

92. センサ処理と音響・触覚通知による視覚障害者屋内ナビゲーションシステムのスマートグラス実装と社会実験

東京大学大学院情報理工学系研究科 教授 入江 英嗣

概要

視覚障害者にとって、屋内施設での自立した移動は依然として大きな課題である。本研究では、先行研究で開発した屋内ナビゲーションシステム「Vi-map」を実環境への展開に向けて発展させることを目的とし、実施設での予備評価、システムの全面刷新、および当事者による動作評価を実施した。

研究では、まず予備評価として、実際のホテルの客室階通路において Visual SLAM (VSLAM) を用いたマップ生成と自己位置推定の動作を確認し、実施設運用時に生じる課題を確認した。

この知見をもとに、屋内ナビゲーションに適したシステムを新たに開発した。主な提案は①スマートグラスを活用したコンパクト化②HW/SW 両面からの屋内 VSLAM 精度向上手法の開発③ステレオスピーカーを用いた立体音響による経路誘導④VSLAM と IMU を組み合わせたセンサフュージョンによる高速化、が挙げられる。また、VRSNS 上にナビゲーション体験・評価環境を構築し、UI パラメータの検証と体験機会の拡大を図った。

VR 評価環境を用いた開発者試験では、音源定位による方向提示が歩行誘導として直感的に機能すること、および視界暗転モードでの目的地到達の再現性を確認した。実機では全盲の視覚障害当事者 1 名を対象として屋内通路で歩行試験を実施し、目的地への到達を確認した。立体音響による方向提示は自然に方向感が把握できると評価され、カメラベースの手法への期待も示された。装着形態についても問題点の指摘はなく、可搬性の高さが確認された。

背景および目的

視覚障害者にとって、外出先での移動は依然として大きな制約となっている。特に初めて訪れる施設では、目的地までの移動やトイレ利用など介助を必要とし、行動の自由度やプライバシーの確保の観点から課題となっている。近年はスマートフォンを用いた音声ナビゲーションや AI 認識ツールなど、デジタル技術を利用した支援手段が普及しつつあるが、屋内環境では、GPS 信号が利用できない場合が多く、施設内部の詳細地図データも整備されていないことが多い。また、扉や通路などを正確に案内するためには屋外ナビゲーションよりも高い位置精度が要求されるため、従来の音声ナビゲーションのみでは十分な支援を実現することが難しい。ビーコンなど、建物側への設備追加により精度を高める技術では、整備と維持、また対応状況の把握が課題となる。このため、公共交通機関などを利用して施設付近までは到達できても、施設内に入った途端に目的地までの移動が困難になるという問題が存在している。

我々は先行研究において、視覚障害者の外出・歩行を支援する屋内ナビゲーション技術の研究開発を、当事者および支援者と協力しながら進めてきた。Visual SLAM を用いた位置推定、経路生成、触覚および音声による方向提示を統合したウェアラブルナビゲーションシステム「Vi-map」を開発し、東京大学構内や盲導犬訓練施設に

において動作検証を行ってきた。その結果、ユーザの位置推定および目的地までのナビゲーションをリアルタイムで行うシーズ技術を創出し、この技術により屋内環境においても安定したナビゲーションを実現できる可能性が示されている。

本研究の目的は、先行研究による Vi-map 技術を実環境での利用に発展させ、視覚障害者が施設内を自由に移動できる支援システムとして社会実装につなげることである。

予備評価

実施設において VSLAM によるマップ生成および自己位置推定の予備評価を行った。本評価では、ORB-SLAM2 を用いた単眼カメラ VSLAM を用い、ホテル館内の通路環境においてマップ生成および自己位置推定の挙動を観察した。実験は京王プラザホテル（新宿）の協力を得て行った。

実験環境は客室階の通路であり、長い直線通路や曲がり角を含む構造を有する。また、通路は壁面や照明配置などが規則的に繰り返し配置された景観を持つ。図 1 に実験環境の概略平面図を示す。図 2 に特徴点検出および生成されたマップの例を示す。小型カメラを用いたマップ生成においても床面や壁面、照明などから安定した特徴点が取得され（図 2 左）、これらを用いて VSLAM 用のマップが自動的に生成された（図 2 右）。生成されたマップは通路の形状を概ね再構成しており、移動に伴う自己位置推定も安定して行われた。一方で、類似した景観が連続する環境のため、VSLAM 上で似たような場所への誤認識が生じ、間違ったループクロージャからマップ生成に失敗する現象が観測された。

