



胸部装着型 XR デバイスにおける腹部平面上のタッチ操作と 仮想空間との座標対応に関する考察

A Study on Coordinate Correspondence between Touch Operation
on the Abdominal Plane and Virtual Space in a Chest-Mounted XR Device

山内耀斗, 岩井大輔, 佐藤宏介
Akito YAMAUCHI, Daisuke IWAI, and Kosuke SATO

大阪大学 大学院基礎工学研究科 (〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3, akito.yamauchi@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp)

概要: 本研究では, 歩行や巡回を伴う作業現場での XR 業務支援を想定した, 仮想空間の没入と離脱がヘッドバンドレスで容易な胸部装着型の XR デバイスの構成法を提案する. 実工具の把持を想定しているため仮想空間を操作するハンドコントローラは利用できない. そのため, ユーザの腹部付近にタッチパッドを垂直に備える. 骨格構造に基づいた直感的なタッチ操作を提供するため, 垂直面上のタッチ操作とカーソル移動の座標対応に関する知見を示す.

キーワード: ウェアラブル, 業務支援, タッチパッド

1. はじめに

近年では, 拡張現実感 (AR: Augmented Reality) や仮想現実感 (VR: Virtual Reality), 複合現実感 (MR: Mixed Reality) 等を総称した XR 技術が産業分野の業務支援に活用されている. 産業分野における XR 業務支援として, 倉庫内の物品のピッキング作業や工場の部品組み立て作業のような, 歩行や巡回を伴う作業の支援では, 主にヘッドマウントディスプレイ (HMD) が用いられる[1][2]. HMD は, 頭部に装着して使用するため, 様々な作業環境に持ち込むことができ, 作業者は手でデバイス本体を把持する必要がなく, 自由に手を使った作業に取り組むことができる. 一方で, 業務中は HMD を装着し続けることが想定されるが, HMD の長時間使用は疲労や視覚的な不快感を引き起こし得る[3][4][5]. さらに, 長時間使用による負担を予防するために, 度々 HMD を着脱することに時間と労力を要して, 作業効率が低下することが懸念される. そこで, 本研究では, 使用中に把持する必要がなく長時間使用を容易に中断できる胸部装着型ディスプレイ (CMD: Chest-Mounted Display) を提案する. さらに, CMD はユーザの腹部に触覚インタフェースを備え, 仮想空間との双方向の触覚インタラクションを提供する. 本稿では, CMD の全体像を説明した後, 触覚インタフェースのタッチ入力システムの配置と操作方法の特徴に言及し, 実験を通じてタッチ操作とカーソル移動との適切な座標対応を特定する.

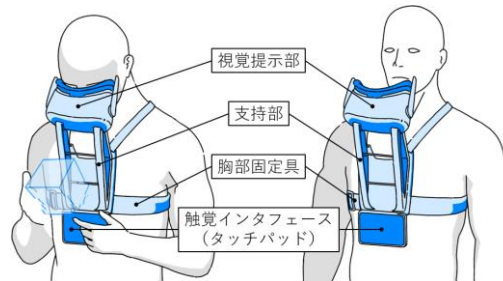


図 1: CMD の全体の概念図と構成要素

2. 提案デバイス

CMD の利用イメージを図 1 に示す. CMD は, 視覚提示部, 支持部, 胸部固定具, および触覚インタフェースで構成される. これら以外に外部機器を必要としないスタンドアロンの装着デバイスである.

