



Title	LED反射光を用いることによるスマートフォン屋内位置認識に関する研究
Author(s)	嶋田, 祥太
Citation	北海道大学. 博士(情報科学) 甲第14582号
Issue Date	2021-03-25
DOI	10.14943/doctoral.k14582
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/81257
Type	theses (doctoral)
File Information	Shota_Shimada.pdf



[Instructions for use](#)

令和2年度 博士論文

LED 反射光を用いることによるスマートフォン 屋内位置認識に関する研究

北海道大学 大学院情報科学研究科 情報理工学専攻
数理科学講座 知能情報学研究室
嶋田 祥太

令和3年1月18日

Smartphone Indoor Positioning using LED Reflection

Shota SHIMADA

Laboratory of Intelligent Information Systems
Research Group of Mathematical Science
Division of Computer Science and Information Technology
Graduate School of Information Science and Technology
Hokkaido University

January 18 2021

概要

LED 照明の床面反射光とスマートフォンカメラを用いた屋内位置認識手法を提案する。スマートフォンは近年普及している個人用携帯端末であり、これを用いた屋内位置認識技術の需要が増加している。しかし、いまだ標準的な測位技術は確立されておらず、電磁波、音、コンピュータビジョンなど様々な技術を活用した屋内測位手法が研究されている。中でも本研究では、高精度に測位可能な手法として可視光測位に注目する。可視光測位とは、照明光と受光素子を用いた情報伝達技術の一種である可視光通信を応用した位置認識技術である。メリットとして、人が利用する建造物には通常、照明が遍在しているため、測位インフラの整備が比較的容易であること、また、信号干渉が起きにくく、カメラを用いた幾何学的な計算により高精度に測位可能なこと、などが挙げられる。スマートフォンは一般的にカメラが内蔵されており、これを用いることで光信号を受信できる。

この背景によりスマートフォンカメラを用いた可視光測位が今日まで研究されてきたが、ほとんどの既存手法が持つ特徴として、LED 変調光などの光源、ランドマークをカメラで直接撮影し、幾何学的にターゲットの位置を計算する点がある。この特徴のメリットは、誤差数 cm 単位の高精度な測位を実現できることだが、デメリットとして光源探索のために必要な解像度の高いスマートフォンカメラや計算時間など、要求リソースコストの高さや、インカメラの画角の限界により、LED の配置や天井高に制約があることなどが挙げられる。

そこで本研究では、この問題を回避しつつ、同程度の性能で測位可能な手法の実現を目的とし、床面反射光の撮影により測位するシステム、RefRec を提案する。RefRec では、床面反射光をカメラで撮影した画像を、LED からの距離に関係する新たな減衰モデル式に当てはめ、計算した複数の LED-撮影点間の距離から撮影画像の二次元座標を求める。そして、得られた複数の床面座標とカメラの幾何学的な位置関係から、スマートフォンの 6 自由度を推定する。

提案手法はプロトタイプとして LED とスマートフォンに実装され、計測実験にて提案モデルの妥当性を確認した。そして、撮影した床の二次元座標推定精度を調査し、90 パーセントイル誤差 0.42m であることを明らかにした。最後に、スマートフォンの 6 自由度を推定し、 (x, y, z) 座標について 90 パーセントイルの絶対誤差は 0.2073m、0.1713m、0.002464m、ピッチ、ロール、ヨー角についてそれぞれ 5.78° 、 5.69° 、 3.96° という結果が得られた。実験結果に対する考察によって、誤差の要因として、床面の反射率、カメラの角度、人などによる影が強く影響することを議論する。得られた結果を先行研究と比較し、障害物がない環境にて、十分な密度の LED 配置や天井の高さが確保できない場合においても高い性能を維持できることを特徴として述べる。そして今後の取り組みとして、導出した LED-カメラ間モデルを活用した可視光通信手法や障害のある環境における提案手法の適用について言及する。

目次

概要	1
第 1 章 序論	8
1.1 屋内位置認識とは	8
1.2 研究背景	9
1.3 研究課題	9
1.4 解決方針	10
1.5 本論文の構成	11
第 2 章 従来手法	12
2.1 信号を用いるスマートフォン測位の要素技術	12
2.2 アクティブ測位手法	14
2.2.1 音波	14
2.2.2 無線 LAN	15
2.2.3 無線 PAN	16
2.2.4 RFID	17
2.2.5 IMES(Indoor MESSAGING System)	18
2.2.6 IR	18
2.3 パッシブ測位手法	18
2.3.1 コンピュータビジョン	18
2.3.2 地磁気	19
2.4 可視光測位	20
2.4.1 PI	21
2.4.2 PD を用いる手法	21
2.4.3 カメラを用いる手法	25
2.4.4 先行研究の課題	27
第 3 章 提案手法	29
3.1 LED 直下と撮影された床面間の距離推定	30
3.2 撮影点の推定	35
3.3 スマートフォンの 6 自由度推定	37

3.3.1	IMU を用いた 6 自由度の推定	37
3.3.2	AoA による 6 自由度推定	38
第 4 章	実装	40
4.1	送信機	40
4.2	受信機	41
第 5 章	計測実験	44
5.1	実験設定	44
5.2	反射光減衰モデルのパラメータ推定及び評価	44
5.2.1	実験設定	44
5.2.2	カメラパラメータによる影響	45
5.2.3	床面の材質	47
5.2.4	環境光	50
5.2.5	二次反射	52
5.2.6	カメラの角度	52
5.2.7	カメラのフォーカス	53
5.2.8	撮影画像の解像度	54
5.3	測位性能の評価	54
5.3.1	障害のない環境における測位	54
5.3.2	影のある環境における測位	55
5.4	6 自由度推定性能の評価	57
5.4.1	6 自由度推定に用いる撮影点数の決定	57
5.4.2	6 自由度の推定性能	58
第 6 章	考察	60
6.1	測距誤差の要因とその影響	60
6.1.1	カメラ行列及びレンズ歪み	60
6.1.2	カメラパラメータによる影響	61
6.1.3	床面の材質	61
6.1.4	環境光	61
6.1.5	二次反射	63
6.1.6	カメラの角度	63
6.1.7	カメラのフォーカス	63
6.1.8	撮影画像の解像度	63
6.2	測位誤差の要因とその影響	64
6.3	影による測位誤差への対処	65
6.3.1	先行研究との比較	67
6.3.2	提案手法の制限	67

6.4	電力消費	68
6.5	デバイスの製造コスト	69
第7章	結論	70
参考文献		73

目次

2.1	測位における要素技術の概略図	13
2.2	LED の配置と、カメラで直接撮影可能な LED の数の関係	28
3.1	提案手法の概要	30
3.2	カメラを用いた測距フロー	31
3.3	反射面とその測距の概略	31
3.4	送信信号とカメラの動作	32
3.5	送信周波数と受信スペクトルの関係	33
3.6	両モデルの比較	35
3.7	多点測量と撮影点の関係	36
3.8	撮影点と 6 自由度の変換	38
3.9	撮影点と 6 自由度の変換	38
4.1	送信機の構成	41
4.2	送信機の各機材	41
4.3	撮影した画像内の各画素における画素値とその出現回数，及び真値を中心とした正規分布のグラフ	42
5.1	実験環境	45
5.2	シャッタースピード 16.7ms における距離ごとの振幅スペクトル	46
5.3	シャッタースピード 6.7ms における距離ごとの振幅スペクトル	46
5.4	シャッタースピード 3.3ms における距離ごとの振幅スペクトル	46
5.5	シャッタースピード 2.0ms における距離ごとの振幅スペクトル	47
5.6	シャッタースピード 0.1ms における距離ごとの振幅スペクトル	47
5.7	各設定における式 (3.22) の推定パラメータ C_R^k	47
5.8	各 SS, ISO における測距誤差の CDF	48
5.9	7 種類の床面	48
5.10	7 種類の床面による距離と振幅の関係	49
5.11	7 種類の床面による測距誤差の CDF	50
5.12	直射日光下における実験の様子	51
5.13	各環境における距離と振幅の関係	51

5.14	各環境における計測地点の CDF	52
5.15	二次反射とそれに伴う誤差	52
5.16	カメラの撮影角とそれに伴う誤差	53
5.17	3 種類のフォーカス	53
5.18	解像度と標準偏差の関係	54
5.19	スマートフォンの測位誤差	55
5.20	光源を変更した実験	56
5.21	絶対誤差及び標準偏差のヒートマップ	56
5.22	$(x, y) = (0, 0)$ における影の領域とその測位	57
5.23	8 箇所における各セグメントの平均測位誤差	58
5.24	床面 9 点を撮影する様子	58
5.25	スマートフォン 6 自由度の推定結果	59
5.26	スマートフォンの各姿勢における各推定角度の 90 パーセンタイル誤差	59
6.1	直射日光による直流分を加味して振幅を補正する例	62
6.2	各 LED の振幅のマップ	64
6.3	振幅ごとにソートされたセグメント $ B_m^k $	65
6.4	2 階微分し, スムージング処理をしたセグメント	66
6.5	各 LED の抽出された LOS 領域	66
6.6	LOS を用いた測位	66
6.7	各 LED の抽出された LOS 領域における CDF	67