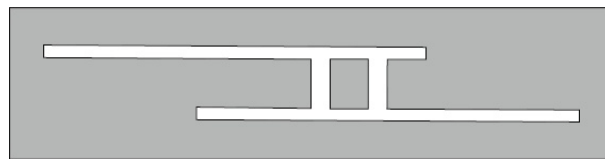


図 1. 予備評価実験環境の概略平面図

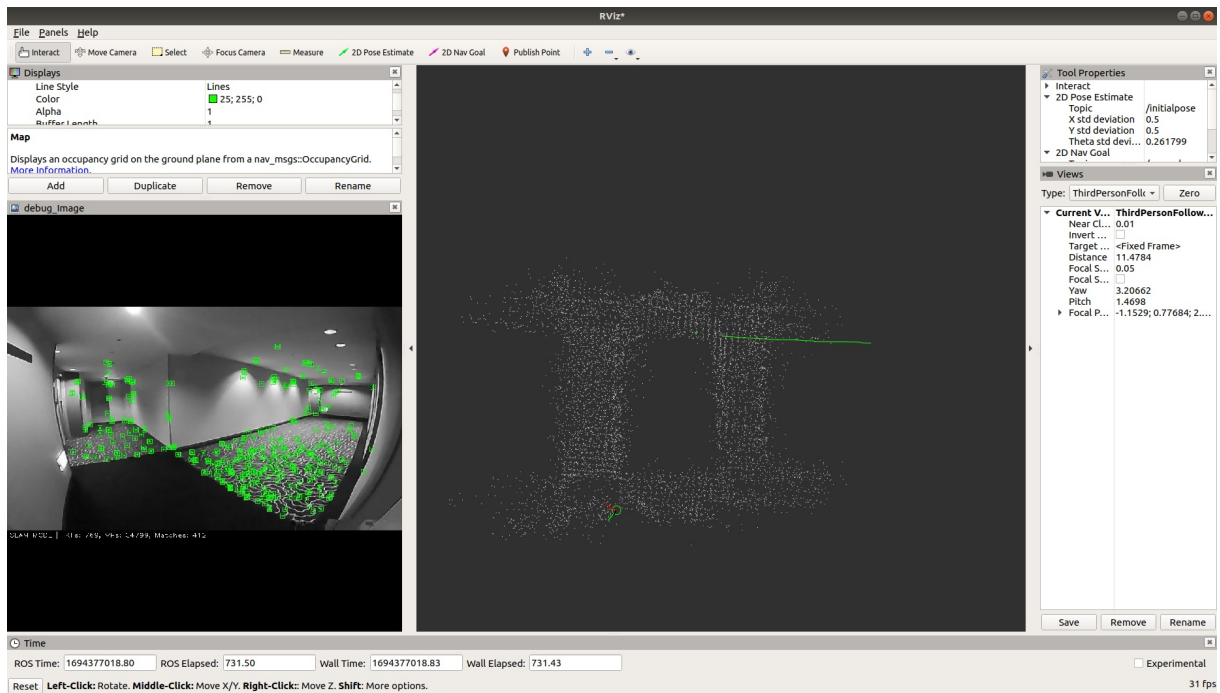


図 2. VSLAM の動作例

予備評価から、以下の知見が得られた。

- ・ VSLAM により実施設の屋内環境マップ生成は可能であり、また屋内の案内に必要となる cm レベルの位置推定精度を有している。
- ・ 屋内には対称で均一な施設など、類似した景観を持つ環境が発生しやすく、ループクロージャ誤認識によるマップ不整合や位置推定の飛びを招きやすい。このため、センサフュージョンなどによる補助が不可欠となる。
- ・ 屋内ナビゲーション用途では取り回しやすくバッテリーの持ちが長い、コンパクトなシステム構成が重要である。

