

LineChaser: 視覚障害者が列に並ぶためのスマートフォン型支援システム

栗林 雅希^{*†} 粥川 青汰^{*†} 高木 啓伸[‡] 浅川 智恵子[‡] 森島 繁生[§]

概要. 本研究は視覚障害者が列に並ぶ事を支援するシステム (*LineChaser*) を提案する. 列に並ぶ際は, 刻々と位置が変化する列の最後尾を発見し, 列の動きを検知して追従する必要があるが, どちらも視覚障害者には難しいタスクである. 本研究ではスマートフォン1台で視覚障害者を列の最後尾まで案内し, 列に追従できるように支援するシステムを開発した. 提案システムは列のできる場所の概形が記録された地図を使用し, 地図上における周囲の人物の位置をスマートフォンのRGBDカメラを用いて検出する. 検出結果に基づいて検出された人物が列に並んでいるかを判断し, 音声と振動を用いてユーザに列に並ぶための指示を与える. 12名の視覚障害者を対象にシステムの評価実験を行ったところ, 提案システムを用いることで全ての参加者が単独で列の最後尾の発見および列の追従が可能となり, 普段の体験と比較して列に並ぶ際の自信度も有意に向上した.

1 はじめに

空港やショッピングモールといった公共空間内では列に並ぶ機会が存在するが, 視覚障害者にとって単独で列に並ぶ事は困難である. 列に並ぶためには「列の最後尾の発見」および「列の追従」という2つのタスクが求められる. 列の最後尾の位置は刻々と変化するため, 周囲の人物が列にいらんでいるか否かを判断した上で最後尾へ移動する必要がある. また列を追従する際は, いつ, どの方向へ, どれだけの距離を進むべきかを判断する必要がある. 本研究で視覚障害者を対象に予備調査を行ったところ, これらの列に並ぶためのタスクを視覚障害者が白杖や盲導犬といった従来の歩行支援ツールを用いて1人で行うことは極めて難しいというコメントが得られた.

また予備調査では, 列に追従するタスクを支援するプロトタイプシステムを実装し, 評価実験を行った. プロトタイプシステムはスマートフォンに搭載されたRGBDカメラと物体検出手法 [7] を組み合わせることでユーザの前方に立つ人物との距離を計測し, 距離に基づいて進むべきタイミングを振動パターンを用いてユーザに伝える (図1). 実験の結果, プロトタイプシステムを使用したユーザが追従すべき最後尾の人物以外の人物を追従してしまう結果が確認され, 参加者からは前の人物との距離や方向を具体的に知りたいというコメントが得られた.

予備調査の結果を基に, 本研究は視覚障害者が列の最後尾を発見し, 列に追従できるように支援するスマートフォン型システム-*LineChaser* を提案する (図3). 提案システムは列ができる場所の概形

が記録された地図を事前に用意し, 用意した地図とARマーカを用いた自己位置推定結果を元に列の入り口まで案内する. その後地図に記録された列の概形に沿って案内し, 列の最後尾を目指す. その際提案手法は, RGBDカメラと物体検出手法 [7] を組み合わせることで周囲の人物の地図上における位置を検出することで, 検出された人物が列に並んでいるか, どの人物が列の最後尾か, を判断する. 列の追従時はカラーヒストグラムを用いて最後尾の人物をトラッキングし, その人物の位置情報に基づいて進むタイミングと方向および距離を音声と振動を用いて伝える.

本研究では12名の視覚障害者に対して, 提案システムを用いて直線および蛇行した列に並ぶタスクを与え, 提案システムの有用性を検証した. 実験から (1) 提案システムは視覚障害者に対して列の最後尾の発見および列の追従を可能にする, (2) ユーザは提案システムを用いることで自信を持って列に並ぶことができる, (3) ユーザは音声と振動を組み合わせた案内を有用に感じる, という知見が得られた.

