

Corridor-Walker: 視覚障害者が障害物を回避し交差点を認識するためのスマートフォン型屋内歩行支援システム

栗林 雅希* 粥川 青汰*† Jayakorn Vongkulbhisal‡ 浅川 智恵子‡ 佐藤 大介§
高木 啓伸‡ 森島 繁生¶

概要. 本研究では屋内の通路を歩く視覚障害者がスマートフォン1台を用いて障害物を回避し、交差点を認識するためのシステム、Corridor-Walkerを提案する。屋内の廊下を歩く視覚障害者は、自らの手や白杖の触覚だけを頼りに箱や椅子などの障害物を安全に回避し、曲がるべき交差点を発見する必要がある。提案システムはスマートフォンのLiDARセンサを用いた周囲の床領域の検出結果に基づいて地図を作成し、障害物を回避する経路の生成および交差点の位置と形状の検出を行う。提案システムは骨伝導イヤホンの左右からのピープ音、音声、振動シグナルを用いてユーザへ生成された経路に沿って歩くように指示し、検出された交差点の位置と形状を伝える。14名の視覚障害者を対象に評価実験を行った結果、提案システムを用いることでユーザは壁伝いに歩かずに障害物を回避し、目的の交差点でその形状を認識したうえで曲がることのできた。

1 はじめに

視覚障害者が病院やホテルなどの建物内の通路を歩く際に直面する困難として、障害物との衝突回避と交差点の把握の2つがある。視覚障害者が屋内の通路を壁伝いに歩こうとすると、消化器やゴミ箱などの壁沿いに配置された障害物と衝突する危険性がある[13]。そのため、視覚障害者は白杖の感覚を頼りに障害物を検出し、回避するための経路を自身で探索する必要がある[17]。また、視覚障害者は壁伝いに歩くことで通路の交差点を発見できるが、壁沿いの障害物を回避しなければいけない状況では曲がるべき交差点を通り過ぎてしまう可能性がある[8]。

そこで本研究は、屋内の通路を歩く視覚障害者に障害物を回避する経路と交差点の位置および形状を案内するスマートフォン型支援システム(Corridor-Walker)を提案する。壁沿いに配置された障害物を回避するため、システムは周囲の壁や障害物と一定の距離を確保する経路を生成し、ユーザが経路からずれること(ベアリング[veering]と呼ぶ)が無いようにその経路に沿って案内する。前方に障害物が現れた場合はその障害物を迂回するような経路を生成する。また、システムはユーザが交差点を通り過ぎないように交差点の位置を事前に伝え、曲がるべき交差点かを確認するためにその形状も伝える。システムはiPhone 12 ProのLiDARセンサを用いた周囲の床領域の検出と占有格子地図の作成、および

A*経路計画アルゴリズム[10]を用いた障害物を回避する経路の生成をリアルタイムに行う。同時にシステムは占有格子地図の画像と物体検出手法[23]を組み合わせることで交差点の位置と形状を検出する。

本研究では14名の全盲の視覚障害者を対象にシステムの評価実験を行った。実験では交差点を曲がるタスク、複数の障害物が配置された真っすぐな通路を歩行するタスク、複数の交差点と障害物が存在する通路を歩行するタスクの3種類のタスクを行い、それぞれにおいて、システムと白杖を併用した時と白杖のみを使用した時でタスク完了時間、交差点形状の正答率、白杖と壁や障害物との接触回数を比較した。実験から、システムを併用することで白杖のみを使った時と比較して、1)タスク完了時間が伸びたもののユーザはスムーズに障害物回避と歩く方向の修正ができたことと評価したこと、2)壁や障害物と白杖の接触回数が減少したこと、3)ユーザは交差点の形状をより正確に把握できたことを確認した。

2 関連研究

視覚障害者向け屋内歩行支援システムとして、事前に地図の準備が必要なもの[9, 15, 18, 25]と必要としないもの[4, 14, 21]が存在する。地図を用いるシステムでは、地図情報とユーザの自己位置推定結果を基に交差点の情報の案内[18, 25]、また地図情報とセンサを用いたリアルタイムセンシング結果を基に障害物を回避する経路を生成、案内[9, 15, 18]が可能となる反面、多くの建物では地図が用意されていない問題点がある[26]。またこれまで提案されてきた地図を必要としない歩行支援システム[4, 14, 21]は障害物回避を主目的としており、交差点の認識を