表目次

2.1	各手法の特徴比較	20
5.1	各設定における式 (3.22) の推定パラメータ ρ	47
5.2	各フォーカスの平均測距誤差及び標準偏差	53
6.1	カメラを用いた可視光測位手法の比較 1	68
6.2	カメラを用いた可視光測位手法の比較 2	68

第 1 章

序論

1.1 屋内位置認識とは

今日、屋内環境には多くの人や物が存在し、これらのターゲット検知や種類の識別、あるいは位置座標の推定といった技術は屋内位置認識と呼ばれる。その市場は 2020 年に 61 億米ドル、2025 年までには 170 億米ドルへ増加すると予測されている [1]。人をターゲットとする場合、その位置を推定する手法は大きく 2 種類に大別される。屋内に設置されたカメラやセンサなどでターゲットを検出するデバイスフリー手法 [2] と、ターゲット自身が携帯可能な端末を活用して自己位置を計算する手法である。

デバイスフリー手法では、ターゲットの負担がほとんどないメリットがある反面、複数ユーザが混在するような公共の場で固有のユーザを特定することは、技術的ないしはプライバシーに対する課題がある [3]。そのため、デバイスフリー手法の応用例はプライベート空間におけるジェスチャ認識 [4] や、あるいは個人や群衆の行動解析 [5] などである。

一方で、携帯可能な端末を用いる手法は、近年スマートフォンの普及に伴って注目されている [6]。この手法では、人の代わりに、人が保有するスマートフォンをターゲットとする。この場合、応用例によって異なるが、基本的に次の 3 つの情報の獲得が目的となる。

- 位置情報
- 姿勢情報
- 運動情報

位置情報とは、屋内のどの階層やエリアにいるのかといったセマンティックレベルのもの [7] から、マップ上の 2 次元座標、あるいはワールド座標上のどこにいるのかといった 3 次元座標 (x, y, z) レベルのものまで想定される。例えば適切な HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) 制御によるエネルギーの節約 [8] といった応用例ではセマンティックレベル、ジェスチャ入力 [9] といった応用例では 3 次元座標レベルのものが要求される。姿勢情報とは、スマートフォンの向きを指し、屋内でどの方向を向いているかという 1 軸回転角、あるいは、ピッチ、ロール、ヨー角 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ の 3 軸回転角を意味する。この 3 軸回転角と 3 次元座標の 6 パラメータにより、スマートフォンの場所と向きが表現可能で、これを 6 自由度と呼ぶ [10]。そして、任意時刻におけるスマートフォンの速度、ないしは加速度を運動情報と呼ぶ。運動情報はベクトルで表現され、次の時刻におけるスマート

フォンの位置情報や姿勢情報の推定に活用可能である。これら運動情報はターゲットのトラッキングとして、病院や介護施設での患者や医師の行動記録 [11] といった応用に期待されている。

1.2 研究背景

本研究では、このうち位置情報と姿勢情報、特にスマートフォンの2次元座標 (x, y) 及び方位 θ_z の情報を活用した屋内ナビゲーションシステムに注目する。屋内ナビゲーションシステムの具体的な応用例として、視覚障害者の支援 [12] や、個人の買い物支援 [13] などが挙げられる。

視覚障害者は現在世界で約3億、日本で約150万人存在する。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2020年に63件発生しており、音声案内などの屋内ナビゲーションによる安全対策の重要性が指摘されている [14]。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によるものが有効とされ、スマートフォン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、歩幅単位、すなわち誤差数10cm程度のナビゲーションが必要である。

また、個人の買い物支援などの消費活動喚起システムにおいては、国土交通省が東京オリンピック・パラリンピック開催にあたって重要な課題と定め、高精度測位社会プロジェクト検討会が開かれている [15]。他にも、同省の総合技術開発プロジェクト「3次元地理空間情報を活用した安全・安心・快適な社会実現のための技術開発」の中の「パブリックタグ」屋内測位の標準仕様策定においても、誤差1m未満の高精度な屋内スマートフォン測位を活用した例として、特定場所における購買や動作、店舗内や通路内の人員流動、の把握が挙げられている [16]。

このように、誤差数10cmから1m未満の精度でスマートフォンを測位することによる効果が挙げられている一方で、実際に検討されている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るユーザエクスペリエンスの質低下が指摘されている [17]。本研究では高精度な屋内スマートフォン測位によるこれら応用例の普及を目指し、測位システムが満たすべき要件を次のように定めた。

- 2次元測位精度が1m未満であること
- 方位を推定可能なシステムであること

1.3 研究課題

本研究では、前述の要件を満たす測位システムの有望な手段として、可視光測位に着目した。これは、LEDなどから発せられる可視光を用いて通信を行う可視光通信技術 [18, 19] の応用である。フォトダイオード (Photo diode: PD) やイメージセンサでLED変調光を検出し、距離や角度などからターゲットの位置を計算する [13]。測位専用の新たな器具の設置、あるいは精密な学習データの収集が必要な他の手法と異なり、屋内には照明が至る所に存在するため、可視光測位は既存の照明インフラを活用することで実現可能である。また、可視光は壁を貫通せず、高々数10kHzで変調されるのでマルチパスの影響を受けにくい。そのため誤差1m未満の精度で測位できる [20]。

PDを用いた可視光測位は消費電力が低いメリットがあるが、スマートフォンに環境光センサとし

て搭載されている PD は応答速度及び受信感度が悪く、測位への利用は困難である。そのため、先行研究では高速に動作する PD をスマートフォンに別途装着しており [21]、スマートフォン実装の PD を用いた測位システムは実現されていない [22, 23]。そのため本研究では、スマートフォンに取り付けられたカメラをそのまま用いる可視光測位手法をもって測位システムの実現を目指す。

課題は LED の検出方法である。既存手法の多くは、天井の LED に異なる ID を割り当てて変調光を送信し、スマートフォンのインカメラを用いて直接撮影することで識別する。しかし、スマートフォンのカメラは一般的に視野角 (Field of View: FoV) が限られており、配置された複数の LED を撮影するのは容易ではない。それゆえ、天井高、LED 配置、または測位可能な領域、すなわちカバレッジに制約があり、測位困難な環境においては、使用者は LED を撮影するために、意図的にスマートフォンの角度を変更し続けなければならない。また、検出のためにできる限り大きな画像を用いるため、スマートフォン単体で計算を行うことが困難な場合があり、先行研究ではオフラインでの計算やクラウドによる実装 [24] を行っている。しかし、オフラインでの計算は屋内ナビゲーションとしての意味をなさず、スマートフォンのインカメラで撮影した画像をクラウドに送信して測位する場合、インカメラに写ったユーザのプライバシーに配慮する必要がある上、ユーザ数が増加した場合クラウドのリソース不足が懸念される。このことから、スマートフォンカメラを用いた可視光測位システムはいまだ社会に普及していない。本研究ではインカメラによる可視光測位ではなく、別のアプローチで同等の性能を実現することを目指す。そしてこのボトルネックを解消することにより、前述の目標を達成する。

以上より既存手法のボトルネックであり、提案手法が達成すべき項目を研究目的として要約する。

- カバレッジ、天井高、LED 配置の制約を改善する
- 解像度を下げスマートフォン上でリアルタイム測位を可能にする

1.4 解決方針

本論文では、前述の目的を達成するために新たな測位手法 RefRec を提案する。提案手法では、まず送信機側が自己位置に関連づけられた固有の周波数で 3 つ以上の LED 照明から異なる変調光信号を送信する。受信機側は、事前に各 LED の位置と周波数の情報を保持し、カメラで床面を撮影する。そして動画ストリーム中の受信信号から周波数の強度解析によって各 LED 直下と撮影した床面の距離を求めることで測位を行う。本稿では LED の周波数強度が距離によりどのように減衰するかを計測に基づき、そのモデルを提案する。実験によりモデルを用いて中央誤差 0.2m 未満で LED-撮影点間の測距が可能であることを示した。先行研究の 1/4 から 1/10000 以下のサイズである 64×64 ピクセルの画像により、4.0 m 四方のカバレッジと 2.3m の天井高を持つ実験室にて 90 パーセントイル測位誤差 0.42m 未満のリアルタイム測位を達成した。これによって、パフォーマンスインデックス (Performance Index: PI)[13] が 0.0675 と算出された。これは測位精度に対するカバレッジの広さ、及び LED 配置数の少なさを示す指標である。この算出値を先行研究と比較して良好な値であることが確認された。さらに、画像内の任意の点に対してそれぞれ測位を行い、画像平面と床平面の射影関係に基づき、カメラの 6 自由度推定を可能にする。計測実験にてスマートフォンの 6 自由度を推定