2 関連研究

視覚障害者向け案内システムとして, スマートフォンと自己位置推定技術を用いて目的地までの経路を案内するシステムが提案されている [8, 2]. これらの研究はお店や施設などの固定された目的地までの案内を支援するが, 列の最後尾のように刻々と位置が変化する目的地までの案内に適用することは難しい. また, スマートフォンカメラとコンピュータビジョン技術を用いて周囲の様子をユーザに伝える視覚障害者支援システム¹も提案されている. しかしながら, これらの支援システムは検出された人物との距離や人物が列に並んでいるかといった列に

Copyright is held by the author(s).

* Authors contributed equally.

† 早稲田大学

‡ IBM Research

§ 早稲田大学理工学術院総合研究所

¹ <https://www.microsoft.com/en-us/seeing-ai>

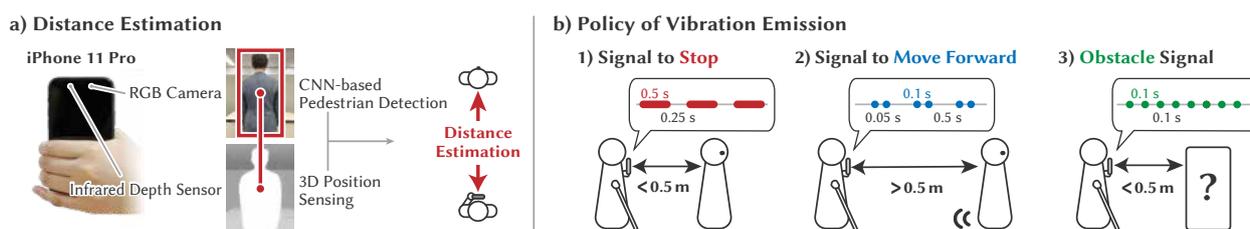


図 1. プロトタイプシステムの概要

並ぶために必要な情報を検出することができない。

周囲の人物の位置を検出し、視覚障害者と歩行者の衝突回避に利用するシステムも提案されている [3, 4]。しかしながら、視覚障害者が列に並ぶためには人物の位置情報に加えてその人物が列に並んでいるか、どの人物が列の最後尾かをシステムが判断する必要がある。また自律ロボット向けの技術として、列の先頭から列に沿って移動しながら人物を順番に検出することで列の最後尾を発見し、列に追従する手法が提案されている [6]。しかしながら、ロボット向けに提案された手法を用いて視覚障害者が列の最後尾を発見する場合、ユーザは人物を検出するために体の向きを頻繁に変える労力が必要となり、自分の位置を見失ってしまう危険性も生じる。

3 予備調査

本研究ではまず初めに 6 名の視覚障害者に対して、普段単独で列に並ぶ際の経験を聞き取る予備調査を行った。全ての参加者は過去に列の前の人物と衝突する、あるいは列が動いていたことに気づかなかった経験があると答えた。また、「駅やショッピングモールのようなうるさい場所だと列が進んだことを把握するのは難しい。たとえそれが分かってもどれくらい進めばいいのかわからない」、「蛇行の列に並ぶときはどの方向に進めばいいのかわからない」といったコメントが得られた。

また本研究では、列の追従を支援するプロトタイプシステムを実装し、予備調査に参加した視覚障害者からフィードバックを集めた。システムはスマートフォン (iPhone 11 Pro²) の RGBD カメラと物体検出手法 [7] を組み合わせて前方の人物との距離を計測し (図 1-a)、距離に基づいて進むべきタイミングを 3 種類の振動パターンを用いてユーザに伝える (図 1-b)。予備実験において参加者は直線の列の最後尾についた状態からシステムを用いて列に追従するタスクを行った。

実験の結果、参加者は 75% の成功率でプロトタイプシステムを用いて 1 人で列に追従できた。追従に失敗した要因として、システムが追従すべき最後尾の人物以外の人物を検出したためにユーザが誤った

