

視覚障害者向け屋内ナビゲーションシステムの 大規模施設における測位精度の評価

佐藤大介^{†1} 村田将之^{†1} 内藤拓也^{†2} 高木啓伸^{†1} 貞清一浩^{†2}

概要：視覚障害者向けのナビゲーションには高い測位精度が必要とされるが、システムを大規模に設置する場合、設置コストの低減が求められるため、システムに要求される測位精度と設置コストのトレードオフの検討が必要である。一方で視覚障害者向けのナビゲーションについて、どの程度高い精度の測位が必要であるのか、実際の測位精度とナビゲーション体験との関係は明らかになっていない。本稿では 21,000 m² の大規模商業施設に設置した屋内ナビゲーションシステムの視覚障害者ユーザ実験において、得られた測位精度とユーザがシステムの指示通りに移動できたかなどのナビゲーション体験を評価し、視覚障害者の移動に求められる測位精度について考察する。また設置コストと関連するビーコン間平均距離と測位精度の関係についても評価し、設置コストの低減の可能性について議論する。

キーワード：屋内測位、屋内ナビゲーション、視覚障害者、BLE ビーコン

1. はじめに

GPS 等の測位システムにより、視覚障害者が他者の支援を受けずに、初めてあるいは不慣れな場所を自立して歩行することが可能になる[4]。屋外においてはスマートフォンを利用した視覚障害者向けの歩行支援アプリが多数あり、日本国内では準天頂衛星の運用開始で、屋外における更に高い精度でのサービスが期待されている。一方屋内では GPS が利用できないため、様々な代替技術を利用した測位システムの研究・開発が進んでおり、国土交通省の高精度測位社会プロジェクト等で実証実験が実施され実用化が期待されている。

我々は視覚障害者の単独での歩行を支援するための高精度かつ大規模な屋内ナビゲーションの実用化を目指して Bluetooth Low Energy (BLE) ビーコンを使ったスマートフォン向け屋内測位システムを開発している[9]。昨年度、本システムを 21,000 m² の大規模商業施設内に設置し、10 名の視覚障害者を対象に、施設内のナビゲーション実験を実施した。Fallah らは[3]視覚障害者のナビゲーションに必要な測位精度は 3 フィート (約 90cm) 程度であると述べているが、測位精度とナビゲーションが成功するかどうかの関係については検証されていない。そこで実験中のユーザの位置とシステムの測位結果の誤差を評価し、曲がり角においてナビゲーションが成功したかどうかの評価と合わせて、測位に求められる精度について考察した。

また様々な場所でこのような高精度の屋内測位システムを導入する場合には、より低コストで屋内測位システムの構築を実現することが求められる。実験環境では 6~10m の間隔に BLE ビーコンを設置したが、より広い間隔でビーコンを設置し、かつ高精度の測位を維持しなければならない。実社会において屋内測位システムの設置を検討する場

合、一般ユーザ、車椅子ユーザ、外国人旅行者など視覚に問題がないユーザだけを対象として、精度を落とすことで設置コストを低減することがしばしば議題にあがる。しかし全ての場所で視覚障害者ユーザが移動支援を受けられる精度が出せることが望ましい。本稿では BLE ビーコン間の平均距離と測位精度の関係についても評価し、視覚障害者ナビゲーションに求められる測位精度と設置コストのトレードオフについて議論する。

2. 関連研究

ここでは本研究に関連する代表的な屋内測位システムの手法に関する研究についてまとめる。

屋内測位手法には様々なものがあり[6]、代表的なものは RFID, UWB, Wi-Fi, 磁気, BLE 等を利用する手法である。

RFID を用いる場合、比較的安価な RFID タグを環境に設置し、ユーザが持つ RFID リーダで読み取る電波強度を用いて位置を推定する。タグの密度を増やすことで精度を上げることができるが、ユーザはスマートフォンのような汎用機器以外に専用端末を持ち運ぶ必要がある[8]。UWB は 10cm 程度の高精度が期待できるが、専用端末が必要であり、一般的に工場内での物や人のトラッキングが主な用途で、環境構築には高いコストを要する。

一方 Wi-Fi は一般的なスマートフォンに搭載されており、設置されている Wi-Fi 基地局の MAC アドレスや受信信号強度などの情報を使い位置を推定することができる。しかしながら Wi-Fi 基地局が測位のために理想的に配置されているわけではなく精度は 5~10m 程度と言われている[2]。磁気センサも一般的なスマートフォンには搭載されており、新宿駅等でサービスが提供されている[7]。建物の中では構造物に含まれる磁性体の影響で磁気が場所によって変化することを利用するため、事前に環境の磁気マップを作る必

