

BBEEP : 歩行者との衝突予測に基づく警告音を用いた視覚障害者のための衝突回避支援システム

粥川 青汰¹ 樋口 啓太² João Guerreiro³ 森島 繁生⁴ 佐藤 洋一² Kris Kitani³ 浅川 智恵子^{5,3}

概要: 本研究では混雑した環境における視覚障害者と歩行者の衝突を回避するためのスーツケース型システム-BBEEP を提案する。BBEEP は周囲の歩行者の検出及び将来位置の予測結果から歩行者がユーザ（視覚障害者）と衝突する危険性を予測し、衝突する危険性を持った歩行者に対して警告音を鳴らす。警告音を聞いた歩行者がユーザの存在を認識しユーザに道を譲ることで、ユーザに対して歩行者と衝突しない安全な進路を提供することが可能になる。本研究では警告音の種類や鳴らすタイミングの違いによる歩行者の反応の違いを調査し、警告音を鳴らすタイミングが歩行者の経路に大きく影響することを確認した。さらに、本結果をもとに BBEEP の警告ポリシーをデザインし、国際空港内にて視覚障害者による評価実験を行ったところ、BBEEP を用いることで歩行者と衝突する回数が大幅に低減されたことを確認した。

1. はじめに

視覚障害者が単独で外出する際に直面する困難として、障害物との衝突が挙げられる。その中でも本研究では視覚障害者と歩行者の衝突に注目する。多くの歩行者は視覚障害者の存在を認識した段階で視覚障害者に道を譲る行動をとるが、全ての歩行者が視覚障害者の存在を認識している訳ではない。例えば、歩きスマホをする歩行者、電光掲示板を確認する歩行者、会話をしている集団など視覚障害者の存在を視界に捉えていない歩行者も存在し、視覚障害者はそのような歩行者と衝突する危険性がある。視覚障害者と障害物の衝突を回避するためのシステムは多く研究されているが、これらの手法の多くは机や階段など静止した障害物に注目しているため、これらの手法をそのまま用いて歩行者などの動く障害物を回避することは難しい。

そこで本研究では、周囲の歩行者に対して警告音を用いて視覚障害者の存在を通知することにより、視覚障害者が進む道を譲るように促すスーツケース型システム-BBEEP を提案する(図1)。警告音を用いた通知を行うことにより、歩行者に対してユーザの存在を通知し、道を譲るように促すことが可能となる。しかしながら、単純に警告音を常時鳴らし続けることシステムは、歩行者にユーザの存在を認識してもらえない反面、 unnecessary 警告音が周囲へのノイズと

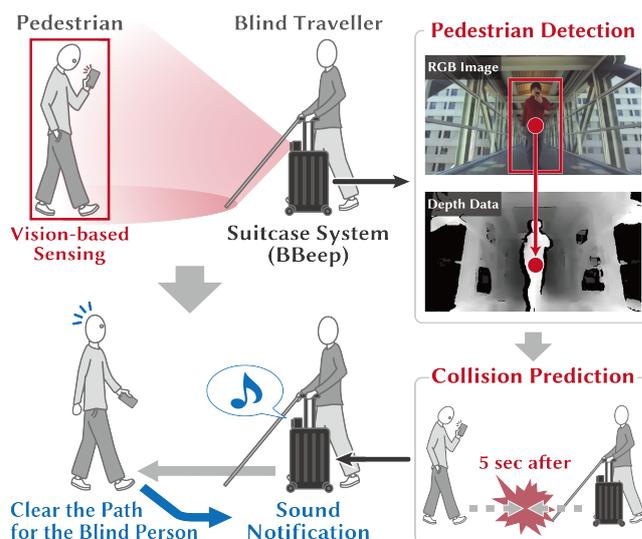


図1: 提案システム (BBEEP) の概要図。

なるため、社会受容性が低いシステムになってしまう。そのため、警告音を鳴らす回数を可能な限り抑え、社会受容性を向上させることが重要となる。そこで本研究では周囲の歩行者がユーザと衝突する危険性があるかを推測し、両者が衝突する危険性がある時のみ警告音を鳴らすシステムを提案する。

BBEEP はスーツケースに取り付けられたステレオカメラを用いて RGB 画像とデプス情報を取得し、歩行者の位置の検出、トラッキング、及び将来位置の予測を行う。具体的には BBEEP はまず、RGB 画像から Convolutional Neural Network を利用した物体検出手法を用いて歩行者の検出を

¹ 早稲田大学

² 東京大学

³ Carnegie Mellon University

⁴ 早稲田大学理工学術院総合研究科

⁵ IBM Research

行い、検出結果とデプス情報に対応させることにより歩行者の位置を取得する。次に歩行者の位置情報の変化を元に歩行者のトラッキングを行い、歩行者の動きの推定及び将来位置の予測を行う。将来位置の予測結果に基づいて歩行者がユーザと衝突する危険性があるか否かを判定し、両者が衝突する危険性がある時のみ警告音を鳴らす。提案システムを用いることで、社会受容性を維持しつつ、ユーザと歩行者の衝突を回避することが可能となる。

本研究では、ユーザと歩行者の衝突回避に効果的な警告音の鳴らし方をデザインするために、音の種類や鳴らすタイミングが異なる複数の警告ポリシーを用意し、警告音に対する歩行者の進路の変化を調査した。調査結果から、(1) 警告音を鳴らすことで歩行者の進路をスーツケースから遠ざかる方向へ変化させることが可能となる、(2) 警告音を鳴らすタイミングが歩行者の進路に大きく影響した、(3) 警告音の種類の違いが歩行者の経路に影響することは確認されなかった、という知見が得られた。これらの知見をもとに、三種類の音を用いて歩行者と視覚障害者に衝突の危険性を知らせるシステムをデザインした。

さらに本研究では、実環境において BBeep が視覚障害者と歩行者の衝突回避に有効であるかを検証するため、六人の視覚障害者を実験者として集め、国際空港内で BBeep の評価実験を行なった。実験では参加者に対して BBeep を使用しながら空港内を移動するタスクを与え、ユーザと歩行者の衝突回数を評価した。評価の結果、BBeep を用いることでユーザと歩行者が衝突する確率を大幅に低下可能であることを確認した。また実験参加者からも、BBeep は混雑した環境内を移動する際に有用である、というフィードバックが得られた。

2. 関連研究

2.1 視覚障害者ナビゲーションシステム

視覚障害者の外出を支援する目的として、視覚障害者向けナビゲーションシステムが研究されている [1], [2], [5], [14]。これらの手法は GPS [14] や RFID [5]、ビーコン [1] などを用いて地図上におけるユーザの位置推定を行い、音声や触覚デバイスを用いて目的地への道順をユーザに案内する。しかしながら、これらの手法は地図上に記載されていない障害物 (机や椅子、歩行者など) については考慮していないため、ユーザはこれらの障害物と衝突する危険性がある。ユーザが安全に移動するためには、目的地への道順を案内するだけでなく、ユーザの経路上に存在する障害物をリアルタイムに検出し、回避するためのシステムも重要である。

