

[研究助成 (C)]

視覚障害者支援のための頑健かつ高精度な屋内可視光位置認識

Robust and Accurate Indoor Visible Light Positioning for Assisting the Visually Impaired

2197006



研究代表者

北海道大学大学院
情報科学研究科

博士後期課程

嶋田 祥太

[研究の目的]

本研究の目的は、視覚障害者のための音声案内普及である。現在世界で約3億、日本で約150万人の視覚障害者がいる。国土交通省によると、国内で視覚障害者の駅構内転落事故が年に100件程度発生しているなど、音声案内の重要性が指摘されている [1]。音声案内は専用の端末ではなく、近年保有率が急増しているスマートフォン（スマホ）によるものが有効とされ、スマホ保持者を駅構内で乗車口の前まで案内するといった応用のためには、スマホの位置を高精度に認識する必要がある。そして危険回避のために、様々な環境に対し頑健であるべきである。我々はこれを、可視光通信の知見を用いて達成し、視覚障害者が安心できる世の中を実現する。しかし、既存の実システムでは、測位精度の不足が指摘されている。例えば国土交通省により平成29年に行われた調査では、屋内ナビゲーション手法に電波を用いた場合における測位性能の悪さや、方位が計算できないことによって、目的地に行く際に迷ってしまう、進むべき方向がわからない、などといったユーザーエクスペリエンスの低下が指摘されている [2]。本研究では高精度な屋内スマートフォン測位手法の提案によりこれら応用例を実現可能とするため、満たすべき要件を次のように定めた。

- ・二次元測位精度が1 m 未満であること
- ・方位を推定可能なシステムであること

[研究の内容, 成果]

提案手法

提案手法の目標は屋内に存在する携帯端末の6自由度 $(x, y, z), (\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ を推定することである。概要は図1で示される。

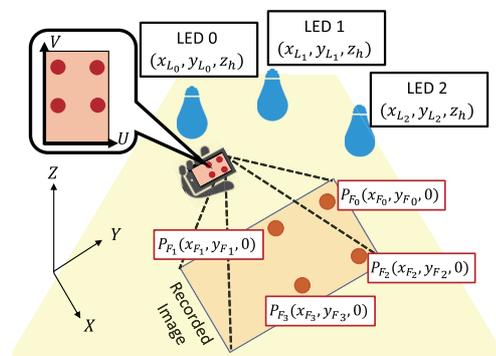


図1 提案手法の概要

スマートフォンは未知の座標3次元座標 (x, y, z) に存在する。本研究はカメラを用いた手法であるので、この3次元座標は正確には撮像素子の位置情報を示している。この時の端末の姿勢（傾き）をそれぞれピッチ角、ロール角、ヨー角と呼ぶ。伝送路モデル構築のためにまずは理想的な環境として、天井と床のみが存在する空間を想定し、図1のように、3つ以上のLEDを天井に設置する。天井と床面はX-Y平

面に並行であるとし、3つ以上のLEDを天井に設置する。床面のZ座標は0、天井のZ座標、すなわち高さは z_h とする。この時ユーザーに与えられる k 番目のLEDの既知の3次元座標を (x_{Lk}, y_{Lk}, z_h) とする。LEDをただ1つだけ点灯させた場合、床面はLEDの光を反射する。カメラでこの床を撮影した場合、その明るさはLEDからの距離によって減衰し、暗くなる。提案手法では、スマートフォンカメラでこの明るさを計測し、LED直下と撮影された床面間の距離を推定することでターゲットの位置を計算する。

この時、課題が3点存在する。実際には点灯しているLEDが複数存在するため、これらLEDを識別する必要がある点、互いの変調光が重なり合い、干渉する点、低速で動作する動画カメラに対し、変調光は人の目に有害な刺激を与えないようちらつきを感じさせない設計にする必要がある点、である。