^{†1} 日本アイ・ビー・エム株式会社 東京基礎研究所
IBM Research - Tokyo

^{†2} 清水建設株式会社 技術研究所
Shimizu Corporation, Institute of Technology

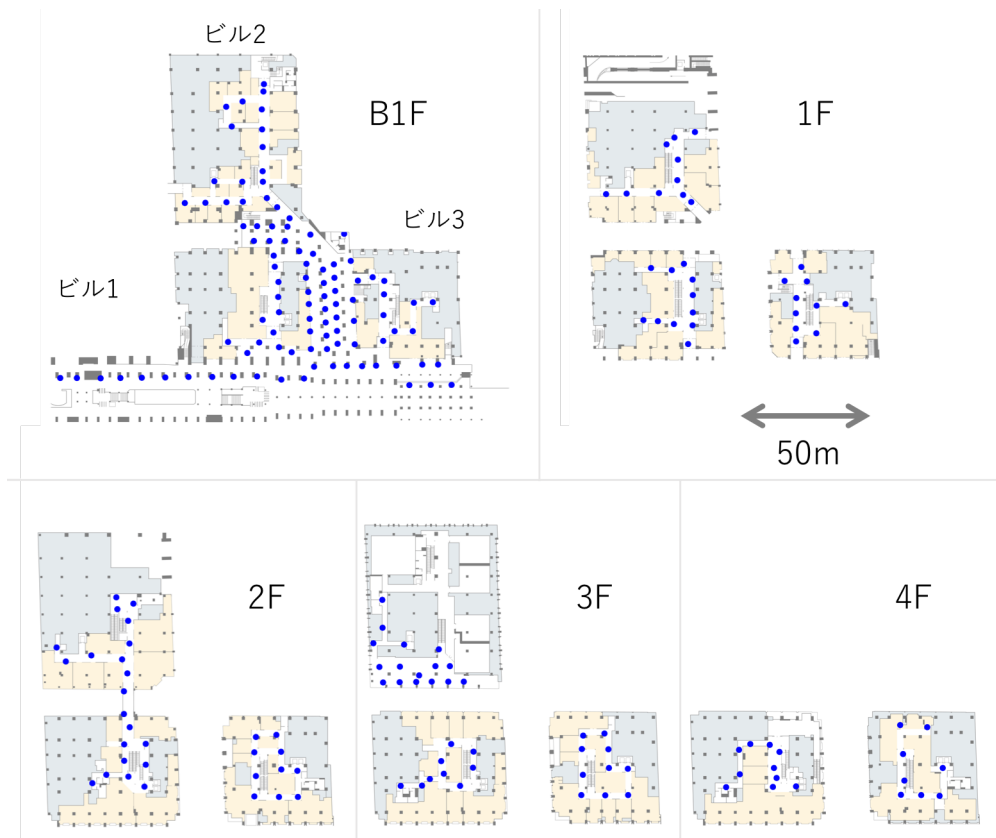


図 1 屋内ナビゲーションを設置した商業施設のフロアマップおよびビーコンの配置

要がある。精度は1~2メートルとされているが、磁場の局所的な変動を利用するため広範囲で測位をする場合には事前にエリアを絞り込む必要があり、Wi-FiやBLEビーコンと組み合わせて利用する。また駅構内など電車による大きな磁場変化の影響を大きく受ける欠点がある。

BLEビーコンはビーコンから受信端末にIDを一方に送信する仕組みで、2013年ごろからスマートフォンでの実用化が進んでいる。BLEビーコンを利用する測位手法には大きく分けて二つの方法がある。一つはビーコンと受信機の距離とRSSIの関係をモデル化した距離減衰モデルを用いて三つ以上のビーコンからの距離を推定し、三辺測量の要領で位置を決定する手法である。この方法では設置状況により電波の反射や壁による遮蔽の影響により測位精度が著しく低下することがある。もう一つの方法は我々が採用する手法で、BLEビーコンを設置した後に環境中の電波強度を実測することで、反射や遮蔽の影響が反映された電波強度マップを作成し、測位の精度を向上させる手法である。また歩行者自律航法(PDR)を組み合わせることで、位置を連続的に追跡し測位精度の向上を図っている[9]。

