



重度視覚障害者向け複合現実物体位置提示インタフェース ～3 次元位置関係提示方法の検討～

村野航大¹⁾, 棟近子竜²⁾, 金澤悠冬¹⁾, 高尾秀伸²⁾

1) 神奈川工科大学 ロボット・メカトロニクス学科 (〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野1030)

2) 神奈川工科大学大学院 ロボット・メカトロニクスシステム専攻 (〒243-0292 神奈川県厚木市下荻野1030)

概要: 重度視覚障害者は視覚情報が利用困難なため、物体の位置を認知することが難しい。この問題に対し、筆者らは立体音響およびソニフィケーションを用いた複合現実物体位置提示インタフェースを開発中である。本研究では、高さ情報を含む物体の 3 次元位置提示インタフェースのデザイン提案を行い、プロトタイプを作成した。さらに、ユーザビリティ評価を通じてその有効性について検討を行った。

キーワード: ユーザインタフェース, 視覚障害, 聴覚, 感覚・知覚

1. はじめに

令和 3 年の障害者差別解消法の改正[1], および令和 6 年の同法施行により, 全事業者に対し障害のある人への合理的配慮の提供が義務化された。しかし, この義務には「配慮の実施に伴う負担が過重でないとき」という制約が存在する。このため, 小売店の混雑時など, 人的リソースが不足している状況では店員による適切な配慮が受けられない場合がある。その結果, 特に重度視覚障害者が単独で買い物を行う際には, 外界情報の取得が非常に困難となっている。

筆者らのグループの先行研究[2]では, 重度視覚障害者向け食器位置提示複合現実インタフェースに関する基礎的検討を行ってきた。この研究では仮想聴取位置を頭部から指先に変更することで, メンタルワークロードが 27.1% 減少し, 音像定位を手の動きに利用することで直感的な操作が可能となることが示唆されている。しかし, これらのシステムは主に 2 次元空間での位置提示にとどまっており, 実際のインタフェースにおいて位置関係提示を 3 次元へ拡張することが課題となっていた。そこで本研究では, 高さ情報を含む物体の 3 次元位置提示インタフェースのデザイン提案を行い, プロトタイプを作成した。さらに, ユーザビリティ評価を通じてその有効性について検討を行った。

利用して 3 次元的な位置情報の提示を行った。また, 仮想空間内の聴覚情報を聴取する仮想耳の位置を利き手の示指先端に移動させる指耳システム (図 1) を実装した。聴取位置として, 利き手の示指先端の左右に耳があると想定する探索方式で, 図 1 のように示指先端に小さな頭部がついているような聞こえ方をする。手腕の動きによって音像が移動するため, 身体運動と聴覚との運動供応が効果的に行われることによる認知負担の軽減が期待される。また, 頭部に比べて手腕は自在に動くことができるため, 定位の判断材料をより多く得られることで高精度の物体位置把握が可能になると考えられる。聴取位置が利き手の示指先端となり, 示指先端とターゲットとの相対距離がソニフィケーションによって提示される。被験者はこの提示音をもとに 3 次元物体位置の探索を行うことができる。

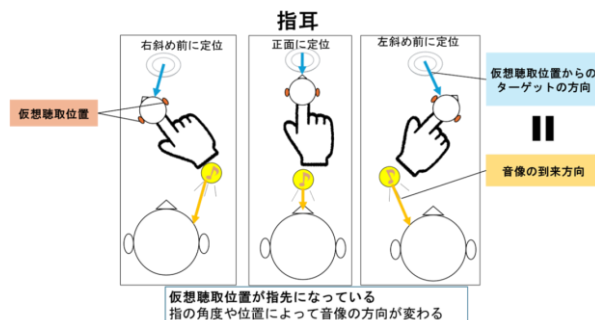


図 1: 指耳

2. 物体位置探索方式

2.1 デザイン提案

本研究では, MR ヘッドセットを用いて仮想空間上に配置した仮想オブジェクトを仮想音源とし, その音の変化を

なお, これらの提示音は MR ヘッドセット内に内蔵されている立体音響を用いてターゲットの位置から発生する

よう設計した。開発および実装には MR ヘッドセット (Meta Quest3, Meta) を用いた。ハンドトラッキングには Meta Quest3 に搭載されているセンサを用い、音声提示には一体型ステレオスピーカを用いた。制御プログラムは Unity (Ver. 6000.0.24f1 Personal, Unity Technologies) で開発し、プロジェクト内に MR ヘッドセット制御用ライブラリ (Meta XR) を追加して作成した。

