

裸眼立体視ディスプレイのための レイキャストを利用した選択・移動インタフェース

江川 楽^{1,a)} 井尻 敬¹

概要：本研究では、裸眼立体視ディスプレイ環境のためのレイキャストを利用した選択・移動インタフェースを提案する。具体的には、ユーザが把持したスタイラスから連続ようなレイを仮想空間に配置し、このレイを利用して仮想物体の選択・移動を行える手法を提案する。提案法では、実空間と仮想空間がシームレスに繋がれるため直接的な操作が可能になる。提案手法の有用性を評価するため、仮想物体を移動するタスクに関する予備的なユーザスタディを行った。結果、ハンドキャプチャによる手法に比べ、提案手法ではより小さな手の動きで移動操作を遂行できることを確認した。また、提案手法による移動操作時間は、手の回転と奥行方向への移動を考慮した Fitts の法則の拡張モデルで説明できる可能性が示唆された。

1. はじめに

1.1 背景と課題

裸眼立体視ディスプレイとは、異なる方向に異なる画像を出力することで視差のついた画像を提示できるデバイスである。右目・左目用の2枚の画像を提示する3次元テレビや、一定の視野角内に数十枚の異なる画像を提示できる Light Field Display がこれにあたる。特に最近では、高精細な Light Field Display が製品化されはじめ、その普及が期待されている。例えば、本研究で利用する Looking Glass[1] は、水平方向の視野角約 50°内に 45 枚の異なる画像を提示できるデバイスである。

裸眼立体視ディスプレイにおける物体選択・移動操作には、マウスやハンドキャプチャに基づくユーザインタフェース (UI) が広く利用される。一般的に、マウスによる UI では、3次元ディスプレイ内にマウスカーソルを配置し、最も手前の物体上にカーソルを乗せることで物体の選択を行う。しかし、この UI には、奥行方向に重なった物体を選択できない、奥行方向への移動を行えないという欠点がある。ハンドキャプチャによる UI では、ハンドキャプチャデバイス [2] により手の位置を取得することでハンドモデルを仮想空間に提示し、これにより物体の選択・移動を行う。しかし、この UI には、実際の手と仮想的な手が異なる空間に存在するため直接的な操作が行えない、物体移動時に空中で手を大きく動かす必要があるといった問

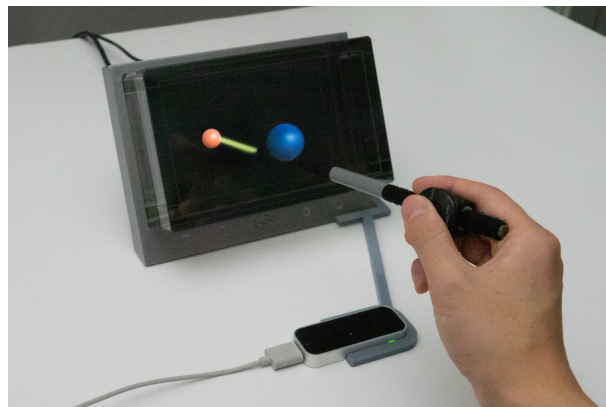


図 1 レイキャストを用いた選択・移動のためのユーザインタフェース。ユーザは、スタイラスから伸びるレイにより仮想空間内の物体の選択・移動操作を行える。

題がある。

Virtual Reality (VR) や Volumetric Display 環境における物体選択・移動のためレイキャストを利用した UI が研究されている。Mine ら [3] は、VR 空間においてコントローラーから直線状に伸ばしたレイを利用して、遠方の物体を選択する手法を提案した。また、Balakrishnan ら [4] は、Volumetric Display のための UI についてモックアップを用いた議論を行い、その中でレイキャストによる選択・移動法を紹介している。しかし、Light Field Display 環境にレイキャストを適用した例は少なく、その実現方法や操作特性について議論の余地がある。

本研究は、Light Field Display を利用した裸眼立体視環境における直接的な物体操作法の実現を目的とし、レイキャストを用いた UI を提案する。具体的には、ユーザが

