が可能である。ただし、今回比較対象とする Both Hands 6 DoF には Spindle + Wheel と異なる点がある。図 3 に操作の概要図を示す。図 3 (a) に示すように両手で位置/姿勢の 6 DoF 同時操作ができるのは Spindle + Wheel と同じである。しかし、Spindle + Wheel では専用のコントローラを使用していたが、Both Hands 6 DoF では使用せず、ハンドトラッキングによる推定結果を入力とする。また、スケーリング操作は受け付けず、位置/姿勢の 6 DoF 操作のみが可能である。これは、作業の教育・訓練のシステムに適用した場合、スケーリング操作は現実空間では不可能な、すなわちシステムの目的にとっては不要な操作であるためである。Direct 手法は現実空間と同じ感覚で操作可能であるため、現実空間に近い形で作業のトレーニングができると予想される。そのため、今回比較対象として Both Hands 6 DoF を選定した。

4.1.2 ギズモ (Widgets)

ギズモは一般的な Widgets 手法である。図 3 (b) に一般的なギズモの操作手法を示す。前述したように、ギズモは多くの 3D モデリングソフトウェアに採用されている[5]。また、多くのオブジェクト操作に関する研究で比較対象として挙げられている手法でもある[4][6][7]。操作精度が

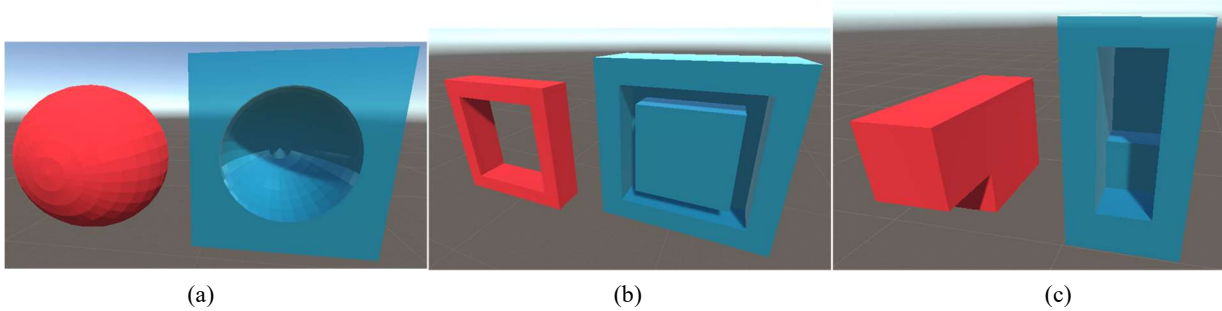


図4 難易度の異なる三種のペグインホール（赤：ペグ，青：ホール）を模したタスク (a)：位置 3 DoF のみの操作で達成可能なタスク，(b)：位置 3 DoF と姿勢 1 DoF の操作で達成可能なタスク，(c)：位置/姿勢の 6 DoF 操作で達成可能なタスク

Direct 手法よりも高いとされているが[4]，教育・訓練に応用したときの効果は検証されていない．よって，今回の比較対象として選定した．

4.2 実験タスク

実験タスクは Mendes ら[2]を参考に、「ペグインホール」に類似したタスクを設定する予定である．図4にタスクのイメージ図を示す．ペグインホールは，ペグ（オブジェクト）をホール（穴）に挿入する作業である．このような作業は，工場内における組み立て作業などで多発するため，タスクとして選定した．例えば，ネジをネジ穴に挿入する，ナットにネジを挿入する，部品同士を組み付けるなどの作業である．

また，Mendes ら[2]と同様に，タスクの難易度をオブジェクトの形状やオブジェクトの初期位置/姿勢を変化させること等で調整する．例えば，図4(a)に示した球のような単純な形状のオブジェクトであれば，姿勢を変更することはせず，3 DoF の位置のみの操作でタスクを達成することが可能である．一方，図4(c)に示したような複雑な形状のオブジェクトであると，タスクを達成するために6 DoF の操作を必要とする．

5. 結論

本論では，XR を応用した教育・訓練に適する新しいオブジェクト操作方法を提案した．提案手法では，オブジェクトの位置/姿勢の6 DoF 同時操作が可能である．また，専用の回転軸選択 UI を使用し，回転軸を指定した操作も可能である．回転軸選択 UI は，Pie Menu を応用した UI であり，同じように操作自由度を選択する UI であるギズモと比較すると，選択時の操作時間に優れると予想している．

また，抽象的な作業を対象に先行研究と提案手法の比較実験について述べた．本論で示した比較実験は基本的なユーザビリティ評価のための実験であり，その結果を踏まえ，組立作業を対象とした教育効果の比較実験も行う予定である．

今後の課題としては，4章で述べた比較実験を行うことである．この比較実験の結果は後日報告する．

また，基本的なユーザビリティの評価実験後は，前述したように教育効果を検証する実験も行う．ユーザビリティ評価では高い評価を得たが，トレーニング後に作業が身につかないというように，教育効果が低くなる可能性も十分に考えられる．そのため，具体的な組立作業を対象に各手法で仮想空間内でのトレーニングを行い，教育効果を比較する予定である．

参考文献

- [1] 松宮正太, 村松敦, 鈴木雄介, “3D ディスプレイによる重量表示機能を用いた技能伝承システムの提案”, インタラクシオン 2023, pp. 162-165, 2023.
- [2] D. Mendes, F. Fonseca, B. Araújo, A. Ferreira and J. Jorge, "Mid-air interactions above stereoscopic interactive tables," 2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), Minneapolis, MN, USA, 2014, pp. 3-10.
- [3] I. Cho and Z. Wartell, "Evaluation of a bimanual simultaneous 7DOF interaction technique in virtual environments," 2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), Arles, France, 2015, pp. 133-136.
- [4] D. Mendes, F.M. Caputo, A. Giachetti, A. Ferreira and J. Jorge, "A Survey on 3D Virtual Object Manipulation: From the Desktop to Immersive Virtual Environments", Computer Graphics Forum, vol. 38, pp. 21-45, 2017.
- [5] D. Mendes, F. Relvas, A. Ferreira, and J. Jorge, "The benefits of DOF separation in mid-air 3D object manipulation", in Proc. of the 22nd ACM Conf. on Virtual Reality Software and Technology, 2016, pp. 261-268.
- [6] D. Mendes, M. Sousa, R. Lorena, A. Ferreira, and J. Jorge, "Using custom transformation axes for mid-air manipulation of 3D virtual objects", in Proc. of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST '17), Article vol. 27, pp. 1-8, 2017.
- [7] P. C. Gloumeau, W. Stuerzlinger and J. Han, "PinNPivot: Object Manipulation Using Pins in Immersive Virtual Environments," in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 27, no. 4, pp. 2488-2494, 2021.
- [8] J. Callahan, D. Hopkins, M. Weiser, and B. Shneiderman, "An empirical comparison of pie vs. linear menus", in Proc. of the SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI '88), New York, NY, USA, 1988, pp. 95-100.
- [9] Fitts, Paul M. "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. 1954." Journal of experimental psychology General, vol.121, no. 3, pp. 262-269, 1992