2.2 インタフェースの実装

本報では、対象となる物体として 300ml 程度の小サイズのペットボトルを想定した。当該ペットボトルのサイズは一般的に直径は 6cm 程度、高さは 15cm 程度である。すなわち、点音源の中心からそれぞれ 3cm, 7.5cm の精度で認知できれば、正しく手に取ることができると考えられる。

以下、4 種類の提示方法を提案する。

(1) 断続音方式

先行研究[2]の指耳システムを用いた提示方法を比較対象とした。本方式では、相対距離が短くなるほど断続音の周波数を高く、テンポを速く変化させるように設計した。具体的には、商品に手を近づける動作がわかるよう、相対距離が 40cm から 2cm に近づく間に、断続音の周波数およびテンポを 2 倍高く、速く変化させた。また、示指がターゲットより奥行方向に 1cm 以上超過した場合には、警告音を提示することで奥行方向への超過を表現した。

(2) 断続音+無音方式

次に、第 2 方式を「断続音+無音方式」と名付ける。断続音方式と同じように相対距離が短くなるほど断続音の周波数を高く、テンポを速く変化させるよう設計した。このとき、別の商品に手を伸ばしている動作がわかるよう、相対距離が 40cm から 2cm に近づく間に、断続音の周波数およびテンポを 2 倍高く、速く変化させた。また、示指がターゲットより奥行方向に 2cm 以上超過した場合には、警告音を提示することで奥行方向への超過を表現した。さらに、ターゲット中心点から半径±3cm の範囲を音のならない領域（以下、無音領域）とすることで、y 軸方向における高さ情報の提示が可能になると考えた。3cm の範囲としたのは、前述のペットボトルのサイズに基づく。また、無音領域の導入によって、ターゲット位置に到達する精度が一定となるものの、条件 1 と比較してターゲット到達までの時間を大幅に短縮できる可能性があるとして仮定した。

(3) 連続音+無音方式

連続音+無音方式では、条件 1, 2 における「1 つの音を変化させる」というアプローチを拡張し、複数の正弦波を同時に変化させる設計とした。これは、複数の類似した音が指の 3 次元的な動きと連動して変化することで、認知負担が大きくなる代わりにユーザがターゲット位置に吸い込まれるように、指が円を描くような軌跡を自然に導き出し、より高い精度が見られるのではないかと仮説に基づき提案する。ターゲットまでの距離が 30cm から 0cm に近づく間、正弦波で提示している提示音の音量が増加しつつ、ビーブのテンポが 0.8Hz から 8Hz に上昇する。上下方向の

ズレがターゲットの中心点から±25cm になることで、250Hz から 1000Hz にピッチを変化させる。さらに、前後方向の超過が 2cm 以上で 1200Hz のアラーム音を発し、40cm 以下に戻ると停止するよう設計した。また、ターゲット中心点から±3cm を無音領域とし、すべての提示音を無音にした。3cm の範囲としたのは、前述のペットボトルのサイズに基づく。これは、音の種類が多くなることで種類判別が難しくなることへの配慮と、y 軸方向の高さ情報提示に対する有効性を期待したためである。