¹ 芝浦工業大学
Shibaura Institute of Technology
^{a)} raku.sienori@gmail.com

スタイラスを Light Field Display に向けると、スタイラスから仮想空間へ伸びるようなレイが提示され、このレイにより仮想空間内の物体選択や移動を行える UI を提案する (図 1)。提案法は、現実空間と Light Field Display 内の仮想空間をシームレスにつなぐため、直接的な操作が可能になる。また、手首の回転により大きな移動を指定できるため、ハンドキャプチャに比べ小さな手の動きで物体移動を指定できる。

提案手法の有用性を調査するため、3 名の実験参加者の協力のもと予備的なユーザスタディを行った。この実験では、3 次元空間に赤・青 2 つの球を配置し (図 1)、赤い球を掴み、これが青い球に触れるまで移動して離すというタスクを用意した。このタスクを、ハンドキャプチャによる UI と提案法を利用して実施してもらい、タスクにかかった時間と手の移動距離を計測した。結果、提案法のほうがハンドキャプチャに比べて小さい手の動きで移動操作を行えることを確認した。また、提案法による移動操作時間は、手の回転と奥行方向への移動を考慮した Fitts の法則の拡張モデルで表現できることが示唆された。

2. レイキャストを利用した選択・移動 UI

本研究では、裸眼立体視環境における直接的な選択・移動操作のためレイキャストを用いた UI を提案する。提案システムは、Looking Glass [1] を利用した裸眼立体視環境を想定し、ユーザはスタイラスを用いて仮想環境内の物体選択・移動操作を行う。図 2a の通り、スタイラスは約 180mm の棒であり、把持する部分にクリック操作のためのボタンが取り付けられている。このスタイラスを Light Field Display へ向けると、スタイラスから連続する直線 (レイ) が Display 内の仮想空間に提示される。このレイを仮想空間内の物体に交差させクリックすることで物体を選択できる。一度物体を選択するとレイの長さが固定され、スタイラスを上下左右前後に動かすことで選択した物体を 3 次元的に移動できる。

図 2b にシステム全体像を示す。本研究では、8.9 インチの Looking Glass を利用して裸眼立体視環境を実現する。この Looking Glass は、水平方向約 50°の視野角内に 45 枚の異なる画像を提示できるデバイスで、約 80mm の厚みのアクリル内に 3 次元仮想空間が提示される。また、Looking Glass の手前に 2 眼赤外線カメラ (Leap Motion[2]) を配置しこれによりスタイラスを追跡する。この追跡を堅固にするため、スタイラス先端部に再帰性反射マーカが貼り付ける。なお Light Field Display と 2 眼赤外線カメラの相対位置関係を固定するため、3D プリンタで製作した専用マウントを使用する。