開発したシステム

3.1 システム概要

予備評価の知見をもとに、システムを全面的に刷新した。主な改良は四点である。

第一に、キャップ搭載カメラとスマートグラスを組み合わせたウェアラブル構成へ移行し、フォームファクタを小型化した。第二に、マイクロジンバルの導入による画像安定化、屋内光条件に合わせた ORB-SLAM2 パラメータ調整、および対称・類似空間でのループクロージャ誤認識を排除するカスタマイズにより、小型カメラによる VSLAM 精度を確保した。第三に、スマートグラスのステレオスピーカーを用いた立体音響による経路誘導を採用した。経路上のユーザの少し先に仮想音源を配置し、音が聞こえる方向として進行方向を直観的に伝える。振動と音声メッセージを加えた 3 チャンネル構成により、恒常的な方向提示と曲がり角案内などのイベント通知を両立する。第四に、VSLAM と IMU のセンサフュージョンにより、頭部回転時の音源定位の即時追従と、VSLAM ロスト時も方向提示を継続できる構成を実現した。

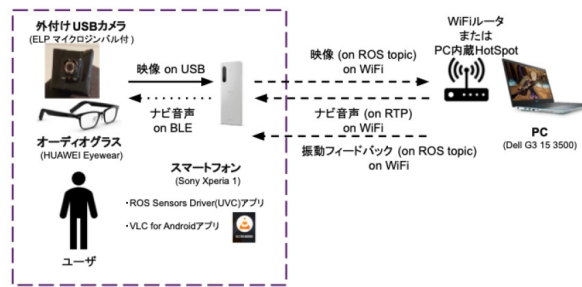


図 3. システム構成図

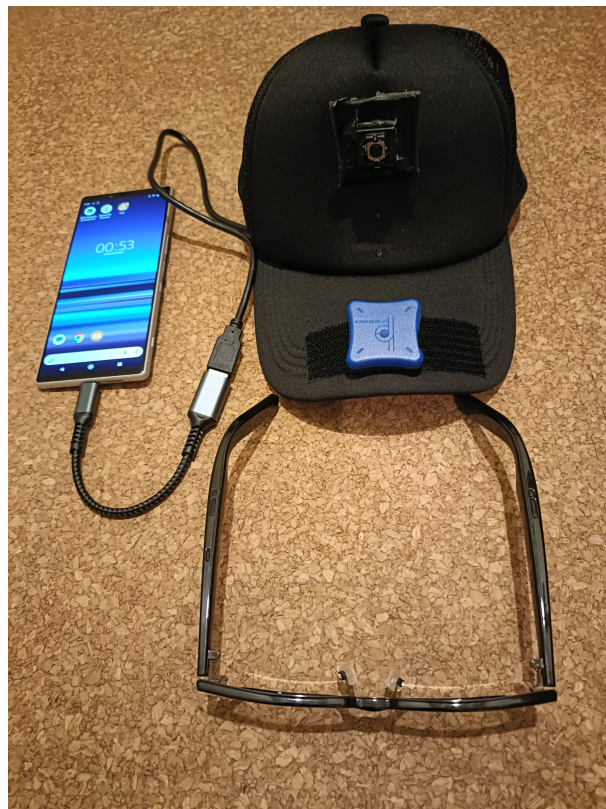


図 4. プロトタイプシステムの装着構成

3.2 ハードウェア構成・ソフトウェア構成

本システムを構成する機器の一覧を図 5 に示す。

構成要素	機器名	主な役割
処理用PC	Dell G3 15 (Ubuntu 18.04)	VSLAM処理、経路計画、音響制御
スマートフォン	Sony Xperia 1	センサデータ中継、カメラ映像転送
カメラ	ELP 4KCAMC5AF (マイクロジンノール付き)	映像取得 (VSLAM用)
IMUセンサー	LPMS-B2 (Bluetooth)	頭部方位取得
スマートグラス	HUAWEI Eyewear	立体音響出力

本システムのソフトウェアは ROS melodic 上に構築されており、主要な処理ノードと図 6 に示す。ROS ノードの結合の様子を図 7 に示す。

ノード名	ベース	役割
orb_slam2_ros	ORB-SLAM2 (カスタマイズ版)	単眼カメラVSLAMによる自己位置推定
ROS Sensors Driver (UVC)	android_sensors_driver (カスタマイズ版)	Android端末のカメラ・センサデータ取得
move_base	ROS Navigation Stack	ウェイポイントに基づく経路計画
panorama_sender	自作	立体音響・振動・音声メッセージ制御
LPMS-B2 ROS node	自作	IMUセンサデータ取得・配信

[illegible]