3. 屋内測位システムの設置

視覚障害者向け屋内ナビゲーションのための屋内測位システムを設置した環境は図1に示すとおり三つの商業ビ



図 2 設置したBLEビーコン

ルにまたがり、地下鉄駅につながる地下歩道部分を含めたのべ21,000㎡の広さがある。屋内測位システムの対象は地下通路および商業施設の通路部分のみとし、商業施設の店舗内は対象外とした。

3.1 BLEビーコンの配置

図1中の青い点は設置した約220個のビーコンの配置を示している。設置したビーコンは図2に示すもので、単三電池2本で約1年間動作する。設置間隔が密なため、ビーコンが発信する電波の強度を少し弱く設定した(-8dBm)。電波強度の測定により設置場所の制約は少なくなるが、金属製のカバー等、電波が大きく減衰するような場所は避ける必要がある。実験環境におけるビーコンの設置間隔は6~10m程度であり、天井の点検口の裏側

もしくは間接照明の死角部分など目立たない部分に設置した。

3.2 電波強度マップの作成

電波強度マップは人手によって作成されることが多いが、規模が大きくなると現実的な時間で電波測定が終わらないという問題が発生する。特に電波環境はシャッター等が降りていない店舗開店時間中に実施する必要があり、より短時間での作業が求められる。そこでレーザーを使った距離計測装置である LIDAR センサを活用し、屋内で数センチから数 10 センチメートルの精度で測位するシステムを作成し、屋内の電波強度測定を行なった。これにより測位精度を落とさずに、人手に比べて約 20 倍早く電波強度マップを作成することが可能になった。対象環境においては各ビルにつき約 3 時間×3 棟に加えて地下通路部分約 3 時間の合計 12 時間で測定を実施した。

3.3 測位精度評価

電波強度マップの作成の後、測位精度を評価するための評価データを、電波強度マップ作成に用いたシステムを利用して別途作成した。測位誤差は推定された位置と評価データに付与された正解位置との間の平面上での距離として算出した。評価データは約 11,000 点の正解位置で構成され、平均で 1.5m、95%分位点で 3.3m であった (図 3)。

4. ユーザ実験における精度評価

設置した屋内測位システムを活用した視覚障害者向けナビゲーションシステムのユーザ実験を実施し、ナビゲーション中のユーザの実際の位置とシステムが推定した位置を比較した。ナビゲーションシステムの案内内容やその使いやすさの評価等については[5]を参照されたい。

4.1 被験者

日本点字図書館の紹介で視覚障害者 10 名に参加いただいた。被験者の属性は表 1 に示す通り、男性 4 名、女性 6 名、全盲 6 名、弱視 4 名であった。

4.2 実験手順

被験者には決まった 3 つのルートをナビゲーションシステムの案内に従って順に歩いてもらった。ルートの長さはそれぞれ 177m、54m、176m (合計 407m) であった。被験者と周囲の状況を記録するため 360 度カメラを用いて実験を記録し、記録したカメラ映像から毎秒の被験者の位置を手動で抽出し、システムが出力した推定位置との比較することにより実環境での測位精度を評価した。

4.3 測位精度

10 名の被験者は全てのルートを歩き、移動距離は平均で 450.0m (SD=32.4) であった。記録映像から全部で 7641 点のユーザの位置を抽出し推定された位置と比較した結果、平均で 1.7m、95%分位点は 3.2m であった (図 4)。