* 早稲田大学

† 日本科学未来館

‡ IBM Research

§ Carnegie Mellon University

¶ 早稲田大学理工学術院総合研究所

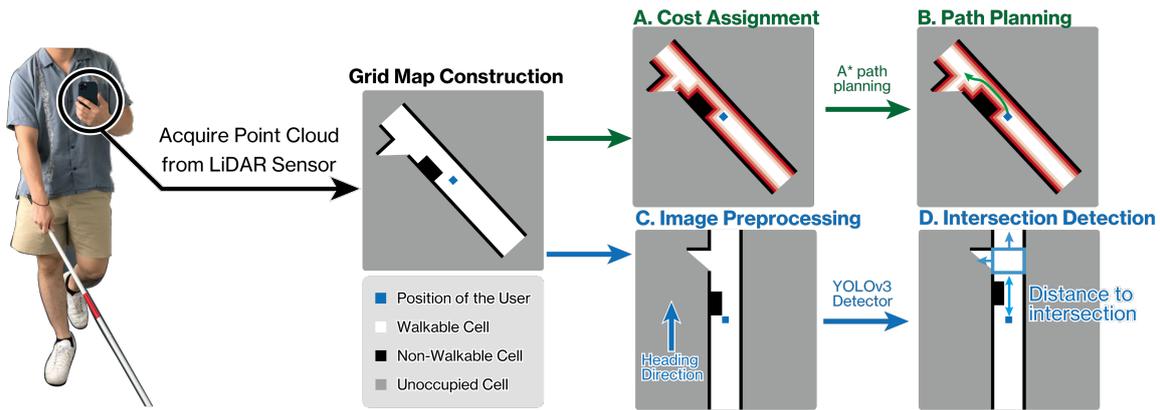


図 1. システムの実装の概要図.

支援するシステムは提案されていない。そこで本研究では、事前に地図の準備を必要としない、障害物回避と交差点検出の実現を目指す。

障害物の回避を目的として、障害物の位置や種類などをユーザへ伝えるシステム [2, 22] が提案されてきたが、これらはシステムからの指示を基にユーザ自身が障害物を回避する経路を設計する必要があり、ユーザ側の負担が大きくなる。そのため、障害物を回避する経路をシステムが生成しユーザに提示するシステムが研究されている [9, 15, 17, 18, 21]。しかしながらこれらのシステムはウェアラブルデバイス [17, 18, 21, 28]、スーツケース型デバイス [15]、ロボット [9] などを必要とする必要がある、システムを普及させる面で課題がある [12]。そこで本研究は、多くの視覚障害者が使用しているスマートフォン [19] 1台のみを用いて、障害物を回避する経路に沿ってユーザを案内するシステムを提案する。

屋内の交差点検出手法としてロボティクス分野ではレーザセンサを用いた手法 [16, 27] が提案されているが、これらの手法は周囲 180 度をスキャンするレーザセンサを必要とするため、スマートフォンに搭載された画角の狭い LiDAR センサから交差点を検出することは難しい。また、ロボットに固定された RGB カメラを使用する手法も提案されているが [1, 6, 7]、歩行中の視覚障害者が撮影する画像はモーションブラーがかかっている可能性があるため [24]、交差点を撮影した画像から直接交差点を検出することは難しい。そこで提案システムは、スマートフォンの LiDAR センサを用いて周囲の地図を作成し、その地図に対して交差点検出を行う。

3 Corridor-Walker の実装

本研究では屋内の通路において視覚障害者が障害物を回避し交差点を認識するためのシステムを提案する。システムは、1) 病院やホテルのような道幅が 1.5m から 3.5m 程度の通路、2) ユーザは目的地に行くために交差点を曲がる回数が分かっている、と

いう状況での支援を想定している。

3.1 占有格子地図と経路計画

本研究では、ロボティクス分野で広く使われているコストマップを用いた経路計画アルゴリズム [20] を参考に、スマートフォンの LiDAR センサデータから障害物を回避する経路を生成するシステムを実装した。システムはまず、スマートフォンの LiDAR センサから三次元点群を取得し、各点の法線ベクトルを計算する [11]。次に、平面検出アルゴリズム (RANSAC) [5] を用いて床面の高さを計算し、取得した点群の各点において、高さが床面から閾値 ϵ m 以内かつその法線ベクトルが重力加速度ベクトルと平行な点を全て “walkable”，そうでないものを “non-walkable” として分類する。一辺 ω m の占有格子地図上において各点がどの格子 (ピクセル) に属するかを計算し、各点の分類結果に基づいて格子を walkable cell (図 1 の白いピクセル)、non-walkable cell (黒) あるいは未占有 (灰色) に分類する。

次に、システムは周囲の壁や障害物から一定の距離を確保した経路を生成するために、占有格子地図と同じサイズで各ピクセルにコストを割り当てたコストマップを作成し (図 1-A) [20]、コスト最小の経路を計画する (図 1-B)。各 walkable cell i に割り当てられるコスト $cost_i$ は以下のように定義する。

$$cost_i = \begin{cases} \beta(1 - \frac{\delta_i - 1}{\alpha}), & 1 \leq \delta_i \leq \alpha, \\ 0, & \delta_i > \alpha. \end{cases} \quad (1)$$

δ_i は walkable cell から最も近い non-walkable cell とのピクセル距離、 α は walkable cell が正のコストを持つ上限のピクセル距離、 β は割り当てられるコストの最大値である。壁および障害物の判定精度やスマートフォン上での実行速度を考慮し $\epsilon = 0.1$, $\omega = 0.15$, $\alpha = 3$, $\beta = 50$ として実装した。