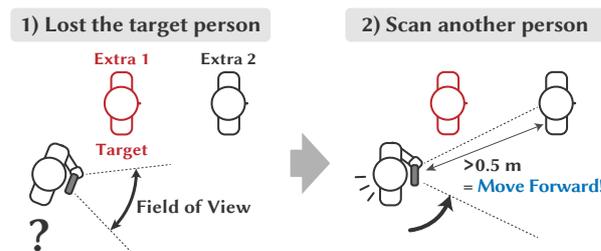


図 2. 追従に失敗した例

人物を追従した結果が確認された (図 2)。また実験後のインタビューから、列の人物との距離や方向などより詳細な情報を知りたい、というコメントが得られた。実験の詳細な結果は [5] を参照してほしい。

4 LineChaser の実装

4.1 自己位置推定

LineChaser は列ができる場所の概形 (列の入り口、終点、幅、曲がり角など) および自己位置推定で用いる AR マーカの位置が記録された地図を使用する (図 3, Setup)。本研究では、スマートフォンで 0.27m–0.74 m 程度の精度 [9] で自己位置推定が可能な ARKit を用いる。提案システムはスマートフォンのカメラで AR マーカを読み込み、ARKit を用いて地図上におけるユーザの自己位置推定を行う。

4.2 列の最後尾の発見および人物の位置検出

提案システムは自己位置推定結果を元に、ユーザを列の最後尾まで案内する。まず最初に提案システムはユーザを列の入り口まで案内する (図 3, Step1)。その後提案システムは、地図に記録された列に沿って最後尾の人物が見つかるまで歩くようにユーザに指示する。列に沿って歩く間、提案システムは周囲の人物検出および列に並んでいるか否かの判定を行うことで最後尾の人物を検出する。

具体的に提案手法はまず、スマートフォンに搭載された RGB カメラと深度センサを用いて人物の位置を検出する。RGB カメラと YOLOv3-tiny [7] を用いて人物検出を行い、検出された人物の矩形領域の中心部分と深度データを対応づけることで人物の位置を検出する。ユーザの自己位置推定結果と人物

² <https://www.apple.com/iphone-11-pro/>

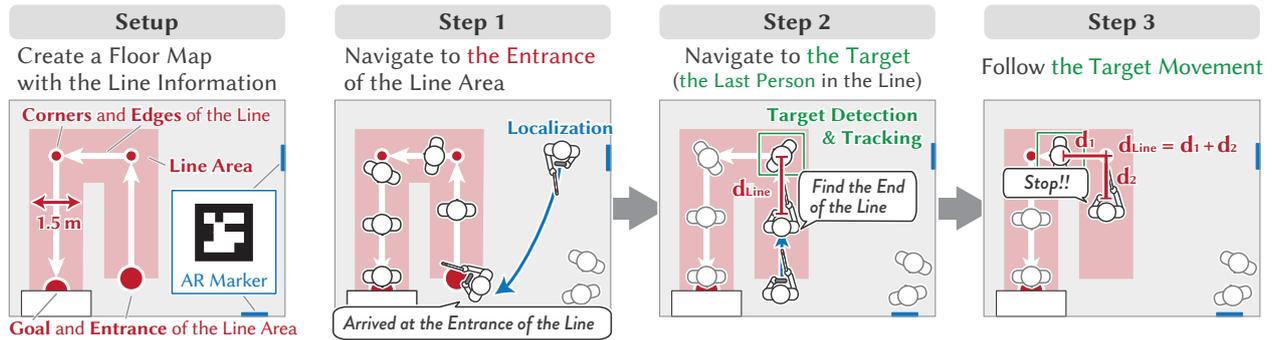


図 3. LineChaser の列に並ぶタスクの支援方法の概要

の位置検出結果を元に、地図上における人物の位置を推定し、列に並んでいるか否か、検出された人物の中でも列の一番後ろに立っている人物が誰なのかを推定する。列の最後尾と推定された人物との距離が2.5m以下になった時点でシステムはユーザが列の最後尾についたとみなし、続いて列に追従するタスクの支援を始める。