4.4 測位精度とナビゲーション成功率

3 つのルートには合計で 26 箇所の曲がり角があり、被験

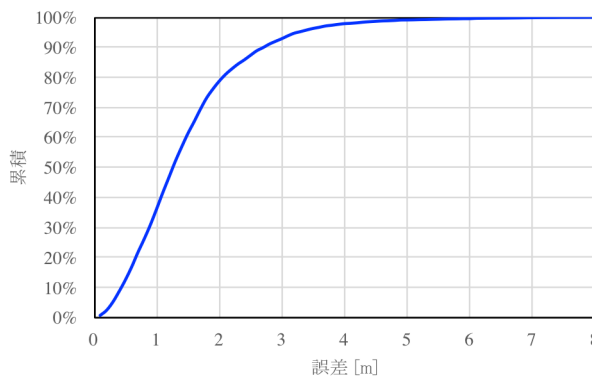


図 3 事前実験の累積測位精度

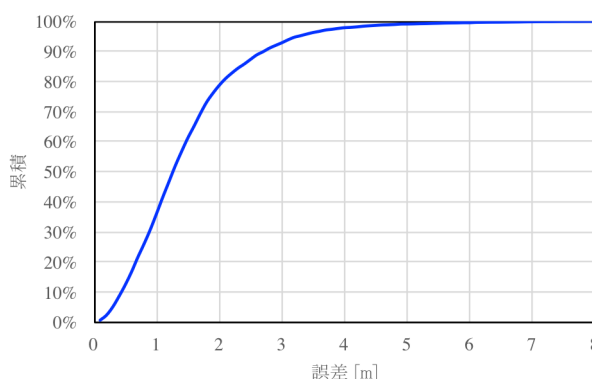


図 4 ユーザ実験中の累積測位精度

表 1 被験者の属性一覧

ID	性別	年齢	視覚障害	歩行支援
P1	女	42	両目矯正0.01	白杖
P2	女	46	右目のみ矯正0.04	白杖
P3	男	54	全盲	白杖
P4	女	44	全盲	盲導犬
P5	男	33	全盲	白杖
P6	女	53	左目のみ矯正0.04	白杖
P7	男	38	全盲	白杖
P8	女	40	全盲	白杖
P9	男	42	左目のみ矯正0.04	白杖
P10	女	48	全盲	白杖

者全体で 260 箇所の曲がり角についてナビゲーションが成功したかどうかとそこでの測位精度について検証した。260 箇所の曲がり角のうち、221 箇所(85%)ではユーザは問題なく進むことができた【成功】。残りの 39 箇所のうち 22 箇所ではシステムが間違いを修正するなどしてユーザがルートに復帰することができた【成功 2】。17 箇所ではユーザの安全上の問題等により実験者が介入した。主な原

因は近隣の店舗内に侵入してしまった (8 箇所), 他人にぶつかりそうになった (2 箇所), ユーザが迷ってしまった (2 箇所), システムトラブル等 (5 箇所) であった【失敗】.

曲がり角における測位精度は平均で 1.3m, 95%分位点で 2.6m であり, 結果として 243 箇所 (93.5%) ではナビゲーションシステムにより正しい方向に進むことができた.

図 5 は曲がり角における測位誤差とナビゲーションが成功したかどうかを測位誤差ごとに頻度分布にしたものであり, 失敗率 (失敗回数/全体回数) も同様に示している. 6m の誤差で成功した箇所が 1 箇所あるが, これは広い地下通路内で大きく手前で曲がってしまったが最終的にルートに戻ることができたため成功としたものであった.

4.5 視覚障害者ナビに必要な測位精度に関する考察

Fallah ら[3]は視覚障害者のナビゲーションに必要な精度は 3 フィート (約 90cm) 程度であると述べているが, 実際にどの程度の精度を必要とされるのか検証されていない. 本来は測位精度をコントロールして実験することが望ましいが, 上記の実測値での測位精度を検証することで, 視覚障害者のナビゲーションに必要な精度について一定の示唆は得られるものと考えられる.

測位精度が 3m 以上の測位精度ではナビゲーションが失敗する割合が増えるようである. 一方で~3.0m の推定精度では同等の失敗率であった. 精度が高くても失敗することがあるのは, システムが案内を音声として出力しユーザが認知するまでにタイムラグがあることや, 曲がり角に隣接する店舗の壁等にぶつかった際にユーザがどのように移動するかなどの要因も絡むと考えられる. そのため成功率を向上させるためには, 位置精度の向上だけではなくユーザの案内の認知や, 環境中での自己位置の認知を補助するための情報を提供することが考えられる.

本評価では試行回数が少ないため測位精度をコントロールした評価により詳細な検証が必要である.

5. ビーコン間距離と測位精度の評価

ビーコンの設置や管理のコストを下げるには, 設置するビーコンの数を減らして設置間隔を広くする必要がある. 一方で先に示したように視覚障害者を対象としたナビゲーションでは高い精度が要求される. ここではビーコン間距離と測位精度の関係について評価し, そのトレードオフについて考察する.

5.1 実験環境

図 1 の実験環境のうち, 地下通路の一部分 (図 6) を対象としてビーコン間距離と測位精度の関係を評価した. 評価対象とするエリアは 25 個のビーコンが設置されているおよそ 20m×40m (800 m²) の空間である.