2.2 視覚障害者向け障害物回避支援システム

視覚障害者が障害物を検知し、回避するためのツールとして白杖が広く普及している。しかしながら、白杖は障害物を叩いて検知する必要があるため、周囲の歩行者を検

知する際は好ましくない。白杖に代替するツールとして、レーザ [10]、超音波 [9], [17]、デプスカメラ [8], [11] などを用いて障害物の位置、距離、種類などを検出し、ユーザにフィードバックするシステムも研究されている。しかしながら、これらの手法ではシステムからのフィードバックを元に、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るため、特に障害物の数が多い場合はユーザ側の負担が大きくなる。混雑した街中など障害物が多く存在する環境では、障害物が存在しない安全な経路をユーザに提供することがより重要となる。

これらの問題点を解決するために、障害物を回避する経路を自動で設計し、ユーザに提示する手法 [11], [18], [19] が研究されている。ユーザはシステムが提示した経路に従って移動するだけで障害物を回避することが可能となる。これらのシステムは机や椅子といった静止した障害物の回避に注目しているが、周囲の歩行者はすべてユーザを回避すると仮定し、周囲の歩行者とユーザの衝突を回避することについては注目していない。しかしながら、空港や駅といった公共の場では、歩きスマホをする歩行者や他の人と会話をしている人物など、視覚障害者の存在を視認していない歩行者が多数存在し、視覚障害者はそのような歩行者と衝突する危険性がある。そこで本研究では、ユーザの存在を視認していない人たちに対して視覚障害者の存在を伝えることが重要であると考え、警告音を用いてユーザの存在を通知し、周囲の人たちに視覚障害者に対して道を譲るように促すシステムを提案する。

2.3 音を用いた警告方法

ビーブ音は緊急状況を知らせる警告音として病院 [13] や飛行機 [3] などで使用されており、特に自動車のドライバ支援の分野では障害物との衝突の危険性を知らせる目的でビーブ音が使用されている [12]。またビーブ音に関して、ビーブ音のパラメタ (音の高さ、長さ、間隔など) と受け手が感じる緊急度、不快度の関係性が研究されており、ビーブ音から感じる緊急度と不快度はトレードオフの関係があることも示されている [6], [12]。

以上で示したようにビーブ音はユーザに緊急状況を知らせるための手段として幅広く利用されている。そこで本研究ではビーブ音を鳴らすことで周囲の歩行者にユーザの存在を知らせるシステムを提案する。さらに本研究では、ユーザと歩行者の衝突回避に効果的な警告音の鳴らし方を調査し、結果を元に警告音の鳴らし方をデザインした。

3. 本研究が取り組む課題

本研究では、周囲に歩行者が多く存在する環境における視覚障害者の移動を支援することを目的として、周囲の歩行者に対して衝突の危険性を通知するシステムを提案する。本項では、歩行者との衝突回避における既存の視覚障害者

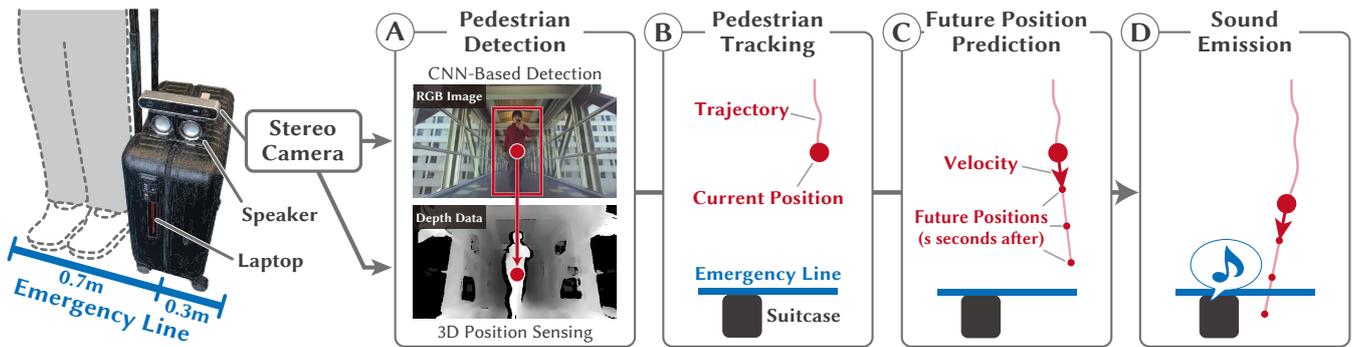


図 2: 警告システムの概要図。

向け障害物回避支援システムの問題点を指摘した上で、本研究が取り組む課題を明らかにする。

3.1 既存インターフェースの問題点

関連研究の項で述べたように、既存の障害物回避支援システムは検出された障害物の情報をユーザ（視覚障害者）のみに知らせるため、ユーザ自身が進路を変更して障害物を回避する必要がある [11], [18]。これらの手法は机や階段など静止した障害物を回避する際には有効だが、周囲の歩行者との衝突を回避する際には、(1) 通路全体が歩行者で遮られている場合にユーザが通過する経路を確保することができない、(2) 周囲に存在する全ての歩行者の情報をユーザにフィードバックするとユーザ側の負担が大きくなる、といった問題点がある。特に街中などの混雑した環境を移動する際は、システムから得られる周囲の情報に基づいてユーザ自身が歩行者を回避するシステムは効果的ではない。

3.2 音による周囲への警告システム

そこで本研究では衝突の危険性をユーザだけでなく周囲の歩行者にも通知することで、周囲の歩行者に対してユーザの経路を確保するように促すシステムを提案する。特に提案システムでは、システムに取り付けられたスピーカから警告音を鳴らすことで、周囲の歩行者に対して衝突の危険性を通知する。音を用いて衝突の危険性を減らすシステムは、左折や後退をする大型車、工場内を自走するロボットなど数多く実用化されている。また、警告音を用いた通知を行うことにより、ユーザの存在を視認していない歩行者（歩きスマホをしている人やユーザに背を向けて会話している人など）に対しても衝突の危険性を知らせることが可能となる。

3.3 音を用いた警告システムの課題

しかしながら、単純に警告音を周囲に鳴らし続けることは、周囲の歩行者にユーザの存在を認識してもらえない反面、周囲の環境を壊してしまい、社会受容性が低下するという課題がある。そのため、警告音を鳴らす回数を可能な限り抑え、必要な時のみに警告音を鳴らすことが重要であ