システムはコストマップを基に、スマートフォンが向いている方向 3.5m 先の通路の中央を目的地と

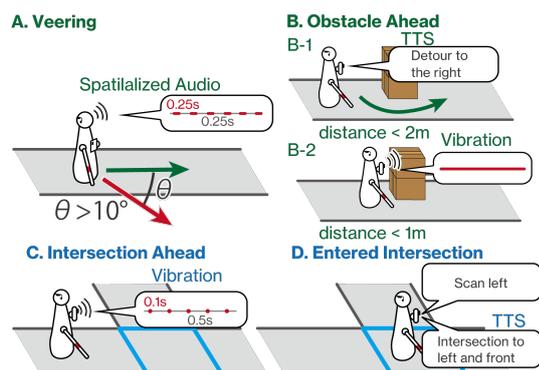


図 2. システムのインターフェースの概要図.

して障害物を避ける経路を A*経路計画アルゴリズム [10] を用いて生成する. ユーザが歩行中, システムは常に前方に障害物があるかを判断する. 具体的にはまず, 作成した占有格子地図の non-walkable cell において壁に属している cell を RANSAC アルゴリズム [5] を用いて検出する. システムの前方, 扇形 (中心角 30° , 半径 $2m$) の範囲に, 壁に属しなかった non-walkable cell の個数が 30%以上含まれる場合, 前方に障害物があると判断する. システムは障害物を検出した場合もしくはユーザが経路の半分を歩いた場合に新しい経路を計画しなおす.

3.2 交差点検出

システムは占有格子地図の画像を入力として物体検出手法 (YOLOv3[23]) を用いて交差点の検出を行う. 占有格子地図は交差点を検出の際に必要な前後左右の情報を持たない. そのため, 前処理として現在から 2 秒前までのユーザの平均位置と 2 秒前から 4 秒前までのユーザの平均位置を結んだベクトルをユーザの進行方向として計算し, その方向と画像の上方向が一致するように占有格子地図を回転させ, ユーザの位置が画像中央に位置するように画像変換を施す (図 1-C). 本研究では交差点検出モデルを学習させるために, 前処理された交差点の占有格子地図の画像を集め, アノテーションおよびモデルの学習を行った. アノテーション時は交差点領域を示す矩形 (図 1-D の青い四角形) および, 交差点から伸びる通路の方向を全て列挙したラベルを付与した. 例えば図 1-D に示した交差点の場合は「Left, Front, Back」のラベルを与えた. ラベルの組み合わせは全部で 9 通りである. またシステムでは, 矩形領域の底辺とユーザの距離をユーザから交差点までの距離と定義する (図 1-D). また, 矩形領域がユーザの位置を内包する場合, ユーザは交差点内部にいると判断する. 学習させた交差点検出モデルを 1215 枚のデータを用いて評価したところ, ユーザから $2.25m$ 先にある交差点は F 値 0.95 , $3.25m$ 先にある交差点は F 値 0.63 の精度で検出できた.

今回学習させた交差点検出モデルは, 屋内の通路にある壁の窪みを交差点と誤認識してしまう可能性があるため, システムはユーザが交差点に入った際に検出された交差点が本当に交差点かを確認する. 具体的には占有格子地図において, 検出された交差点から右, 左または前方へ $1.5m$ 以上離れた場所に walkable cell が存在している場合, 提案手法はその方向に通路が伸びていると確定する.

3.3 インタフェース

システムは骨伝導イヤホンのピープ音および音声とスマートフォンの振動を用いて生成された経路に沿って歩くようにユーザを案内する. ユーザがベアリングしている間はユーザが向くべき方向から 0.25 秒間隔のピープ音 ($400Hz$ のサイン波) が鳴り, ユーザが正しい方向を向くとピープ音が鳴り止む. 例えば, ユーザが進むべき方向より右に向いている場合には, 左側の骨伝導イヤホンからピープ音を鳴らすことで, ユーザへ左を向くように促す (図 2-A). ベアリングの判定基準はスマートフォンの向きが目的方向よりも 10° 以上ずれたこととした.

ユーザの前方 $2m$ 以内に障害物が検出された場合は迂回すべき方向を指示する. 例えば, ユーザの進行方向左側に障害物が検出された場合には「右迂回開始」と指示する (図 2-B-1). ユーザ前方 $1m$ 以内に壁を含む障害物が検出された場合は, 緊急停止シグナルとしてスマートフォンが強く長く振動する (図 2-B-2).

前方に交差点が検出された場合は, スマートフォンが周期的に振動することによって交差点が近いことを伝える (図 2-C). ユーザが交差点に入った際は, 交差点の曲がりうる方向をスキャンするように音声を用いて指示する. スキャンの結果実際に通路が伸びていることをシステムが確認できた場合, システムは交差点の形状を音声を用いて伝える (図 2-D).