ナビゲーションシステム使用のための施設ごとの準備としては、施設側への設備設置を必要とせず、マップ撮影→VSLAMによる点群地図の自動生成→コストマップ変換→ウェイポイント設定という手順で、可搬システム側のみで準備を完結できる。

3.3 ユーザインタフェース

開発システムは、装着したカメラによりユーザの現在位置を推定し、施設ごとに用意された歩行可能領域情報および施設位置情報から目的地までの経路をリアルタイムに生成しつづける。その経路情報を元にユーザに対して、経路方向少し先に仮想的な音源を配置し、そこから聞こえる音をステレオスピーカーで通知する。このことから、ユーザは自由な歩行をしつつ、音の聞こえる方向へ歩くことで目的地へ向かうことができる。音に従うことで、通路に対してまっすぐ歩くこと、曲がり角などでつぎの方向へ正しく向かうことが可能となる。経路上にウェイポイントを設定することで、「まもなくウェイポイントです、次は左に曲がります」などの音声ガイドを併用することができる。

3つの情報提示チャネルの仕様を図8に示す。音声メッセージは曲がり角案内や到着通知のほか、VSLAMが10秒以上ロストした場合や後退・停止時にも通知を再生し、状況認識を補助する。

図8 情報提示チャネルの構成

チャネル	出力デバイス	提示内容	提示の性質
立体音響	スマートグラス	進行方向の定位、距離に応じた周波数・音量変化	恒常的
振動	スマートフォン	経路方向との一致度（周期変化）	恒常的
音声メッセージ	スマートグラス	曲がり角案内、通過通知、到着通知、ロスト通知	イベント時

図8. 情報提示チャネルの構成

3.4 VR 評価環境

実施での検証には施設側との調整や当事者の移動負担など多くの制約があることから、VRSNS(VRChat)上にナビゲーション体験・評価環境を構築した。UIパラメータ（スフィア半径、ウェイポイント判定距離等）をリアルタイムに変更・比較できる検証環境であるとともに、当事者や支援者がインターネット経由で任意の時間に体験できる公開ワールドとして実装した。屋外の街路環境を再現した屋外ワールドと、旅館の廊下・曲がり角を含む旅館ワールドの2種類を構築した。立体音響ナビゲーションはVR空間内のHeadSphereにより再現し、バーチャル白杖、壁衝突カウント、パラメータ調整スライダーなどの評価機能を備える。コンセプト設計は本研究チームが行い、VRChatワールドの実装をTAILWAYと共同で進めた。