実世界のスタイラスから仮想空間へ伸びるレイを生成するため、提案システムは、2 眼赤外線カメラを用いてスタイラス表面に貼付された再帰性反射マーカを追跡する。2

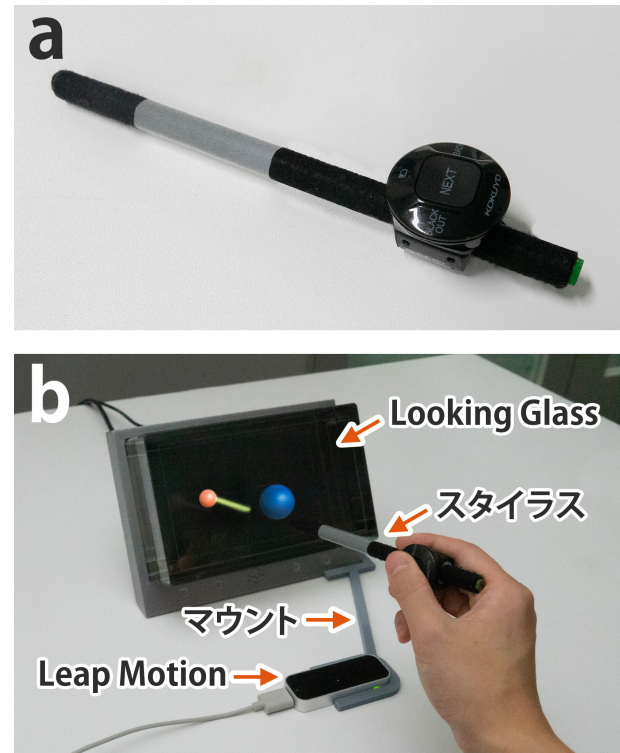


図 2 提案システム。提案システムで用いるスタイラスには、再帰性反射マーカと、クリック操作のためフィンガーマウスが取り付けられている (a)。ユーザは、スタイラスを Looking Glass に向けることで仮想空間の物体選択・移動操作を行う (b)。

眼赤外線カメラからは、40mm の間隔で配置された 2 つのカメラにより 2 枚の画像が撮影される (図 3a)。提案システムは、まず、この画像に 2 値化処理を施しマーカ以外の領域を大まかに除去する。次に Blob 検出を用いて長方形のマーカ領域を抽出し、この領域の長軸に対する始点と終点の 2 次元座標を取得する (図 3b)。得られた 2 次元座標の組からその 3 次元座標を三角測量により推定することで、2 眼赤外線カメラに対するスタイラスの位置・姿勢が取得できる。Looking Glass と 2 眼赤外線カメラの相対位置関係は既知である (マウントにより固定されている) ので、この情報を利用することで Looking Glass 内の座標系におけるスタイラスの位置・姿勢を取得できる (図 3c)。

3. ユーザスタディ

提案システムの操作性を評価するためユーザスタディを行った。Light Field Display における物体操作にはマウスやハンドキャプチャによる UI が主に利用されている。前述の通り、マウスによる UI では奥行方向の操作が行えないため、本研究ではハンドキャプチャによる UI と提案手法とを比較する。また、提案システムでは、レイを利用した物体選択と、長さが固定されたレイによる移動という 2 種類の操作が可能である。ここでは、後者の移動操作のみに着目する。

比較対象であるハンドキャプチャによる UI (以下、ハン

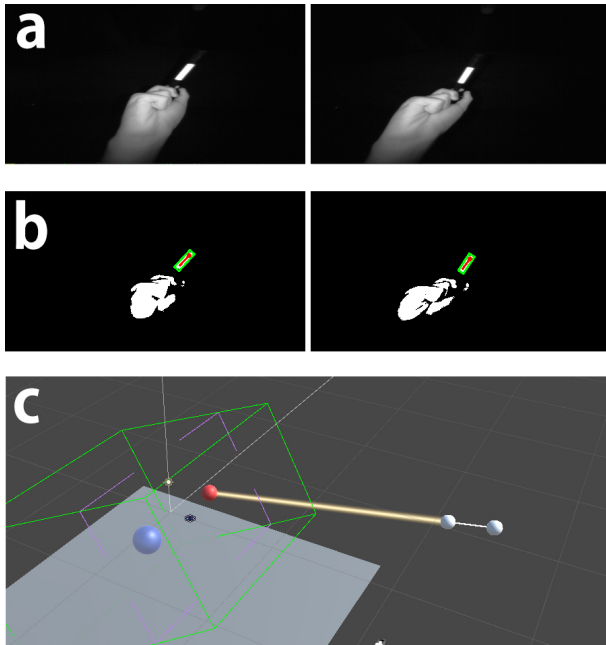


図 3 マーカの追跡手法. 2 眼赤外線カメラにより撮影された 2 枚の画像 (a) に対し, 2 値化処理と Blob 検出を施すことで長方形形状のマーカを検出する (b). (b) における緑色矩形が検出されたマーカを表す. 検出したマーカの 3 次元座標を三角測量により取得することで, 実空間のスタイラスを仮想空間に配置できる (c).

