

# Mixed Reality 環境下における物体透明度が ポインティングタスクに及ぼす影響

桑津 賢士<sup>1</sup> 井尻 敬<sup>1</sup>

## 概要 :

光学的透過型の Head Mounted Display (HMD) を用いた Mixed Reality (MR) 環境では、表示される仮想物体が半透明となることが少なくない。そこで本研究では、Microsoft HoloLens を用いた MR 環境下において、物体透明度がポインティングタスクに及ぼす影響を調査する。具体的には、不透明度と移動距離がランダムに変化する対象物体をポインティングするタスクを繰り返し、対象物体の不透明度と移動距離、および、ポインティング時間を記録する。また、ポインティングタスクは、HoloLens の標準入力である AirTap ジェスチャと、対象に一定時間視線を合わせる Gaze 入力によって行う。実験より得られたデータ群に対し分数関数による回帰を行った。結果、Gaze 入力を行ったデータ群に対して、比較的高い決定係数値による回帰が行え、分数関数による推定式が高い精度でポインティング時間を評価できることが示唆された。

キーワード : Mixed Reality, ポインティングタスク, 物体不透明度

## 1. はじめに

光学的透過型 Head Mounted Display (HMD) を用いた Mixed Reality (MR) 環境下では、半透明表示された仮想物体に対してインタラクションを行うことが多い。この理由の一つはデバイスの特性によるもので、実世界を透過させながら映像を表示するという光学的透過型 HMD の特性上、明るい環境では実世界の背景が仮想物体を透過して観察できてしまうことがある。もう一つの理由はアプリケーションデザインに起因するもので、実世界に情報を重ね合わせるアプリケーションでは、半透明の仮想物体により情報提示が行われることも多い。また、本研究にて着目する HoloLens[1] を用いた MR 環境では、仮想物体との主なインタラクションはポインティングとなる。

1 次元的なポインティングにかかる時間は、対象物体のサイズと対象物体までの距離に関係することが知られている [2], [3], [4]。また、1 次元のみならず、2 次元空間 [5], 3 次元空間におけるポインティング [6] や VR 空間におけるポインティング [7], [8] に関する研究も行われている。しかし、光学的透過型 HMD を用いた MR 環境下におけるポインティングについてはあまり研究がなされていない。特に、対象物体の透明度がポインティングに及ぼす影響につ

いてほとんど知られていない。

そこで本研究では、HoloLens を用いた MR 環境下において、物体不透明度がポインティング時間に与える影響を調査する。具体的には、HoloLens を装着した実験協力者に対象物体を提示し、これをポインティングするタスクを繰り返してもらおう。この時、現在の注視位置から対象物体までの距離と対象物体の不透明度をランダムに変化させる。また、ポインティングは、AirTap と Gaze の二通りを利用して行うものとする（詳細は後述）。この環境で収集したデータを利用して、物体不透明度とポインティング時間との関係を解析する。

本研究では、5 名の実験協力者よりデータを収集し、収集したデータに対し分数関数による回帰分析を行った。結果、AirTap を利用したデータに対する回帰分析では、高い決定係数は確認されず、物体不透明度がポインティング時間へ与える優位な影響は確認されなかった。一方、Gaze を利用したデータに対する回帰分析では比較的高い決定係数が確認され、分数関数による推定式が高い精度でポインティング時間を評価できることが示唆された。

## 2. 関連研究

**Fitts の法則.** ポインティングタスクに関する最も有名なモデルのひとつに Fitts の法則がある [2]。Fitts は、鉄筆

<sup>1</sup> 芝浦工業大学 工学部 情報工学科  
Shibaura Institute of Technology

(スタイラス)の先端で2つのターゲットを交互にタッチし、所要時間と失敗の回数を測定した。この実験の結果から、1次元方向のポインティングタスクにかかる時間  $MT$  は、 $MT = a + b \log_2(\frac{2A}{W})$  で表現できることを示した。ここで、 $a, b$  は実験結果をもとに線形回帰を行うことによって得られる定数であり、 $A$  はターゲットそれぞれの中心間の距離、 $W$  はターゲットの横幅である。式中の  $\log_2(\frac{2A}{W})$  は Index of Difficulty ( $ID$ ) とも表され、ポインティングタスクの困難度を示す指標である。一方、MacKenzie らは、シャノンの公式 [9] をもとに Fitts の法則を拡張し、ポインティング時間  $MT$  を、 $MT = a + b \log_2(\frac{A}{W} + 1)$  で表した [4]。ただし、 $A, W, a, b$  は前述した Fitts の法則における定義と同様であり、困難度  $ID$  は  $\log_2(\frac{A}{W} + 1)$  となる。このモデルでは  $ID$  が負の値をとらないため後続の研究に広く用いられている。