ユーザが胸部固定具により CMD を装着すると, 視覚提示部は胸部固定具によって支持され, ユーザの眼前に配置されるため, ユーザはデバイスを把持する必要がない. そして, ユーザが俯いて視覚提示部を覗き込むと XR の映像が視聴でき, 頭を上げて視覚提示部から目を離すことで自在に視聴を中断できる. つまり, 中断時や再開時に, デバイスを把持したりヘッドバンドを着脱する手間が不要である. そして, ユーザは触覚インタフェースを用いて, タ

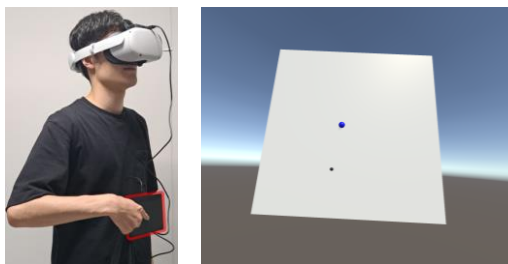


図 2: タッチパッド (赤枠) を操作する参加者と参加者が観察している仮想空間

タッチ操作により仮想オブジェクトに働きかけ、振動フィードバックを受け取ることで、双方向の触覚インタラクションを行う。入力方法としてタッチ操作を用いることで、ハンドジェスチャより精密な操作が実現し、把持型コントローラのような付属デバイスを着脱する手間を必要とせず、グローブ型コントローラと異なり他の手作業を阻害しない。

一方で、触覚インタフェースは、ユーザの腹部付近に搭載されているため、配置と操作方法において通常のタッチパッド操作とは以下のような相違がある

- ・ 操作手の遠位方向 (指先が向く方向) が下方または側方を向く
- ・ 操作面がユーザの前方を向く
- ・ 操作面が垂直である

一般に、タブレット端末やコンピュータマウスを用いてポインティングを行う場合には、ユーザの操作手は前方や上方を向く。また、操作面を上から観察するため、操作面は上方やユーザの後方側を向く。そして、操作面は水平である事が多い。このように、触覚インタフェースは一般的な操作体験と異なる操作を要求するため、ユーザが操作に混乱することが予想される。そこで、腹部装着のタッチインタフェースの入力における直感的な操作方法を模索し、ユーザが操作の手掛かりにしている要素を解明することで、快適なユーザ体験を提供する特有の操作方法を採用する。

3. 触覚インタフェースのタッチ操作と仮想空間との座標対応の調査

コンピュータマウスを用いて画面上のカーソルを操作する場合に、ユーザは次の二つに似た操作方法を比較的容易に習得する[6]。一つ目は、一般的なマウス操作と似た腕の動きでカーソルを移動できる座標の対応関係を持ち、腕を伸ばすことでカーソルがディスプレイ上方に移動するような場合である。二つ目は、マウスの移動方向が空間的にカーソルの移動方向と類似する座標の対応関係を持ち、マウスを身体の前方または上方に操作することでカーソルがディスプレイ上方に移動するような状況である。しかし、CMD の触覚インタフェースにおいては、操作手は下方または側方を向いており、腕を伸ばすことで操作手もその方向に移動するため、この二つの状況は相反

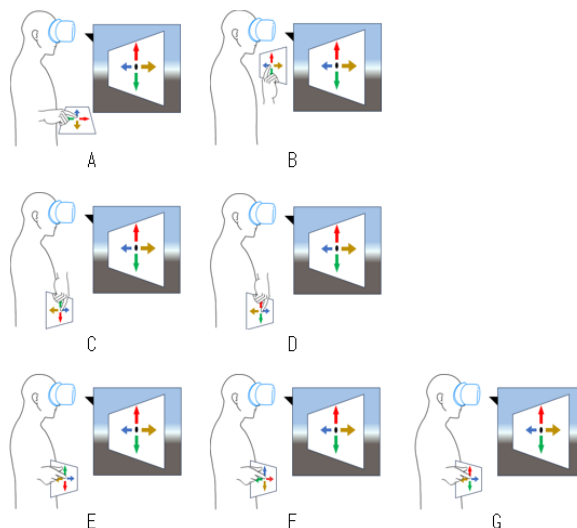


図 3: 各実験条件におけるタッチパッドの配置と、タッチ操作とカーソル移動の座標対応

する。そこで、どちらの状況を満たす操作方法で直感的な操作が実現するか比較する。

3.1 実験目的

触覚インタフェース上のタッチ操作と仮想空間内のカーソルとの座標対応が異なる複数の条件下でタスクを繰り返し、タスク達成時間を評価することで、直感的な座標対応とその要因を特定する。

