



狭可動範囲ハンドヘルド力覚提示装置による 空間ベクトル場提示

Spatial vector field presentation using a narrow motion range handheld haptic interface

山邊泰雅¹⁾, 矢野博明²⁾

Taiga YAMABE, and Hiroaki YANO

- 1) 筑波大学 システム情報工学研究群 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, t_yamabe@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp)
- 2) 筑波大学 システム情報系 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, yano@iit.tsukuba.ac.jp)

概要：本研究では、ユーザに歩き回れるほどの空間に広がる流れ場のようなベクトル場を指先に力覚提示するためのハンドヘルド力覚提示装置を開発した。装置は大空間内で知覚したい位置を指定するために、HMD のコントローラと組み合わせて指先の位置と装置の位置姿勢を計測する。コントローラと一体化させたグリップを支持点として、直径 20mm の球を効果器として 3 自由度のリンク機構とサーボモータによって効果器に力ベクトルを提示する。これにより、狭い可動範囲の装置であっても、任意の位置の力ベクトルをユーザに提示できる。動作確認のためのベクトル場の知覚実験の結果、ベクトル場の可視化と力覚提示を同時に行うことで、大空間でのベクトル場の知覚の可能性を検証した。

キーワード：力覚提示装置, ハンドヘルド, ベクトル場

1. はじめに

近年、電場や磁場、流速場のような科学技術データの直感的な理解のために情報の可視化技術が研究されている。特にバーチャルリアリティ (Virtual Reality: 以下 VR) の分野では、視覚ディスプレイとしてヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display: 以下 HMD) や CAVE [1] が開発されてきた。高エネルギー加速器研究機構 (以下 KEK) では教育訓練加速器 (以下 KETA) のバーチャルリアリティ版 (以下 VR-KETA) の開発が進められている。VR-KETA は KETA 内の電子ビームの動きやエネルギーの変化を、HMD を用いて可視化したものであり、大学生や若手研究者向けの教育ツールとして利用されている [2]。可視化技術は視覚情報を用いるため、人間の感覚機能の中で最も多くの情報を取り入れることができる利点がある。しかしながら、視覚情報のみのベクトル場の表現は奥行方向において提示物体のオクルージョンの問題が発生するため、情報量に限界がある。

このような欠点を補う表現方法の一つとして、情報の可触化技術が研究されている。可触化技術は力覚提示装置を用いてユーザに力覚フィードバックを行う。触覚による表現は、視覚による表現と異なり、提示物体のオクルージョンの問題を受けない。また、触覚は、視覚と比べると一度に知覚できる範囲が狭くなるが、その範囲においては詳細な情報の知覚を可能にする。したがって、可視化技術と可触化技術を組み合わせることで、大局的な一貫性の高さと局所的な認識性の高さをあわせもつ表現が可能になる [3]。

VR-KETA は教育ツールとして利用されているため、加速器に関する専門的な知識がない人でも直感的に理解することが必要である。電場や磁場といったベクトル場の可触化を行うことで、ベクトル場の様子をより直感的に理解しやすくなるため、学習やデータ検証に有用であると考えられる。

これらのことから本研究では、HMD や CAVE などを必要とする歩き回れるほどの大規模空間での可視化技術と可触化技術を組み合わせたベクトル場の提示を目的として狭可動範囲ハンドヘルド力覚提示装置を開発した (図 1)。

また、システムの動作確認のためにベクトル場の知覚において力覚提示のみの時、ベクトル場の可視化のみの時、力覚提示+ベクトル場の可視化を用いた時のベクトル場の知覚に関する実験を行い、ベクトル場の知覚の可能性を検証した。