ド UI) について解説する. この手法では, ユーザが Light Field Display の手前に手を置きと仮想空間にハンドモデルが表示され, 実空間で手を動かすことで自由に仮想空間のハンドモデルを移動できる (図 4). ユーザは, ハンドモデルを仮想物体へ近づけ, 人差し指に装着したフィンガーマウスをクリックすることで物体を掴んだ状態にできる. 掴んだ状態で手を動かすことで物体を移動でき, マウスボタンを離すと物体も離される. ハンド UI では手を握るジェスチャが利用されることも多いが, ジェスチャ誤認識の影響を排除するため今回はマウスクリックを利用する.

ハンド UI では, 実空間に対する仮想空間のスケール比によって操作性が大きく変わると予想される. そのため, 実空間に対する仮想空間のスケールを 100% または 50% とする 2 通りの条件を用意した. 以下では, それぞれ, ハンド UI100, ハンド UI50 と呼ぶこととする. 我々の実装では, ハンドモデルを中心とする直径 150mm (ハンド UI100) または直径 75mm (ハンド UI50) の球と対象物体が接触する場合に掴む挙動が発生することとした.

3.1 仮説

評価実験を設計するにあたり以下 3 件の仮説を立てる.

- 仮説 1) 提案手法を用いた物体移動に要する時間は, 手首の回転と移動を考慮した Fitts の法則 [5] の 3 次元拡張モデルに従う.
- 仮説 2) 物体の移動操作の際, ハンド UI に比べ提案手

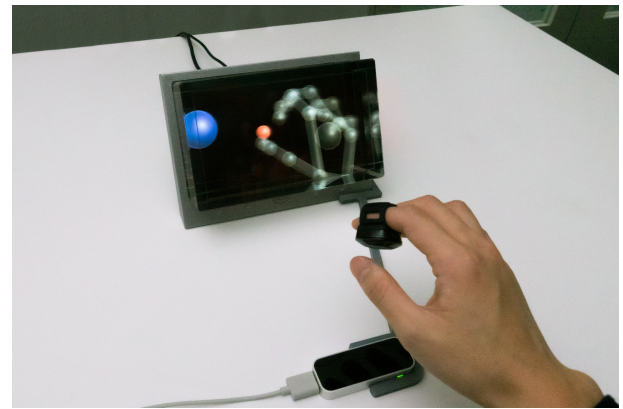


図 4 ハンド UI を利用した操作の様子. ユーザは, ディスプレイ手前に手を置き, 仮想空間内のハンドモデルを利用して物体選択・移動操作を行う.

法では手首の動きが少ない

- 仮説 3) 物体の移動操作の際, ハンド UI に比べ提案手法では顔の動きが少ない

この 3 件の仮説は, それぞれ以下の考察に基づき設定されている. (仮説 1) 提案手法による物体の 3 次元移動は手首の回転と奥行方向の平行移動に分解できると考えられる. したがって, 回転方向の移動角度と奥行方向の移動距離を考慮したモデルでタスクにかかる時間を説明できると予測される. (仮説 2) 提案手法では手首を回転させることで大きな移動を指定できるため, 手を 3 次元的に動かす必要のあるハンド UI よりも, 物体移動操作に必要な手の移動が小さいと推測される. (仮説 3) ハンド UI では手を大きく動かす必要があり, 手がディスプレイを遮蔽する状況が多く発生すると考えられる. この場合ユーザは顔を動かして対象物体や移動目標を確認する必要が生じる. このため, 提案手法のほうが物体移動操作時に発生する顔の動きが小さいと予測される.

本研究では, 上記 3 個の仮説のうち仮説 1 と仮説 2 の検証を試みる. 本研究で行うのは予備的な評価実験であり, データ数を増やしたより大規模な実験の実施を計画している.

