

仮想道具の実在感創出手法に関する研究

—仮想影と可変慣性モーメントを統合した“Phantom Pole”の開発—

佐藤 大樹^{*1} 片山 智文^{*1} 渡辺 貴文^{*1} 上杉 繁^{*2} 三輪 敬之^{*3}

Method for creating a sense of actuality of virtual tool

:Development of “Phantom Pole” integrating virtual shadow and variable inertia moment tool

Hiroki Sato^{*1}, Tomofumi Katayama^{*1}, Takabumi Watanabe^{*1}, Shigeru Wesugi^{*2} and Yoshiyuki Miwa^{*3}

Abstract – In this paper, we describe our novel interface system that can provide a user a sense of actuality of a virtual tool in my own hand. As a first step, we focus attention on effects of the shadow as a visual representation and the inertia moment of a tool. Therefore, we have developed a “Phantom Pole” interface system, which consists of a variable inertia moment tool moving a plumb within a pipe, and a video projection system casting virtual shadow, the length of which changes in proportion to the location of the plumb in the pipe, onto the tool. Subjective evaluation experiment results show that our “Phantom Pole” system has a possibility that a user can feel as if they were stretching a tool in their own hand.

Keywords: Tangible tool, Virtual tool, Shadow, Inertia moment, Body image

1. はじめに

我々は道具を利用することで身体機能を支援するのみならず、あたかも道具が自身の一部になったかのような身体の拡張感覚を経験している。このような道具の利用における身体の拡張に関する現象は、身体像の拡張と関係すると考えられ、入来らは道具を操作するサルの脳の活動を計測することで、その道具の先端にまで身体像が拡張することを明らかにした^[1]。Maravitaらは、人間における道具と身体の関係について研究し、道具使用により視・触覚間の相互作用に影響が起ることを示した^[2]。また、Pavaniらは、手の影によって視・触覚間の相互作用に影響が起ることを示した^[3]。以上の知見から、道具や自身の影の表現によって、自己の身体像が拡張する効果があると考えられる。

一方で、実体の道具ではなく、仮想空間や映像空間において利用する仮想的な道具に関しては、パソコンのマウスが一般的に広く使用されているものであるが、他にも例えば、ジャイロモーメントを用いた力覚呈示デバイスや^[4]、角運動量の変化に着目したジャイロキューブなどが提案されている^[5]。それらの多くは仮想空間における道具の操作性や作業の効率の向上に着目したものであ

り、道具による身体像の拡張の問題についてはほとんど明らかになっていない。

このような状況において、著者らは先に述べたような道具による身体像の拡張という問題に着目し、自身が操作する実体の道具の影に仮想的な道具の影を整合的に重畳し、映像空間にまで延長する仮想道具インタフェースシステムを開発し、あたかも実体の道具を操作しているかのような感覚の創出や、仮想道具への身体像の拡張の問題について研究を進めてきた^[6]。

本研究では、これまでに考案した、固定した長さの仮想道具を操作する表現手法をさらに発展させるために、帯状の紙を巻いた棒を前方に投げ出すとその紙が伸びる玩具に着目し、手にしたツールを振ることで、仮想影映像が伸びると同時に、ツールの慣性モーメントが変化するインタフェースシステム“Phantom Pole”を開発したので以下に報告する。

2. 設計手法

本研究では、先に著者らが考案した、自身が操作する実体の道具の影に仮想的な道具の影を整合的に重畳する表現手法^[6]に基づき、仮想道具の長さを自由に变化させることが可能なシステムを開発する。

そこで、実体道具に重畳する仮想影映像を道具の操作に伴って伸長させる表現手法と合わせて、視覚以外の表現における棒の長さの知覚について検討するため、Solomonらの研究に着目した^[7]。彼らは、被験者の右手に持ったアルミ棒の長さを、左手でパネルを動かして示すという実験手法を考案した。この結果から、人は視覚情

*1: 早稲田大学大学院 理工学研究科

*2: 早稲田大学 先端科学・健康医療融合研究機構

*3: 早稲田大学 理工学術院

*1: Graduate School of Science and Engineering, Waseda University

*2: Consolidated Research Institute for Advanced Science and Medical Care, Waseda University