5.2 評価方法

25 個のビーコンの一部のみを用いた場合の測位誤差を,

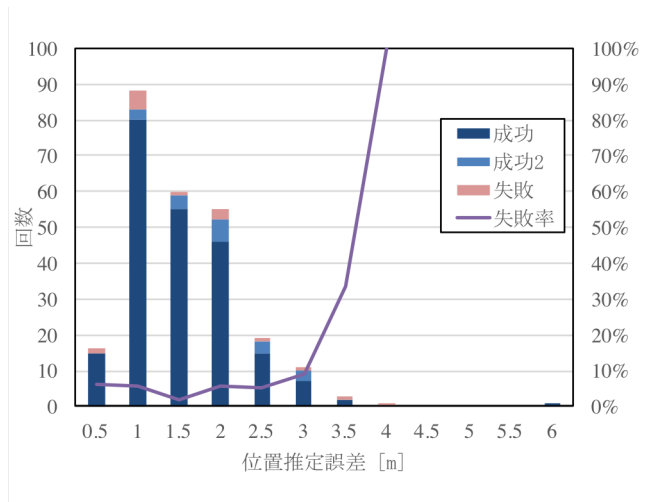


図 5 測位誤差とナビゲーションの成功と失敗

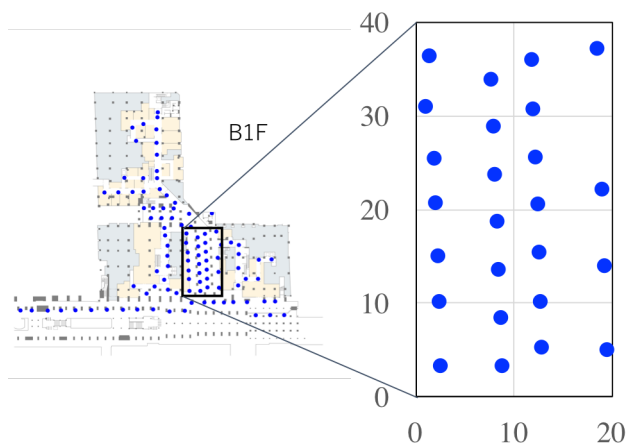


図 6 実験環境の概要

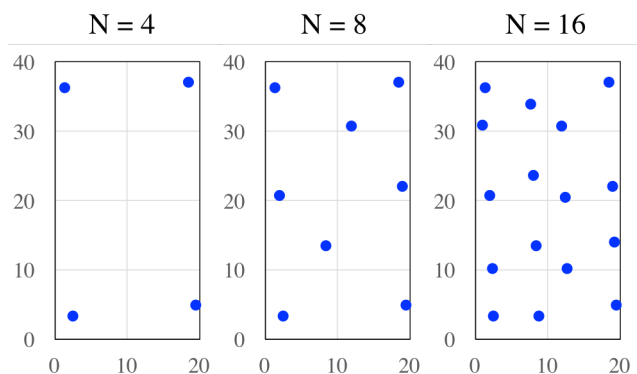


図 7 ビーコンの組み合わせ例

使用するビーコンの個数 N を 1 個ずつ減らし, $N=4$ まで評価した. 電波強度マップと評価データは 3.3 節の評価で用いたデータのうち, 対象エリアに入っているデータのみを利用した. 使用するビーコンを減らした場合の組み合わせについては, 電波強度を用いた測位における測位誤差の下限 [1]に基づいて, 測位誤差が小さくなることが期待されるビ

ーコンの配置の組合せを選択した。代表的なビーコンの配置を図 7 に示す。

5.3 結果

図 8 にビーコンの数を変化させた時の測位誤差の変化の関係を示す。縦軸は測位誤差、横軸は隣接するビーコン間の距離の平均値である。初期位置推定は PDR による位置追跡を行わずに 3 秒間のビーコンの電波強度から位置を推定した結果であり、評価データの移動経路に依存しない精度評価値である。

5.4 測位精度と設置コストに関する議論

この実験の結果によれば、隣接するビーコン間の平均距離が伸びるにつれて位置の推定精度は下がる傾向にある。特にビーコン間平均距離が 10m を超える初期位置推定では顕著に精度が低くなっている。しかしながら 10~20m の広い間隔でも位置追跡による測位精度はあまり下がらなかった。一方 4.5 節でも述べたように、推定誤差が 3.0m 程度まではナビゲーションの成功率は高かった。また 95% 分位点の測位精度とナビゲーションの成功率が高い精度が概ね一致しており、視覚障害者ナビゲーションに必要な精度については、平均精度ではなく 95% 分位点の精度を元に議論するのが良いと考えられる。本稿の実験だけでは十分なデータが揃っていないとは言えないが、95% 分位点における精度が 3m 程度に収まれば、10~20m の広いビーコン間隔でも視覚障害者向けナビゲーションに利用でき、設置コストを低減できる可能性がある。今後の課題は測位システムの改良による測位精度の向上と、ビーコン間距離が広い場合におけるユーザ実験による検証が挙げられる。