図 9. VR ワールドのスクリーンショット（上：屋外ワールド、下：旅館ワールド）

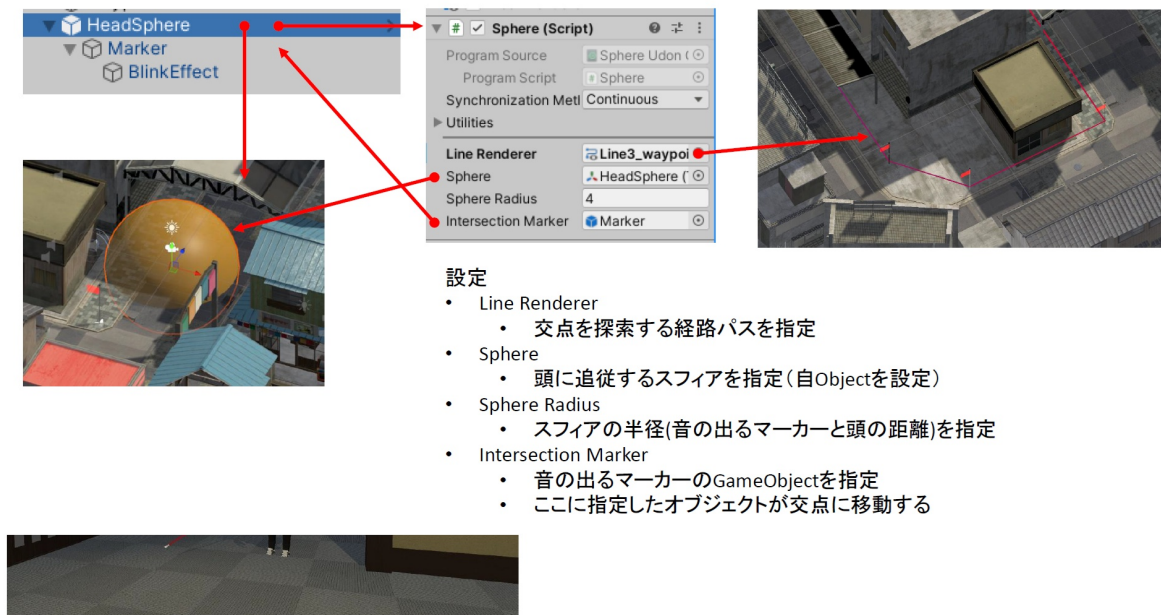


図 10. HeadSphere 実装

結果および考察

4.1 当事者による動作評価

今回の提案システムを実装したプロトタイプシステムを開発し、東京大学工学部 2 号館 11 階においてシステムを装着して歩行試験を行った。参加者は全盲の視覚障害当事者 1 名であり、エレベータホールを起点として 11

階全域を反時計回りに一周するルートを設定し、システムの案内に従って目的地まで歩行するタスクを行った。図 11 に実験場所のライダー計測による点群を示す。歩行後にヒアリングを実施し、使用感に関するフィードバックを得た。

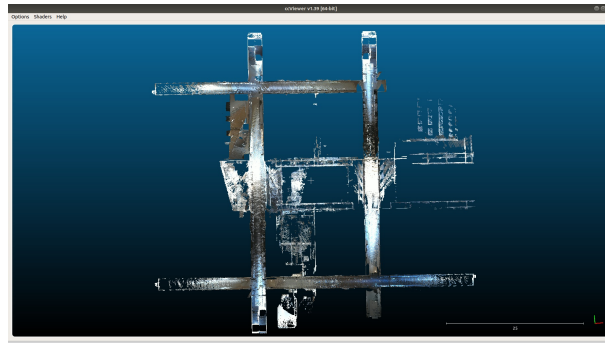


図 11. 実機試験場所のライダー計測点群

歩行タスクは2回実施し、いずれの試行においても目的地までの到達を確認した。ただし、特定の曲がり角において VSLAM が長時間ロストし、ユーザが経路を通り過ぎてしまう事象が発生することがあった。この際には、通り過ぎたことを口頭で伝えたうえでユーザが振り向くことにより VSLAM が回復し、正しい経路誘導が再開されて曲がり角で正しい方向を向くことができた。ロストの原因は当該地点における逆光であった。