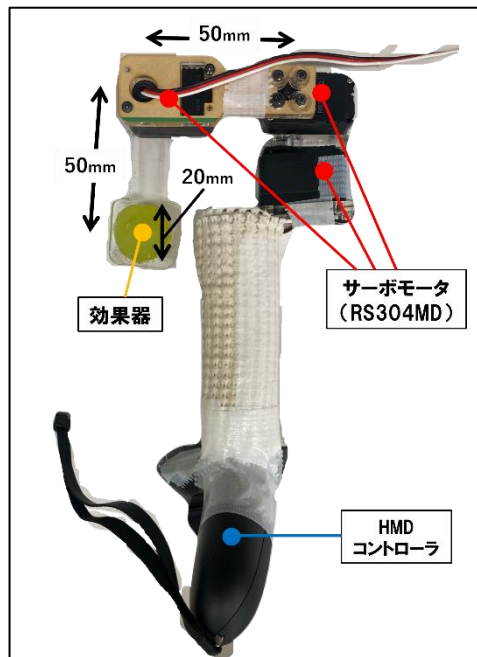


図 1: 狭可動範囲ハンドヘルド力覚提示装置

2. システム設計方針

本システムは歩き回れるほどの大規模空間中に分布するベクトル場の各位置でのベクトルを視覚と指先への力覚フィードバックを同時に提示することで、ベクトル場の直感的な理解を促進することを目的とする。そのため力覚フィードバックにおける必要な機能として知覚したい位置を大規模空間で自由に指定できる可動範囲の広さとその位置のベクトルの向きと大きさが提示できる力覚提示方法であることが挙げられる。

まず、装置の可動範囲を広げることを考える。接地型の力覚提示装置を大型化することも考えられるが、本研究では歩き回れるほどの空間での利用を想定しているため、現実的ではない。次に、ハンドヘルド型の力覚提示装置を検討する。ハンドヘルド型では、反力を提示する効果器に指先が接触する面積はほぼ変わらないものの、その反作用力を受ける支持部位の支持面積が大きければ大きいほど、その部位の圧力が減り、相対的に指先での提示力が知覚しやすくなる。支持部位としては、いくつかの選択肢がある。腕や手首を支持点とする手法[4]では、手首から先の手の姿勢変化の制約が少ないが、把持部位である効果器の支持点から見た可動範囲が大きくなる。そのため、出力が大きなモータが必要となり、装置が大型化し、重量も増加するため、長時間の使用には向かない。一方で、手のひらを支持点とする方法では、把持部位である効果器の支持点から見た可動範囲が小さくなるため、比較的小さな出力のモータでも十分である。また、装置の小型軽量化を図ることができ、長時間の使用にも適している。ハンドヘルド型では、手全体を動かして提示するベクトル場の位置を指定するため、装置の位置姿勢を別途計測する必要がある。

次に、ベクトルの向きと大きさを提示できる力覚提示方法について考える。まず、指サックを用いて1本指に提示することが考えられる。指腹での知覚が主であるが、指腹から離れる方向のカベクトルは爪側に反力として提示される。さらに、指サックが抜ける方向では提示可能な力が小さくなるなど、カベクトルの知覚感度に異方性がある。指腹をカベクトルに垂直にするのが望ましいが、力が大きくなる方向の探索行動が必要となり、使いにくさがある。次に、指先で効果器を摘む道具媒介型が考えられる。効果器を粒子に似せるとベクトル場を知覚する直感性が高くなり、親指と人差し指の指腹を使った牽引力知覚により、指腹の向きをそれほど気にしなくても良い(図2)。また、振動子の牽引力錯覚を用いる手法[5]もあるが、提示方向に制限があり、知覚開始までの時間が長くなるため、素早い動きへの対応が困難である。

これらのことから、本研究では位置姿勢計測機能付きグリップを支持面として手のひらで握り、人差し指と親指で効果器を把持することで、必要可動範囲を狭め、小型軽量化しつつ、連続的で滑らかなカベクトル提示を可能とする手法を提案する。

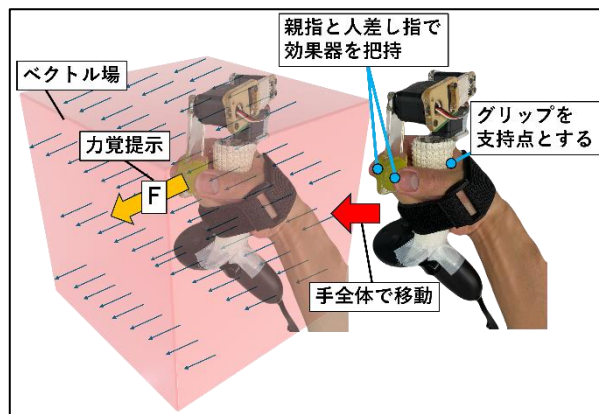


図 2: 力覚提示方法

3. プロトタイプシステム

3.1 ハードウェア構成

本システムの概要図は図3のようになっている。HMD、ハンドヘルド力覚提示装置からPCへはそれぞれの位置姿勢情報が送られるようになっており、PCからHMDへはゲーム開発エンジンUnityで作成した映像が送られる。また、PCからハンドヘルド力覚提示装置へはサーボモータの角度、装置の位置姿勢に応じたトルク制御の信号が送られる。