4 評価実験

4.1 実験方法

Corridor-Walker の有用性を検証するために 14 名の全盲の視覚障害者 (年齢: $21-71$ (平均 43.9) 歳, 男性 5 名, 女性 9 名) を対象に評価実験を行った. 最初に参加者へシステムの使い方の説明および練習を 30 分行った後, 本番タスクで白杖のみを使った場合と白杖とシステムを併用した場合の 2 つのコンディションを比較した. システムの交差点検出機能と障害物回避機能を評価するために本番タスクでは, 1) 交差点 (図 3 の 4 種類の交差点) を事前に指示された方向へ曲がるタスク, 2) 複数の障害物が配置された直線の通路 (図 4 のルート 2-1 とルート 2-2) において歩行するタスク, 3) 複数の障害物および交差点を含んだ $40m$ 程のルート (図 5 のルー

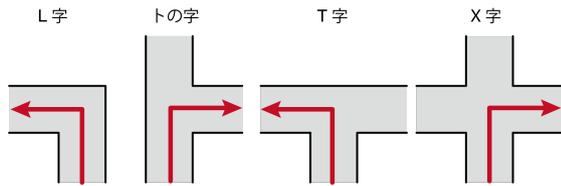


図 3. タスク 1 の交差点.

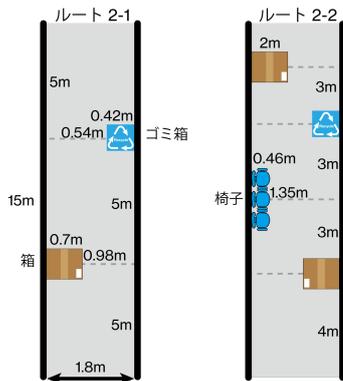


図 4. タスク 2 の通路と障害物の配置.

ト 3-1 とルート 3-2) を歩行するタスク, の 3 種類のタスクを行った. 最初の 7 名の参加者 (P01-07) は図 3-図 5 に示した交差点および通路を白杖のみで歩行し, 図 3-図 5 を左右反転した交差点および通路をシステムを併用して歩行した. 残りの 7 名の参加者 (P08-14) は図 3-図 5 の交差点および通路をシステムを併用して歩行し, 図 3-図 5 を左右反転した交差点および通路を白杖のみで歩行した.

4.2 評価指標

全てのタスクでタスク完了時間を測定した. タスク 1 では交差点の 4m 手前から 1m 後の区間を歩く時間を測定し, タスク 2 とタスク 3 ではルート開始地点から終了地点の間を歩く時間を測定した. 参加者が交差点の形状を把握したうえで曲がれたかを評価するために, タスク 1 では参加者に交差点を曲がった後にその交差点の形状を答えてもらい, その正答率を計算した. また, 全てのタスクにおいて障害物を回避し, 壁伝いに歩かずに歩行できているかを評価するために白杖と壁および障害物との接触回数を数え, システムを評価した. 本番終了後, システムと白杖を比較するために参加者はそれぞれに関して 7 段階 (1: 全く同意しない, 7: 強く同意する) の主観評価項目 (図 6, Q1-6) に回答した.

5 結果

5.1 タスク完了時間

タスク 1 で各交差点を歩くのにかかった時間は, 白杖のみで平均 9.3 秒, システム併用では 15.4 秒で

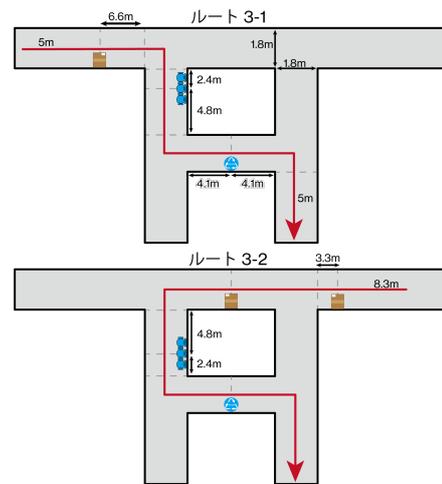


図 5. タスク 3 の通路と障害物の配置.

あった. タスク 2 のルート 2-1 では, 白杖のみで平均 18.6 秒, システム併用で 23.5 秒, ルート 2-2 では, 白杖のみで 20.9 秒, システム併用で 28.5 秒かかった. タスク 3 のルート 3-1 では, 白杖のみで平均 50.7 秒, システム併用で 69.3 秒, ルート 3-2 では, 白杖のみで 63.0 秒, システム併用で 85.7 秒かかった. Mann-Whitney の U 検定 (有意水準 1%) を用いて白杖のみの場合とシステムを併用した場合を比較したところ, 全てのタスクにおいてシステムを併用した方が有意に時間がかかるという結果が得られた. これはシステム併用時にユーザがシステムの指示の確認や自身の歩く方向の修正に時間がかかることが原因として考えられる.