*3: Science and Engineering, Waseda University

報がなくとも振ることにより棒の長さを知覚することができ、それが棒の回転軸に対する慣性モーメントに相関するものであるということを示した。

以上の知見を踏まえ、図 1 に示すような仮想映像の表現と棒の慣性モーメントによる感触とを組み合わせる仮想道具の表現手法を提案する。そして次の 3 点に着目して本表現手法を実現するシステムの開発を行う。

- ・ 実体の道具に重畳する仮想映像の長さが変化
- ・ 手にした実体の道具の慣性モーメントが変化
- ・ 慣性モーメントの変化に応じて投影する仮想映像の長さが変化

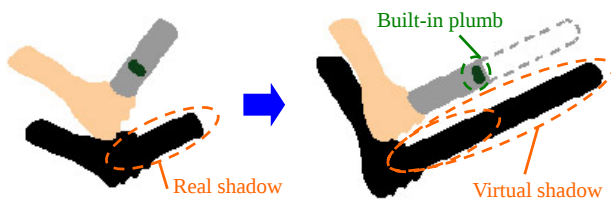


図 1 “Phantom Pole” のイメージ

Fig.1 A conceptual image of “Phantom Pole”

3. 仮想映像による表現

最初に、自身が道具を振るとその仮想映像が伸長する視覚表現の効果について検討することにした。そこで、先に開発した、手に持つ実体の道具の影に仮想的な影を上部からビデオプロジェクタによって投影するインタフェースシステム^[6]を利用して実験を行った。

まずは、映像表現システムについて説明する。本システムでは、水平スクリーンに 660×880[mm]の範囲で映像投影を行っている。図 2 に本システムの光学系を示す。

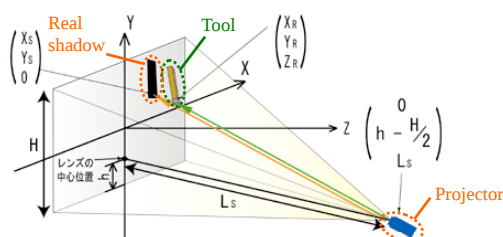


図 2 プロジェクションにおける光学系の座標系

Fig.2 A coordination system of the optical system

3 次元トラッカによって得られた実体の棒の根元の 3 次元位置を X_R, Y_R, Z_R とし、プロジェクタによってスクリーン上にできる棒の影の根元の座標を X_S, Y_S 水平スクリーンの高さ H 、レンズ中心からスクリーン下端までの距離を h 、プロジェクタからのスクリーンまでの最短距離を L_S とするならば、道具の影の投影位置は、式(1),(2)から算出できる。

$$X_S = X_R \times \left(\frac{L_S}{L_S - Z_R} \right) \quad (1)$$

$$Y_S = \frac{L_S + \left(\frac{H}{2} - h \right) \times Z_R}{L_S - Z_R} \times Y_R \quad (2)$$

したがって、実体の棒の 3 次元位置に基づき仮想的な道具を生成することで、手に持つ木製の棒(20×20×190[mm])の影に対してその根元から正確に重畳できる。

そして、道具を前方に振っても、初期位置に換算した仮想映像の長さが 20×600[mm]のままで変化しない映像表現と、初期状態で 20×190[mm]の仮想映像を、振ることによって、その角速度の最大値に比例して伸びる映像表現との比較実験を被験者 12 名(男子学生 20-24 歳)に対して行った。被験者は手に持った道具によって仮想映像を操作することでスクリーン上に置かれたオブジェクトを指示するというタスクを 2 つの表現において、各 5 分間程度体験する。実験終了後、「道具が伸びた感じがするか?」という評価項目を 7 段階(中立 0)で評価した。図 3 にこの結果を示すが、映像が伸びる表現の方がより高く評価され、有意差も確認できる。また、被験者のコメント結果からも、伸びた感覚がすることや、表現が面白いなど好意的に報告されている。一方で、身体が感じる伸びる感覚が足りないとの指摘もされている。