し, (x, y, z) 座標について 90 パーセントイルの絶対誤差は 0.2073m、0.1713m、0.002464m、ピッチ、ロール、ヨー角についてそれぞれ 5.78°, 5.69°, 3.96° を達成した。実験結果の妥当性、提案手法の有効性、そして制約や性能改善の可能性について考察し、障害物による影響への対策や、より実際の使用例に近い環境における計測実験が今後の課題として残されていることについて言及する。

本研究の貢献を以下に要約する。

- 床面の撮影により LED を検出する測位方式の提案
- 床面に照射される LED 変調光の距離による減衰のモデル化
- 実世界での測位実験による提案手法の性能評価

1.5 本論文の構成

次章からの構成を以下に示す。第 2 章では、屋内測位の要素技術、手法及び具体的な先行研究について述べる。第 3 章にて、反射光を用いるスマートフォン 6 自由度推定手法を提案する。提案手法では、反射光の距離減衰モデルを新たに導出する。第 4 章では、提案手法のプロトタイプの実装について説明する。実装したプロトタイプを用いた提案手法の評価実験が第 5 章で示される。得られた結果から、第 6 章にて測位誤差の要因や、その性能について議論し、今後の取り組みについて言及する。そして、本稿の内容を第 7 章で総括する。

第2章

従来手法

本研究の位置付けを説明するために、スマートフォン屋内位置認識の主な手法を、先行研究を具体例に挙げながら大別し、その中で可視光を用いる手法に着目する意義、そして先行研究が解決した課題及びその制約と本研究によって解決しようとする問題について議論する。

測位には、屋内のどこにターゲットが存在するかを推定する絶対測位と、初期位置などのアンカーポイントからターゲットがどこに移動したかを推定する相対測位がある [25]。相対測位では、スマートフォン内部の慣性計測ユニット (Inertial Measurement Unit: IMU) を用いて運動情報を取得し、ユーザの歩行経路を推定する PDR (Pedestrian Dead Reckoning) 手法を用いるのが一般的である [26, 27]。相対測位を屋内ナビゲーションに活用したい場合、2つの問題点がある。1つは屋内における位置情報を推定するために正しい初期位置を与えなければいけない点、もう1つは、時間経過と共に誤差が蓄積し続けてしまう点である [28]。これら2点を解決するためには、原理的に絶対測位との組み合わせが必須となる [29]。

スマートフォンのような携帯端末を絶対測位したい場合、端末で送信、もしくは受信が可能な電磁波や音波の信号を用いるアクティブな手法と、屋内そのものが持つ地磁気や映像情報などを端末で取得するパッシブな手法が存在する。どのような応用を想定するかによって異なるが、測位技術の課題として、どれくらいの精度や測位可能領域を達成すべきか、位置だけでなく端末の姿勢や方向なども推定すべきならどのように実現するか、測位の時間分解能をどう決めるか、複数端末の混在が想定されるのであればそれらの干渉や混乱をどのように防ぐか、などがあり、これによって各手法が選択される。まずアクティブな信号を用いるスマートフォン測位の要素技術及びその具体例を説明し、次に信号を用いないパッシブな手法とその具体例について述べる。

2.1 信号を用いるスマートフォン測位の要素技術

信号を用いるアクティブなスマートフォン測位の場合、大きく3つの要素技術が測位に活用される [25][30]。

- 伝搬時間 (Time of Flight: ToF)
- 到来角 (Angle of Arrival: AoA)
- 信号受信強度 (Received Signal Strength: RSS)

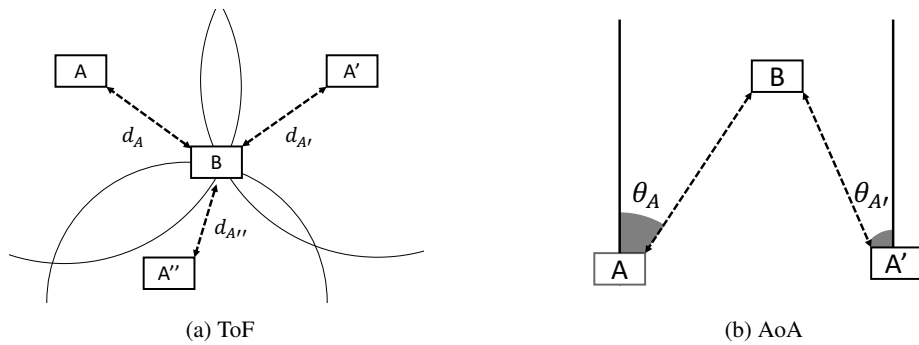


図 2.1 測位における要素技術の概略図

ToF は、図 2.1a のように、信号が送受信機 (ノード) 間を伝搬するのにかかった時間から、その距離を推定する手法である。信号の送信時刻を既知とする到来時間 (Time of Arrival: ToA) と、未知として受信時刻のみを利用する到来時間差 (Time Difference of Arrival: TDoA) に大別される。他に、各ノードが送受信の両方を行うことで送信信号の折り返し時間を測定する手法として Round Trip Time(RTT)[31]があるが、測位に用いる場合、3 辺測量原理の原理を用いる点は ToA に等しい。ToA では、ノード A から時刻 t において送信された信号が時刻 $t + \Delta t$ にてノード B で受信される。伝搬速度 c を用いて伝搬距離 d_A は

$$d_A = c\Delta t \quad (2.1)$$

と計算される。伝搬速度 c は電磁波の場合 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 、音波の場合 $c = 340.29 \text{ m/s}$ である。そして 2 次元測位では、3 台の送信ノードに対して同様の手順で伝搬距離を求め、3 辺測量の原理で受信ノード B の位置を導出する。送信機が 4 台以上の場合には測位に冗長性が持たれ、非線形な最小二乗法の最適化問題として解くことができる [32]。TDoA では送信時刻 t が未知であるために単一のノードでは Δt が計算できない。そこで、複数の送信ノードからくる信号の到来時間の差によってこれを導出する。そのため、送信ノードは 4 台以上必要である。ToA, TDoA いずれの場合においても、3 次元測位の場合はもう 1 台送信ノードを必要とする。

AoA は図 2.1b のように、受信した信号を元にノード間の幾何学的な角度関係を推定する手法である。2 次元測位においては最低 2 つの送信ノードが必要で、それぞれから角度 $\theta_A, \theta_{A'}$ に向けて送信された信号の交点を受信ノード B の位置である。送信信号の角度は、ノード B が受信信号の到来角を推定することで得ることができる。ToF の方法と比較して、2 次元測位は 2 台、3 次元測位の場合でも 3 台の送信ノードで実現できるメリットがある。

RSS は、受信した信号の伝搬モデルに基づく距離減衰を測定し、ノード間の距離や位置関係を推定する手法である。伝搬モデルにて正確な測距が可能な場合、測位の原理は ToA を用いた手法と類似する。しかし、電波などを用いた手法では特に屋内のオブジェクトの影響により伝搬する信号の減衰が理論モデルに従わない。そのため、屋内各所で事前に計測した RSS パターンを楕円の等高線に近似したモデルとの照合により測位する手法などが存在する [33]。

いずれも測位のために原理的には複数のノードを用意する必要があり、1 つの受信機に対して 3 つ以上の送信機や、逆に 1 つの送信機に対して複数の受信装置アレイを持つ受信機などを用いるのが一

一般的である。次節では、測位に用いられる電磁波や音波の種類と特徴、そして先行研究の傾向について述べる。

2.2 アクティブ測位手法

送信機を用い、信号を発するアクティブな手法について述べる。屋外での標準測位技術である GNSS(Global Navigation Satellite System) と異なり、屋内での標準的なスマートフォン測位技術は未だ確立されていないため、様々なアプローチが研究されている [34, 35, 36, 37]。具体例として、電波 [6]、音 [34, 38]、画像認識 [39][40]、赤外線 (Infrared: IR)[41]、可視光 [42] を用いる測位手法が提案されている。これらの信号を汎用のスマートフォンにハードウェア的変更を加えることなく受信したい場合、電波はアンテナで、可視光や IR はカメラや光センサで、音波はマイクで受信できる。電波の中でも屋内位置認識に有用な技術は主に、無線 LAN(Local Area Network)、無線 PAN(Personal Area Network)、RFID(Radio Frequency Identifier) などがある。これらを用いた測位について具体的に説明し、本研究で可視光に着目した理由とその位置付けについて詳細に述べる。

2.2.1 音波

スマートフォンには通常マイクとスピーカが搭載され、これを用いて音波を送受信できる。音波の周波数は人間に聞こえにくい領域を用いることが一般的である。音波は電磁波と比較して空気中の伝搬速度が遅いため、ToF による測距誤差を小さくできる利点がある。そのため、複数のノードを活用した ToA や TDoA による測位が広く研究されている [43]。音は壁や床で反射するため、見通し距離 (Line of Sight: LOS) の確保やマルチパスによる精度低下が課題である。