これらを解決するために、各LEDは直流印加直交周波数分割多重 (DC-biased optical-orthogonal frequency division multiplexing: DCO-OFDM) 方式 [3] を用いて各LEDは固有に割り当てられた周波数の正弦波で変調される。これによって環境光やLED同士の干渉を最小限にし、可能な限り多くのLEDを検出できる。そして、カメラが床面を向いた状態で撮影すると、図1のように、床面の一部を抽出でき、画素ごとに撮影した床面の明るさから、エイリアス、距離減衰、周波数フィルタを考慮した周波数解析を行うと、その座標を推定できる。そして撮影された各画素と床面の射影関係によって、画像平面の6自由度、すなわちスマートフォンの6自由度を推定する。以上の手順を要約する。

- ・LED直下と撮影された床面間の距離推定
- ・推定された床面の座標推定
- ・スマートフォンの6自由度推定

まず送信機はLEDを正弦波で変調する。時刻 t における k 番目のLEDの発光強度 $b_k(t)$ は次の式で表される。

$$b_k(t) = \sin(2\pi t(A_k f_s + m_k)) + \alpha \quad (1)$$

f_s は信号の基本周波数、 m_k は周波数キャリアのインデックス、 α は $b_k(t)$ が負の値とならないよう追加されるDCバイアス、 A_k は信号がちらつかないように十分高い周波数を確保するための任意自然数である。ただし、信号同士が干渉しないようにするため、各LEDに異なる m_k を割り当てる必要がある。

次に受信機は各LEDのキャリアインデックス情報を事前に取得しカメラを用いて光を検出する。そして信号の受信強度を周波数解析により求める。カメラのフレームレートを $f_c = f_s$ 、フレーム周期を $T_c = 1/f_c$ 、撮影する画像の枚数を $N = f_s$ とする。サンプリング定理より、 $m_k < N/2$ を満たす必要があり、検出できるLEDの数は最大で $N/2 - 1$ である。このとき、各LEDから送信された床面反射光 $b_k(t)$ をカメラで撮影し、 n 番目に得る画像に注目する。撮像素子の動作は時間領域に対して積分的であるので、露光時間比を η 、シャッタースピードを ηT_c とし、カメラが得る輝度 I は

$$I = \sum_k \frac{2\pi X(d_k)}{T} \int_0^{\eta T_c} b(t + \delta T_c + n T_c) dt \quad (2)$$

である。ただし、 δ は信号に対するシャッタタイミングの遅れで、 $X(d_k)$ は距離 d_k と伝送効率によって決まる受信信号の減衰関数である。従って、本研究の目的である距離 d_k の計算は、 I を用いた $X(d_k)$ の逆関数により達成される。

$$d_k = \frac{1}{\rho} \sum_k \cos h^{-1} \left(\frac{C^k}{|B|} \right) \frac{2\pi X(d_k)}{T} \quad (3)$$

ここで、 ρ は光の反射光の拡散度合いを表す係数、 C^k は k 番目のLEDが持つ固有のパワーの関連する係数である。これらの係数は計測時に推定するか、計測前にキャリブレーションを行

う。

受信機は、事前に取得する各 LED の配置と、上式より得られた各 LED からの距離を用いて、3 辺測量の原理によって二次元位置を推定する。そして、画像内の複数のピクセルを用いて同様の手順を行うと、画像内のピクセル配置と、推定される二次元座標の射影関係を表すカメラ行列によって 6 自由度が推定できる。

計測実験

二次元測位の環境：まず、スマートフォンの二次元座標を推定する実験を行なった。実験環境は図 2 で示される。特に断りのない限り、実験は全て下記の条件で行った。iPhone 7 を人が手で持つことを想定し、三脚を用いて高さ 1.15 m に固定、背面カメラを地面に正対させた。影や遮蔽ができないよう周辺の障害を取り払った。LED ビーコンを高さ 2.6 m の天井に設置し、各 LED 0, 1, 2, 3 の二次元座標はそれぞれ (1, 0.5), (1, 3.0), (3.2, 0.5), (3.2, 3.0) で、これは、実験環境における既存照明と同じ配置として設定された。また、LED は間隔が近すぎない適当な周波数として、 $m = (1, 6, 13, 20)$ ($k=0, 1, 2, 3$) とした。すなわち、LED はそれぞれ 101, 106, 113, 120 Hz で変調される。これは折り返し雑音により、カメラでは 1, 6, 13, 20