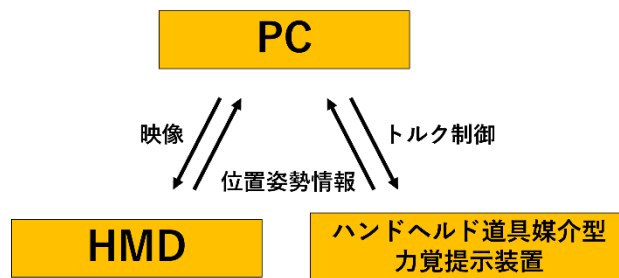


図 3: システム概要図

ハンドヘルド力覚提示装置は、効果器を把持した指先を3自由度に動かすことができ、親指と人差し指の可動範囲の目標値を半径20mmとして指先の動きをリンクが邪魔しないようにシリアルリンク機構を採用した。シリアルリンク機構を構成している2本のリンクの長さはともに50mmである。本研究では、Futaba社製のコマンド式サーボモータRS304MDを3つ使用した。RS304MDは角度の取得とトルク調整が可能であり、寸法が35.8(mm)×19.6(mm)×25.0(mm)、重量21g、最大出力トルクが約49N・cmである。効果器に加えるカベクトルの大きさは最大3N程を想定し、モータの選定を行った。効果器には直径20mmのゴム製の球を使用し、力覚提示装置の下部には装置の位置姿勢をトラッキングするためのHMDのコントローラを取り付けた。本研究ではHMDとしてMeta Quest Pro(Meta社)を使用した。

3.2 ソフトウェア構成

本システムで使用しているサーボモータRS304MDはUSB-RS485変換ケーブルを使用し、TTL半二重通信をすることによって出力トルクの調整、角度の取得を行っている。各モータの角度とHMDのコントローラの位置姿勢データを入力として各モータの出力トルクを計算し、効果器部分にカベクトルを提示している。また、PCとHMDはOculus Linkを用いて双方向の通信を行っている。

4. ベクトル場知覚実験

本システムの動作確認のために流れ場のようなベクトル

ル場の知覚において、指先への力覚提示のみ(条件1)、ベクトル場の可視化のみ(条件2)、力覚提示+ベクトル場の可視化(条件3)の3つの条件でベクトル場の知覚に関する実験を行った。また、条件間での比較を行うことによって本システムを用いた大規模空間でのベクトル場の知覚の可能性を検証した。

4. 1 実験手法

実験は、手指の知覚機能に顕著な低下が無い20歳前半の男性4名に対して行った。実験参加者にHMDとハンドヘルド力覚提示装置を装着してもらい、直立の姿勢で行う(図4)。バーチャル空間上の750(mm)×750(mm)×750(mm)の立方体の領域で、ある一点のターゲットに向かうベクトル場が条件1、条件2、条件3のいずれかの方法で提示され、ターゲットに向かって右手に把持しているハンドヘルド力覚提示装置の効果器を動かしてもらう。その後、効果器の位置をターゲットの位置で保持した状態で左手に持っているHMDのコントローラのボタン入力によりターゲットの位置を解答してもらう。