5.2 交差点の形状の正答率

交差点の形状の正答率は, 白杖のみを使用した時は 30.4%, システムを併用した時は 83.9% だった. システムを併用した際に誤回答した回数は合計 9 回 (L 字の交差点で 1 回, T 字で 1 回, X 字で 7 回) であり, 理由は以下の 3 つに起因する: 1) システムは交差点の形状を正しく伝えたが, ユーザがシステムのフィードバックに集中していなかったため, 誤った形状を答えた (5 回). 2) ユーザがスマートフォンを安定して持つことが出来ず, 占有格子地図の構築が不十分であったため, システムが交差点の形状を誤認識した (1 回). 3) システムは X 字の交差点を正しく検出し, 左右両方をスキャンするように指示したが, ユーザは曲がるべき方向のみをスキャンしたため, システムがトの字の交差点と誤認識した (3 回). また, 白杖のみを用いた時に交差点を気付かずに通り返ってしまう現象が 3 回見られた.

5.3 白杖と壁および障害物との接触回数

表 1 に各タスクにおける白杖と壁および障害物との接触回数を示した. Mann-Whitney の U 検定を

Corridor-Walker: 視覚障害者が障害物を回避し交差点を認識するためのスマートフォン型屋内歩行支援システム

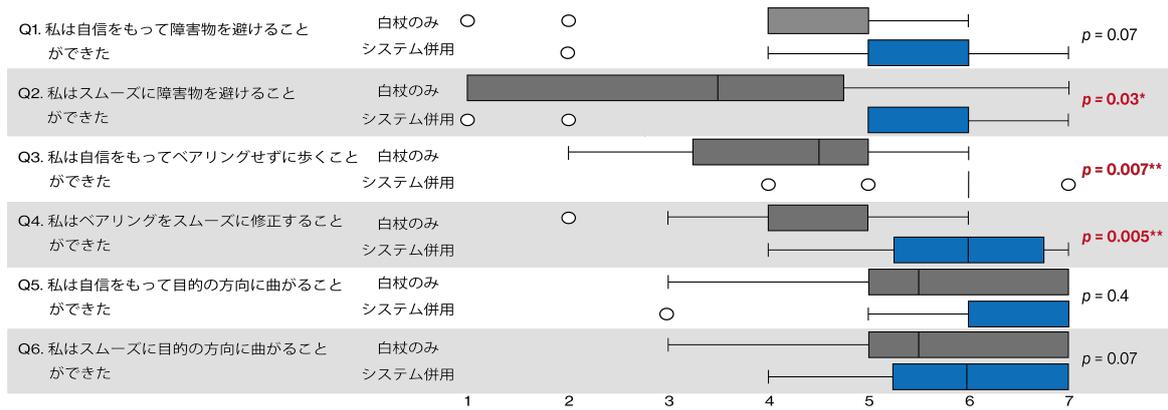


図 6. 白杖のみを用いた場合とシステムを併用した場合を比較した質問項目. *は有意水準 5%, **は有意水準 1%で認められた有意差を示す.

表 1. 白杖と壁および障害物との接触回数の詳細. *は有意水準 5%, **は有意水準 1%で認められた有意差を示す.

タスク	コンディション	接触対象	接触回数 (白杖のみ)		接触回数 (システム併用)		p 値
			平均 ± 標準偏差	中央値	平均 ± 標準偏差	中央値	
1	L 字	壁	3.86±2.35	4.5	0.14±0.36	0	0.00007**
		壁	3.57±2.31	4	0.29±0.47	0	0.0003**
		壁	3.42±2.28	4.5	0.14±0.36	0	0.0001**
		壁	3.71±2.20	4.5	0.14±0.36	0	0.00007**
2	ルート 2-1	障害物	1.28±0.73	1	0.50±0.52	0.5	0.0004**
		壁	3.14±3.61	1.5	0.57±0.94	0	0.04*
	ルート 2-2	障害物	2.21±1.42	2.5	1.35±1.00	1	0.1
		壁	1.86±3.18	0.5	0.62±1.01	0	0.4
3	ルート 3-1	障害物	3.07±1.49	3.5	1.28±1.32	1	0.005**
		壁	12.21±9.67	10.5	1.07±1.27	1	0.0002**
	ルート 3-2	障害物	3.71±2.34	3.5	0.85±1.29	0	0.0009**
		壁	15.21±12.75	14	1.43±2.10	0	0.0008**

用いて白杖のみを用いた場合とシステムを併用した場合を比較したところ、タスク 2 のルート 2-2 以外ではシステム併用時に白杖と壁および障害物との接触回数が有意に減少した。ルート 2-2 では障害物が互いにわずか 3m しか離れていなかったため (図 4)、他のタスクと比べ難しかったことが原因だと考えられる。表 1 の壁との接触回数の結果から、システムを併用することで参加者は壁伝いに歩かずに通路を移動できたことが分かった。