る。そこで本研究では周囲の歩行者との衝突の危険性を推測し、衝突の危険性が推測された時のみ警告音を鳴らすシステム-BBeep を提案する。これにより社会受容性を保ちつつ、かつユーザと歩行者の衝突の危険性を減らすことが可能となる。

4. BBeep の実装

BBeep における警告システムの概要図を図 2 に示す。BBeep はまずスーツケースに取り付けられたステレオカメラから RGB 画像とデプス情報を取得する。ステレオカメラをスーツケースに固定することにより、動きのブレが少ないデータを取得することが可能になる。次に BBeep は RGB 画像から歩行者の検出を行い (図 2(A))、検出結果とデプス情報を用いて歩行者の位置検出及びトラッキングを行う (図 2(B))。さらに、トラッキング結果を元に歩行者の将来位置を予測し (図 2(C))、歩行者がユーザと衝突する危険性が検出された際に警告音を鳴らす (図 2(D))。

4.1 歩行者の検出

BBeep はまず、Convolutional Neural Network を用いた歩行者検出手法とステレオカメラを組み合わせることでユーザの進行方向に存在する歩行者の三次元位置を取得する。特に BBeep は、ステレオカメラとして ZED™2K Stereo Camera *1 (デプス情報取得可能距離: 0.3–20 m, 水平視野角: 90 度, FPS: 最大 100 Hz) を、RGB 画像からの歩行者検出には YOLOv2 [15] を使用する。YOLOv2 で得られた歩行者のバウンディングボックスの中心と、ZED から得られるデプス情報を対応づけることによって歩行者のステレオカメラに対する三次元相対位置を取得する。この際、歩行者の相対位置をより正確に取得するために、ZED から得られる三次元オドメトリ情報を用いて相対位置を補正し、ZED の回転による影響を取り除く。ZED と YOLOv2 を組み合わせることにより、カメラから 10m 程度離れた位置にいる歩行者も検出可能となる。また、YOLOv2 を用いることで体全体がカメラに映っていない歩行者も比較的ロバストに検出することが可能となる。

*1 <https://www.stereolabs.com/zed/>

また、人物の将来位置を高精度に予測するためには、高いFPSで人物位置を検出することが重要となる。しかしながら、本研究で使用したラップトップ (Intel Core i7-7700HQ CPU, NVIDIA GeForce GTX 1060 GPU) では、YOLOv2を毎フレーム実行した際、15FPS程度しか確保することができなかった。そこでBBEEPでは、システムのメインプロセスとYOLOv2を同時に別スレッドで動かし、YOLOv2から新たな歩行者検出結果が得られるまで、最新の歩行者検出結果とデプス情報を対応づけることで歩行者の位置情報を更新する、という手法を採用する。これにより約40FPSで歩行者の位置情報を取得することが可能となる。

4.2 歩行者のトラッキング

次にBBEEPは歩行者位置の検出結果を利用して歩行者のトラッキングを行う。本研究ではリアルタイムに歩行者のトラッキングを行うためのアルゴリズムを実装した。BBEEPは以下に示す手順に従って歩行者のトラッキングを行う：

- (1) 4.1で得られたそれぞれの歩行者の位置 (以下：現在位置) に対して以下の(2)と(3)を繰り返すことで、トラッキング中の歩行者のリスト (以下：トラッキングリスト) を更新する
- (2) 現在位置から距離 α 以内に位置する歩行者がトラッキングリストに一人も含まれない場合、画面内に新しく登場した歩行者として現在位置をトラッキングリストに加える。
- (3) 現在位置から距離 α 以内に位置する歩行者がトラッキングリストに含まれる場合、トラッキングリストに含まれる歩行者の内、現在位置から最も近くに位置する歩行者の位置情報を現在位置に更新する。更新する際、更新前の位置情報は歩行者の移動履歴として保存する。
- (4) トラッキングリストに含まれる歩行者の内、 β フレーム連続して位置が更新されなかった歩行者はトラッキングリストから削除する。

BBEEPでは $\alpha = 1$ m, $\beta = 5$ フレームと設定した。

4.3 歩行者の将来位置予測と衝突判定

次にBBEEPはトラッキングリストに含まれるそれぞれの歩行者の将来位置を予測する。具体的には、トラッキング時に取得したカメラに対する相対位置と過去 $N - 1$ フレーム分の移動履歴から、以下に示す式を用いて s 秒後の歩行者の位置 $\hat{\mathbf{p}}_{t+s}$ を推定する：

$$\mathbf{p}_\mu(i, n) = \frac{1}{n} \sum_{j=i-n+1}^i \mathbf{p}_j \quad (1)$$

$$\hat{\mathbf{p}}_{t+s} = \frac{\mathbf{p}_\mu(t, \frac{N}{2}) - \mathbf{p}_\mu(t - \frac{N}{2}, \frac{N}{2})}{\Delta t(\mathbf{p}_{t-\frac{N}{4}}, \mathbf{p}_{t-\frac{3N}{4}})} s + \mathbf{p}_t \quad (2)$$



図 3: 調査実験の様子。

上式に於いて、 \mathbf{p}_t は時刻 t における歩行者のカメラに対する相対位置、 $\mathbf{p}_\mu(i, n)$ は過去 n フレーム分 (\mathbf{p}_{i-n+1} から \mathbf{p}_i まで) の平均位置、 $\Delta t(\mathbf{p}_t, \mathbf{p}_i)$ は \mathbf{p}_t から \mathbf{p}_i までの経過時間を示す。BBEEPはまず、二つの平均位置 ($N - 1$ フレーム前から $N/2$ フレーム前まで、 $N/2 - 1$ フレーム前から現在フレームまで) を求める (式 1)。次に二つの平均位置から歩行者のカメラに対する相対速度ベクトルを計算し、 s 秒後の将来位置を推測する (式 2)。BBEEPでは $N = 32$ と設定した。

推測された将来位置をもとに将来の衝突危険性を予測し、警告音を鳴らすかどうか判断する (図 2 も参照)。具体的にはBBEEPはまず、現在位置と s 秒後の将来位置を結んだ直線を歩行者の将来経路と近似する。さらに、図 2 に示すように、ユーザとの衝突の危険がある領域として “Emergency Line” を定義し、将来経路と Emergency Line が交差する場合は衝突の危険性があると判断して警告音を鳴らす。この際、水平平面上における歩行者の相対位置のみ考慮し、歩行者の鉛直方向の位置は考慮しない。

5. 警告音のデザイン

本研究では、ユーザと歩行者の衝突回避に効果的な警告音の鳴らし方をデザインするために、様々なパターンの警告音に対する歩行者の反応を調査した。関連研究の項で述べたように、警告音を聞いた際に人が感じる緊急度や不快度については研究されているが [6], [12], 警告音に対する歩行者の反応や経路の変化については知見が得られていない。そこで本研究では、様々なパターンの警告音を鳴らすシステムを見通しの良い通路に置き、警告音を鳴らされた歩行者の経路の変化を調査した (図 3)。さらに調査結果を用いて歩行者との衝突回避に最も有効な警告音の鳴らし方 (警告ポリシー) を設計し、BBEEPに実装した。本項では、調査用に準備した警告パターン、調査方法、評価尺度、結果、そして結果を元にデザインした警告ポリシーについて詳しく述べる。

5.1 七種類の警告パターンの準備

今回の調査では実験に使用する警告パターンとして、音を

表 1: 実験で使用した警告パターン.