3.2 実験手順

大学生 3 名の実験参加者に以下のタスクを実施してもらった. 実験参加者は, 裸眼立体視ディスプレイを設置した机に着席し (図 5), 3 分程度の趣旨説明を受ける. その後, 仮想空間内においてランダムな位置に出現する対象物体を掴み, 移動目標に向かって移動し, 離す操作を行う. 一連の移動操作を 1 試行とし, 100 試行を 1 セッションとする. 対象物体は直径 15mm の赤い球とし, 移動目標は直径 [10, 50]mm の範囲でランダムに大きさの変化する半透明の青い球とした. 対象物体が移動目標に接触している状態で離されればタスクは成功とした. また, 試行中の誤操作などにより対象物体が操作できなくなった場合はキー

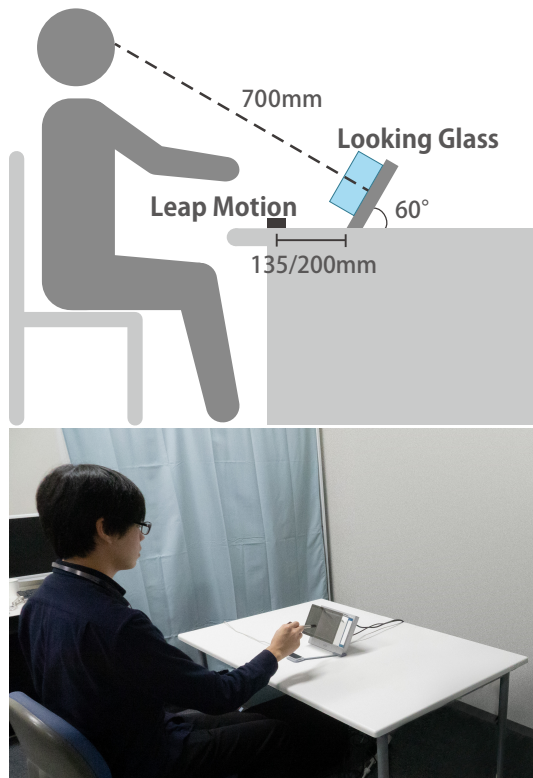


図 5 ユーザスタディにおける実験機器の配置 (上) と実験時の様子 (下). 参加者の視点位置が Looking Glass の正面 700mm となるよう椅子の位置・高さを調整した. Looking Glass に対する Leap Motion の位置はレイキャスト条件時は 135mm, ハンド UI 条件時は 200mm とした.

ボードのスペースキーを押下して試行をスキップするよう参加者に伝えた.

各参加者には, i) 提案法を用いる (以下, レイキャスト条件), ii) ハンド UI50 を用いる, iii) ハンド UI100 を用いる, という 3 条件で, 1 セッションずつタスクを行ってもらった. 各セッションの実施前には操作に慣れるための練習時間を 3 分間設けた. なお, 順序効果を考慮して各条件の実施の順番は参加者ごとに変化した.

4. 結果と考察

前述の各タスクにおいて, 対象物体から移動目標までの距離, 物体を掴んでから移動し離すまでの時間を記録した. 3 名の参加者が各条件において 100 回ずつタスクを実施したが, 後述する装置トラブル・タスクエラー・計測エラーのため, 正しく取得できたデータは, レイキャスト条件で 157 試行, ハンド UI50 条件で 283 試行, ハンド UI100 条件で 288 試行であった.

実験時の装置トラブルにより, 1 人の参加者においてレイキャスト条件を 7 回分取得できないセッションがあった. また, 今回の実験では, 誤操作などにより参加者が操作不能と判断しスキップした試行, または, 対象物体が移動目標に接触していない状態で離された試行, をエラーと判断し集計からは取り除いた. エラーと判断された試行は, レ

イキャスト条件で 12 試行, ハンド UI50 条件で 12 試行, ハンド UI100 条件で 10 試行であった.