(4) 軸音方式

軸音方式では、断続音方式、断続+無音方式では 1 種類であった音を正弦波および矩形波など複数の種類に分割し、各軸に異なる音色を割り当てることで、軸ごとの空間認知を支援できるのではないかと仮説に基づいて設計を行った。具体的には、x 軸に対しては正弦波、y 軸に対しては矩形波を用い、左右および上下方向の提示音をそれぞれ分割して提示した。また、上下方向においては、ターゲットの中心点から y 軸方向に±3cm の範囲に利き手の示指が入ると、上下方向の矩形波の音が無音となり、左右の提示音である正弦波のみが提示され続けるよう設計した。3cm の範囲としたのは、前述のペットボトルのサイズに基づく。矩形波のみを消失させた理由は、y 軸方向に無音領域を設けることで高さの提示に寄与するという考えによるものである。さらに、音の種類を増やすことによって、負担は増加するものの、精度向上が期待できると考えた。一方、正弦波を無音にはしなかった理由としては、条件 1 でも十分な操作精度が得られることが先行研究[2]から判明していたため、音色変化のみで無音領域と同等の効果が得られるかどうかの検証を目的とした。

3. 実験

3.1 実験概要

本研究では、先行研究で課題として残されていた高さ情報の提示方法に着目し、今回提案した高さを含む物体の 3 次元位置提示方法について、ユーザビリティ評価を通じて検討するため、断続音条件、断続音+無音条件、軸音条件、連続音+無音条件の 4 条件を実験条件とした。また、棚に置かれたペットボトル（横幅約 6cm）を手に取るという具体的な状況を想定した実験とした。

3.2 実験参加者

聴覚が健常な男子大学生 6 名（平均年齢 21±0.82 歳）であった。なお、全員右利きであった。

3.3 実験環境・実験装置

神奈川工科大学・認知行動科学研究室にて行った。実験室は外来の電磁波遮断および防音機能を有しており、暗騒音は平均レベルで 35dB (A) である。MR ヘッドセット (Meta Quest3, Meta) を用いて仮想空間の構築を行った。仮想空間上にはターゲットとなる仮想のオブジェクトを配置し、のターゲットを音源として提示音を 3 次元的に提示した。図 2 に実験環境構成図を示す。ホームポジションとして、

実験参加者の頭部中心から実験参加者が右利きであれば右方に 30cm, 前方に 10cm, 床面から高さ 87.6cm の位置に触って分かる印をつけた棚を配置した。また, 安全のために棚の角にはコーナーガードを取り付けた。

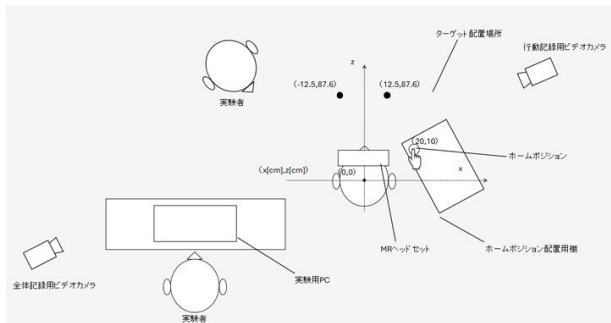


図 2: 実験環境構成図

3.4 実験課題

実験参加者には, その場で立位姿勢を保ち, 静止するよう指示した。視覚情報を遮断するため, 使い捨てアイマスクを装着した後, MR ヘッドセットを装着し, 非利き手にコントローラを把持させた。探索開始を知らせる報知音を聴取したのち, MR ヘッドセットから提示される聴覚情報のみを頼りに, 利き手の示指をホームポジションから 3 次元的に誘導させて仮想空間上の音源位置を探索するよう求めた。利き手の示指先端が音源と重なったと判断した場合は, できるだけ速やかにコントローラのボタンを押下し, その後, 示指をホームポジションに戻す動作を行わせた。これを 1 試行とし, 1 つの音源位置につき 2 試行実施した。配置箇所全 6 カ所のため, 12 試行を 1 セットとし, 合計 4 セット (計 48 試行) を実施した。探索時は利き手の示指のみを伸展し, 手背を上に向けた姿勢を保持するよう指示した。手指操作を妨げない範囲で, 身体の自由な動きは許可した。

3.5 実験条件

実験条件は, 2.2 インタフェースの実装にて紹介した, 断続音方式, 断続音+無音方式, 連続音+無音方式, 軸音方式の 4 方式とする。

3.6 測定・評価指標

3.6.1 客観評価

ユーザビリティの一要素である効果のなかでも正確性を評価するため, 試行終了時の実験参加者の示指先端とターゲットとの距離誤差を測定した。また, 参考情報として試行開始から試行終了までにかかった時間を測定し達成時間とした。迅速性として評価し, また, 実験参加者の利き手の示指先端の試行開始から試行終了までの座標値を 60Hz で記録した。そして, 総軌跡長および軌跡パターンを評価した。