警告パターン	警告音の種類				タイミング
	緊急度	高さ	長さ	間隔	
S1	高	1000 Hz	0.1 s	0.1 s	5.0 s
S2					2.5 s
S3	中	400 Hz	0.1 s	0.1 s	5.0 s
S4					2.5 s
S5	低	400 Hz	0.5 s	0.5 s	5.0 s
S6					2.5 s
S7	警告音を一切鳴らさないパターン				N/A

一切鳴らさないパターン (S7) を含む計七種類の警告パターンを用意した. 音を鳴らす警告パターンとしては, ビープ音の種類を三種類, ビープ音を鳴らすタイミングを二種類用意し, それらを組み合わせることで六種類の警告パターン (S1-S6) を用意した.

5.1.1 三種類のビープ音

今回の調査では異なる緊急度を持った三種類のビープ音を用意した. 関連研究の項で述べたようにビープ音のパラメタと聞き手が感じる緊急度の関係性については多数の研究で示されている [6], [12]. それらの知見を元に音の高さ, 長さ, および間隔を変えることで三段階の緊急度 (高, 中, 低) を持ったビープ音を用意した (表 1).

5.1.2 警告音を鳴らすタイミング

BBeep は周囲の歩行者の s 秒後における将来位置に基づき警告音を鳴らすため, パラメタ s を変化させることにより, BBeep が警告音を鳴らすタイミングを変えることができる. このパラメタ s もシステムをデザインする際に重要な要素となる. 例えば $s < 1$ と設定した場合, BBeep は歩行者がユーザと衝突する直前まで音を鳴らさないため, 歩行者がユーザと衝突する危険性が高くなる. 一方, $s = \infty$ と設定した場合, BBeep は頻繁に警告音を鳴らしてしまうため, 不必要に周囲の環境を壊し, 社会受容性が低下してしまう. 本研究では s として二種類の値 ($s_1 = 5.0$, $s_2 = 2.5$) を設定し, 調査を行なった (表 1). BBeep は約 10 m 離れた歩行者まで検出可能であり, 最大 5 秒後の衝突まで予測可能 (ユーザと歩行者が 4km/h で互いに接近する場合を想定) であることから, $s_1 = 5.0$ と設定し, s_1 の半分の値として $s_2 = 2.5$ と設定した.

5.2 調査方法

調査を行うにあたり, 表 1 に示した七種類の警告パターン (S1-S7) を持ったシステムを実装し, 見通しの良い通路に設置した (図 3). システムは七種類の警告パターンを順番に変更させつつ, 割り当てられた警告パターンに従って衝突の危険性がある歩行者に対して警告音を鳴らす. 調査は四日間かけて行い, 各警告パターンにつき衝突危険性を検知した 57 人分 (合計 399 人分) のデータを収集した.

収集したデータから歩行者の位置を取得し, それぞれの警告パターンが歩行者の経路にどのような影響を与えたを分析した. この時, より正確に人物の位置を取得するため, YOLOv2 の代わりに最新の人物姿勢推定手法である OpenPose [4] を用いて毎フレーム人物の検出を行った. 今回は OpenPose で得られた人物の腰の位置と実験で記録したデプス情報を対応させることで, 各フレームごとに人物の三次元位置を検出した. 歩行者のバウンディングボックスを検出する YOLOv2 と異なり, OpenPose は人物の骨格情報まで検出可能であるため, より正確に人物位置を取得することが可能となる.

5.3 評価尺度

歩行者の経路を分析するにあたり本研究では, 歩行者が最もスーツケースに近づいたときの距離を“最接近距離”と定義し, 各警告パターン間で比較した. 最接近距離が大きい警告パターンほどユーザにより安全な経路を提供可能な警告パターンとなる. 本研究では, 最接近距離は (1) 警告音の有無, (2) 警告音を鳴らすタイミングの違い, (3) 警告音における緊急度の違い, の影響を受けるという三つの仮説を立て, マン・ホイットニーの U 検定, フリードマン検定, 95%信頼区間を用いて検証した.

5.4 結果

各警告パターンごとの最接近距離の平均及び 95%信頼区間を図 4 に示した. 警告音を全く鳴らさないパターン (S7) が最も最接近距離の平均が小さい結果というが得られた. また, マン・ホイットニーの U 検定 (有意水準: 5%) を用いて, S7 と警告音を鳴らすパターン (S1-S6) をそれぞれ比べたところ, 警告音を鳴らす全てのパターンと S7 の間に有意差が確認された. これらの結果から仮説 1 は採択され, 警告音を鳴らすことで歩行者の経路をスーツケースから遠ざかる方向へ変化可能であることが確認された. 次に仮説 2 を検証するために, 衝突の 5 秒前に音を鳴らす警告パターン (S1, S3, 及び S5) と衝突の 2.5 秒前に音を鳴らす警告パターン (S2, S4, 及び S6) の最接近距離を, マン・ホイットニーの U 検定 (有意水準: 5%) と 95%信頼区間を用いて比較した. 検定の結果, 警告音を鳴らすタイミングが異なる警告パターンの間に有意差を確認し, 警告音を鳴らすタイミングも歩行者の進路に大きく影響することが確認された.

一方, 警告音を鳴らすタイミングは同じだが警告音の緊急度が異なる警告パターン ($s = 5$ のパターン: S1, S3, 及び S5, $s = 2.5$ のパターン: S2, S4, 及び S6) においてフリードマン検定 (有意水準: 5%) を用いて最接近距離を比較したところ, 有意差は確認されず, 仮説 3 は棄却された.

調査結果から得られた知見を以下にまとめる.