図4: 使用時の様子

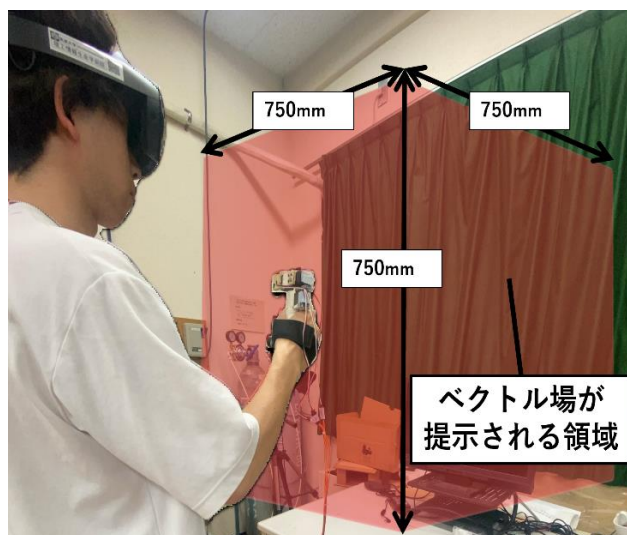


図5: 実験の様子

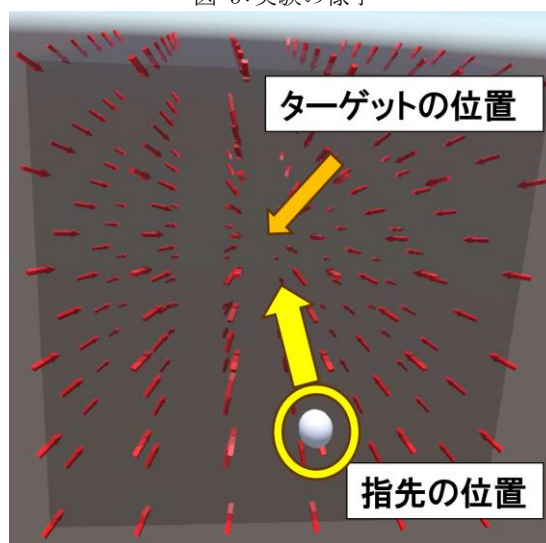


図6: 実験参加者が見ている映像

実験は順序効果を考慮して、ランダムな順番で3つの条件に対して各10問ずつのデータの提示を行った。条件間の比較を可能にするために、ターゲットの位置は10種類で条件によらず同じターゲットの位置のデータを提示する。各試行の手順は以下である。

1. 研究対象者に直立の姿勢で、HMDとハンドヘルド力覚提示装置を装着させた(図5)。
2. 実施参加者が初期位置に指先を動かさせた後に3秒間待機させた。
3. 750(mm)×750(mm)×750(mm)の立方体の領域にベクトル場を条件1、条件2、条件3のいずれかの方法で提示した(図6)。
4. 提示された情報をもとに研究対象者に右手のハンドヘルド力覚提示装置の効果器をターゲットの位置に動かさせた(図6)。
5. ターゲットの位置に力覚提示装置の効果器を保持した状態で左手に持っているHMDのコントローラのボタン入力によりターゲットの位置を回答させた。

以降は3から6の手順を繰り返し行った。

解答した位置と実際のターゲットの位置との誤差、解答までにかかった時間、作業中の指先の位置姿勢の時系列データを計測し、3つの条件で比較することによって提案手法の有効性を検証した。

4. 2 実験結果と考察

各参加者が解答したターゲットの位置と実際のターゲットの位置の距離の平均と標準偏差を図7に示す。3つの条件間で平均誤差、標準偏差ともに条件1、条件2、条件3の順に小さくなっていることがわかる。3つの条件で1元配置分散分析を行った結果、 $F=17.8$, $p<0.01$ と1%水準で有意であった。TukeyのHSD検定を用いた事後検定の結果、すべての組み合わせにおいて1%水準で有意であった。これらの結果から、力覚提示とベクトル場の可視化を組み合わせたことが、ターゲットの位置を最も正確に指示するために有効であることが考えられる。

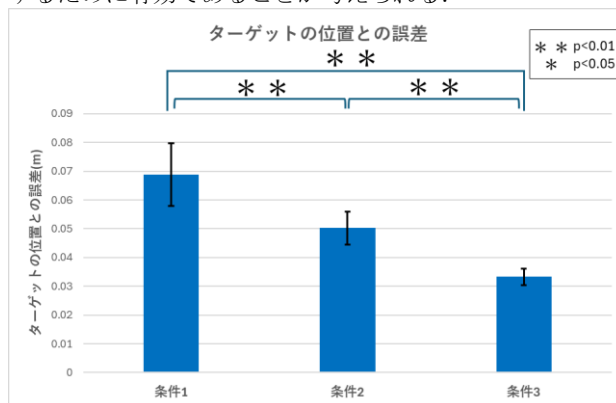


図7: ターゲットの位置との誤差

各参加者の解答までにかかった時間の平均と標準偏差を図8に示す。3つの条件間で解答までにかかった平均時間、標準偏差ともに条件1, 条件2, 条件3の順に小さくなっていることがわかる。3つの条件で1元配置分散分析を行った結果、 $F=13.1$, $p<0.01$ と1%水準で有意であった。TukeyのHSD検定を用いた事後検定の結果、条件2, 条件3の組み合わせを除いて1%水準で有意であった。解答までにかかる時間に関しては、条件2と条件3では大きな差が無いことがわかり、条件1では短時間で得られる情報量が少ないためベクトル場の迅速な知覚は困難であることがわかる。