AAMouse はスマートフォンを、コンピュータのマウスのような入力デバイスとして用いることを目的とした 2 次元測位手法である [44]。この研究では、スマートフォンに内蔵されている加速度センサでは速度の推定は困難であるため、端末のトラッキングには性能が不十分であることを指摘している。そこで汎用のスピーカから非可聴域の音波を発信し、ドップラー効果による周波数シフトを用いてスマートフォンマイクとスピーカの速度と移動距離を推定している。0.4m 四方の 2 次元空間でスマートフォンを操作し、動作をトラッキングする実験では、中央誤差 0.014m の精度が達成された。

CAT はスマートフォンによる仮想現実 (Virtual Reality: VR) や拡張現実 (Augmented Reality: AR) のための 3 次元トラッキング手法である [45]。分散周波数変調連続波形とドップラー効果を用いてスマートフォンマイクとスピーカの非同期で高精度な測距を行い、さらに慣性センサと組み合わせることでトラッキングをする。システムは 2 つのユースケースを想定してそれぞれ構成され、2 つのスピーカを 0.9m 離れた間隔で配置し、1.1m 先にあるスマートフォンの 2 次元位置を中央誤差 7mm で推定した。2 つのスピーカの間にも 3 つ目のスピーカを設置し冗長性を持たせることで、中央測位誤差が 5mm まで向上することも確認されている。3 次元測位では 4 つのスピーカが使用され、誤差 9mm でスマートフォンをトラッキングできることが示された。

村上らは壁や床の反射を利用し、従来よりも少ないスピーカ数の 3 次元測位手法を提案した [46]。従来誤差の要因とされていた 1 次反射のマルチパスによる遅延信号を、仮想的な鏡像スピーカからの信号と捉えることで従来手法のような複数台のスピーカを用いた 3 次元測位と同等の計算を可能

にしている。計測実験では、2.0m×2.5mの空間に2台のスピーカを設置し、90パーセントイル誤差37.7mm未満の精度で3次元測位可能であることを示した。

このように、音波を用いた手法はセンチメートル単位での高精度な2次元、あるいは3次元測位が可能であることが報告されている。これは本研究の前提とする精度を満たしていると言える。また、これらの先行研究はスマートフォンのマイクで受信可能であるため、ユーザの負担が少ないメリットもある。本研究においては後述の理由により可視光に着目したが、将来的には音波を使用した手法と組み合わせることにより、音波と可視光を切り替えるシームレスな測位、あるいは、よりロバストな測位システムを目指している。

2.2.2 無線 LAN

Wi-Fiなどで規格化された無線LANの送受信機であるアクセスポイント (Access Point: AP) は、今日屋内の至る所に存在する。これをそのまま測位に活用することで、測位用のインフラ整備コストを削減できるメリットがある [35]。また、無線LANの信号は物体を貫通しやすく、LOSを必ずしも確保しなくて良い。これを用いたベースステーション測位では、端末が接続しているAPの座標を取得する。シンプルでカバレッジが広い一方で、端末自身の座標を計算できる手法ではない。一方でToFやAoAに基づき端末と複数のAP間の距離や角度を推定し、多点測量の原理から測位する手法では、電波が屋内のオブジェクトに影響を受け、高精度な測位が困難であるなどの短所がある。

そこで無線LANでは、Wi-FiのFingerprintを活用する測位手法が広く用いられている [47]。これはまず、屋内の随所にて各APから発せられる信号の受信強度を測定してデータベースをあらかじめ作成し、そして測位の際に端末が受信した信号とこのデータベースを比較して位置推定をする手法である。端末の配置の工夫などにより、測位誤差は数m程度まで向上できるが、cm単位の測位精度の確保が難しく、データベース作成には手間がかかり、家具の再配置などの環境変化に弱いといったデメリットがある。

ZeeはスマートフォンのIMUを用いた移動経路推定を実行しながらWi-Fiの電波強度を収集することにより、Fingerprintのボトルネックであるデータセットの事前収集コストを軽減し、屋内での2次元測位を実現した手法である [48]。IMUによるPDRには、歩幅や歩行速度の個人差による測位誤差が発生するが、拡張パーティクルフィルタによりこれを推定し、フィードバックながら経路推定することにより、より精度の高いPDRを用いたデータ収集を実現した。また、事前学習の段階で部分的にWi-FiによるRSS測位を用いることで、初期位置の入力を必要としない。収集したデータセットは、Fingerprintの先行研究である、EZ[49]及びHorus[50]のアルゴリズムを用いて測位され、65m×35mのオフィス環境にて歩行実験を行った結果、両手法で中央誤差3.0mを達成した。

ArrayTrackは、アンテナアレイを持つAPでMIMO技術を活用したAoAで2次元測位を行う手法である [51]。多くの既存手法と異なり、この手法ではクライアントが信号を送信し、APがこれを受信し、サーバ側でクライアントの位置を推定する。プロトタイプのAPは屋内の全6箇所に設置され、3つ以上のAPを用いることで冗長性を持たせることができる。3つのAPを使用した場合は2次元測位中央誤差0.75m、6つのAP全てを用いた場合中央誤差0.26mを達成した。この手法においては本研究の要件である測位精度を達成できている。しかし、このような精度を確保するために、通常のAPよりも遥かに多い10本程度のアンテナアレイを用いている。また、方位は計算でき

ない、AP側でクライアントの位置推定を行うためプライバシーに配慮する必要がある、といった課題がある。

SpotiFiは、超解像アルゴリズムを用いてアンテナを3本しか持たない汎用のAPでのAoAによる2次元測位を可能にした[52]。アンテナ数が少ない場合、チャンネル状態推定(Channel State Information: CSI)が困難になる課題を、各アンテナのCSIを組み合わせることで解決した。そして、実環境において各アンテナが必ずしもLOS信号を取得できないことについて言及し、各パスの重み付けによって信頼度の高い信号のみAoAを推定することを提案した。マルチパスによって測位困難になる場合について、このAoA推定とRSSによる測距を組み合わせることでロバストな測位を実現した。20台のAPが設置された52m×42mのオフィスにて、ダイレクトパスが多数取得できる環境下で0.4mの中央測位誤差を達成した。ダイレクトパスを取得できるAPが2つかない環境下では中央誤差1.6mであった。

このように、無線LANを用いた手法では、空気中の伝搬速度が早く、マルチパスの影響があるため測位精度の確保が難しい。中央誤差は1m前後の手法も報告されているが、これら手法全般として偶然誤差は大きく、90パーセンタイル誤差で見ると10m以上となるものが多い。それに伴い、方位の計算も困難である。

2.2.3 無線PAN

無線PANは無線LANよりもさらに狭域な通信範囲のネットワークを構成し、BluetoothやZigBeeで規格化された通信機器を用いる。Bluetoothは、BLE(Bluetooth Low Energy)ビーコンが屋内測位のノードとして市販で提供されている。測位手法はWi-Fi同様にRSSによるFingerprintなどがある。多くのスマートフォンで利用可能であるため、追加のハードウェアが必要なく、Wi-Fiと比較して、BLEはチャンネルホッピングによる電波干渉へのロバスト性や、消費電力の低さ、高いスキャンレートといった利点がある[53]。一方で、通信インフラとして整備されているWi-Fiと異なり、測位のために多数のビーコンを屋内に設置する必要がある。

BLocでは、BLEアンカーがターゲットから到来する信号強度と位相の情報を用いるCSIによって2次元測位を行う手法である[54]。不定期的に送信されるBLE信号のCSIを正しく推定するため、連続する0ビットと1ビットのそれぞれのシーケンスを交互に送信する。また、誤差の影響であるマルチパスを排除し、LOS信号のみを受信するために、LOS信号が最短で到来するという特性と、マルチパス信号は理想的なアンテナから発せられたものでないために信号の相関のピークが空間的に広がりを持つという特性を利用する。5.0m×6.0mの空間に4台のアンカーを設置した計測実験では、中央誤差0.86mを達成し、AoAを用いる従来手法よりも良い性能で測位可能であることが示されている。

FangらはZigBeeを活用した複数の測位手法によるアンサンブルで、より高精度な2次元測位を実現した[55]。ZigBeeは低消費電力で低レート of データ通信が可能な通信規格で、主に用いられる測位の原理はWi-FiやBLEとおおよそ共通する。ZigBeeを用いる測距手法として提案された複数の手法を、事前計測値によって評価し、得られた学習モデルを用いて各手法による結果を重み付けし、測位する。8つのセンサが2mの間隔で配置された実験室にて、測位誤差1.25m未満の精度で2次元測位を達成した。

また、近年は超広帯域無線 (Ultra-WideBand: UWB) を活用した測位も注目されている。UWB の特性は可視光に近く、通信距離が Bluetooth などよりもさらに短く、物体の貫通力も小さい代わりに、高速通信が可能である。