- 衝突予測に基づいて警告音を鳴らすことで歩行者の経

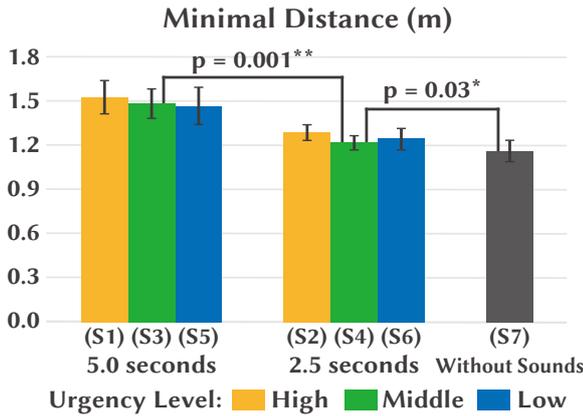


図 4: 各警告パターンにおける最接近距離の平均および 95%信頼区間。p: 最接近距離に対してマン・ホイットニーの U 検定を行なった際に得られた p 値 (** と * はそれぞれ有意水準が 0.001 と 0.03 の時に有意差が得られた結果を示す)。

路をスーツケースから遠ざかる方向へ変えることが可能となる。

- 警告音を鳴らすタイミングも歩行者の経路に影響し、衝突の 2.5 秒前よりも衝突の 5 秒前に警告音を鳴らす方が衝突回避に効果的である。
- 警告音における緊急度の違いが歩行者の経路に影響することは確認されなかった。

5.5 警告ポリシーのデザイン

上でまとめた知見に基づき、以下に示す三段階の警告音を鳴らす警告ポリシーをデザインした (図 5)。

- 第一段階の警告音:** ユーザと歩行者の衝突が 5 秒以内に起こる可能性がある時に鳴らされる警告音。警告パターン S5 及び S6 で用いた警告音 (緊急度: 低) を使用した。周りの歩行者に対して視覚障害者が進む道を譲るように促す目的で用いる。
- 第二段階の警告音:** ユーザと歩行者の衝突が 2.5 秒以内に起こる可能性がある時に鳴らされるピープ音。警告パターン S3 及び S4 で用いた警告音 (緊急度: 中) を使用した。周りの歩行者に対して視覚障害者が進む道を譲るように促す目的で用いる。
- 第三段階の警告音:** ユーザから 70cm 以内の距離に障害物 (歩行者, 机, 壁など) が存在する場合に鳴らされる警告音。ピープ音とは全く種類の異なるベルの音を使用した。ユーザが衝突を回避するための最終警告として用いる。

一般的に緊急度の高いピープ音を聞いた際、聞き手は高い不快感を感じる事が示されているが [6], [12], 本研究で行った調査では音の緊急度の違いによる歩行者への経路影響は確認できなかった。そこで BBeep では調査で使用した三種類のピープ音の内、より不快感の少ない音として緊急度が低い二種類のピープ音を使用する。二種類の音を用いることにより、ユーザは周りの歩行者が警告音に気づ

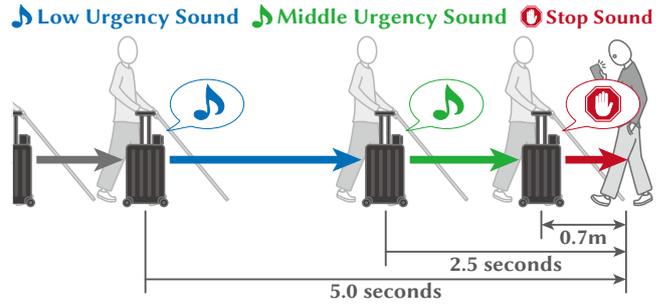


図 5: 調査結果からデザインした警告ポリシー。

表 2: 実験参加者データ (*は主に使用している歩行支援ツール)。

参加者	性別	年齢	視力	歩行支援ツール
P1	女性	70	全盲	白杖
P2	女性	70	全盲	白杖
P3	男性	65	全盲	白杖
P4	男性	46	全盲	盲導犬*, 白杖
P5	男性	42	全盲	盲導犬*, 白杖
P6	男性	58	全盲	白杖

かずに接近し続けているかどうかを判断することが可能となる。加えて、BBeep はスーツケースから 70cm 以内に障害物を発見した時は第三段階の警告音としてベルの音をユーザに向けて鳴らす。視覚障害者を対象とした評価実験を行う際は実験参加者に対して、第三段階の警告音が鳴った際は直ちに止まるように指示した。

6. 評価実験

BBeep が視覚障害者と歩行者の衝突回避に有効に働くかを調査するため、本研究では 6 人の視覚障害者 (表 2) を実験参加者として集め、国際空港で BBeep の評価実験を行った。BBeep は視覚障害者へのみ音声フィードバックを与える既存手法とは異なり、周囲の歩行者に対しても警告音を鳴らすことで、視覚障害者に安全な進路を提供する。そこで評価実験では、二つのベースラインシステム (ユーザのみに警告音を鳴らすシステム, 警告音を全く鳴らさないシステム) を用意し、これらと BBeep を比較することで BBeep の有用性を検証した。

6.1 コンディション

実験では以下の三種類の異なるインタフェースを持ったシステムを用意し、これらを比較することで BBeep の有用性を検証した。

スピーカインタフェース (BBeep): 5.5 でデザインした警告ポリシーに従って警告音をユーザ (視覚障害者) と周囲の歩行者に向けて鳴らすシステム。警告音はスーツケースに取り付けられたスピーカを通して鳴らされる。

ヘッドセットインタフェース: BBeep と同じ警告ポリ

シーに従って警告音をユーザのみに鳴らす、周囲の歩行者に対しては鳴らさないインターフェース。警告音はスピーカの代わりに骨伝導ヘッドセットを用いてユーザにのみ鳴らされる。

警告音なしインターフェース： 警告音を全く鳴らさないインターフェース。

また実験中は、警告音を鳴らすプロセスで得られる周囲の歩行者の位置情報及び将来位置予測結果を記録し、実験後の分析に使用した。

6.2 実験タスク

実験では参加者に対して、片手で白杖を、片手でシステムを使用しながら空港内を移動するタスクを与えた(図6)。移動するルートとしては、搭乗ゲートを挟む形で20mほどの長さがある直線のルートを使用し、特に搭乗を待つ乗客で列が形成されているような混雑したゲートを選択した。

6.3 実験手順

実験ではまず初めに、実験の概要及び三種類のインターフェースについて説明した。次に参加者が警告ポリシー及びそれぞれのインターフェースについて慣れるために、システムを実際に使用するトレーニングセッションを10分から15分程度行った。スピーカインターフェースを使用する際の警告音の大きさは全てのタスク及び参加者に対して固定したが、ヘッドセットインターフェースを使用する際の警告音の大きさは各参加者の好みに合わせて調整した。また、トレーニングセッションでは、衝突予測を安定させるためになるべくスーツケースの向きをユーザの進行方向と合わせるように指導した。