5.4 主観評価結果

図 6 に主観評価結果を示した。システムの各機能について、白杖のみを使用した時 (only cane) とシステムを併用した時 (system) を Wilcoxon の符号順位検定 (有意水準 5%) を用いて比較したところ、Q2-4 において有意差が認められた。

5.5 ユーザフィードバック

インタビューを通して、参加者それぞれがシステムの異なる側面を評価していることが判明した。12

名の参加者は障害物回避機能を評価し、以下のようなコメントが得られた: A1 「迂回シグナルでスムーズに障害物を回避できた。白杖を使わなくても通路を歩ける安心感があった。」 (P05), A2 「指示を聞くためにゆっくり歩く必要があったが、障害物を回避出来て嬉しい。」 (P01) 特に 9 名は以下のように、システムが生成した経路に沿ってベアリングせずに歩くように支援する機能を評価した: A3 「このシステムはまっすぐ歩くことの補助になる。最初は必要ないと思っていたが、壁に沿って歩けない所では通路の真ん中をまっすぐ歩く必要があるの、助けになる。」 (P09) また、13 名の参加者は交差点検出機能を評価し、特に 9 名はこの機能をメンタルマップ作成時に使いたいとコメントした: A4 「もうすぐ交差点であるとわかることで、交差点を突っ切ってしまう心配がない。交差点の伸びている方向を全て確認することで、実は他の方向にも道が伸びていたと知れて、新しい発見になる。」 (P01)

13 名の参加者は、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した：A5「スマートフォンは必ず持ち歩いているので、スマートフォン1台で完結していることは良い。」(P08) 一方で11名はスマートフォンを持つことによって片手がふさがる事を指摘し、特に4名の参加者はスマートフォンの持ち方に否定的なコメントをした：A6「スマートフォンを体と平行に持つのが難しい。」(P08)

システムを使いたい場所として、病院やショッピングモールがあげられた。本研究では目的地への道順をユーザが把握している状況での使用を想定してシステムをデザインしたが、6名の参加者はシステムを他社のオフィスなど目的地への道順が**分からない場所**でも使いたいと答えた：A7「このシステムがアプリストア等でリリースされたら視覚障害者によって（実験時の用途に限らず）色々な使用方法が提案されると思う。」(P13)

6 議論

6.1 Corridor-Walkerの有用性

実験の結果、参加者はシステムを使うことで壁伝いに歩かずに障害物を回避し（表1）、交差点の形状を把握したうえで曲がることができた（5.2節）ことが分かった。システムを併用した場合、システムからの指示の確認や方向修正によってタスク完了時間が白杖のみの場合よりも長くなったが（5.1節）、主観評価において参加者は、システムを併用することで白杖のみの時よりもスムーズに障害物を回避し（Q2, A2）、自信を持ってスムーズに歩く方向を修正できた（Q3, Q4）とシステムを高く評価した。12名の参加者からは白杖を使わずに障害物を避けられたこと（A1, A2）、9名から壁に頼らず歩けたこと（A3）を歓迎するコメントが得られた。また、交差点検出機能に関する質問事項（Q5, Q6）に関して有意差は認められなかったものの、13名から交差点検出機能は交差点の通り過ぎを防止し、特に9名からはメンタルマップ作成に役立つと評価された（A4）。さらに、P03以外の全ての参加者はシステムがスマートフォン1台で完結していることは強みであると同意した（A5）。

6.2 システムの持ち方と訓練方法

スマートフォンを用いる利点として、ユーザがスマートフォンを手にもって、周囲をスキャンするというインタラクションが可能になる点があげられる。一方で11名の参加者はスマートフォンを持つことで片手がふさがってしまうことを欠点と感じ、特に4名はシステムを持つ方法が難しいとコメントした（A6）。評価実験では30分ほどの練習時間を確保したが、タスク1ではユーザが安定してスマートフォンを持てなかったためにシステムが交差点の形状を誤認識した場合があった（理由2）。今回のシステ

ムの持ち方は視覚障害者の間で一般的な持ち方でないため、システムの普及のためには視覚障害者の歩行訓練（O&Mトレーニング）にどのように組み込んでいくか検討する必要がある。

6.3 課題と今後の展望

システムの課題としてまず、交差点検出モデルが通路の直交する交差点のみを対象としている点が挙げられる。提案モデルは交差点の通路に対して「Left, Right, Front, Back」の4種類のラベルを推定する多クラス分類のタスクとして交差点の種類を判定しているが、実世界においては、五差路やY字の交差点など通路が直交せず上述の4種類のラベルを付与できない複雑な交差点も存在する。これらの複雑な交差点にも対応するためには、通路の角度を直接推定する交差点検出方法を考案する必要がある。