6. おわりに

本稿では BLE ビーコンを使った屋内測位システムの位置精度と、視覚障害者のナビゲーションに必要な推定精度に関して評価・議論した。10 名の視覚障害者のナビゲーション実験では平均 1.7m、95% 分位点で 3.2m の精度で位置を推定することができ、93.5% の割合でユーザは迷う事なくナビゲーションを完了することができた。また実験環境の一部についてビーコン数を減らしたデータを使ってビーコン間平均距離と測位誤差の関係について評価し、視覚障害者ナビゲーションに必要な測位精度と設置コストについて議論した。

参考文献

- [1] Adrian N. Bishop, Barış Fidan, Brian D. O. Anderson, Kutluyıl Doğançay, and Pubudu N. Pathirana. 2010. Optimality Analysis of Sensor-target Localization Geometries. *Automatica* 46, 3: 479–492.
- [2] Yu-Chung Cheng, Yatin Chawathe, Anthony LaMarca, and John Krumm. 2005. Accuracy Characterization for Metropolitan-scale Wi-Fi Localization. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems*,

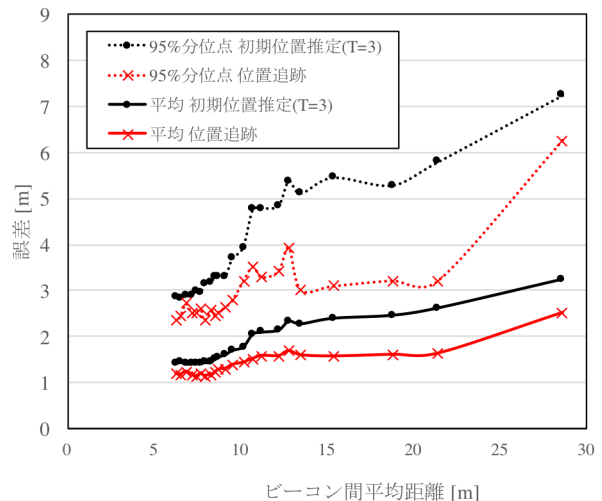


図 8 ビーコン間平均距離と測位精度

Applications, and Services (MobiSys '05), 233–245.

- [3] Navid Fallah, Ilias Apostolopoulos, Kostas Bekris, and Eelke Folmer. 2013. Indoor Human Navigation Systems: A Survey. *Interacting with Computers: iws010*.
- [4] Nicholas A. Giudice and Gordon E. Legge. 2008. Blind Navigation and the Role of Technology. In *The Engineering Handbook of Smart Technology for Aging, Disability, and Independence*, John Wiley & Sons, Inc., 479–500.
- [5] Daisuke Sato, Oh Uran, Kakuya Naito, Hironobu Takagi, Kris Kitani, and Chieko Asakawa. 2017. NavCog3: An Evaluation of a Smartphone-Based Blind Indoor Navigation Assistant with Semantic Features in a Large-Scale Environment. In *Proceedings of the 19th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*.
- [6] Jiang Xiao, Zimu Zhou, Youwen Yi, and Lionel M. Ni. 2016. A Survey on Wireless Indoor Localization from the Device Perspective. *ACM Comput. Surv.* 49, 2: 25:1–25:31.
- [7] Yahoo. 2016. 「Yahoo!地図」アプリ、新宿駅などの駅構内で現在地確認とルート案内が可能に. Retrieved from <https://about.yahoo.co.jp/pr/release/2016/06/09b/>
- [8] 山下晃弘, 佐藤佳, 佐藤俊太, 松林勝志. 2016. 視覚障がい者ナビゲーションを目的としたRFIDタグと準天頂衛星による位置測位システム. *研究報告アクセシビリティ (AAC)* 2016-AAC-1, 2: 1–7.
- [9] 村田将之内, 内藤拓也, 佐藤大介, 五十嵐雄哉, 貞清一浩, 高木啓伸. 2016. BLEビーコンを用いた視覚障害者向け高精度屋内外ナビゲーション. *研究報告アクセシビリティ (AAC)* 2016-AAC-1, 3: 1–8.