**2次元・3次元空間におけるポインティング。** 2次元空間や3次元空間におけるポインティング時間を推定するため、Fitts の法則を拡張したモデルが研究されている。MacKenzie らは2次元空間において、ターゲットへの距離・ターゲットの大きさとポインティング時間との関係を調査した [5]。結果、MacKenzie らは、ポインティング時間  $MT$  を  $MT = a + b \log_2(\frac{A}{W} + 1)$  と表し、Fitts の法則が2次元空間のポインティングへも拡張できることを示した。ここで  $W$  はスタート位置からターゲット中心へ向かう直線上におけるターゲットの幅である。

Fitts の法則は3次元空間におけるポインティングタスクへも拡張されている。Teather らは、CrystalEyes Stereographics 3D Glasses and Emitters を用いた実験を行い、2次元空間に拡張された Fitts の法則が3次元でのポインティングタスクに適応できないことを示した [10]。岩瀬らは右手人差し指にセンサを装着し、ボード上の円形のターゲットをタッチしそれにかかる時間を計測するという実験を行い、3次元空間におけるポインティングタスクのモデル化を行った [11]。

上記の通り、物体をポインティングするタスクは最も頻繁に利用される重要なインタラクション法の一つであり、様々な環境下において調査がなされている。しかし、光学的透過型 HMD を用いた MR 環境下におけるポインティングや、ターゲットの不透明度とポインティング時間の関係についてはあまり調査がなされていない。

### 3. MR 環境における半透明物体のポインティング

#### 3.1 AirTap と Gaze によるポインティング

本研究の目的は、HoloLens を用いた MR 環境におけるポインティングタスクにかかる時間の調査である。本研究では、AirTap と Gaze によるポインティングを利用する。

AirTap とは、対象に視線を合わせたもとの、人差し指

を立てまっすぐ下に倒す AirTap ジェスチャを行うことで、対象をポインティングする手法である (図 1a)。これは HoloLens の標準的な入力法として利用されているものである。Gaze とは、視線を一定時間合わせ続けることで対象を選択する入力方式である。今回の実験では、0.5 秒間視線を合わせ続けた物体を選択されたとみなすこととした。この Gaze は、HoloLens の標準機能ではないが、HoloLens 初心者は AirTap を上手く行えない可能性があるため、この入力方式も利用する。

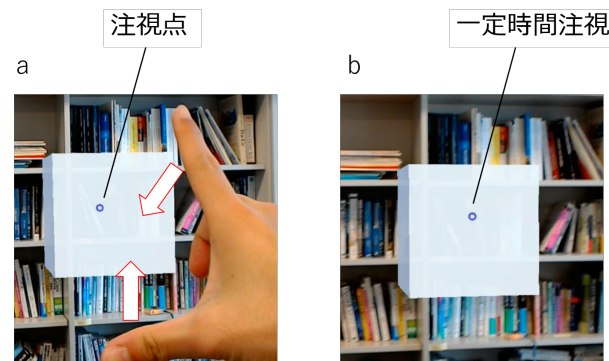


図 1 AirTap (a) と Gaze (b) による対象物体のポインティング。

#### 3.2 実験環境とポインティングタスク

本研究にて利用した実験環境を図 2 に示す。実験協力者は白い壁の前 3m の位置に立ち、HoloLens を装着してポインティングタスクを行う。MR 環境では、半透明物体の見え方は実験空間 (背景) の明るさによる影響を受ける。そのため、背景の明るさを図 2B の位置にて照度計により測定し、極端に明るいまたは暗い環境下での実験は避けることとした。