3.6.2 主観評価

主観評価として, NASA-TLX[3]を用いてメンタルワークロードを測定し, 評価した。また, 心理的評価構造モデル

を抽出するために評価グリッド法[4]を用いたインタビュー調査を行った。

4. 結果

4.1 平均距離誤差

平均距離誤差の結果を図 3 に示す。断続音条件と軸音条件の値はそれぞれ 1.76cm と 3.71cm で断続音+無音条件および連続音+無音条件については, ターゲットからの距離 3cm の無音領域に入ると成功ということになるため, 達成率を求めた。その結果, 断続音+無音条件が 100%, 連続音+無音条件が 84.7% となった。

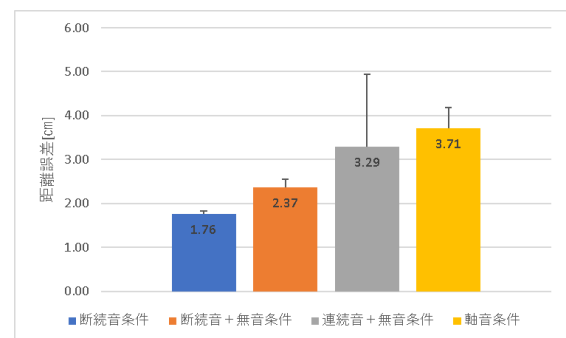


図 3: 平均距離誤差

4.2 平均達成時間

実験協力者間における平均達成時間を以下に示す (図 4)。結果より断続音条件が最も達成時間が短く, 連続音+無音条件が最も達成時間が長いことがわかる。結果に対し, フリードマン検定を行った結果, 主効果が有意であった ($p < 0.01$)。さらに, Scheffe の一対比較法を用いた下位検定の結果, 断続音+無音条件と連続音+無音条件の間に 5% 水準で有意差が認められた ($p < 0.05$)。

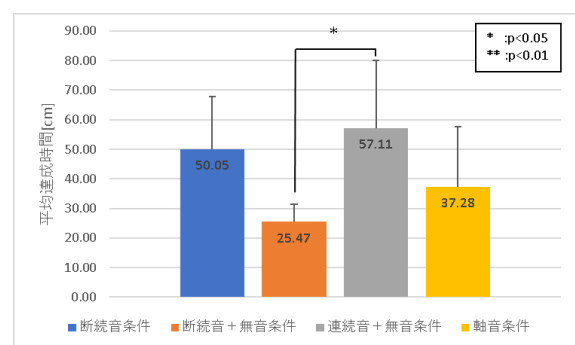


図 4: 平均達成時間

4.3 平均総軌跡長

実験協力者間における平均軌跡長を以下に示す (図 5)。結果より断続無音提示条件が最も軌跡長が短く, 連続音+無音条件が最も軌跡長が長かった。なお, これらの結果に対してフリードマン検定を行った結果, 有意な主効果は認められなかった。

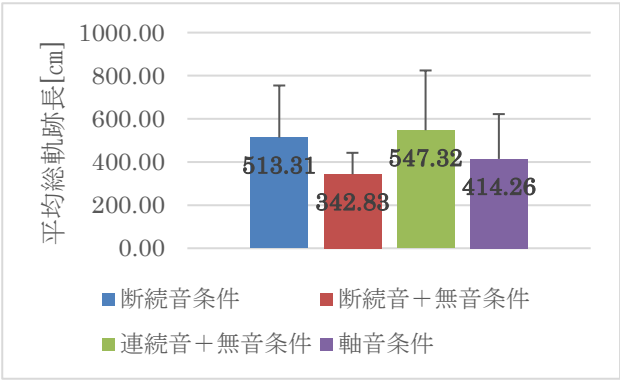


図 5:平均軌跡長

4.4 精神的作業負担

実験協力者の精神的作業負担を以下に示す(図 6)．断続音+無音条件が最も精神的作業負担が少なかった．連続音+無音条件と比較した場合、46.5%の精神的作業負担の軽減が認められた．また、軸音条件と比較した場合には42.3 %の精神的作業負担が軽減したことが認められた．