4.3 列の最後尾のトラッキングに基づく列の追従

人物の位置検出結果に基づいてLineChaserは検出人物のトラッキング [4] を行う。予備調査での失敗は、プロトタイプシステムが列に並ぶ人物の中から最後尾の人物を見分けられなかったことに起因する。そこでLineChaserは検出された人物のカラーヒストグラムに着目することで、最後尾の人物かそうでないかを区別する。これにより、最後尾の人物がカメラの画角に入らず、画角内の別の人物をシステムが検出した場合も最後尾以外の人物に追従することを防ぐことが可能となる。

具体的に提案手法はまず、最後尾の人物と推定された人物に対して検出された矩形領域の中心部分におけるカラーヒストグラムを取得する。さらに列追従時においても検出された人物に対して同様にヒストグラムを取得する。各検出人物のヒストグラムに対して列の最後尾発見時に取得した最後尾の人物のヒストグラムとのLab色空間におけるa空間とb空間のバタチャリア距離を計算し、閾値 $\gamma = 0.40$ 以下の人物を追従すべき人物として認識する。

LineChaserは追従すべき人物との列に沿った距離 d_{Line} を計算し(図3, Step3), $d_{Line} > d_0$ ではユーザに進むように、 $d_{Line} \leq d_0$ では止まるように指示する。本研究では実験時にソーシャルディスタンスを保つために $d_0 = 1.7\text{m}$ とした。

4.4 案内に使用するインターフェース

予備調査では振動のみでユーザに指示を与えたが、そこで得られたフィードバックを元に、LineChaserでは音声による指示と振動パターンを組み合わせた

インターフェースを採用する。

音声による指示は、「2時の方向、3m進め」というように、時計方向による方向の指示と具体的な距離の値を用いてどの方向へどれくらい進むべきかを骨伝導イヤホンを用いてユーザに伝える。ユーザが向くべき方向から 30° 以上ずれた方向を向いている場合、LineChaserは正しい方向を向くように指示を与える。また、ユーザの向きは正しいが、列から左右どちらかにはみ出している際は「2歩左へ」というように、左右にスライドするように伝える。

例としてLineChaserは以下のように音声による指示を与える：(1)案内開始時:「2時の方向、2.1m進め。」、(2)列の入り口到着時:「これから列に沿って進みます。」、(3)列の最後尾発見時:「列の最後尾を発見。止まれ。ターゲット(追従すべき人物)は1時の方向に1.5m。」、(4)列追従時:「ターゲットに向かって前方に1.4m進め。」、(5)列の先頭到着時:「列の先頭に到着。」

提案システムは2種類の振動パターンを用いてユーザに進むべきか止まるべきかを伝える。まず、弱く素早い振動をユーザが正しい方向を向いており進むべき時を知らせる振動として用いた。ユーザはこの振動を受け取る間は自分の向いている方向へ前進し、振動が止まった場合はその場で立ち止まって音声による指示に合わせて向きを調整する。また提案システムは、ユーザの0.5m以内に人物に限らず壁など何らかの障害物が存在する場合、緊急停止用信号として強く長い振動を発する。

5 評価実験

5.1 実験方法

LineChaserの有用性を検証するために12名の視覚障害者(年齢:23-58(平均43.8)歳,男性4名,女性8名)を対象に評価実験を行った。実験では直線もしくは蛇行した列の情報を記録した地図を用意し、そこに沿って2-4名が並ぶ列を用意した(図4)。本実験では感染予防の観点から、互いにソーシャルディスタンス(1.5m)を確保するように各人