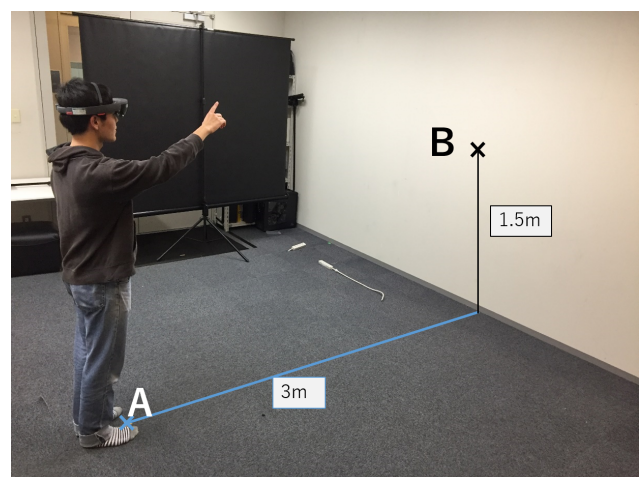


図 2 実験環境。白い壁を背景とし、壁から 3m の位置でポインティングを行う。

実験協力者は、HoloLens の操作方法及び実験内容の説明を5分間受け、AirTap の練習を15回、Gaze の練習を15回行う。その後、AirTap によるポインティングタスクを51回、続けてGaze によるポインティングタスクを51回行う。各タスクでは、不透明度と表示位置の変化する長方形形状の選択対象（バーと呼ぶ）をポインティングする。バーは図3の通り縦長の長方形形状を持っており、その幅は1度、高さは17度である。ただし、本実験においては物体のサイズを視野内の角度で表現することとする。また、垂直方向17度は、著者が独自に計測して得られたHoloLensのおおよその最大表示画面角である。バーは、HoloLens が認識する3次元空間において、HoloLens からの距離3mの位置に生成する。

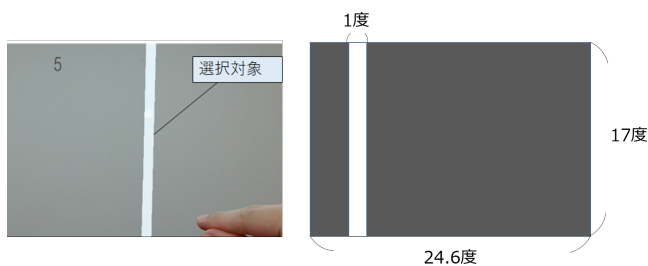


図3 選択対象（バー）。実験中に表示されたイメージ（左）とバーのサイズ（右）。

あるタスクにおいて実験協力者がバーをポインティングすると、そのバーは削除され、すぐに新しいバーが表示され次のタスクが開始される。新しいバーは、前のバーから水平方向に視野角  $d$  度離れた位置に表示される。本研究では  $d$  を、 $[2, 12.3]$  または  $[-12.3, -2]$  を値域に持つ一様乱数からサンプリングした。HoloLens の水平方向のおおよその最大表示角は約24.6度であるため、この範囲でバーを移動させれば、視野角外にはみ出すことなく新しいバーを生成できる。ただし、この最大表示画面角は著者が独自に計測を行ったものである。

また、新しいバーの不透明度  $x$  は、0を平均とする正規分布をもつ乱数よりサンプリングし決定する。ただしこの時、負の不透明度が発生しないようサンプリングを行う。不透明度  $x$  は、0ならば完全に透明、1ならば完全に不透明となる。事前実験により、物体不透明度がある程度大きければ、ポインティング時間は対象が不透明の場合とほぼ変わらないことが分かっていたため、本研究では、透明に近いバーがよく表示されるような設定とした。この不透明度の値は、実装に用いたUnityにおいて、物体マテリアルの不透明度として設定する。HoloLens には、ディスプレイの明るさを調整する機能が搭載されており、これを変化させると表示物体の透明度が変化する。そのため、本研究では、明るさを最大に固定し実験を行った。

## 4. 結果と考察

本研究では、工学部の学生5名による協力のもと、HoloLens を用いたMR 環境下におけるポインティングタスクの時間計測を行った。実験協力者全員がHoloLens の利用は初めてであった。実験時における実験環境の照度は、実験協力者位置（図2A）において859lux~1038lux、背景となる壁（図2B）において743lux~782luxであった。

取得データは、(移動距離  $d$ , 不透明度  $x$ , 時間  $y$ ) の3変数からなるデータの集合となる。実験協力者ごとに、AirTap・Gazeそれぞれについて、51回分のポインティングタスクを行う。ただし、最初のタスクに関しては、前のバーとの移動距離を算出することができないため、初めの1回を取り除き、それぞれ、50回分のデータを利用する。

不透明度とポインティング時間の関係性を調べるため、取得データを、距離  $d$  を用いて4つのビンに分割する。このとき、距離  $d$  の値域  $[2, 12.3]$  を4等分した2.575を各ビンの幅とする。各ビンに振り分けられたAirTapによるデータとGazeによるデータを距離  $d$  の小さい順に、AirTap1, AirTap2, AirTap3, AirTap4, Gaze1, Gaze2, Gaze3, Gaze4と呼ぶこととする。

各データの散布図を図4に示し、各データにおけるポインティング時間の平均と分散を表1に示す。この散布図より、AirTap, Gaze はともに、不透明度がある程度より高い場合にポインティング時間は定数値へ収束し、不透明度が低い場合ポインティング時間は大きな値をとる傾向がみられる。この傾向を考慮し、取得データに対して分数関数による回帰を行った。得られた分数関数の係数と決定係数  $R^2$  を表2に示す。