またシステムは幅が3.5m以上ある広い通路やオープンスペースで安定して使用することが難しいという課題がある。これはシステムが目的地を設定するためには通路の両側の壁がLiDARセンサの検出範囲内に入っている必要がある反面、iPhone 12 Proに搭載されたLiDARセンサの検出範囲が5mに限定されるためである[3]。システムはスマートフォン1台で完結していることが利点である一方、使える場所がデバイスのセンサ上の制約によって限定されることがある。

本研究ではユーザが目的地への道順を把握している状況を想定してシステムを開発したが、6名の参加者から道順がわからない場所でもシステムを使いたいというコメントが得られた。ユーザが日々の生活でシステムを試す中で、我々が意図しなかった様々な使用方法を産み出す可能性があるため（A7）、今後はシステムをアプリとして広く配布し、ユーザからのフィードバックを集めていきたい。

7 まとめ

本研究は屋内の通路を歩く視覚障害者が障害物を回避し、交差点を認識するためのスマートフォン型歩行支援システムを提案した。システムはスマートフォンのLiDARセンサから周囲の占有格子地図を作成することで、障害物を回避する経路を生成し、交差点の位置と形状を認識する。システムは骨伝導イヤホンの左右からのピープ音、音声、振動信号を用いて生成された経路に沿ってユーザを案内し、交差点の位置と形状を伝える。実験からシステムを併用した参加者は壁伝いに歩かずに障害物を回避し、交差点の形状を認識したうえで曲がることができた。また、システム併用時にタスク完了時間は伸びたものの、参加者はスムーズに障害物回避と歩く方向の修正ができたとシステムを高く評価した。今後はシステムの配布に向けて、より一般的な交差点の検出方法を検討していきたい。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP20J23018) と JST 未来社会創造事業 (JPMJMI19B2) の助成を受けた。

参考文献

- [1] M. Adachi, S. Shatari, and R. Miyamoto. Visual navigation using a webcam based on semantic segmentation for indoor robots. In *2019 15th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS)*, pp. 15–21, San Francisco, CA, USA, 2019. IEEE.
- [2] A. Constantinescu, K. Müller, M. Haurilet, V. Petrusch, and R. Stiefelhagen. Bring the Environment to Life: A Sonification Module for People with Visual Impairments to Improve Situation Awareness. In *Proceedings of the 2020 International Conference on Multimodal Interaction*, pp. 50–59, New York, NY, USA, 2020. ACM.
- [3] A. Developer. Displaying a Point Cloud Using Scene Depth. Retrieved in September, 2021 from https://developer.apple.com/documentation/arkit/environmental_analysis/displaying_a_point_cloud_using_scene_depth, 2021.
- [4] A. A. Díaz-Toro, S. E. Campaña-Bastidas, and E. F. Caicedo-Bravo. Vision-Based System for Assisting Blind People to Wander Unknown Environments in a Safe Way. *Journal of Sensors*, 2021, 2021.
- [5] M. A. Fischler and R. C. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6):381–395, 1981.
- [6] A. Garcia, E. Mattison, and K. Ghose. High-speed vision-based autonomous indoor navigation of a quadcopter. In *2015 international conference on unmanned aircraft systems (ICUAS)*, pp. 338–347, Los Alamitos, CA, USA, 2015. IEEE.
- [7] A. Garcia, S. S. Mittal, E. Kiewra, and K. Ghose. A convolutional neural network vision system approach to indoor autonomous quadrotor navigation. In *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 1344–1352, Los Alamitos, CA, USA, 2019. IEEE.
- [8] J. a. Guerreiro, E. Ohn-Bar, D. Ahmetovic, K. Kitani, and C. Asakawa. How Context and User Behavior Affect Indoor Navigation Assistance for Blind People. In *Proceedings of the 15th International Web for All Conference*, New York, NY, USA, 2018. ACM.
- [9] J. Guerreiro, D. Sato, S. Asakawa, H. Dong, K. M. Kitani, and C. Asakawa. CaBot: Designing and Evaluating an Autonomous Navigation Robot for Blind People. In *The 21st International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pp. 68–82, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [10] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2):100–107, 1968.
- [11] D. Holz, S. Holzer, R. B. Rusu, and S. Behnke. Real-time plane segmentation using RGB-D cameras. In *Robot Soccer World Cup*, pp. 306–317, New York, NY, USA, 2011. Springer.
- [12] D. Jain. Path-guided indoor navigation for the visually impaired using minimal building retrofitting. In *Proceedings of the 16th international ACM SIGACCESS conference on Computers & accessibility*, pp. 225–232, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [13] W. Jeamwatthanachai, M. Wald, and G. Wills. Indoor navigation by blind people: Behaviors and challenges in unfamiliar spaces and buildings. *The British Journal of Visual Impairment*, 37:140 – 153, 2019.
- [14] S. Kayukawa, K. Higuchi, J. Guerreiro, S. Morishima, Y. Sato, K. Kitani, and C. Asakawa. BBeep: A sonic collision avoidance system for blind travellers and nearby pedestrians. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–12, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [15] S. Kayukawa, T. Ishihara, H. Takagi, S. Morishima, and C. Asakawa. Guiding Blind Pedestrians in Public Spaces by Understanding Walking Behavior of Nearby Pedestrians. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 4(3):1–22, 2020.
- [16] G. Lacey and S. MacNamara. Context-aware shared control of a robot mobility aid for the elderly blind. *The International Journal of Robotics Research*, 19(11):1054–1065, 2000.
- [17] Y. H. Lee and G. Medioni. Wearable RGBD indoor navigation system for the blind. In *European Conference on Computer Vision*, pp. 493–508, New York, NY, USA, 2014. Springer.
- [18] B. Li, J. P. Munoz, X. Rong, J. Xiao, Y. Tian, and A. Arditi. ISANA: wearable context-aware indoor assistive navigation with obstacle avoidance for the blind. In *European Conference on Computer Vision*, pp. 448–462, New York, NY, USA, 2016. Springer.
- [19] J. Morris and J. Mueller. Blind and deaf consumer preferences for android and iOS smartphones. In *Inclusive designing*, pp. 69–79. Springer, New York, NY, USA, 2014.
- [20] M. Nakamiya, Y. Kishino, T. Terada, and S. Nishio. A Route Planning Method Using Cost Map for Mobile Sensor Nodes. In *2007 2nd International Symposium on Wireless Pervasive Computing*, Los Alamitos, CA, USA, 2007. IEEE.
- [21] V. Pradeep, G. Medioni, and J. Weiland. Robot vision for the visually impaired. In *2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops*, pp. 15–22, San Francisco, CA, USA, 2010. IEEE.