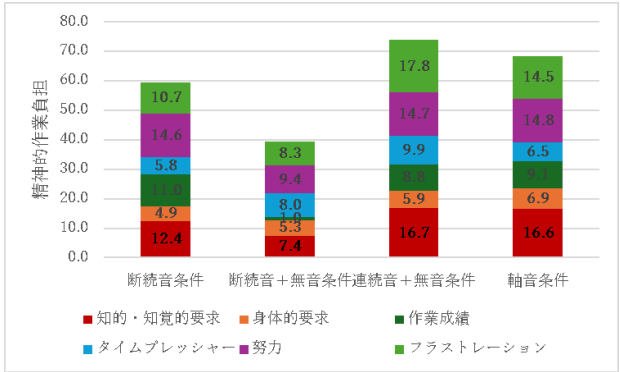


図 6:精神的作業負担

5. 考察

結果より断続無音条件の提示方法は、主観的負担を大幅に軽減し(図 6)、操作の直感性および容易さにおいても高く評価された．評価グリッド法[5]による主観的評価では、「単音で答えの位置が分かる」「無音による明確なゴール提示が直感的であった」という意見が多く、全員が無音領域に到達できていたため、設計意図が十分に機能したといえる．客観的にも、達成時間・軌跡長ともに本条件が最も優れており、ユーザビリティ指標の全体で高い性能を示した．この直感性の背景には、単音によるシンプルなソニフィケーションが認知負荷を低減し、指耳で距離感を把握できたことが挙げられる．また、効率において、迅速性および効率性の双方で最良の結果が得られた、満足においてメンタルワークロード値も最も低かったこ

とから、本条件は今回のペットボトルを獲得するという実験想定に最適なインタフェースであったと考えられる．一方で、断続音条件では、無音という正解が存在しないため、ユーザはより高精度を目指していることがみられ、平均距離誤差は1.76cmという高精度を示した．精神的作業負担や探索時間、軌跡長が増加する傾向が観察された．評価グリッド法の内省報告からも「正解が分かりにくい」「ゴールが明確でないため迷いやすい」という指摘が多く、決めに欠ける課題が浮き彫りとなった．

6. おわりに

本研究では、品棚に配架されたペットボトルを重度視覚障害者が単独で手に取ることを可能とする複合現実物体位置提示インタフェースを目指し、3次元位置関係提示方法の検討を行った．高さ情報の表現を含む4種類の音提示方式を提案し、ユーザビリティ実験により評価を行った．その結果、断続音方式および断続音+無音方式の2方式が優れている可能性が示唆された．今後は、断続音+無音方式の最高精度に関する検討を行ったうえで、断続音方式と比較する評価実験を行う．これにより、ペットボトルより小さな物品の探索に最適な方式の検討を行っていく予定である．

参考文献

[1] 厚生労働省:障害を理由とする差別の解消の推進に関する法律の一部を改正する法律(令和3年法律第56号),
https://www8.cao.go.jp/shougai/suishin/pdf/law_r03-56.pdf (2025年7月18日アクセス)．

[2] 棟近子竜, 森怜依, 高尾秀伸: 重度視覚障害者向け食器位置提示複合現実インタフェースの基礎研究〜2次元位置関係提示方法の検討(第2章)〜, ヒューマンインタフェースシンポジウム2024, 3T-D2, 2024.

[3] S.G.Hart & R. P. Jr Harper: Development of NASA-TLX: Result of Empirical and Theoretical Research: Hancock, P. A. & Meshkati, N. (eds.): Human Mental Workload Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam,, pp. 139-183, 1988.

[4] 讃井純一郎, 乾 正雄: レポートリーグリッド発展手法による住環境評価構造の抽出-認知心理学に基づく住環境評価による研究(1)-, 建築学会計画系論文集, No. 367, pp. 15-22, 1986.