SurePoint では、スマートフォンに装着可能な UWB 送受信機 TriPoint のプロトタイプを制作し、2次元測位を実現した [56]。この研究において、屋内測位の分野は既にデシメートル単位の精度を達成した手法が多く存在することが述べられ、もはや測位精度だけでシステムを評価することは妥当ではなく、測位精度はデシメートルで十分であるとしながら、実用性と信頼性に焦点を当てるべきだと主張されている。その点において UWB は測位精度の面で十分高性能であるとしながら、作成したプロトタイプの送信機には空間的、周波数帯域的な冗長性が確保されており、これによりトラッキングの性能が誤差 2.2m 未満から 0.77m 未満へと向上したことが確認された。

これら無線 PAN においても無線 LAN と同様に、6 自由度推定は原理的に困難である点がデメリットとして挙げられる。また、スマートフォンにはこれら無線 PAN を受信するハードウェアが備わっていない場合も多く、現状提供されているものは BLE のみであることが基本である。BLE はその省電力性のメリットがある一方それにより通信速度や距離は低く、通信インフラとしては活用しにくいため、BLE は測位専用デバイスとして使用しなければならないという欠点がある。

2.2.4 RFID

RFID は小型のチップを内蔵した ID タグと、それを読み取るリーダーで構成される。屋内に多数のタグを配置し、リーダーでそれを読み取ることで、現在読み取っているタグがどこに存在するのかわかることができる。通常、複数のタグからの読み取り情報を活用し、多点測定の原理から測位する [57]。逆に、複数のリーダーからタグを読み取ることで同様の測位も可能である。RFID タグは非常に安価で、バッテリーの寿命も 10 年以上持続する、ないしバッテリーを必要としない。しかしその分タグ 1 つのカバレッジが狭く、測位には多数のタグを配置する必要がある。

LANDMARK は各タグの信号強度をリーダーで読み取り、k 近傍法によってタグの 2 次元位置を決定する [58]。このシステムではリーダーがタグから発せられる電力強度を読み取ることで測距する。すなわち RSS が元になっている手法である。環境要因によって発生する系統誤差のルックアップテーブルを作成し、測位中にもこれを動的に変更する。システムのプロトタイプは 4.0m×9.0m の屋内環境に 4 つの RFID リーダーが設置され、中央誤差 1m の精度でタグの 2 次元測位が可能であることを示した。

Tagoram は RFID タグをより高精度に測位するシステムである [59]。移動する RFID タグを複数回読み取ることで仮想アンテナアレイを作成し、測位する。システムの実証実験では、屋内で直線で移動するタグと、直径 54cm の円周上で移動するタグをそれぞれトラッキングし、直線では 90 パーセント誤差 18mm、円周では平均誤差 7.29mm であった。また、空港内の実験においては、数 10m のトラック上を移動するタグを追跡し、中央測位誤差 12.3cm を達成した。

RFID を活用した測位では、高い精度を実現している手法も見受けられる。その一方で、RFID は携帯できるほど小型ではあるがスマートフォンには搭載されておらず、先行研究の応用例としても、航空会社における貨物の位置把握といった環境で使用されており、本研究の目的とはやや異なっている。

2.2.5 IMES(Indoor MESSageing System)

IMES は宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency) によって開発されたシステムである [60]. GPS(Global Positioning System) の信号を発する衛星電波は通常屋内では壁によって遮られてしまう. そこで IMES では, 屋内に GPS 信号を発する送信機を設置することで, 屋外同様に測位を可能にする手法である. 広く普及している GPS を活用したアプリケーションなどが使えるメリットがある一方で, デメリットとして送信機の設定には JAXA の許可が必要で, IMES 対応のスマートフォンはまだ普及していないという点が挙げられる [61]. また, GPS は通常方位を計算できないため, 地磁気センサを用いて推定を行うが, 後述のように屋内においては地磁気センサで正しく方位を推定することは困難である.

2.2.6 IR

IR は LED によって発せられ, 受光素子でこれを感知する. IRLED は人の目では知覚できない. そのため, 可視光 LED と異なり照明インフラとしては活用できないが, どのような変調パターンでも人の目に有害な刺激を与えにくい.

SpinLight は, この特性を利用し, IRLED を回転スリットを用いて任意パターンに放射させる手法である [62]. この放射パターンによって 1 つの IRLED からターゲットの 2 次元位置を, 2 つの IRLED を用いることで 3 次元位置を推定できる. 実験では半径 5.5m の円形領域をカバーする IRLED を用い, 屋内の実験室環境にて 2 次元, 3 次元測位を行い両方の場合において平均誤差 0.04m を達成した.

IR を用いた手法は高精度である一方で, 現在 IRLED を常設している屋内環境は非常に少なく, インフラ整備コストの課題がある. そのため, この手法に関する研究はあまり多く行われていない.

2.3 パッシブ測位手法

送信機を設置せず, 従来の屋内の情報を活用するパッシブな測位手法について説明する. 屋内ではオブジェクトの配置や建物の構造などにより, 固有の視覚的情報や地磁気パターンを持つ. これを事前計測などで把握し, 得られたデータとマッピングすることで測位を行う.

2.3.1 コンピュータビジョン

カメラを用い, 建物を撮影することで自己位置を推定する手法である. カメラを用いた可視光測位と近いが, 変調された LED などの発信機を必要としないメリットがある. 一方デメリットとして, プライバシーへの配慮が必要, データベース作成のコストが高い, オブジェクト配置の変化に弱い, などが挙げられる.

MoVIPS は屋内にてスマートフォンカメラで撮影し, 画像と位置を対応付けたデータベースによって測位するシステムである [63]. この研究において, ロケーションベースのサービスを提供するには, 部屋単位の区別ができるように測位誤差は数メートルを超えてはならないと主張している. この

システムでは Wi-Fi の Fingerprint のように、撮影位置と被写体の幾何学的関係を事前データベースに登録し、それと照合することによって測位を行う。屋内環境にて解像度 2560×1920 のカメラで撮影をし、1.3m の誤差で測位できることが確認されているが、精度は事前データベース作成の際に用いる既存の測位システムに依存するとされている。

Signpost は位置情報を持つ 2 次元マーカをカメラで読み取ることで幾何学的に測位する手法である [64]。レンズ歪みによる補正アルゴリズムによって、cm 単位で測位可能である。二次元マーカは印刷機で安価に作成できる長所があるが、短所として、十分なカバレッジを確保するためには数 10cm 四方の大きな二次元マーカが必要になる点があり、これによって景観を損ねる恐れがある。

ViNav はクラウドソーシングされた画像のデータベースを用い屋内の 3D データを再現し、それを元にターゲットカメラの 6 自由度を推定する手法である [65]。この研究においてスマートフォンを用いた屋内ナビゲーションが満たすべき要件として、ユーザの位置を効率よく正確に求められること、ユーザが目的地を検索できること、ユーザに柔軟なナビゲーションを提供すること、の 3 点が挙げられている。これらを満たすためにクライアントはまず各種センサデータと画像データのセットにて 3D モデルを構築し、目的地検索及び経路案内のためのインターフェースを作成することを提案している。Wi-Fi による Fingerprint と画像によるデータベースを組み合わせた測位により、オフィス環境とショッピングモール環境のそれぞれにおいてそれぞれ 90 パーセント測位誤差 2m、角度誤差 6 度、97 パーセント測位誤差 1m、角度誤差 6 度未満でターゲットの状態を推定可能であることを示した。

以上のように、カメラを用いたコンピュータビジョンによる手法は、その特性により幾何学的に高性能にターゲットの位置を検出できる一方で、事前のデータベース収集方法が課題となり、多くはオーバーヘッド削減のために Wi-Fi による Fingerprint が選択されるが、前述のようにこの手法ではデシメートル単位での測位が実現できず、結果として画像に対応付けられた位置情報のデータベースそのものが不正確であるため、コンピュータビジョンを用いた手法全体の傾向としては、あまり測位精度は高くない。

2.3.2 地磁気

屋内の建物は鉄筋などによる微弱な磁場を帯びている。そのため、地磁気センサによるコンパスは、屋内では正しい値を示さず、方位推定には適さない。一方で、この特性を逆手にとって、事前に屋内の任意計測箇所における地磁気の強度を計測し、そのデータベースを元に測位する手法が提案されている。原理的には鉄筋の建物であれば適用可能であるため、システム構築のための制約が非常に少ないというメリットがある。

Gozick らはスマートフォンを用いて屋内の柱の磁力を測定し、強度マップを作成し、測位に活用できることを示した [66]。この研究において、カメラなどで得る視覚情報は、災害時の停電などにおいて必ずしも有効ではないとし、既存インフラが停止した場合においても用いることのできる情報として、屋内の地磁気を挙げている。x, y, z の 3 軸における地磁気の強度を測定できるセンサを用いてオフィス環境全域で 2000 回計測を行い、環境内に存在する 4 つの部屋の外周で、それぞれの部屋を明確に区別できる相関が存在することを明らかにした。