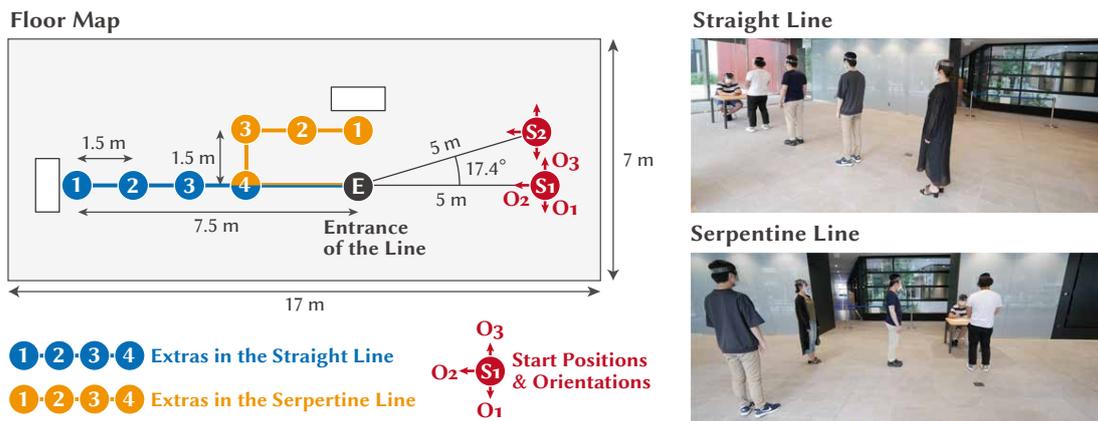


図 4. 評価実験の実験セットアップ概要

物を配置した。参加者はランダムに設定された開始位置（2種類の開始位置 S1, S2 および 3種類の開始方向 O1–O3）から、列の最後尾の発見および列の追従を行い、列の先頭にあるレジに見立てた机まで提案システムを用いて列に並びながら移動する。参加者が列を発見した後、列はランダムに 20, 40, 60 秒おきに 1 人ずつ進行させた。列の最後尾の位置が変わりうるという性質を実験の列でも反映させるために各試行において列に並ぶ人数を 2–4 名の 3 種類に設定し、各参加者は合計 6 回実験（直線 3 回、蛇行 3 回）を行った。参加者は右手に白杖、左手に提案システムを（ただし盲導犬ユーザの P11 は左手に盲導犬のハンドル、右手に提案システムを）持って移動した。また、人混みの環境を再現するために実験中は 60dB でスピーカーからショッピングモールの環境音を流し続けた。

5.2 実験手順と評価尺度

まず参加者に対して、普段単独で列に並ぶ際の自信度に関するアンケート（図 6, Q1–Q7）を 7 段階の評価軸（1: 全く同意しない, 7: 強く同意する）で回答する形で行った。その後、参加者に LineChaser の使い方の説明および練習を 30 分行った。

実験本番中は、追従すべき人物の周辺の領域を 0.5m 四方で区切り、参加者が列を発見した時および列が進行するたびに参加者がどの領域に立ち止まったかを記録した（図 5）。特に列の追従すべき人物の 1.5m 後方を中心とした 0.5m 四方の領域を Ideal Position, Ideal Position の周辺 1.5m 四方の領域を Acceptable Positions とした。

本番終了後、本番前と同様の質問事項を参加者に尋ね、提案システムを使うことで列に並ぶ際の自信度が変化したかを調査した。また参加者は、音声および振動の指示に関する主観評価アンケート項目（図 6, Q8, Q9）および system usability scale (SUS) [1] の質問項目に回答した。最後に参加者に対してインタビューを行い、システムの利点欠点を調査した。

6 結果

6.1 停止位置の分布

図 5 (a) に列発見時の停止位置の分布を示した。全ての参加者が Acceptable Positions の領域内で列を発見することに成功した。特に Ideal Position で列を発見した割合は 40.2% (72 回中 29 回) であった。

図 5 (b) に列追従時の停止位置の分布を示した。全ての参加者は全試行において列の先頭にあるレジまでたどり着いた。参加者は全試行の 90.9% (144 回中 131 回) の割合で Acceptable Positions 内で停止し、34.7% (144 回中 50 回) の割合で Ideal Position 内で停止した。しかしながら参加者が Acceptable Positions の外に立ち止まる機会が 13 回観測された。