3.2 装置

触覚インタフェースとして有線接続のタッチパッド (MIYOSHI 社) を三脚雲台上に固定し、実験条件に応じた指定の位置と方向に配置し、ソフトウェアで座標対応を切り換える。デバイスの標準配置におけるタッチパッドの操作面の入力範囲は 135 mm × 90 mm で上端から 10 mm の範囲は入力を受け付けられないため、この領域にマスキングテープを張り、使用者が触感で入力範囲を判別できるようにする。また、Meta Quest 2 (Meta 社) により仮想空間の映像を提示する。仮想空間には灰色の平面と、平面上を移動する黒色の球形のカーソルと青色の球形のターゲットを配置する。

3.3 参加者

タッチパッドと VR デバイスの使用経験がある右利きの男性 6 人が実験に参加し、全員が VR 酔い等の不快感に言及することなく実験を完了した。

3.4 手順

実験の様子を図 2 に示す。各条件で、被験者は右手でタッチパッドを操作して仮想空間中のカーソルが追従して移動することを確認してから、トラッキングタスクに取り組む。トラッキングタスクでは、仮想空間中のカーソルがターゲットに到達して 300 ms 間接触し続けると、ターゲットはデータセットに従って新しい位置に瞬間移動する。ターゲットが 40 回移動するとトラッキングタスクが終了する。ターゲットの移動距離が一定になるように座標のデータセットを生成し、その中から移動方向が比較的ばらけ

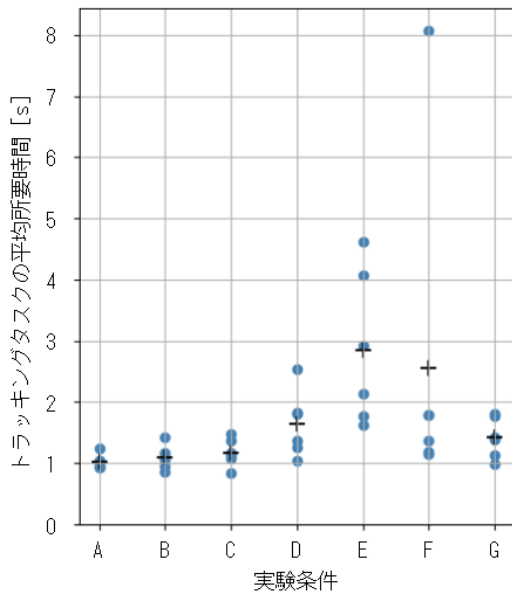


図 4: 各実験条件における参加者のトラッキングタスクの平均所要時間とその平均値

ているものを採用する。さらに、全ての条件および被験者のタスクで異なるデータセットを使用する。

3.5 実験条件

実験条件の模式図を図 3 に示す。標準的なタッチパッドの配置と CMD の触覚インタフェースの特徴に準じたタッチパッドの配置について、直感的に習得しやすいと考えられるタッチ操作とカーソル移動の座標対応を条件とする。直感的に習得しやすい座標対応として、一般的なマウス操作と似た腕の動きでカーソルを移動できる場合、または、マウスの移動方向が空間的にカーソルの移動方向と類似している場合を参考に提案する。