Galvan らは磁場のマップを作成する際、遺伝的アルゴリズムを用いて学習に必要な特徴量を 46 か

表 2.1 各手法の特徴比較

	可視光	音響	WLAN	WPAN	UWB	RFID
精度	~dm	cm~m	m	dm~m	~dm	dm~m
範囲	~10m	~10m	~50m	~30m	~10m	~10m
準備コスト	低~高	中	低~中	低	高	低
受信専用機	場合による	不要	不要	場合による	必要	必要
強み	精度と効率	高精度	低コスト	低コスト	高精度	低コスト
弱み	設備変更	頑健性	頑健性	低精度	高コスト	低精度

ら 5 に削減し、ユーザが現在どの部屋にいるのか推定する手法を提案した [67]。提案モデルは家庭環境とオフィス環境の 2 つの屋内環境にて評価され、特徴選択処理を行うことで、ユーザのセマンティックな位置を 0.784 の確率で識別できることを示した。

以上のように、地磁気の特徴を事前に収集することで測位をする手法が提案されている。しかし、大きな建物になるほど地磁気だけでは情報量が不足する。また、具体的にスマートフォン座標を計算できる手法は提案されていない。

2.4 可視光測位

我々は、可視光に着目した。可視光測位では、PD やイメージセンサで天井の LED 変調光を検出し、距離や角度などからターゲットの位置を計算する [13]。可視光測位には大きく 3 つのメリットがある [68]。1 つ目に、エネルギー効率の良好な点がある。LED は照明インフラとして屋内に普及しており、新たにランドマークを設置する必要がある手法と比較すると、既存照明の活用による省エネルギー化が期待でき、近年心配されている電波帯域割り当ての限界にも影響しない。2 つ目は、誤差数 cm から数 10cm 単位の高精度な測位が実現可能な点である。その要因の 1 つに、電波等と比較した際、可視光はオブジェクトを貫通しないためにマルチパスの問題を低減できることが挙げられる。また、これによりスマートフォンの姿勢情報も推定できる可能性がある。3 つ目に、可視光測位は他の手法に多く見られるような、事前計測データを用いた機械学習を用いなくとも、測位が実現できる点である。

一方で、LED 変調光を用いる場合、既存の照明インフラには変更を加えなければならない問題がある。具体的に、文献 [30, 69, 37] を元に作成した各アクティブ測位手法の大まかな傾向の比較を表 2.1 で示す。ここまでの要約し、本研究で可視光測位に注目する理由について、次のように要約する。

- ユーザが汎用スマートフォンに変更を加えなくて良い
- 既存のインフラを活用できる
- 屋内ナビゲーションに適した測位精度が報告されている
- 6 自由度推定を可能にするポテンシャルがある

2.4.1 PI

前節で、可視光測位は高精度である一方、照明インフラの整備が必要であることを述べた。一般に、可視光測位では、用いる照明の数が多いほど測位精度が向上する。しかし必要な照明の数は、インフラ整備コストと比例してしまうため少ない方が望ましいとされる。Afzalanらは、この整備コストと測位精度のトレードオフからなるシステムのパフォーマンスを示す指標として、PIを提案している [13]。PIは以下のように計算される。

$$PI = Acc * D \quad (2.2)$$

ここで、 Acc は測位の平均絶対誤差 (単位は m)、すなわち真値の座標と推定座標の絶対距離の平均値であり、小さい値の方が精度が良いと言える。 D は LED の配置密度 ($1/m^2$) で、カバレッジ内 $1m^2$ あたりに配置された LED の数を示す。つまり、1つの LED で広いカバレッジを確保しているシステムほど小さい値になる。よって、カバレッジ、LED 配置数、測位精度のトレードオフからなるパフォーマンスが良いほど PI は小さくなり、1章で述べた本研究の目的は、天井高の制約を解消しつつ低い PI を実現することと言い換えることができる。

次節からは、具体的に PD やカメラを用いた可視光測位の先行研究についてそれぞれ述べ、前述の PI を評価し、PD は低 PI を実現している一方でスマートフォンには実装されていないこと、カメラはスマートフォン上に実装可能であるが高 PI であると共に天井高の制約が課題として挙げられる点について説明する。

2.4.2 PD を用いる手法

PD を用いた手法では、シミュレーションベースで ToA [70] や TDoA を用いた手法 [71, 72] が提案された。しかし実際に PD を用いて光速で到達する信号の到来時間を正確に測定することは難しく、実デバイスの使用を想定した手法では AoA [73] や RSS の利用 [5, 74, 75] が提案されている。

環境光センサを用いる手法

スマートフォンに搭載されている PD は環境光センサ (Ambient Light Sensor: ALS) と呼ばれ、画面の明るさを周辺光に合わせて自動調整する目的などで使用される。そのため動作が非常に遅く、信号の受信に不向きである。現在スマートフォン上に実装された ALS を用いた測位手法は筆者の知る限り提案されていない。

ALS-P はエイリアシングの特性を用いて可視光通信及び 2 次元測位を可能にする手法である [22]、ALS が積分的動作をすることにより、周波数フィルタが発生し、信号対ノイズ (Signal to Noise: SN) 性能が送信周波数によっては極端に悪化することを指摘した。この課題をサンプリング周波数の動的な変更によって複数回計測することで回避し、低速で動作する ALS を用いて信号の検出を可能にした。実験にて 5 ビット/秒の可視光通信及び 90 パーセントイル誤差 25cm の 2 次元測位を達成した。カバレッジは $1.2m \times 1.5m$ で、空間内に 4 つの LED があり平均誤差は明言されていないが、中央誤差 0.15m を用いて PI を計算すると、PI は約 0.33 である。また、LED の数を 3 つの減らした場合の検証もされており、その場合は平均誤差が約 0.3m にまで悪化するため、PI はおよそ 0.5 である。

NALoc は iPhone 6 plus や Samsung Galaxy S5, S6 に搭載されている ALS と同じデバイスを用いた測位システムで、受信機の非線形性による差分周波数とエイリアシングによって LED の割り当て周波数を特定し、2次元測位する手法である [23]。また、ALS の低サンプリング周波数によって割り当て可能な周波数が実験環境においては 50 しかないことについて言及し、グラフ理論の 4 色問題から着想した隣接頂点の周波数割り当て方法を提案した。実験により 90 パーセント誤差 35cm を達成した。カバレッジ 3.3m×6.12m で、5 つの LED が配置されている。中央誤差 0.2m を用いて計算される PI は 0.0495 である。しかし、スマートフォン上に搭載された ALS には、OS のスケジューリングなどの問題から、サンプリングの欠落といった不安定性が発生する。そのため、スマートフォン上でのシステム実装は実現していない。

高速 PD を用いる手法

高速で動作する PD などをスマートフォンに装着し、光を検知することで測位する手法も提案されている。専用の受信デバイスが必要になる点がボトルネックだが、消費電力の低さや信号への応答速度の点で ALS やカメラを用いた手法に対して優れている。

Epsilon は学術分野で初めて発表された、PD を用いた測位システムのプロトタイプである [21]。ランバートモデルを用いて各 LED からの RSS を参照して 2次元測位する。3 つの異なる環境にて実験をし、カバレッジはそれぞれ 8.0m×5.0m, 3.0m×3.5m+1.0m×3.5m, 2.0m×12.0m, LED の個数はそれぞれ 5, 5, 4 個であった。90 パーセント誤差はそれぞれ 0.4, 0.7, 0.8m を達成した。PI はそれぞれおよそ 0.0375, 0.107, 0.0667 である。環境によって PI に変化が見られるが、これは物理的に PI の大きな環境には測位不可能なエリアが存在するためである。また、IMU を用いて 1 つの LED だけで測位する場合についても検討されているが、具体的なカバレッジについては明言されていない。

Pulsar は FoV が異なる 2 つの PD からなる受信機を用いた AoA によって 3次元座標及び方位を推定する手法である [76]。この筆者らは、ランバートモデルを仮定しないため、あらゆる形状の光源に対応できると主張している。また、受信角によって周波数の応答特性が変化しないことに着目し、変調しない蛍光灯を事前登録し、識別する。さらに、従来研究ではあまり考慮されていなかった光源の位置と周波数特性の関係の事前登録を簡略化する手法も提案されている。実験において天井の高さが 2m の環境で、光源を 1.5m 間隔に設置した場合、90 パーセント誤差が 2次元座標で 0.05m, 3次元座標で 0.21m だった。この 90 パーセント誤差は、平均誤差と近い値であったことが述べられている。その場合の PI は 2次元測位において 0.05 である。天井の高さが 4m の場合、0.06m の 2次元誤差と 0.316m の 3次元誤差、天井の高さが 6m の場合は大きな系統誤差が報告されている。天井の高さが 4m の環境において蛍光灯の設置間隔を 2.0m, 2.5m と変化させた場合の 2次元中央誤差は 0.72m, 1.27m であることが述べられている。PI はそれぞれ 0.0467, 0.36, 0.508 と計算される。このことから、光源の設置間隔が広い環境において、PI は増大する傾向にあることがわかる。また、実験により 90 パーセント誤差 3 度から 5 度未満の精度で方位を推定可能であることを示した。