以上から、本システムにおいては、固定の長さの仮想映像の表現に比べ、自身の振る行為に対応して変化する仮想映像の表現の影響により、仮想道具が伸びた感覚が強まる結果が示唆された。

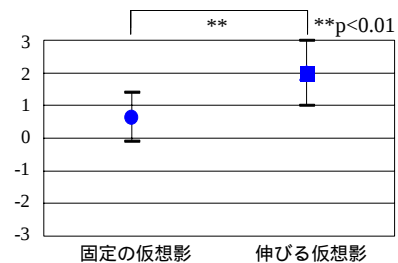


図 3 仮想影による評価結果

Fig.3 Result of the questionnaire on casting virtual shadow

4. 可変慣性モーメントツールによる表現

4.1 可変慣性モーメントツールの開発

錘の変位による慣性モーメントの変化を十分に得るために錘以外の部分は相対的に軽量である必要がある。また、電磁気を利用した 3 次元トラッカを使用するので金属性の材料は利用できない。そこで、外装には比較的軽量かつ適度な強度を持つアクリルパイプ(φ45×350[mm])を用いることにした。パイプに内蔵する錘は比重の高い鉛(11.3[g/cm³])を使用し、パイプ内における錘変位のストロークの確保と、錘がスムーズに動くことを考慮して調節し、形状φ40×33[mm]、重さ 160[g]とした。

次に、錘がスムーズに動くこと、かつその位置計測センサをパイプに内蔵することを考慮し、非接触かつ省スペースの錘位置センシング方法について検討した。まず

超音波センサ(キーエンス UD-020, UD-500)を用いたが、錘の変位が速いため正確に位置検出を行うことができなかった。そこで、透過型の光センサ(発光ダイオード、フォトインタラプタ、測定精度 3.0[deg])と円形のスリットを用いる方法に着目した。このセンサは上下 2 ヶ所において発光・受光するタイプのものである。図 4 に示すように、この光を遮断するためのスリットと組み合わせ、錘とチェーンの片側のみを固定し、錘の位置に比例してセンサ部のスリットが回転するようにした。これにより、スリットの回転方向と回転量から錘の位置を少なくとも 0.5[mm]の精度で検出可能である。

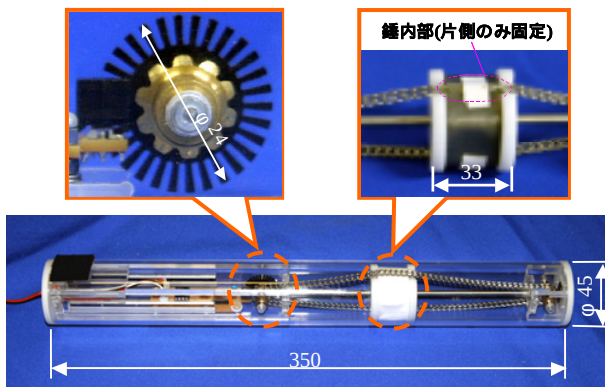


図 4 可変慣性モーメントツール
Fig.4 Variable inertia moment tool

4.2 可変慣性モーメントツールの評価実験

慣性モーメントの違いによる棒の長さの知覚を調査するために、先に述べた Solomon らの手法を参考にして実験を行った^[7]。開発した可変慣性モーメントツールと同一形状のパイプと、パイプ内における錘(160[g])の位置を根元、中央、先端の異なる 3 箇所に固定したパイプ、そして、可変慣性モーメントツールの計 5 種類のパイプをランダムに被験者の右手に持たせ、パイプを見ずに自由に振って、知覚したパイプの長さを左手で操作するパネルで示すというタスクを 5 セット連続で行った。被験者 7 名(成人男性, 21-30 歳)を対象とし、その結果を図 5 に示す。同じ形状のパイプと根元に錘を固定したパイプ間では、錘を入れたほうが長く知覚する傾向にあり、錘の位置を根元、中央、先端の比例的な配置にした結果においては、確かに、比例的に知覚される長さが変化していることが分かる。また、可変するツールとの比較においては、先端に固定した場合と同様の長さにまで変化すると結果が得られた。