今回の実験では, スタイラス追跡およびハンドキャプチャに利用した Leap Motion を用いて手の甲の中心座標の移動距離を計測した. この時, Leap Motion の精度や検出範囲の限界により, 手を正しく検出できない試行が観察された. そこで本研究では, 移動中に手が記録されなかったフレームが存在する試行, 1 フレームあたりの手の最大移動距離がしきい値 ($Q3 + 1.5(Q3 - Q1)$) を超える試行は外れ値とし除外した. ただし, $Q1$ および $Q3$ は手が記録された全試行中の 1 フレーム分の最大移動距離における第一四分位数および第三四分位数である. この計測エラーにより除外されたデータは, レイキャスト条件が 124 試行, ハンド UI50 条件が 5 試行, ハンド UI100 条件が 2 試行であった.

提案手法であるレイキャスト条件では, スタイラス先端のマーカを正確に追跡するため Leap Motion をディスプレイ付近に配置した. このため, Leap Motion の検出範囲から手が外れてしまう追跡エラーが多くみられた. 特に, ある 1 人の参加者は, 想定よりもディスプレイから遠い位置で作業を行ったため, その 81 回の試行について全く手の領域を追跡出来ず解析対象から除外された. この改善は今後の課題である.

4.1 Fitts の法則との関係

得られた各条件のデータに対して次式で表される Fitts の法則の単純な適用を試みた,

$$MT = a + bID \quad (1)$$

$$ID = \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right). \quad (2)$$

ここで, MT (Movement Time) は移動にかかる時間, ID (Index of Difficulty) は移動タスクの困難度指標, A は対象物体と移動目標の距離, W は移動目標の直径を表す. また, a, b は回帰により得られる定数である. このモデルを得られたデータに適用した結果を図 6 に示す. ハンド UI50 条件の決定係数が $R^2 = 0.565$ とある程度高い値を示しているのに対し, レイキャスト条件では $R^2 = 0.326$ と低い値を示した. 提案手法が Fitts の法則によって十分に説明されないのは, 手首の回転により大きな移動を指定できるという提案手法の特性のためだと考えられる. そこで, 提案手法による操作時間をモデル化するため Fitts の法則の拡張を試みる.

Kopper ら [6] は, 遠方のスクリーン上に配置された目標物体をレイキャストを用いてポインティングするタスクについて, 選択時間 MT が手の回転を考慮した次式で説明できることを示した,

$$MT = a + bID_{angle} \quad (3)$$

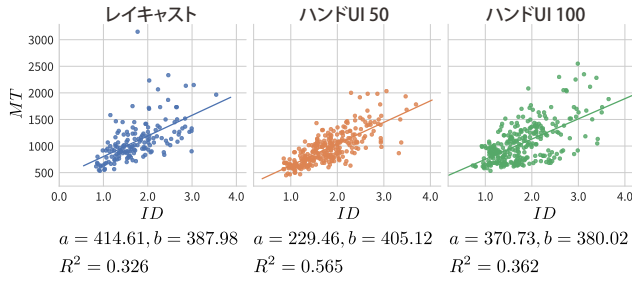


図 6 3 条件により得られたデータに Fitts の法則 (式 1) を適用した結果.

$$ID_{angle} = \log_2 \left(\frac{\alpha}{\omega^k} + 1 \right). \quad (4)$$

ここで, α は開始時のレイの方向と目標物体の方向とのなす角, ω は目標物体の角度幅を表し, k は重み定数である.

提案手法による移動操作は, Kopper らのタスクを 3 次元に拡張したタスクであるといえる. したがって, 手の回転に加え奥行方向への移動を考慮した次式で提案手法を説明できると考えられる,

$$MT = a + b ID_{angle} + c ID_{depth} \quad (5)$$

$$ID_{angle} = \log_2 \left(\frac{\alpha}{\omega} + 1 \right) \quad (6)$$

$$ID_{depth} = \log_2 \left(\frac{D}{W_t + W_g} + 1 \right). \quad (7)$$

ただし, W_t と W_g はそれぞれ対象物体と移動目標の直径, a, b, c は実験結果から得られる定数である. また, α は対象物体と移動目標のなす角, ω は移動目標に対象物体が接触可能となる角度幅, D は対象物体と移動目標の奥行の差である. 図 7 の通り, 手から対象物体までのベクトルを $\mathbf{p}$, 手から移動目標までのベクトル $\mathbf{q}$ とすると, α, ω, D は以下の通り定義される,