Falcon は、ZigBee のフィンガープリントによるセグメント単位での測位と、LED からの RSS を活用した 2次元測位を組み合わせた手法である [5]。この組み合わせにより従来測位困難であった LED の 1次元配置に対応している。また、ZigBee 測位と可視光測位を状況によって切り替えるアルゴリズムの実装により、非見通し距離 (Non-Line of Sight: NLOS) 環境においてもカバレッジ内を

グリッド分けしたセグメント単位での測位を実現した。この論文において LED と ZigBee を組み合わせる意義として、今後照明として以外にも様々な機能を持ったスマートライトが普及し、LED と無線通信装置がユニットになったデバイスが普及すると予測されている。実験により、NLOS が存在する 1.8m×2.7m の実験室環境にて 4 つの LED を用いて平均誤差 0.12m、5 つの LED が存在する 1.8m×9.6m の廊下にて平均誤差 0.09m だった。PI はそれぞれ 0.0988, 0.005 と算出される。実験室環境の PI は廊下と比較して極端に高い値であるが、これは NLOS 環境下において可視光測位困難になる場合を ZigBee の RSS のみで補っているためである。

CELLI は 1 つの LED 変調光を PD で受信して 3 次元測位する手法である [77]。送信機に液晶ディスプレイを透過する LED を用い、偏光フィルタを取り付けた PD でこれを受信することで、人の目には変調しているように見えない偏光信号を受信する。1 つの光源で幾何学的な 3 次元測位を可能にするため 2 つの投影レンズを取り付け、液晶にて光源をスイープ的に変調する。受信機は 2 つのレンズから得た 2 つの信号から、ステレオビジョンの要領で 3 次元測位を行う。受信機に対する送信機の高さが 1.75m と 2.25m、カバレッジが 0.3m×0.4m と 0.5m×0.5m であった時の中央測位誤差がそれぞれ、2 次元で 0.011m, 0.016m で、3 次元で 0.118m, 0.256m であった。PI は 2 次元で 0.0917, 0.064 であった。天井高が高い場合の方が、カバレッジを確保できるために PI が向上していることがわかる。

Du らは [78] 世界で初めてディープラーニングの知見を活用し、PD を用いた RSS によって 3 次元測位を行う手法を提案した。提案手法では任意の 2 箇所にてキャリブレーションを行い、ディープラーニングによる最適化手法によって RSS 測位に必要な LED のパラメータを推定する。特徴はディープラーニングの適用により、従来よりも高速なパラメータ推定が可能になった点で、計算速度と推定性能のトレードオフの観測により適切な学習のレイヤーアーキテクチャを設計し、従来手法の 50 倍速い計算時間でパラメータを推定した。実装したシステムでは 3 つの LED が組み込まれた Cell と呼ばれる 6 角形の LED アレイを空間内に配置し、1.2m×1.0m の領域で、3 つの LED を用いて、PD を天井から 1.5m, 1.7m, 2.0m, に設置した場合について実験を行った。Cell によってそれぞれ異なる周波数を割り当て、90 パーセント誤差 0.12m 未満で二次元測位及び高さ推定が可能であることを示した。PI は 0.3 と計算される。

Foglight は映像投影プロジェクタを使いグレイコードを送信し、PD で受信することで 2 次元測位する手法である [79]。プロジェクタはデジタルマイクロミラーデバイスチップが内蔵されており、これを用いて高速に投影映像をオンオフすることで人の目にちらつかない光源を実現する。そしてプロジェクタは縦横にグレイコードのパターンで明滅することで、投影された各ピクセルは時系列で座標に対応づけられた一意の明滅パターンとなる。システムのプロトタイプは 0.91m×1.22m の空間で平均誤差 1.707mm で二次元測位可能であることを示した。ここから、PI は 0.00152 と算出される。光源が 1 つで、なおかつミリメートル単位での二次元測位を可能にしているため、PI は非常に低い値である。しかし、映像投影プロジェクタは LED と比較して遥かに高価であるため、インフラ整備コストが低いとは言えない。

デバイスフリーな PD を用いる手法

類似の研究として、LED と PD を活用したデバイスフリー測位も挙げられる。デバイスフリー測位とスマートフォン測位の違いは第 1 章で述べたが、これらの研究において反射光を受信する手法なども提案されている。

LiSense は天井に LED アレイ、床面に PD アレイを設置し、その空間にいる人間の姿勢によって遮られる光の変化を検出することで、モーションキャプチャを行うシステムである [4]。16 ミリ秒ごとにモーション推定を行うことで、個人の映像のようなプライバシーに関わる情報を取得することなく、カメラと同程度の時間分解能を達成した。各 LED は任意の信号を送信することで ID 分けされ、事前に学習したモデルによって Arduino を用いた回路で姿勢が計算可能である。3.0m×3.0m のカバレッジで、5 つの LED からできるシャドウマップを用いてモーションを取得する実験により、平均誤差 10 度で関節角を推定した。

StarLight は天井の LED アレイから照射された光が人体に反射したものを同様に天井に設置した PD アレイで受信することで人のモーションを検出し、従来手法にあった床面上に PD を配置する制約を克服した [3]。実装したシステムは 3.6m×4.8m のオフィス環境にて、20 箇所に LED アレイと PD を設置し人体を 5 つの関節でモデル化した。平均誤差 13.6 度の精度で関節角を求めることが実現された。また、2 次元測位精度について検証されており、中央測位誤差 0.04m だった。PI は 0.463 と計算される。ただし、各 LED アレイは FPGA によって変調された 16 の LED を組み込んでいる。これをそれぞれ別の LED とみなす場合、PI は 7.41 である。

PassiveVLP は、天井から LED 変調光をオブジェクトに照射し、得られた反射パターンから 1 次元測位をする手法である [80]。この研究においては、オブジェクトの測位を目的とし、複数の物体を識別するためにオブジェクトの表面にバーコードパターンを持った反射体を貼り付ける。これにより得られる反射光は送信信号のビットストリームと反射体固有のビットストリームの掛け合わせになり、位置認識と物体識別を同時に行うことができる。プロトタイプの送受信機は LED が放射上に配置され、それぞれが指向性のあるビームを発する。実際の応用例を想定した実験環境では、2m から 2.5m 程度の間隔で LED 送受信ビーコンを設置し、平均測位誤差 0.97cm を達成した。この提案手法では反射体をターゲットに取り付ける必要があるため、スマートフォンを用いたユースケースとは異なっている。

FieldLight は天井 LED の人体に対する反射を壁面の PD アレイで受信し、事前キャリブレーションの結果を参考にポテンシャル場を計算することで 2 次元測位する手法である [81]。特徴として、ラベル付きデータセットを必要としない事前学習フェーズにより、変調をしない屋内 LED をそのまま活用して測位が可能である。実験では、16 個の光源がある 8.0m×7.0m のロビー、4 個の光源がある 7.0m×4.0m の廊下、8 個の光源がある 4.8m×9.6m の実験室にて 2 次元測位中央誤差がそれぞれ 1.2m, 0.68m, 0.84m であった。この手法において各光源の変調や事前学習などは行わないため光源配置数によるコストの変化がなく、PI の算出は意味を持たない。そして、学習フェーズと測位フェーズでの差異を少なくするために、日光量や着衣する服の色などは各フェーズで一致させなければいけないという課題が残っている。

Li-Tect は天井の LED アレイと床面の PD アレイを活用し、オブジェクトの断面形状及びその座標

を認識する手法である [82]. 計測空間における 1 次反射を含む LED-PD 間の伝送経路を事前に計測し、オブジェクトがこの光線中を通ることで形状が識別される. これはスマートビルディングの普及により、屋内環境光を計測する PD が建物に遍在する環境を仮定している. 反射の活用によって従来は計測困難であった遮蔽によって見通し距離が確保できない人体の股などの形状も認識可能であることを示した. さらに実験によって 5.50cm の平均平方誤差で物体の形状を識別できることを明らかにした. この研究において屋内にいる人物のトラッキングも可能であることが示唆されているが、具体的な評価実験などは実施されていない.

このように PD を用いたデバイスレス測位の手法の中には、反射光を活用する手法も見られる. しかしそれらの手法は屋内の広い範囲にわたって多数設置された高速応答かつ高感度で動作可能な PD での受信を想定している. そのため、カメラ 1 台で床面に重畳する反射光を撮影する本研究とは条件が異なっている.

2.4.3 カメラを用いる手法

2010 年以前ごろに行われていた研究では、スマートフォンがまだ普及しておらず、スマートフォン上での実装や、最適なカメラパラメータなどの議論はされていない [83, 84]. 本稿では、スマートフォンカメラを用いた先行研究に焦点を当て、説明する.