Acceptable Positions の中に留まる事に失敗した 13 回は次の 4 つの理由に起因する：(1) P01, P08 と P09 は列が進むまでに身体の向きを修正できず、進むことができなかった、(2) P05 はシステムの使い方を理解できておらず、システムが進む指示を出しているのに進まなかった、(3) P12 はシステムの指示を聞かずに前進した、(4) システムの自己位置推定の誤差が蓄積した。(1) と (2) は Acceptable Position の後方で参加者が停止した 10 回の原因、(3) は追従すべき人物と 0.5m 以下の距離しか取らず真後ろについた原因である。追従すべき人物との距離が 1.7m 以下となり、提案システムは振動を停止していたが、P12 はそれに気づかず前進し続け、システムが発した緊急停止信号を受けて停止した。(4) は列の右側に参加者がずれた原因である。

6.2 主観評価結果

図 6 にアンケート結果を示した。列に並ぶ際の自信度に関して実験前（システムの支援なし）と実験後（支援あり）の結果についてウィルコクソンの符号順位検定（有意水準：1%）を用いて比較したところ、Q6 以外の全ての質問項目に対して実験後に結果が有意に改善された。音声と振動を用いた指示も

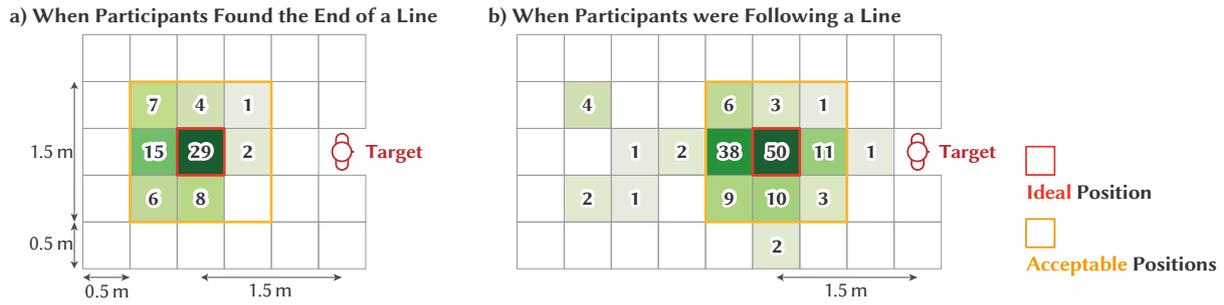


図 5. 列発見時及び追従時の停止位置の分布

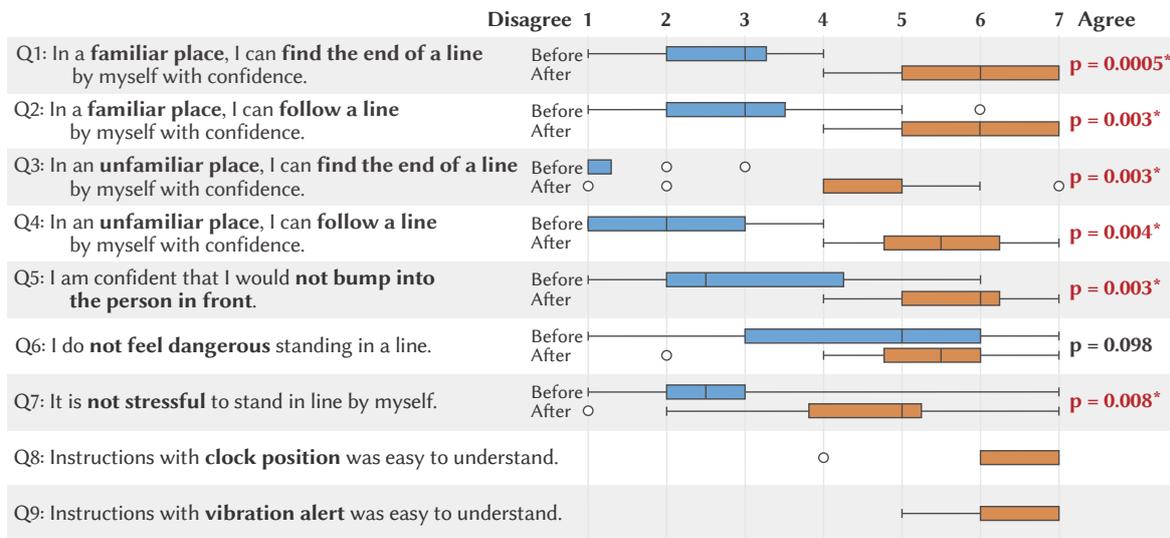


図 6. 実験前（システムの支援なし）と実験後（システムの支援あり）での列に並ぶことの自信についての質問事項の比較

参加者から高く評価され（Q8, Q9），SUS のスコアの平均と標準偏差は 82.9 ± 10.6 となった。

6.3 ユーザフィードバック

全ての参加者から，提案システムを使えば 1 人で列に並べるといったコメントが得られた：A1：「このシステムを使うと前の人と一定の距離を保つことができるため，使っているうちに白杖は必要無くなるのではないかと思った。普段列を見つける際には他人に尋ねていたが，このシステムは誰にも頼ることなく列に並ぶことができるため，このシステムは革命的だ。」（P06），A2：「周囲の人に触れることなく，列を発見できることは素晴らしい。また，前方にいる人に衝突する心配もなかった。」（P03）