次に参加者は、システムを使用しながら直線のルートを移動するタスクを合計五回(スピーカインターフェース：二回、ヘッドセットインターフェース：二回、警告音なしインターフェースを一回)行った。それぞれのインターフェースの使用順序は参加者ごとにランダムに選択した。また参加者をサポートするため、タスクを行う間は一人の実験者が参加者の背後を歩いたが(図6)、衝突の危険が差し迫った時、若しくは参加者がルートから大きく外れた時以外は参加者に対してサポートは行わなかった。さらに実験中は周囲の歩行者の反応を記録するため、スーツケースの上面にGoProを取り付け、撮影を行った。

6.4 評価尺度

6.4.1 衝突人数と衝突予測人数

ユーザが周囲の歩行者とぶつかる危険性がどれほどあったかを定量評価するために、本研究ではシステムから70cm以内の領域に侵入した歩行者の人数を“衝突人数”と定義し、システムの人物位置検出結果を用いて数えた。また、衝突の危険性を持った歩行者の人数を“衝突予測人数”と



図6: 視覚障害者による空港でのシステム評価実験。

定義し、システムが5秒以内に衝突する可能性があるとして予測した歩行者の人数を数えた。実験では三種類のインターフェースに対して、これら二つの評価尺度の平均、分散、及び95%信頼区間を計算した(表3)。さらに警告音を鳴らす二つのインターフェース(スピーカインターフェースとヘッドセットインターフェース)を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。

6.4.2 衝突率

さらに、衝突人数を衝突予測人数で割った値として、“衝突率”を定義した。これは衝突の危険性が検知された歩行者の内、実際に衝突する寸前までユーザと接近してしまった歩行者の割合を表す。衝突率が小さいほど、システムが歩行者との衝突リスクを減らす際に有効だったと考える。前述の二つの評価尺度と同様に、衝突率に対しても95%信頼区間とウィルコクソンの符号順位検定(有意水準：1%)を用いて評価を行った。

6.4.3 システムの主観評価

全てのタスクが終了した後、実験参加者にそれぞれのインターフェースに関する主観評価アンケートを行った。表4に示したそれぞれの質問文に対し、同意するかどうかを七段階のリッカート尺度(全く同意しない場合を1、強く同意する場合を7)で回答する形で集計した。また参加者に対して10分程度のインタビューを行い、それぞれのインターフェースの利点、欠点、改善案、及び空港以外のどのような場面でシステムを使用したいかを調査した。

6.5 結果

6.5.1 定量評価結果

表3に三つの評価尺度の平均及び95%信頼区間を示した。ウィルコクソンの符号順位検定を用いてスピーカインターフェースとヘッドセットインターフェースの比較を行ったところ、衝突予測人数に関しては有意差が観測されなかったが($p = 0.8$)、衝突人数においてはスピーカインターフェースの方がヘッドセットインターフェースよりも有意に衝突人数の値が小さい($p = 0.005$)という結果が得られた。さらに、衝突率においても同様の結果が得られ($p = 0.009$)、ス

表 3: 各評価尺度に対する結果.

インタフェース	衝突予測人数		衝突回数		衝突率	
	平均及び標準偏差	95%信頼区間	平均及び標準偏差	95%信頼区間	平均及び標準偏差	95%信頼区間
スピーカ	6.67 ± 3.75	4.55~8.79	0.41 ± 0.76	0.00-0.85	0.08 ± 0.19	0.00-0.19
ヘッドセット	5.91 ± 2.25	4.64-7.19	2.00 ± 1.35	1.23-2.76	0.37 ± 0.25	0.22-0.51
警告音なし	6.67 ± 2.05	5.03-8.30	3.00 ± 1.85	1.52-4.48	0.45 ± 0.21	0.28-0.63

表 4: アンケート項目と結果.

No.	質問項目	P1	P2	P3	P4	P5	P6	平均	標準偏差	中央値
Q1	スピーカインタフェースを使用した時, 周囲の歩行者が自分に道を譲ってくれた.	4	6	7	7	5	4	5.5	1.26	5.5
	ヘッドセットインタフェースを使用した時, 周囲の歩行者が自分に道を譲ってくれた.	4	3	2	3	4	4	3.33	0.75	3.5
Q2	スピーカインタフェースを用いることで空港内を快適に移動することができた.	7	4	5	6	6	5	5.5	0.96	5.5
	ヘッドセットインタフェースを用いることで空港内を快適に移動することができた.	7	4	3	6	6	6	5.33	1.37	6
Q3	スピーカインタフェースは周囲に歩行者があまりいない環境でも有用である.	5	2	6	6	6	4	4.83	1.46	5.5
	ヘッドセットインタフェースは周囲に歩行者があまりいない環境でも有用である.	5	2	4	5	6	4	4.33	1.25	4.5

スピーカインタフェース (BBeep) は衝突の危険性を持った歩行者との衝突を回避をする際に有効であることがわかった.

6.5.2 ビデオを用いた観察結果

スーツケースに取り付けられた GoPro によって撮影された映像を分析したところ, 実験参加者がヘッドセットインタフェースや警告音なしインタフェースを使用しながら移動する際は, 参加者の存在に気づいていない歩行者が参加者と衝突寸前まで接近してしまうことが場面が多く観察された. 参加者の存在に気づいていない歩行者として, 会話をしている人, 飛行機に搭乗する列に並んでいる人, 空港内の電光掲示板を眺めている人などユーザを視界に捉えていない人が多くみられた. 一方スピーカインタフェースを使用している場合, 前述のようなユーザの存在を視認していない人たちも, 警告音を鳴らされたことでユーザの存在に, 気づき参加者に道を譲る, というシーンが多く観察された.

しかしながら, スピーカインタフェースを使用している際にも, 五人の歩行者がスーツケースから 70cm 以内の領域に侵入した. ビデオを用いた観察の結果, 侵入してきた理由として, (1) 歩行者がヘッドホンをつけており警告音が聞こえなかった, (2) ユーザが急に進行方向を変えた, (3) 歩行者は視覚障害者の存在に気付いて道を譲ろうとしたが壁などに阻まれて避けるスペースが十分になかった, という三つの理由を確認した.

6.5.3 主観評価結果

アンケート結果を表 4 に示した. 4 人の参加者が, スピーカインタフェースを用いることで周囲の歩行者が自分に道を譲ってくれたと回答した (Q1). 一方, その他の質問項目に関してはそれぞれ, 二つのインタフェース (スピーカインタフェースとヘッドセットインタフェース) に対してほぼ同じような回答が得られた.