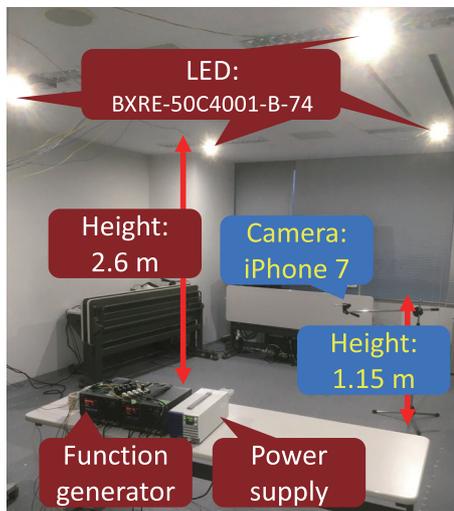


図 2 計測環境

Hz として記録される。

各計測点で推定された座標の重心は図 3 の円で示され、 P_F からのずれが矢印で示される。すなわちこの図は各測定点における系統誤差を示している。系統誤差が非常に少ない箇所と 10 cm 以上の系統誤差が存在する箇所が見取れた。全体として、いずれかの LED に近い箇所では精度がよく、カバレッジの外縁部付近で精度が悪化していることがわかる。このことから、提案手法におけるカバレッジの限界が示唆されている。推定された全ての位置による絶対誤差の累積分布関数は図 3 で示され、90 パーセントイル誤差 0.42 m 未満を達成できることが確認された。応用例として述べた、高精度な屋内ナビゲーションに必要な測位誤差 1 m 以内を満たしている。

6 自由度推定：同様の環境で、スマートフォンの姿勢をいくつか変更し、角度推定への影響を調査した。人がスマートフォンを持つことを想定し、ロール角、ピッチ角、ヨー角をそれぞれ