また，盲導犬とシステムを併用した参加者は以下のようにコメントした：A3：「システムを使うことで列の発見と追従を両方できた。どちらも盲導犬ではできないことである。しかし，左にスライドさせる指示は，盲導犬はそのような動きはしないため盲導犬が非常に困惑していた。盲導犬を使っている以上

は前の人と衝突することはないと思うため，「進め/止まれ」の指示は不要で，周囲の人物の方向と距離を教えてくれるだけで十分だと思う。」（P11）

12 名中 9 名の参加者は音声と振動を組み合わせたインターフェースは使いやすかったとコメントした：A4：「音声で大まかに自分の向くべき方向と進むべき距離が分かり，振動を頼りに自分の進むべき方向を正確に合わせられた。」（P10）

半分の参加者が，スマートフォン 1 台で列に並ぶ支援を実現したことを高く評価した：A5：「たったスマートフォン 1 台で列にひとりで並ぶことができ嬉しかった。」（P09）一方で，7 名の参加者からはスマートフォンのカメラを用いることに関して否定的な意見が得られた：A6：「スマートフォンのカメラを他の人に向け続けることは抵抗がある。」（P03）

7 議論

7.1 LineChaser の有用性

予備調査から視覚障害者が単独で列に並ぶことは困難であることが確認されたが，LineChaser を使用

することで全ての参加者が単独で列の最後尾を発見し、列の動きを追従することができた。またユーザの主観評価においても、LineChaserのSUSスコア[1]の平均は82.9となり、提案システムを使うことで列に並ぶ際の自信度が有意に向上にした(図6)。

7.2 案内方法と訓練方法の改善

提案システムの案内方法は高く評価された一方で、改善の余地が存在する。例えば盲導犬ユーザ(P11)から左右にスライドさせる指示は盲導犬が混乱するというコメント(A3)が得られたように、ユーザが使用する歩行支援ツールによって最適な案内方法は変わりうる。また、実環境で移動する際に視覚障害者が使用するO&M(Orientation and Mobility)スキルやエコロケーションスキルによっても最適な案内方法は変わりうる。今後は実環境で様々な条件の列(より長い列や複数本の並行した列など)を対象に実験を行うことで、ユーザの特性ごとに実環境での使用に最適な案内方法をデザインしていきたい。