$$\alpha = \arccos \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{q}}{|\mathbf{p}| |\mathbf{q}|} \quad (8)$$

$$\omega = 2 \arctan \frac{0.5(W_t + W_g)}{|\mathbf{q}|} \quad (9)$$

$$D = \|\mathbf{q}\| - \|\mathbf{p}\|. \quad (10)$$

一般的な Fitts の法則 (式 1) やその拡張では, ID の定義に移動目標の幅 W が利用される. これは, マウスカーソルなどの大きさを持たない点をポインティングに利用していたためである. 一方本研究では, 対象物体と移動目標がともに大きさ W_t と W_g を持つため, 両方の大きさを考慮した $W_t + W_g$ を利用して ID を定義した (式 7, 9).

得られたレイキャスト条件のデータに対し, 提案したモデル (式 5) を利用して回帰分析を行った結果を図 8 に示す. 決定係数は $R^2 = 0.500$ であり, 今回提案したモデルは, 従来の Fitts モデル (式 1) に比べ, より高い精度で移動時間を説明できることが示唆される結果となった. これは, 手の回転と奥行方向への移動を考慮することで, モデルの説明力が向上したためだと考えられる.

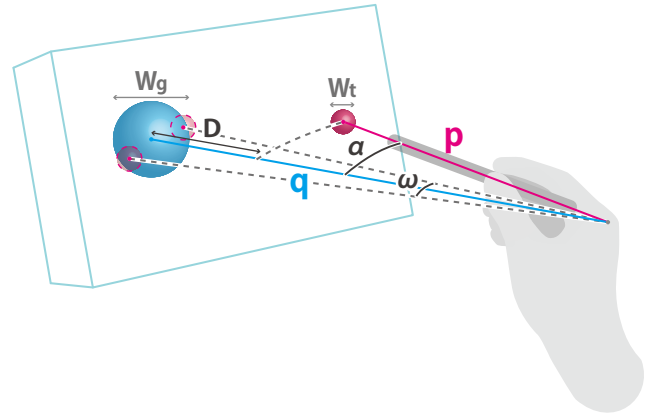


図 7 提案手法による移動操作.

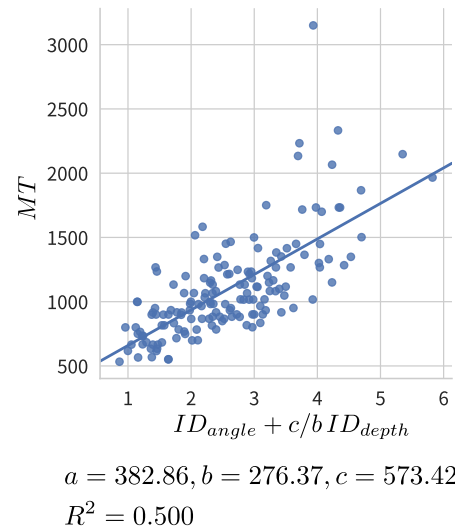


図 8 レイキャスト条件のデータに対し, 式 5 のモデルを用いて回帰分析を行った結果. データを 2 次元グラフにプロットするため, 横軸を $ID_{angle} + c/b ID_{depth}$ としている.

4.2 手の移動距離

次に, タスクにおける手の移動距離と, 対象物体-移動目標間の距離との関係をまとめたグラフを図 9 に示す. 横軸は, 対象物体-移動目標間の距離であり全データを幅 20mm のビンに分けて集計した. このグラフより, ハンド UI50 条件の移動距離は, ハンド UI100 条件の移動距離のほぼ 2 倍になっており, 仮想空間のスケールが正しく反映されていることがわかる. また, 対象物体-移動目標間の距離に関わらず, 手の移動距離が少ないのは順にレイキャスト条件, ハンド UI100 条件, ハンド UI50 条件であることが確認され, 仮説 2 を裏付ける結果となった.