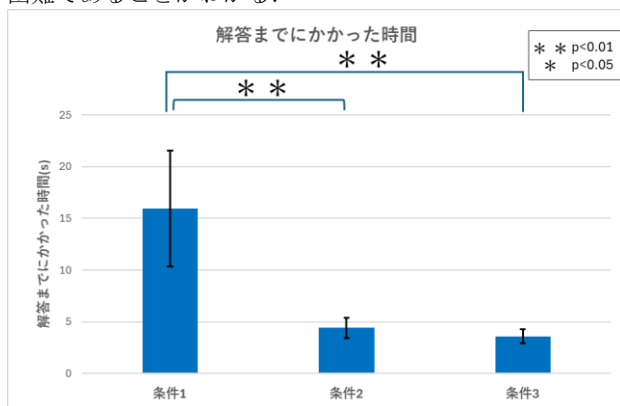


図8: 解答までにかかった時間

各参加者の試行中の頭部の初期位置からの最大変位の平均と標準偏差を図9に示す。3つの条件間で頭部の初期位置からの最大変位の平均は条件2, 条件1, 条件3の順に小さくなっていることがわかる。3つの条件で1元配置分散分析を行った結果、 $F=5.0$, $p<0.05$ と5%水準で有意であった。TukeyのHSD検定を用いた事後検定の結果、条件2, 条件3の組み合わせのみ5%水準で有意であった。これらの結果から、ベクトル場の可視化と力覚提示を組み合わせることによって提示物体のオクルージョンによる視認性の悪さを補償する効果があったと言える。

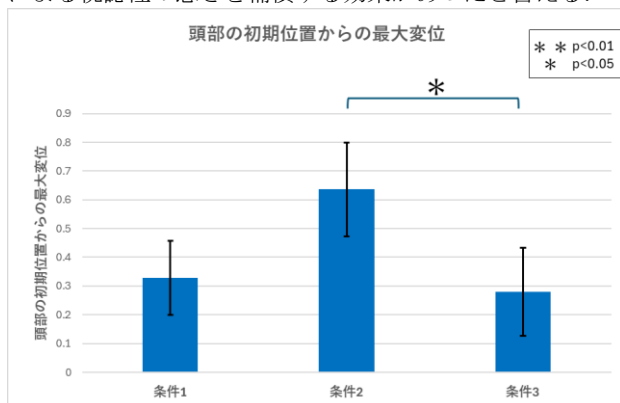


図9: 頭部の初期位置からの最大変位

力覚提示のみ、ベクトル場の可視化のみ、力覚提示+ベクトル場の可視化の3つの条件においてベクトル場の知覚実験を行った結果、力覚提示+ベクトル場の可視化の条件ではベクトル場の可視化のみの条件と比較して、提示物体のオクルージョンによる視認性の悪さを補償して、より正確な知覚が可能であることが考えられる。

5. まとめと展望

本研究では歩き回れるほどの大規模空間で流れ場のようなベクトル場を指先に提示することを目的として狭可動範囲ハンドヘルド力覚提示装置の開発を行った。本システムの動作確認のためのベクトル場の知覚実験を行った。また、実験後に実験参加者から「指先に対して牽引力のようなものがあった」というコメントが得られた。これは牽引力提示の可能性を示すものであり、先のベクトル場の知覚実験中の指先や頭部の位置の時系列変化等の解析を引き続き進める。本研究では静的なベクトル場に対する知覚実験を行ったが、今後は動的なベクトル場への適用可能性を検証する予定である。

謝辞：古坂道弘氏をはじめとした高エネルギー加速器研究機構の関係各位から有益なコメントをいただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J. and DeFanti, T. A.: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, Proceedings of SIGGRAPH '93, pp. 135-142(1993).
- [2] 古坂道弘, 広田克也, 池松克昌, 山口誠哉, 肥後寿泰, 池田進, 平野美穂子, 岩下芳久, 山本昌志, 城野哲, 矢野博明: 高エネ機構におけるUNITY上でのVR加速器開発-II, Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp. 620-622(2023).
- [3] 小俣昌樹, 石原雅巳, Kwok, Misa Grace, 今宮淳美: 感覚特性に基づいた反力と振動による流れ場の可触化, FIT2004 第3回情報科学技術フォーラム, pp. 287-290(2004).
- [4] 岩田洋夫, 中川博憲: 着用型力覚帰還ジョイスティック: Human Interface N&R, Vol. 13, No. 2, pp. 135-138(1998).
- [5] 田辺健, 雨宮智浩, 遠藤博史, 井野秀一: 非対称振動刺激による牽引力錯覚の研究動向, TVRSJ, Vol. 25 No. 4 pp. 291-301(2020).