まず、一般的なマウスやタッチパッドのように、参加者の手元に水平に設置されたタッチパッドを用いる (A)。これは最も経験的に操作しやすい構成であり、タッチパッドを最も直感的に操作した際のパフォーマンスとして評価する。また、垂直のタッチディスプレイのように、参加者の眼前に垂直に設置されたタッチパッドを用いる (B)。これは垂直なタッチ操作として経験的に操作しやすい構成である。続いて、前方を向いた垂直の操作面上で操作手が下方を向くように、腰部付近に設置されたタッチパッドを用いる。これに、腕を伸ばして操作手を下方に移動するとカーソルが上方に動く座標対応 (C) と、操作手を上方に移動するとカーソルが上方に動く座標対応 (D) を備える。ただし、タッチ操作とカーソル移動の左右は空間的に一致する。さらに、CMD の触覚インタフェースと同様に、前方を向いた垂直の操作面上で操作手が側方を向くように、腹部付近に設置されたタッチパッドを用いる。これに、前述の座標対応 (C) と同様の座標対応 (E) と、腕を伸ばして操作手を側方に移動するとカーソルが上方に動く座標対応 (F) と、操作手を上方に移動するとカーソルが上方に動く座標対応 (G) を備える。

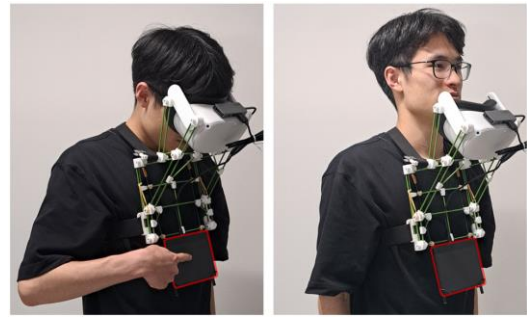


図 5: 接触インタフェース (赤枠) を備えた CMD のプロトタイプ

3.6 結果

各実験条件のタスクにおいて、各参加者が 40 回のトラッキングタスクに取り組み、その各回の所要時間を記録した。そして、40 回のうち参加者が操作に習熟した終盤の 10 回の平均所要時間を図 4 に示す。

水平面上のタッチ操作は、最も平均所要時間の平均値が小さく直感的に操作しやすい上に、参加者間の分散が小さく人に依らず同程度に高いパフォーマンスを期待できる構成である (A, 平均値 1.02, 標準偏差 0.106)。また、垂直面上のタッチ操作においても、一般的なマウス操作と似た腕の動きでカーソルを移動できる場合、または、タッチ操作とカーソル移動の方向が空間的に類似している場合には比較的高いパフォーマンスを示した。特に、タッチパッドが被験者の眼前にある条件では、これら二つの要件が成立し、半数の被験者が水平面上の操作より高いパフォーマンスを示した (B, 平均値 1.09, 標準偏差 0.178)。対して、二つの要件とも成立しない条件では、最も平均所要時間の平均値が大きく操作が直感的でなかった (E, 平均値 2.85, 標準偏差 1.14)。また、操作手が下方を向いている場合には、腕の動きに基づいた座標対応 (C, 平均値 1.17, 標準偏差 0.206) の方が空間的に一致した座標対応 (D, 1.64, 標準偏差 0.494) より直感的である。一方で、操作手が側方を向いている場合には、腕の動き (F, 平均値 2.56, 標準偏差 2.48) より空間的な一致 (G, 平均値 1.42, 標準偏差 0.301) の方が直感的であった。

3.7 考察

本触覚インタフェースのタッチパッド上のタッチ操作においても、初見の利用者の多くはコンピュータマウスと同様に、一般的なマウス操作に似た腕の動きと空間的に類似した座標対応の二つの経験的な手掛かりから、操作方法を習得すると思われる。しかし、これら二つの手掛かりがユーザに直感的な操作を想起する度合は、タッチパッドの配置により異なると考えられる。そのため、タッチパッドの配置による制約から、二つの手掛かりが得られる座標対応が実現し得ない場合には、その配置においてより高いパフォーマンスを示す一方が成立するように座標対応を設定する必要がある。特に、本触覚インタフェースのように腹部付近に配置する場合には、タッチ操作とカーソル移動

の方向が空間的に類似している場合に直感的な操作を提供できる。この座標対応を図5に示すCMDのプロトタイプの触覚インタフェースに適用することで、直観的な操作が実現することを確認した。実験条件と異なり、本デバイスの使用者は俯いて仮想空間を観察するため、タッチパッドの操作面と眼前にあるカーソルの移動面が完全な平行の位置関係にはないが、実験と同様にタッチ操作とカーソル移動の空間的な類似性から直観的な操作が想起された。