インタビューでは以下に示すように, BBeep を使用することで周囲の視聴者が自分に道を譲ってくれたという意見

が得られた: A1: 「スピーカシステムの利点として周りの歩行者が自分に道を譲ってくれるという点があげられる」 (P5); A2: 「自分が接近していることに周囲の歩行者が気づき, 自分に通り道を与えるために移動してくれた」 (P4); A3: 「スピーカインタフェースの最大の利点は警告音を聞いた歩行者が自分の進行方向から退いてくれる点である」 (P3). 一方参加者は, ヘッドセットインタフェースについて周囲に警告音を鳴らさない点を評価した: A4: 「ヘッドセットインタフェースはプライベートである点が良い」 (P1). しかしながら, 参加者は以下に示すように, ヘッドセットインタフェースを使用した際に周囲の人間が道を譲ってくれなかった点を欠点として指摘した: A5: 「周囲の人間が自分に気づいてくれなかったため, スピーカの代わりに自分で声をかけて道を開けてもらうように頼む必要があった」 (P4); A6: 「ヘッドセットインタフェースは静かである点で優れているが, 周囲の注意を得られない点が欠点である」 (P2).

参加者はスピーカインタフェースの有用性は周囲の環境に依存すると回答し, 空港以外にも一般に混雑した環境や公共エリアではスピーカシステムは有用であるという意見が得られた: A7: 「より混雑した環境ではスピーカインタフェースがより効果的なものになる」 (P1); A8: 「スピーカインタフェースは食料品店やショッピングモールといった公共の場所でも有用だと思う」 (P5). 加えて, 人が少ない環境でもスピーカインタフェースを使用したいという意見も得られた: A9: 「スピーカインタフェースは人がいないときは警告音を鳴らさず, 衝突の危険がある時のみ警告音を鳴らすため, 人が少ない環境でも有用である」 (P3). しかしながら以下に示すように, 静かな環境ではスピーカインタフェースを使うのは好ましくないという意見も得られた: A10: 「空港のような場所ではスピーカインタフェースを使用したいが, もし静かにいるように求められる環境に自分がいた場合は, スピーカインタフェースは使用しない」

(P4); A11:「空港や駅などの公共の場所はスピーカインタフェースを使うに適した場所だと思うが、病院や図書館といった静かな環境ではスピーカインタフェースを使いたくない」(P2).

システムの改善案として二人の参加者から、システムは警告音を鳴らすだけでなく周囲の状況を説明する機能を持っているとより有用である、という意見が得られた: A12:「スピーカインタフェースの効果は感じるが、周囲の状況をヘッドセットを通して教えてくれるシステムがあるとより便利である」(P3); A13:「歩行者が近づいてきている、前方に歩行者が立っている、といったように周囲で何が起きているのかを把握したい。例えば、スピーカは周囲の人に向けて警告音を鳴らし、ヘッドセットはユーザに向けて周囲で何が起きているのかを説明する、といったシステムがあるとより有用である」(P2).

7. 議論

7.1 衝突回避支援システムとしての有用性

定量評価の結果から、BBEEPを用いることでユーザと歩行者の衝突回数を大幅に低減可能であることが確認された。BBEEPとヘッドセットインタフェースを比較した際、衝突予測人数について有意差は確認されなかったが、衝突人数及び衝突率についてはBBEEP使用時の方がヘッドセットインタフェース使用時よりも有意に少なかった。二つのインタフェースは同じポリシーで警告音を鳴らすのが、その警告音を届ける対象(BBEEPはユーザ及び周囲の歩行者、ヘッドセットインタフェースはユーザのみ)が異なる。この結果から、警告音をユーザと周囲の歩行者の両方へ向けて鳴らすことにより、ユーザのみに警告音を鳴らした時よりも、歩行者との衝突の危険性が少ない経路をユーザに提供可能となることが確認された。また、ビデオを用いた観察結果からもこれらの結果を裏付ける結果が得られた。空港内を移動する実験参加者は自身の存在を認識していない歩行者と頻りに遭遇したが、BBEEPを使用することによりそのような歩行者に対しても自身の存在を知らせ、ユーザが進む経路を譲ってもらうように促すことが可能になった。また、アンケート(Q1)及びインタビュー結果(A1-A3)からも、BBEEPに対して歩行者との衝突回数を大幅に減らすことができる点を高く評価したフィードバックが得られた。

7.2 BBEEPが有用となる場面

本研究ではユーザと歩行者の衝突を回避するだけでなく、システムの社会受容性を保つことを目的に、BBEEPの警告システムを及び警告ポリシーを提案した。視覚障害者にBBEEPを使用するタスクを与えたところ、実験参加者からは混雑した公共のスペース(空港、駅、ショッピングモールなど)ではBBEEPを使用したいというフィードバックが得られた(A7, A8, A10, 及び A11)。また実験後に行

なったアンケートにおいてBBEEPは周囲に警告音を鳴らすにも関わらず、空港内を快適に移動することができたかという質問項目(Q2)について参加者はBBEEPとヘッドセットインタフェースの両方ほぼ同じ点数をつけた。しかしながら、周囲に人が少ない状況でBBEEPを使用することについては賛否両方の意見が得られた。ある参加者からは、BBEEPは周囲の人と衝突する危険がない限り警告音を鳴らさないため人が少ない環境でも有用であるというコメント(A9)が得られた反面、ある参加者からは、病院や図書館など静かに過ごすように求められる環境ではBBEEPを使用したくないというコメント(A10, A11)が得られた。

7.3 課題と今後の発展

7.3.1 警告回数の削減

ヘッドセットインタフェースに関して実験参加者から、周囲の歩行者の注意を引くことはできないが静かである点は評価する、というフィードバックが得られた(A4及びA6)。これらのフィードバックは、ユーザに歩行者と衝突しない経路を提供する機能を保ちつつ、音を鳴らす回数を減らすことが重要であることを示している。一方で実験においてスピーカインタフェースを使用する際、視覚障害者の存在に気付いていたがすぐに回避できなかった歩行者に対してもシステムが警告音を鳴らしてしまう、という場面が何度か観察された。これらの問題に対する解決策として、歩行者の顔向きや視線を検出する技術[20]を用いて歩行者がユーザを視認しているかを識別し、識別結果をもとに警告音を鳴らす判断を行うという解決策などが考えられる。

7.3.2 警告音およびシステムの社会受容性に関する調査

提案システムの社会受容性を高めていくためには、ユーザだけでなく周囲の歩行者がシステムに対して抱く印象を調査することも重要となる。しかしながら、本研究で行なった二種類の実験(警告音のデザインに関する調査、視覚障害者による評価実験)では、システムが歩行者とユーザの衝突回避に有効かどうかを調査することに焦点を当てたため、ビープ音や提案システムに対して歩行者側が抱く印象に関する調査は行わなかった。今後は、歩行者側の印象にも焦点を当てて警告音やシステムの評価実験を行うことで、より社会受容性の高いシステムをデザインしていきたい。