また今回の実験では、30分ほどの練習時間を確保したが、一部の参加者(P01, P08, P09とP12)はシステムに慣れていなかったため列に適切に追従できない場合があった。システムを普及させていく際はシステムの提案に加え、視覚障害者の歩行訓練(O&Mトレーニング)にどのように支援システムの訓練を組み込んでいくかも併せて検討する必要がある。

7.3 既存のナビゲーションシステムとの統合

本研究の最終的な目標は、LineChaserを既存のスマートフォンを用いた経路案内システム³[8]と統合し、実環境で列に並ぶタスクを支援することである。本研究ではARマーカを用いた自己位置推定技術を利用することで列に並ぶタスクをスマートフォン1台で支援できることを確認した。しかしながら、既存の経路案内システム[8]で用いられる自己位置推定技術は少なくとも1.5m以上の誤差が生じてしまい、列に並ぶタスクの支援に用いるための精度としては不十分である。今後はCV技術も利用した列の最後尾検出や自己位置推定手法の精度向上などに取り組みつつ、既存の経路案内システムとの統合を目指していきたい。

7.4 システムの社会受容性

参加者から提案システムがスマートフォン1台で完結している点を高く評価された(A5)反面、周囲にカメラを向ける動作は他人からの理解が得られない場合があるため抵抗があるというコメントも得られた(A6)。今後はスマートグラスなどのウェアラブルデバイスの使用を含め、社会受容性を損なわないシステムのデザインを検討していきたい。

8 まとめ

本研究は視覚障害者が列に並ぶためのスマートフォン型支援システム、LineChaserを提案した。提案システムはユーザの自己位置推定、周囲の歩行者の位置検出、列に並んでいる人物かの判断を行うことで、列の最後尾および列の動きの検出を行う。提案システムは検出結果に基づいて音声で進むべき方向と距離を、振動で進むべきか止まるべきかを伝える。評価実験の結果、提案システムを使うことで全ての参加者が単独で列の最後尾の発見および列の追従が可能となり、普段の体験と比較して列に並ぶ際の自信度も有意に向上した。また、ユーザは音声と振動を組み合わせた案内方法を高く評価した。今後の展望は実環境での実験を通してインターフェースの改善と既存の案内システムとの統合を目指していきたい。

謝辞

本研究は、JSPS科研費(JP20J23018)、早稲田大学理工学術院総合研究所若手研究者支援事業(アーリーバードプログラム)、JST未来社会創造事業(JPMJMI19B2)の助成を受けた。また研究をサポートしてくれたJoão Guerreiro, Asuka Hirata, Yoshiki Kubotaniに感謝する。

参考文献

- [1] J. Brooke, et al. SUS-A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry '96*, 189(194):4-7.
- [2] H.-E. Chen, et al. BlindNavi: A navigation app for the visually impaired smartphone user. In *CHI '15*, pp. 19-24.
- [3] J. Guerreiro, et al. CaBot: Designing and Evaluating an Autonomous Navigation Robot for Blind People. In *ASSETS '19*, pp. 68-82.
- [4] S. Kayukawa, et al. BBeep: A sonic collision avoidance system for blind travellers and nearby pedestrians. In *CHI '19*, pp. 1-12.
- [5] S. Kayukawa, et al. Smartphone-Based Assistance for Blind People to Stand in Lines. In *CHI EA '20*, pp. 1-8.
- [6] Y. Nakauchi, et al. A social robot that stands in line. *Autonomous Robots '02*, 12(3):313-324.
- [7] J. Redmon, et al. Yolov3: An incremental improvement. *arXiv '18*.
- [8] D. Sato, et al. NavCog3 in the wild: Large-scale blind indoor navigation assistant with semantic features. *ACM Transactions on Accessible Computing '19*, 12(3):1-30.
- [9] C. Yoon, et al. Leveraging Augmented Reality to Create Apps for People with Visual Disabilities: A Case Study in Indoor Navigation. In *ASSETS'19*, pp. 210-221.

³ <https://www.google.com/maps>