加えて、本実験でタッチパッドが水平に配置された場合と垂直に配置された場合を比較して、座標対応の二つの手掛かりがどちらも得られる場合には、参加者の半数が水平面上の操作より垂直面上の操作で高いパフォーマンスを示し、もう半分が逆の結果を示した。つまり、垂直のタッチディスプレイ上のドラッグは水平面上より精度が低く時間を要する[7]のに対して、垂直のタッチパッドでは水平面上と同程度のパフォーマンスを提供し得る。この理由として、タッチディスプレイと比較して、タッチパッドは操作手の可動範囲が狭く、手の向きに依らず操作に伴う身体的な負担が小さいためと推測される。これは、XR技術の入力端末として垂直、または配置が可変なタッチパッドを用いる優位性を示唆している。

4. おわりに

本稿では、XR業務支援のためのデバイスとしてCMDを提案し、CMDを構成する触覚インタフェースについて、特徴的な配置と操作方法に基づいてタッチ操作とカーソル移動との適切な座標対応を調査した。その結果、コンピュータマウスと同様に、本触覚インタフェースのような腹部に配置したタッチパッド上のタッチ操作においても、ユーザは経験的な腕の動きと空間的な類似性を手掛かりに、操作の座標対応に適応していることが確認された。そして、本触覚インタフェースにおいては、タッチ操作とカーソル移動の方向が空間的に類似している座標対応で直感的な操作が実現することが判明した。

さらに、マウスやタッチディスプレイと異なり、タッチパッドでは垂直面上で水平面上と同程度の操作性が実現することが示されたことで、今後は、振動触覚を加えた双方向の触覚インタフェースとして、さらにタッチパッドをXR技術に活用する有効性を調査するとともに、教示が少なく済む直感的なユーザ体験を提供するCMDの構築を目指す。

謝辞 本研究はJSPS 科研費 JP23K26073 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Stoltz, M. H., Giannikas, V., McFarlane, D., Strachan, J., Um, J., & Srinivasan, R. (2017). Augmented reality in warehouse operations: opportunities and barriers. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 12979-12984.
- [2] Vidal-Balea, A., Blanco-Novoa, O., Fraga-Lamas, P., Vilar-Montesinos, M., & Fernández-Caramés, T. M. (2020). Creating collaborative augmented reality experiences for industry 4.0 training and assistance applications: Performance evaluation in the shipyard of the future. *Applied Sciences*, 10(24), 9073.
- [3] Ariansyah, D., Erkoyuncu, J. A., Eimontaite, I., Johnson, T., Oostveen, A. M., Fletcher, S., & Sharples, S. (2022). A head mounted augmented reality design practice for maintenance assembly: Toward meeting perceptual and cognitive needs of AR users. *Applied Ergonomics*, 98, 103597.
- [4] Chen, S., & Weng, D. (2022). The temporal pattern of VR sickness during 7.5-h virtual immersion. *Virtual Reality*, 1-6.
- [5] Yoon, H. J., Moon, H. S., Sung, M. S., Park, S. W., & Heo, H. (2021). Effects of prolonged use of virtual reality smartphone-based head-mounted display on visual parameters: a randomised controlled trial. *Scientific Reports*, 11(1), 15382.
- [6] Brenner, E., de Graaf, M. L., Stam, M. J., Schonwetter, M., Smeets, J. B., & van Beers, R. J. (2020). When is moving a cursor with a computer mouse intuitive? *Perception*, 49(4), 484-487.
- [7] Pedersen, E. W., & Hornbæk, K. (2012). An experimental comparison of touch interaction on vertical and horizontal surfaces. In *Proceedings of the 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Making Sense Through Design* (pp. 370-379). Association for Computing Machinery.