以上の結果から、同じ形状のパイプにおいても、錘の位置によってその知覚される長さが変化することが示された。そして、可変慣性モーメントツールにおいては、その知覚される長さは、およそ 400 ~ 600[mm]程度の範囲で変化することが示された。

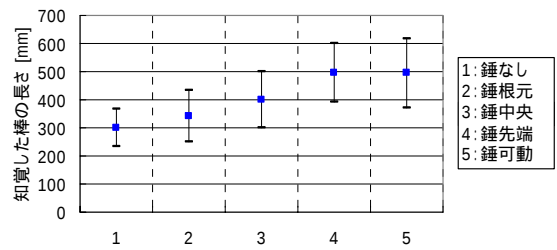


図 5 慣性モーメントの違いと知覚した長さの関係
Fig.5 Perceived length of pipe dependent on variations of inertia moment

5. “Phantom Pole” の開発

5.1 システムの構成

仮想映像による表現、慣性モーメントの変化による表現それぞれにおける仮想道具の伸長感に関する効果を上記に示したが、以上を踏まえ、これら 2 つの表現を組み合わせた“Phantom Pole”を開発した。本システムの構成を図 6 に示す。本システムは、可変慣性モーメントツール、ツールの下に配置した水平スクリーン(840 × 1000[mm])、ツールの位置・姿勢を検出するための 3 次元トラッカ、仮想映像を生成するための PC、その仮想映像を投影するためのプロジェクタにより構成される。さらに、先に述べた可変慣性モーメントツールのセンサ部から錘の変位データを取得することで、パイプ内の錘の位置に比例して仮想映像の長さを変化させることを可能とした。また、本システムにおいて、仮想映像を伸ばす様子を図 7 に示す。

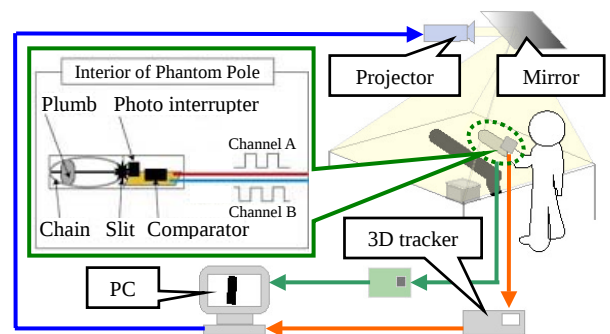


図 6 “Phantom Pole” インタフェースシステムの構成
Fig.6 Schematic diagram of “Phantom Pole” interface system

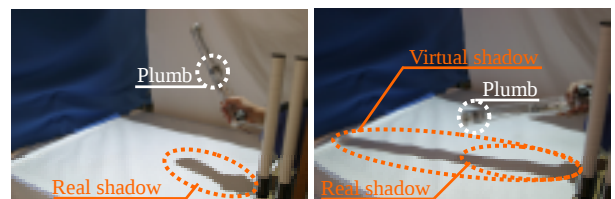


図 7 道具を振ることで仮想影を伸ばす様子
Fig.7 Stretching virtual shadow by swinging a tool

5.2 “Phantom Pole” の評価実験

“Phantom Pole”において、道具の伸長感について検

討するために、錘の無いパイプの角度に応じて伸縮する仮想影映像を重畳した場合と、“Phantom Pole”を利用した場合の比較実験を行った。各表現において、仮想影映像の長さは初期位置に換算した状態で 350[mm]とし、最長では慣性モーメントから知覚される長さ以上である 900[mm]とし、パイプの内部が見えないようにカバーで覆う。手に持った道具を振り、仮想影映像を伸ばすことによりスクリーン上に置かれたオブジェクトを指示するというタスクを被験者 11 名(男子学生, 20-24 歳)に対して行った。実験後の被験者に対して、「持っているグリップを伸ばしている感じがするか?」という評価項目を 5 段階(中立 3)で評価させた。この結果を図 8 に示すが、視覚表現のみの場合に比べて、“Phantom Pole”の方が道具の伸長感が強められるという評価が得られ、有意差も確認できる。このことは、コメント調査から、「錘が動く方が棒を伸ばす実感が強い。」、「自然に伸ばしている感じがする。」と一部で報告されていることとも一致する。一方で、「錘の位置に意識がいく。」という指摘も一部で得られた。