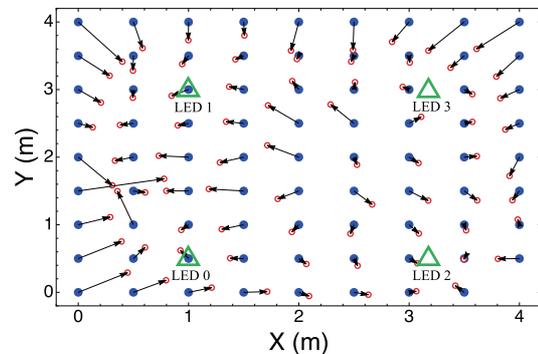


図 3 LED の配置と測位結果

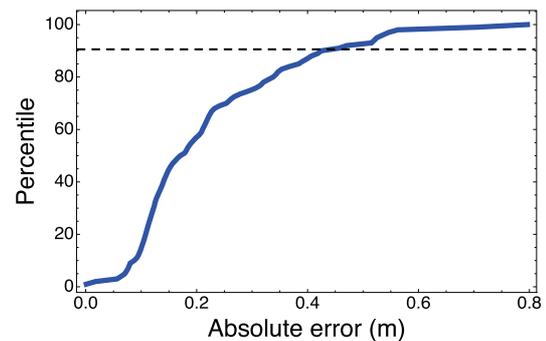


図 4 測位結果の累積分布関数

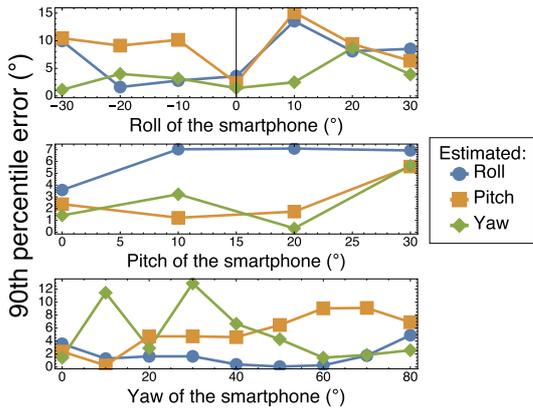


図5 6自由度推定結果の各条件における90パーセンタイル誤差

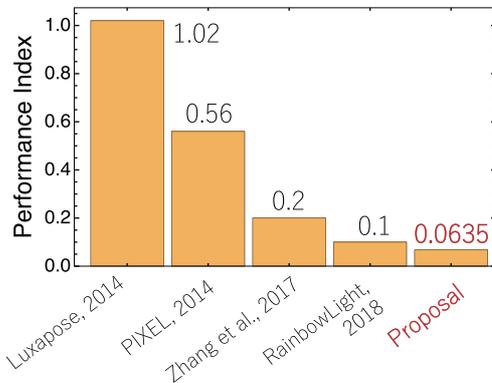


図6 パフォーマンスインデックスの比較

−30度から30度、0度から30度、0度から90度までとし、それぞれ10度ずつ変更してスマートフォンの姿勢を100回ずつ推定した。各角度の推定結果より、得られた角度の90パーセンタイル誤差を図5で示す。各角度の90パーセンタイル誤差の平均は、ピッチ、ロール、ヨーでそれぞれ5.78度、5.69度、3.96度であった。

考察

まず、カバレッジとLED配置数に関して考察する。Afzalanらは、測位精度に対するLED配置数の少なさと、カバレッジの広さを示す指標として、パフォーマンスインデックス(PerformanceIndex: PI)を提案した[4]。提案手法のPIは0.0675であり、他の先行研究と比較して非常に低く、良い値であることがわか

る。これは、直接光源を撮影する手法と比較して、測位精度に大きな差はない一方で、LEDの設置間隔を2.0m以上と大きくできることに起因している。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では、床面反射光をモデル化し、床面を撮影したカメラの画像を用いて、複数のLED-撮影点間の距離から撮影画像の二次元座標を求める手法を提案した。さらに、画像内から撮影した床座標を複数用いて、到来角推定によってスマートフォンの6自由度を推定する方法を提案した。今後は、提案手法を実際の応用例へと適用すべく、実環境での大規模な実験に取り組む。

[成果の発表, 論文等]

1. 嶋田, 橋爪, 杉本: LED照明の床面反射光を利用したスマートフォン可視光測位システム, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J104-D, No. 4, pp. 308-317 (2021).
2. Shimada, S., Hashizume, H., Sugimoto, M.: RefRec: Indoor Positioning Using a Camera Recording Floor Reflections of Lights, In Proceedings of UBIComm 2022, Nice, France, pp. 55-63, 2020.

[参考文献]

- [1] 国土交通省, “新技術等を活用した駅ホームにおける視覚障害者の安全対策検討会,” https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr7_000032.html. 参照 Dec 2020.
- [2] 国土交通省, “第7回位置情報基盤WG,” https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/ichikibanWG_7.html. 参照 Dec 2020.
- [3] 嶋田祥太, 橋爪宏達, 杉本雅則, “CMOSイメージセンサを用いたOFDM速可視光通信,” 電子情報通信学会論文誌B, vol. 102, no. 8, pp. 605-613, 2019.
- [4] M. Afzalan and F. Jazizadeh, “Indoor positioning based on visible light communication: A performance-based survey of real-world prototypes,” ACM Computing Surveys, vol. 52, no. 2, pp. 1-36, 2019. DOI: 10.1145/3299769.

- [5] Y. -S. Kuo, P. Pannuto, K. -J. Hsiao, and P. Dutta, "Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light," Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking, pp.447-458, 2014. DOI: 10.1145/2639108.2639109.
- [6] Z. Yang, Z. Wang, J. Zhang, C. Huang, and Q. Zhang, "Wearables can afford: Light-weight indoor positioning with visible light," Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, pp.317-330, 2015. DOI: 10.1145/2742647.2742648.
- [7] C. Zhang and X. Zhang, "Pulsar: Towards ubiquitous visible light localization," Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.208-221, 2017. DOI: 10.1145/3117811.3117821.
- [8] L. Li, P. Xie, and J. Wang, "Rainbowlight: Towards low cost ambient light positioning with mobile phones," Proceedings of the 24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.445-457, 2018. DOI: 10.1145/3241539.3241545.