- [22] G. Presti, D. Ahmetovic, M. Ducci, C. Bernareggi, L. Ludovico, A. Baratè, F. Avanzini, and S. Mascetti. WatchOut: Obstacle sonification for people with visual impairment or blindness. In *The 21st International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, pp. 402–413, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [23] J. Redmon and A. Farhadi. YOLOv3: An Incremental Improvement, 2018.
- [24] P. R. Sanketi and J. M. Coughlan. Anti-blur feedback for visually impaired users of smartphone cameras. In *Proceedings of the 12th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility*, pp. 233–234, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [25] D. Sato, U. Oh, J. Guerreiro, D. Ahmetovic, K. Naito, H. Takagi, K. M. Kitani, and C. Asakawa. NavCog3 in the wild: Large-scale blind indoor navigation assistant with semantic features. *ACM Transactions on Accessible Computing (TACCESS)*, 12(3):14, 2019.
- [26] J. Striegl, C. Lotisch, J. Schmalfuss-Schwarz, and G. Weber. Analysis of Indoor Maps Accounting the Needs of People with Impairments. In *ICCHP*, Vol. 12377, New York, NY, USA, 2020. Springer.
- [27] J. Yuan, S. Zhang, Q. Sun, G. Liu, and J. Cai. Laser-based intersection-aware human following with a mobile robot in indoor environments. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018.
- [28] 森 大輝, 入江 英嗣, 内原 正一, 荒川 明宏, 坂井 修一. リアルタイム経路生成と振動通知による視覚障害者の歩行支援システム. Retrieved in November, 2021 from <https://www.wiss.org/WISS2018Proceedings/oral/04.pdf>, 2018.

未来ビジョン

これまで視覚障害者のための移動支援システムが数多く提案されてきたが、多くの研究が地図情報などの事前準備が必要であったり、扱い慣れていない追加デバイスを持ち歩く必要があったりと、視覚障害者が日常的に使用する上でハードルが高いため、実際に視覚障害者の間で使われているものは極めて少ない。そのため本研究では、**視覚障害者に日常的に使ってもらってこそ支援システムを提案する意義が出る**という思いから、システムが普及するためのハードルを下げるために「**スマートフォン1台**」かつ「**事前準備を必要としない**」という2つの条件にこだわり Corridor-Walker を提案した。将来的に実際の視覚障害者のコミュニティでシステムが広く使われることで、A7のコメントでも指摘されたように、ユーザ側でもシステムの使い方や新しい使い道に関して検討や議論が行われることも期待している。

また、「スマートフォン1台」という条件にこだわった本研究の究極的な目標として、我々は**一般的に普及しているデバイスが視覚障害者にとって白杖に代わるユビキタスな支援システムとして広く普及する可能性を期待している**。白杖は一步先の危険（障害物や段差など）を確実に検出できるため視覚障害者に広く利用されている。しかしながら、白杖は視覚障害者しか所有しない特殊なツールであり、そのような白杖を携帯して周囲から注目を集めることに抵抗感を感じるユーザも存在している。本研究で提案した「スマートフォン1台」という条件にこだわる方針の先には、白杖のような視覚障害者専用の支援ツールではなく**晴眼者含め誰もが持ち歩いているデバイスだけを用いて視覚障害者も周囲に溶け込みつつ晴眼者さながら自立して移動できるような未来が実現できると期待している**。