AirTap によるポインティングタスクの結果（図4上）では、バーの不透明度が同じでもポインティング時間にばらつきがあった。AirTap はハンドジェスチャを要するため、HoloLens に不慣れである場合はジェスチャ入力に失敗することがある。これが、ポインティング時間のばらつきの原因と考えられる。また、AirTap では分数関数によるフィッティング時の決定係数  $R^2$  の値も小さく、不透明度がポインティング時間に与える優位な影響は確認できなかった。

次に、Gaze によるポインティングタスクの結果に対して分数関数で回帰したものを図4（下）と表2に示す。AirTap に比べ、Gaze では全体的にポインティング時間のばらつきが小さく、分数関数による回帰の決定係数  $R^2$  の値も大きくなった。特に、Gaze1, Gaze2, Gaze4 では、決定係数  $R^2 \geq 0.635$  であり、分数関数を用いた推定式はポインティング時間を高い精度で説明できることが示唆された。

各ビンにおけるポインティング時間の平均と分散（表2）より、バーの移動距離  $d$  にかかわらず、ポインティングの平均時間は変化していないことがわかる。これは、Fitts の法則に反する結果であるが、行ったタスクにおいてバー

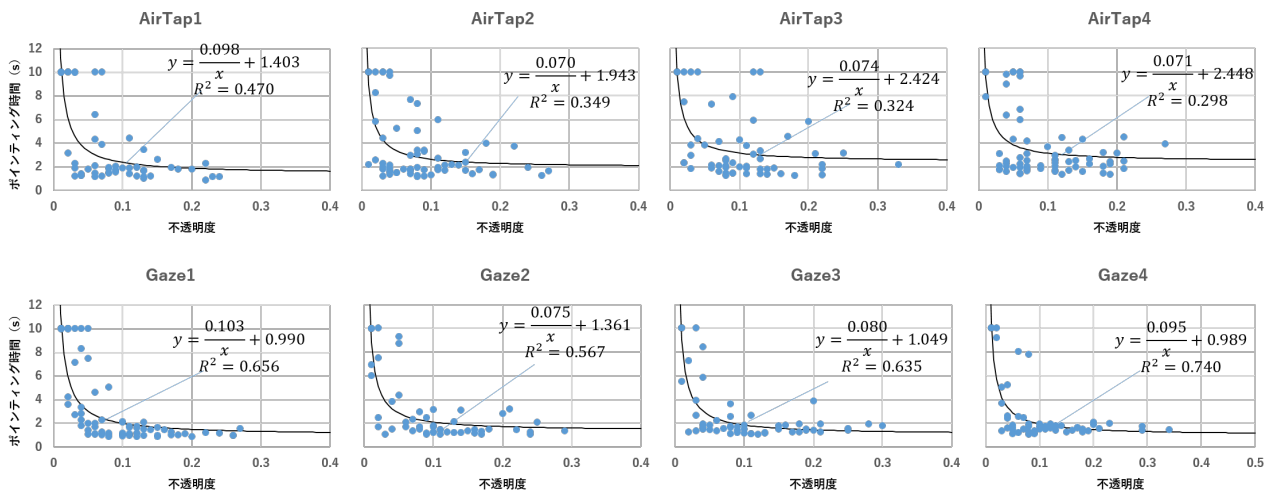


図 4 実験により得られたデータの散布図. 上の行が AirTap によるポインティング, 下の行が Gaze によるポインティングの結果. 各散布図について, 横軸が不透明度であり, 縦軸がポインティング時間である.

表 1 各ビンのポインティング時間の平均と分散.

集合	集合の値域	平均時間 (s)	時間の分散
AirTap1	[2, 4.575]	3.489	10.82
AirTap2	[4.575, 7.15]	3.603	8.836
AirTap3	[7.15, 9.725]	3.854	8.702
AirTap4	[9.725, 12.3]	3.792	8.109
Gaze1	[2, 4.575]	3.458	12.12
Gaze2	[4.575, 7.15]	3.059	7.981
Gaze3	[7.15, 9.725]	2.849	7.320
Gaze4	[9.725, 12.3]	2.950	8.159

表 2 分数関数による回帰.