7.3.3 さらなる発展

本実験ではBBEEPが歩行者との衝突回避に有効であるかを直接検証するために、直線のルートを移動するタスクのみを与え、視覚障害者へのナビゲーションが必要となるような複雑なルートを移動するタスクは与えなかった。しかしながら、視覚障害者が自力で外出を楽しむためには、複雑なルートに沿って目的地へ移動すること、周囲の状況を把握することなど、さらなる支援が必要となる。実際、参加者(P2, P3)からは警告音を鳴らすだけでなく周囲の

状況に関する情報が知りたいという意見が得られた。一つの解決策として、システムのセンシング結果（歩行者との距離や衝突の危険度など）をビープ音のパラメタに反映させることで、ユーザも周囲の状況をより詳細に把握可能にするシステムが考えられる。また他の改善案として、P2とP3が提案したBBEEPと周囲の状況をヘッドセットを通じてユーザに知らせる機能を組み合わせたシステムが考えられる(A12, A13)。今後は、視覚障害者向けナビゲーションシステム [1], [14] や周囲の情報をフィードバックするシステム [16] とBBEEPを効果的に組み合わせる手法、インタフェースを検討して行きたい。また、周囲の状況に関してより多くの情報をユーザへフィードバックすることにより、ユーザ自身が衝突の回避行動を取るべき状況（高齢者や大きな荷物を持った歩行者のように、歩行者が容易に道を譲ることができない状況など）にも対応可能なシステムへと発展させていきたい。

8. まとめ

本研究では視覚障害者が混雑した環境を移動する際、ユーザと周囲の歩行者両方に対して警告音を用いて衝突の危険性を通知することで、歩行者と衝突しない経路をユーザに提供するシステム(BBEEP)を提案した。BBEEPは歩行者のトラッキング及び将来位置予測をリアルタイムに行うことによりユーザが歩行者と衝突する危険性を予測し、衝突する危険性が予測された時のみ警告音を鳴らす。これにより社会受容性を保ちつつ、かつ歩行者との衝突を回避することが可能となる。本研究では様々な警告パターンに対する歩行者の反応を調査し、ユーザと歩行者の衝突回避に効果的な警告音の鳴らし方をデザインした。さらに本研究は実環境(国際空港)において視覚障害者によるシステムの評価実験を行い、その有用性を検証した。評価の結果、BBEEPを用いることで歩行者との衝突回数を大幅に低減可能であることを確認した。さらに実験参加者からは、BBEEPは空港以外にも駅やショッピングモールなど混雑した公共のスペースでは有効であるというフィードバックが得られた。今後は顔向き検出などのコンピュータビジョン技術を衝突予測に組み込み、警告音を鳴らす回数を減らすことで、BBEEPが有効に働く場面をさらに拡大していきたい。

謝辞 本研究はJST CREST (JPMJCR14E1), JST AIP-PRISM (JPMJCR18ZG), NSF NRI award (1637927), NIDILRR (90DPGE0003), Uptake (CMU ML for Social Good fund), 清水建設の支援を受けた。

参考文献

- [1] D. Ahmetovic, C. Gleason, C. Ruan, K. Kitani, H. Takagi, and C. Asakawa. NavCog: a navigational cognitive assistant for the blind. In *MobileHCI*, 2016.
- [2] A. Fiannaca, I. Apostolopoulos, and E. Folmer. Headlock: a wearable navigation aid that helps blind cane users traverse large open spaces. In *ASSETS*, 2014.
- [3] G. P. Boucek Jr, J. E. Veitengruber, and W. D. Smith. Aircraft alerting systems criteria study. Volume II. Human factors guidelines for aircraft alerting systems. In *BOEING COMMERCIAL AIRPLANE CO SEATTLE WA*, 1977.
- [4] Z. Cao, T. Simon, S. Wei, and Y. Sheikh. Realtime Multi-person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields. In *CVPR*, 2017.
- [5] S. Chumkamon, P. Tuvaphanthaphiphat, and P. Keeratiwintakorn. A blind navigation system using RFID for indoor environments. In *ECTI-CON*, 2008.
- [6] J. Edworthy, S. Loxley, and I. Dennis. Improving auditory warning design: Relationship between warning sound parameters and perceived urgency. In *Human factors* 33, 2, 1991.
- [7] V. Filipe, F. Fernandes, H. Fernandes, A. Sousa, H. Paredes, and J. Barroso. Blind navigation support system based on Microsoft Kinect. In *Procedia Computer Science* 14, 2012.
- [8] A. Hub, J. Diepstraten, and T. Ertl. Design and development of an indoor navigation and object identification system for the blind. In *ASSETS*, 2004.
- [9] K. Ito, M. Okamoto, J. Akita, T. Ono, I. Gyobu, T. Takagi, T. Hoshi, and Y. Mishima. CyARM: an alternative aid device for blind persons. In *CHI*, 2005.
- [10] V. Kulyukin, C. Gharpure, J. Nicholson, and G. Osborne. Robot-assisted wayfinding for the visually impaired in structured indoor environments. In *Autonomous Robots* 21, 1, 2006.
- [11] 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. *ECCV*, 2016.
- [12] D. C. Marshall, J. D. Lee, and P. A. Austria. Alerts for in-vehicle information systems: Annoyance, urgency, and appropriateness. In *Human factors* 49, 1, 2007.
- [13] C. Meredith and J. Edworthy. Are there too many alarms in the intensive care unit? An overview of the problems. In *Journal of advanced nursing* 21, 1, 1995.
- [14] L. Risa, S. Helal, and S. Moore. Drishti: an integrated indoor/outdoor blind navigation system and service, In *PerCom*, 2004.
- [15] J. Redmon and A. Farhadi. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. In *CVPR*, 2017.
- [16] D. Sato, U. Oh, K. Naito, H. Takagi, K. Kitani, and C. Asakawa. NavCog3: An evaluation of a smartphone-based blind indoor navigation assistant with semantic features in a large-scale environment. In *ASSETS*, 2017.
- [17] S. Shoval, J. Borenstein, and Y. Koren. The NavBelt-a computerized travel aid for the blind based on mobile robotics technology. In *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1998.
- [18] I. Ulrich and J. Borenstein. The GuideCane-applying mobile robot technologies to assist the visually impaired. In *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 31, 2, 2001.
- [19] L. Zeng, M. Simros, and G. Weber. Camera-based mobile electronic travel aids support for cognitive mapping of unknown spaces. In *Mobile HCI*, 2017.
- [20] Z. Zhang, Y. Sugano, M. Fritz, and A. Bulling. Mpiigaze: Real-world dataset and deep appearance-based gaze estimation. In *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017.