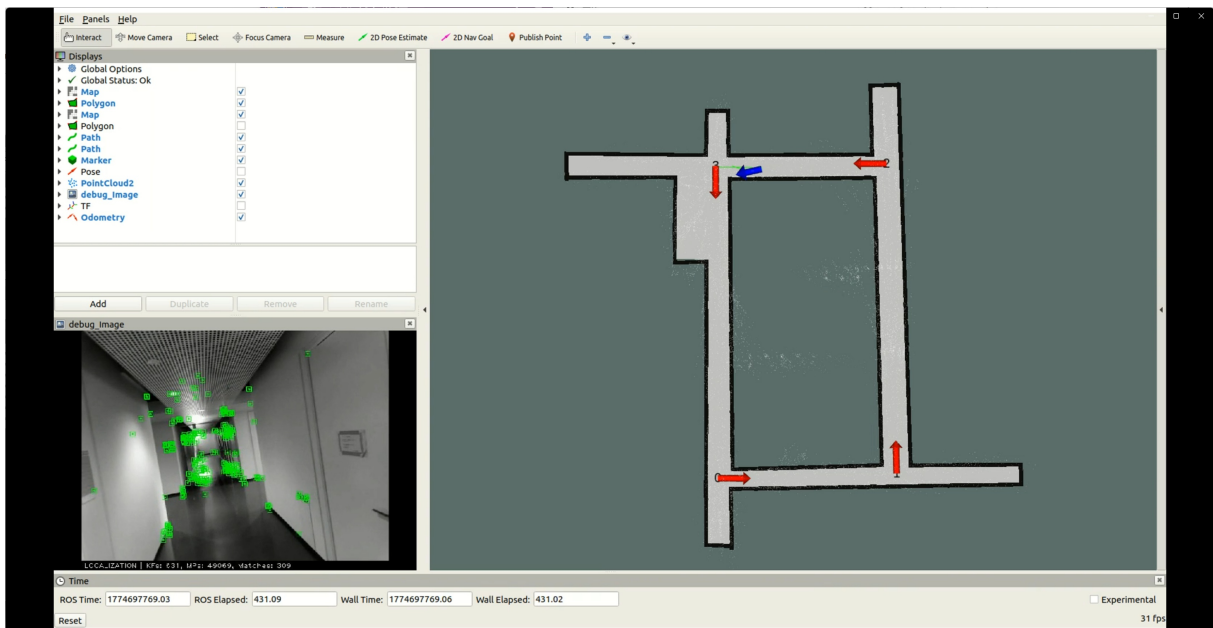


図 12. 歩行試験中のシステム動作画面（左：カメラ映像、右：ナビゲーションマップ）

立体音響による方向提示については、左右の方向感が自然に把握できるとの評価を得た。曲がり角ですぐに次の進行方向へ向き直る動作も確認された。通知音については周囲の環境音を阻害しないとの所見が示され、曲がり角の案内やウェイポイント通過の通知が適切との評価を得た。システム全体について、室内での移動案内には依然として需要があること、建物側の設備設置を必要としないカメラベースの手法は現実的で普及が期待できるとの感想を得た。装着感については特に問題点の指摘はなく、キャップとスマートグラスによる装着形態が違和感の少ない水準にあることが示唆された。

4.2 VR 評価環境による開発者試験

VRChat 上に構築した VR 評価環境を用いて、開発者による動作確認を実施した。屋外ワールドおよび旅館ワールドにおいて立体音響ナビゲーションを検証した結果、音源定位による方向提示が歩行誘導として直感的に機能することを確認した。また、視界暗転モードを用いた試験では、視覚情報を遮断した状態においても立体音響のみで目的地への到達が再現できることを確認した。これらの結果は、VR 環境が実システムのナビゲーション体験を有効に再現できていることを示している。

4.3 今後の課題と展望

本評価を通じて、提案システムが屋内通路環境において立体音響により視覚障害者を目的地まで誘導できることが確認された。特にスマートグラスによるコンパクト化と、これが可能とした音源の仮想的な定位による誘導方法は、提案システムを使いやすく改良する上で大きな効果が確認された。一方で、光環境の変化による VSLAM 精度の低下が課題として確認された。本研究で導入したセンサフュージョンやマップ作成時の異常検知など、VSLAM と他のアルゴリズムの補完をさらに進めていくことが方向と考えている。

VSLAM による位置推定と経路誘導は、認識が正常に行われている限り正確であり、大規模言語モデル (LLM) 等の AI のみに依存する場合に懸念される虚偽の情報生成の問題がないという利点がある。一方で、逆光のように認識が阻害される状況では柔軟な対応が難しく、ロストからの復帰が遅れるという課題が残る。VSLAM の正確な位置推定を基盤としつつ、ロスト時や想定外の状況においては AI との対話によりユーザーに状況を説明し、適切な行動を提案する仕組みを組み込むことで、ナビゲーション全体の信頼性を向上させることが今後有効な研究開発の方向性である。また、地図情報作成時における画像認識の活用は現システムに即時に組み込み可能である。現在のマップ生成手順ではウェイポイントの設定を手動で行っているが、マップ撮影時の映像に対して画像認識を適用することで、トイレ、エレベーター、案内板などの施設内設備の位置情報を自動的に地図に埋め込むことが可能である。これにより、新施設への展開にかかる準備作業が軽減されるとともに、より詳細な案内情報の提供が可能となる。

加えて、VR 評価環境が整備されたことにより、様々な体験・UI の研究を幅広く素早く行うことが可能となっている。これら本研究で得たノウハウ・アセットを土台に、屋内ナビゲーションの実用化は、技術的可能性のフェーズから、ユーザーの快適な使用感のフェーズへと課題の重心が移ってきたと考えている。

(完)

発表論文

- 1) 川本 岳史:「メガネ型デバイスを用いた視覚障害者の屋内ナビゲーションシステムの検討」, 東京大学工学部電子情報工学科卒業論文, 2024 年

引用文献

- 1) 坂本祐輝, 福田大翔, 内原正一, 門本淳一郎, 入江英嗣, and 坂井修一, “Vi-map: Visual SLAM と振動子を用いた視覚障害者の歩行支援システム,” in インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2022) 予稿集, 2022.