集合	近似式	決定係数 $R^2$
AirTap1	$y = \frac{0.098}{x} + 1.403$	$R^2 = 0.470$
AirTap2	$y = \frac{0.070}{x} + 1.943$	$R^2 = 0.349$
AirTap3	$y = \frac{0.074}{x} + 2.424$	$R^2 = 0.324$
AirTap4	$y = \frac{0.071}{x} + 2.448$	$R^2 = 0.298$
Gaze1	$y = \frac{0.103}{x} + 0.990$	$R^2 = 0.656$
Gaze2	$y = \frac{0.075}{x} + 1.361$	$R^2 = 0.567$
Gaze3	$y = \frac{0.080}{x} + 1.049$	$R^2 = 0.635$
Gaze4	$y = \frac{0.095}{x} + 0.989$	$R^2 = 0.740$

への距離が十分小さかったことが原因と考えられる. つまり, 本研究ではバーの移動距離の最大値を, HoloLens の最大視野角からはみ出さない約 12 度としたが, この範囲内の移動距離ではポインティング時間に明瞭な差が生じないのだと考えられる.

また, 表 2 よりバーの移動距離が小さい場合 (AirTap1 と Gaze1) に, ポインティング時間の分散が多少大きくなる傾向がみられた. どちらのビンも距離  $d$  の値域は [2, 4.575] である. バーへの移動距離が小さすぎる場合に, 視線をバー上で止めにくくなり, 視線がバーを通り過ぎてしまっている可能性が考えられる. ただし, 視線の軌跡のより詳細な分析は将来課題である.

## 5. まとめ

本研究では, HoloLens を用いた MR 環境下において, 物体透明度がポインティングタスクに及ぼす影響の調査を行った. 特に, AirTap と Gaze という二種類のポインティング手法を用いて, 半透明のバーを選択するタスクを実験協力者に行ってもらい, ポインティングにかかる時間を測定した. 収集したデータを確認したところ, 不透明度がある程度より高い場合はポインティング時間が一定となり,

不透明度が低い場合はポインティング時間が長くなることが確認された. さらに, 得られたデータに対して分数関数による回帰分析を行った. AirTap によるポインティングでは, 回帰分析の決定係数は低く, 物体不透明度がポインティング時間に与える優位な影響を確認できなかった. 一方で, Gaze によるポインティングでは, 回帰分析の決定係数は比較的高く, 分数関数による推定式がポインティング時間をよく説明できることが示唆された.

**将来課題.** 今回の実験では, ターゲット (仮想物体) と背景 (実世界) のコントラストを詳細には計測していない. ターゲットと背景の詳細なコントラストや色を計測し, より詳細なデータを取得することが今後の課題である. また, 今回は白い壁を背景として実験を行ったが, 背景の煩雑さはポインティングタスクに影響を及ぼすと思われる. 今後, 背景物体の有無や背景テクスチャの変化によって, ポインティング時間が影響を受けるかを調査したい. さらに, ターゲットの奥行きや模様とポインティング時間との関係の調査も将来課題の一つである.



## 参考文献

- [1] Microsoft HoloLens, <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens>, 2018.
- [2] Paul M. Fitts. 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.
- [3] Paul M. Fitts, James R. Peterson. Information capacity of discrete motor responses. *Journal of experimental psychology* Vol.67, No.2, pp.103-112, 1964.
- [4] I. Scott MacKenzie. Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human Computer Interaction*, Vol.7, No.1, pp.91-139, 1992.
- [5] I. Scott MacKenzie, William Buxton. Extending Fitts' law to two-dimensional tasks. In *Proceedings of SIGCHI*, pp.219-226,1992.
- [6] Regis Kopper, Doug A. Bowman, Mara G. Silva, Ryan P. McMahan. A human motor behavior model for distal pointing tasks. *International journal of human-computer studies* Vol 68, No10, pp.603-615, 2010.
- [7] Andrea H. Mason, Masuma A. Walji, Elaine J. Lee and Christine L. MacKenzie. Reaching movements to augmented and graphic objects in virtual environments. In *Proceedings of SIGCHI*, pp.426-433, 2001.
- [8] D.E. Holmes, D.K. Charles, P.J. Morrow, S.McClean, S.M.McDonough. Using Fitt's Law to Model Arm Motion Tracked in 3D by a Leap Motion Controller for Virtual Reality Upper Arm Stroke Rehabilitation. In *Proceedings of CBMS*, pp.335-336, 2016.
- [9] C.E. Shannon. A mathematical theory of communication. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev*, Vol.5, No.1, pp.3-55, 2001.
- [10] Robert J. Teather., Wolfgang Stuerzlinger. Pointing at 3D targets in a stereo head-tracked virtual environment. In *Proceedings of 3DUI*, pp.87-94, 2011.
- [11] 岩瀬弘和, 村田厚生. 3次元空間での移動を要するポインティング作業への Fitts の法則の拡張モデル. 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-A, No.11, pp. 1336-1346, 2002.