ただし, 前述の通りレイキャスト条件において, 手位置の計測エラーのため多くのデータが集計から除外されたことに注意が必要である. 特に, Display から離れた位置でスタイラスを動かした場合に, 手が Leap Motion の検出範囲外となり記録されないケースが多くみられた. この事実により, 図 9 のデータには偏りが生じている可能性がある. 今後, より広範囲な手位置の計測法を利用して再実験

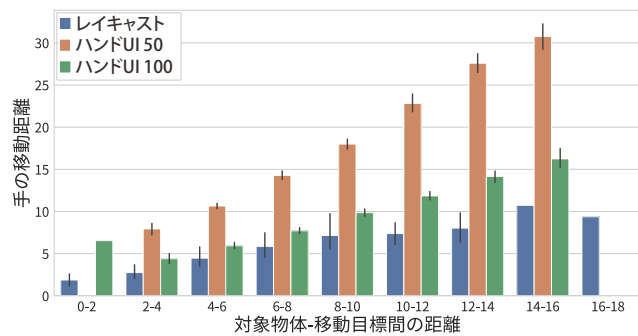


図 9 物体の移動距離と手の移動距離の関係。横軸は、対象物体の初期位置と目標物体位置の距離であり、幅 20mm のビンに分割し全データを集計した。縦軸は、実際の手の移動距離である。

を行い、信頼できるデータを取得したい。

5. まとめと展望

本研究では、Light Field Display を利用した裸眼立体視環境における直接的な選択・移動操作の実現を目的とし、レイキャストを用いた UI を提案した。提案手法の操作性を確認するため、3 件の仮説を立て、予備的なユーザスタディを実施した。結果、提案手法による物体移動時間は Fitts の法則を拡張したモデルで説明できる可能性が示唆された。また、既存のハンドキャプチャによる UI に比べ、提案手法は小さな手の移動で仮想物体の移動操作を行えることも示唆された。

提案システムのひとつの課題は、ユーザの視点（頭の位置）が上下してしまうと実世界のスタイルと仮想空間のレイが不連続になってしまうことである。これは、ユーザの視点位置を追跡しその視点に合わせた映像を Light Field Display に表示することで解決可能である。今回のユーザスタディは、参加者 3 名の予備的なものであり、また、手位置の計測エラーのため多くの試行データを除外する必要があった。今後、計測方法を堅固化した後、より規模の大きなユーザスタディを行うことで、信頼性の高いデータ取得を目指す予定である。また、今回の実験では行えなかった仮説 3 の検証や、NASA-TLX[7] を用いたユーザの精神的作業負荷についても評価を行う予定である。

謝辞 本研究は、日本学術振興会科学研究費新学術領域(15H05924)の支援を受けて行われたものである。

参考文献

- [1] Looking Glass Factory: Looking Glass Factory · The World's First Desktop Holographic Display, Looking Glass Factory (online), available from <https://lookingglassfactory.com/> (accessed 2019-12-13).
- [2] Leap Motion, Inc.: Home - Leap Motion, Leap Motion, Inc. (online), available from <https://www.leapmotion.com/> (accessed 2019-12-13).
- [3] Mine, M. R.: Virtual Environment Interaction Techniques, Technical report, Chapel Hill, NC, USA (1995).

- [4] Balakrishnan, R., Fitzmaurice, G. W. and Kurtenbach, G.: User interfaces for volumetric displays, *Computer*, Vol. 34, No. 3, pp. 37–45 (2001).
- [5] Fitts, P. M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement., *Journal of Experimental Psychology*, Vol. 47, No. 6, pp. 381–391 (1954).
- [6] Kopper, R., Bowman, D. A., Silva, M. G. and McMahan, R. P.: A human motor behavior model for distal pointing tasks, *International journal of human-computer studies*, Vol. 68, No. 10, pp. 603–615 (2010).
- [7] Haga, S. and Mizukami, N.: Japanese version of NASA Task Load Index, *The Japanese journal of ergonomics*, Vol. 32, No. 2, pp. 71–79 (1996).