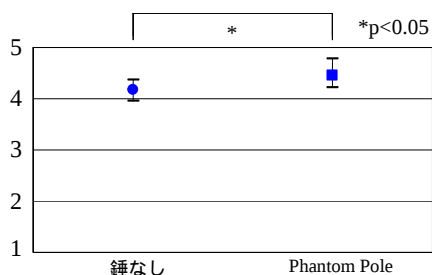


図 8 “Phantom Pole”の評価結果

Fig.8 Result of the questionnaire on using “Phantom Pole”

5.3 “Phantom Pole”の拡張

以上により、“Phantom Pole”によって道具の伸長感により強められる結果が示唆されたが、どこまで映像を伸ばしてもその効果は持続するのかなどの問題について今後さらに検討していきたいと考えている。

そこで、こうした問題へ取り組むことを踏まえ、広範囲に渡って道具の仮想影映像を投影することが可能なシステムへと拡張した。生成した仮想影映像を、直線上に並べた 3 台の各プロジェクタに分配し、1 つの大きな映像として投影する。このとき、投写距離を変えることにより仮想影の最長を 3~9[m]まで調節可能とした。このシステムを用いて、壁や床に投影する表現を試みたので、図 9 に示す。

6. おわりに

本研究では、先に開発した手にした道具の影に仮想的な影映像を重畳するシステムに基づき、手にした道具を振ることによってその仮想影映像の長さが変化する表現、および道具内部の錘の位置を変化させることで慣性モー

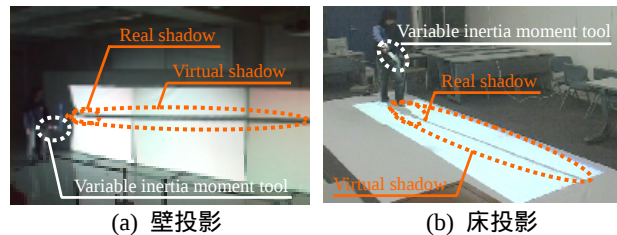


図 9 広範囲に渡る仮想影表現

Fig.9 Wide-ranging expression of virtual shadow

メントを変化させる表現を組み合わせた“Phantom pole”インタフェースシステムを開発した。また、仮想影映像の長さが道具の角度によって変化する表現と比較して、“Phantom pole”において自身が操作している道具があたかも伸びているような感覚が強まる結果が得られた。さらには、より広範囲に仮想影映像を投影することが可能なシステムへの拡張も試みた。今後は、仮想道具の実在感や、身体の高張感などの問題についてさらに検討していきたい。

謝辞

本研究の一部は、岐阜県からの委託研究である WABOT-HOUSE プロジェクトにより行われた。

参考文献

- [1] Iriki, A., Tanaka, M., Iwamura, Y.: Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurons; *Neuroreport*, Vol.7, pp.2325-2330 (1996).
- [2] Maravita, A., Spence, C., Kennett, S., Driver, J.: Tool-use changes multimodal spatial interactions between vision and touch in normal humans; *Cognition*, Vol.83, pp.B25-B34 (2002).
- [3] Pavani, F., Castiello, U.: Binding personal and extrapersonal space through body shadows; *Nature Neuroscience*, Vol.7, pp.14-16 (2004).
- [4] 吉江, 矢野, 岩田: ジャイロモーメントを用いた力覚呈示装置; *TVRSJ*, Vol.7, No.3 (2002).
- [5] 仲田, 中村, 山下, 西原, 福井: 角運動量変化を利用した力覚呈示デバイス; *日本 VR 学会論文誌*, Vol.6, No.2, pp.115-120 (2001).
- [6] 久保, 上杉, 三輪: 実体と仮想の影の統合による身体性の拡張インタフェース; *情報処理学会 第 66 回全国大会講演論文集*(4), pp.21-22 (2004).
- [7] Solomon, H., Y., Turvey, M., T.: Haptically Perceiving the Distances Reachable With Hand-Held Objects; *Experimental Psychology*, Vol.14, No.3, pp.404-427 (1988)