Luxapose は LED に ID を割り当て高速変調させ、CMOS イメージセンサのローリングシャッタ効果 [85, 86, 87] を利用してこれを検出し、その到来角より 6 自由度の推定をする [24]. この研究において、小売店などにおける屋内ナビゲーションの需要があるにもかかわらず、現在のスマートフォンをハードウェア的に変更することなく正確な位置情報や方位情報を取得可能な手法が確立されていないことを問題として挙げられている. システムではまず LED の座標と割り当てられた周波数の情報を可視光通信によって事前にスマートフォンに与え、スマートフォンはこれを元に天井の LED をインカメラで直接撮影し、周波数解析をする. ローリングシャッタ効果によって低速カメラでも数 kHz のサンプリングレートが確保できる. 可視光通信においてビットストリームをそのまま送信することは、ちらつきのある変調光の要因になるとして、マンチェスタ符号と純粋なビットストリームを組み合わせた送信シンボルを提案している. また、実デバイスを用いて信号の受信に最適なカメラパラメータについても検討されている. 受信機よりも 2.46m 高い天井にて約 70cm 四方の天井に 5 つの LED を取り付け、90 パーセントイル 3 次元測位誤差 10cm 未満を達成している. また、誤差 3 度未満で 3 軸を推定可能であることを明らかにした. PI は 1.02 と算出される. 高精度な手法ではあるが、LED の配置間隔が狭く、また、LED の配置領域外では誤差が 30cm 以上に増大することが報告されている. 位置計算には 33 メガピクセルの画像を使用しているため、専用のクラウドサーバで 9 秒の計算時間がかかる.

DIMLOC は、LED 変調光をローリングシャッタカメラで撮影することによって発生する縞模様に対し、多項式近似とコントラストの強調によって検出誤差を改善する測位手法である [88]. カメラを用いた可視光測位が、スマートフォンにハードウェア的に変更をせずに測位を実現する手法として有効であると強調されている. 従来手法を LED ビーコンの周波数を検出する手法と、送信信号を検出する手法に大別し、周波数検出手法では高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform:FFT) を用いるシンプルなアルゴリズムで実現可能である一方、検出には誤りが発生する可能性があること、信号を検出す

る手法では正確なランドマークの検出が可能になる一方、変復調の設計をする必要があることについて言及し、これら既存手法は、従来の LED の調光機能を無視し、常に同じ光量で発光すると仮定していることを指摘した。また、直接撮影する手法において3つ以上の光源を撮影することは現実的ではなく、2つの LED で測位可能な手法の重要性が強調されている。彼らの手法では2つの LED の幾何学的な位置関係と重力加速度を用いて2次元座標を推定する。実験環境は9個の LED が3.3m×3.15mに設置され、スマートフォンと LED の距離は1.76mに設定されている。これにより、カバレッジ内で2つ以上の LED が撮影できると述べられている。スマートフォンのロール角を変更することでより多くの LED を撮影できるが、実際には LED 変調信号が正しく受信できなくなることで誤差が増大することが確認されている。40箇所での2次元測位をした結果、平均誤差4.5cmを達成した。PIは0.039と計算される。これは非常に低いPIであり、十分な測位精度が確保されている。一方でカバレッジ内における LED の設置個数は9個であり、そのように多数の LED が配置されている屋内環境は限られている。

PIXEL は偏光特性を用いて2次元測位を行う手法である [89][90]。携帯端末の計算リソースには制限があり、従来のように大容量の画像を用いることは実際には実装困難であることを指摘している。これを解決するために、従来手法の主流であったローリングシャッター効果を用いない手法を提案している。低周波の変調でも人の目にちらつきを与えないために、液晶を用いたバイナリカラーシフトキーイングと呼ばれる偏波変調を行い、これを偏光板を備えたカメラで直接撮影する。低価格の汎用カメラはサンプリングが不等間隔であることを挙げ、オペレーティングシステム (Operating System: OS) からクロックを取得することで正確なダウンサンプリングを実現する方法についても言及されている。小さな解像度の画像で実現できるシステムのため、スマートフォンのような計算機でも実装可能で、クロック周波数1200MHzのCPUを搭載したスマートフォンで240×320の解像度に設定した場合であっても1.8秒未満で測位が完了することが報告されている。テストベッドでは2.4m×1.8mの領域に8つのLEDを配置している。LEDとカメラは3.0m離れており、測位の結果90パーセントの誤差は0.3mだった。PIは0.56と計算される。この論文では小さな解像度を用いたシステムの重要性が述べられている一方、小さな画像に複数のLEDを直接写す必要があるため、設置LEDの台数が増大し、結果としてPIが増大していることがわかる。

中澤らは、前面カメラに魚眼レンズを取り付け、FoVを確保することでより広い範囲のLEDを検出する手法を提案した [91]。また、1.6メガピクセルの前面カメラと8メガピクセル背面カメラの両方を用い、前面カメラのみを使用した場合と比べ3.5倍の範囲で位置認識を実現した [92]。提案された両手法において、可視光測位が視覚障害者のナビゲーションに有効な解決策の候補でありながら、依然として光源をカメラで直接撮影する手法には、カバレッジが十分確保できない問題があると指摘している。

RainbowLight は複屈折と偏光の特性に着目し、3次元測位を行う手法である [93]。従来手法の問題点として、LED変調光を用いる場合はそのような機能を持つLEDは今日の屋内には普及していない点、LED変調光を用いずに既存の照明インフラをデータセットとして事前学習する手法の場合は、学習コストのオーバーヘッドが避けられない点を挙げている。彼らのシステムでは、セロハンテープなどの複屈折を伴う物質と偏光フィルムをLEDや窓に貼り付けてランドマークとし、偏光フィルム装着のカメラで撮影することで、光を変調することなく測位できる。ランドマークに光が透過するだ

けで良いため、照明だけでなく窓などに貼り付けても使用可能である。光源とカメラの距離が2mから3mにおける3次元測位実験では、平均誤差がx軸に3.19cm、y軸に2.74cm、z軸に23.65cmであった。この実験ではカバレッジに関して明言されておらず、また、LED変調光を用いる手法よりも設置コストのオーバーヘッドが削減できる特徴があるためPIは評価しない。この手法の短所として、ユーザは偏光版を用いてカメラレンズを加工する必要がある点、ランドマークによって景観が損なわれてしまう点などが挙げられる。本研究ではユーザがスマートフォンをそのまま用いることを想定するため、このような偏光板を用いた手法は適用しない。

Rajagopalらの手法は床面の反射光を利用するセマンティックな測位手法である[7]。ローリングシャッタ効果に着目し、床面を撮影することでより大きな面光源として信号を受信する。この手法では、各LEDを異なる周波数でバイナリ周波数シフト変調し、パケット受信率を用いてランドマーク単位での測位をする。数値的に座標を求める手法ではないため、測位精度に関しては議論されていない。

STARLITは単一のLEDからなる反射光をローリングシャッタカメラによって撮影し、2次元測位する手法である[94]。筆者らは可視光測位がマルチパスフリーによって信頼性のある手法であり、LEDは高効率で身近なインフラである利点を挙げている。システムは床面で反射する周波数変調光を面光源として捉え、LEDのIDを識別するとともに、画像内のRSS伝搬モデルから光源に対する相対位置を算出する。特徴として、背景画像から変調信号を抽出するために、長時間露光と短時間露光の画像を比較すること、ノイズを緩和するためにスキャンラインごとに輝度値の和を算出することが提案されている。この手法において反射光を用いる際に、床材は均一であること、天井と床は並行であることが条件として述べられている。テストベッドにおいては、3.6mの高さの天井にLEDを取り付け、72m²の領域で測位実験が行われた。大きな画像を用いることによる計算コストのオーバーヘッドがあるため、スマートフォン内で非同期処理にて計算を行い、全体として測位にかかる時間は平均で0.87秒である。2次元測位の中央誤差及び80パーセンタイル誤差はそれぞれ0.25m、0.55mであった。前提として撮影画像の方位をジャイロセンサによってキャリブレーションしなければならないが、具体的な方法については明言されていない。

2.4.4 先行研究の課題

以上のように、カメラ可視光測位の既存手法の多くは、直接光源を撮影する必要があり、ローリングシャッタ効果による歪みを持つ大きな解像度の画像を用いるか、レンズを加工したカメラで撮影された画像を用いる。歪みを発生させるローリングシャッタ効果はCMOSイメージセンサの特徴であるが、これはカメラの使用者にとって好ましくないため、ローリングシャッタ効果を持たないCMOSイメージセンサ、並びにそれを搭載したスマートフォンの開発が進められている[95]。

また、そのような大きな解像度を処理することはスマートフォンにとって大きな負担になることが指摘されている[96]。そのため、前述の先行研究の多くは、オフラインでの評価を行っており、システムにクラウドサーバを組み込むことが提案されている[24]。これは、ユーザ数が増加するほどサーバへの負荷がかかり、また、画像情報をサーバに送信することによるプライバシーの問題も挙げられる。この問題を解決することを目的とし、レンズを加工することでFoVを確保するなどして測位可能領域を増大させる手法も述べたが、これは使用者の負担増加や、カメラ本来の機能喪失が懸念さ

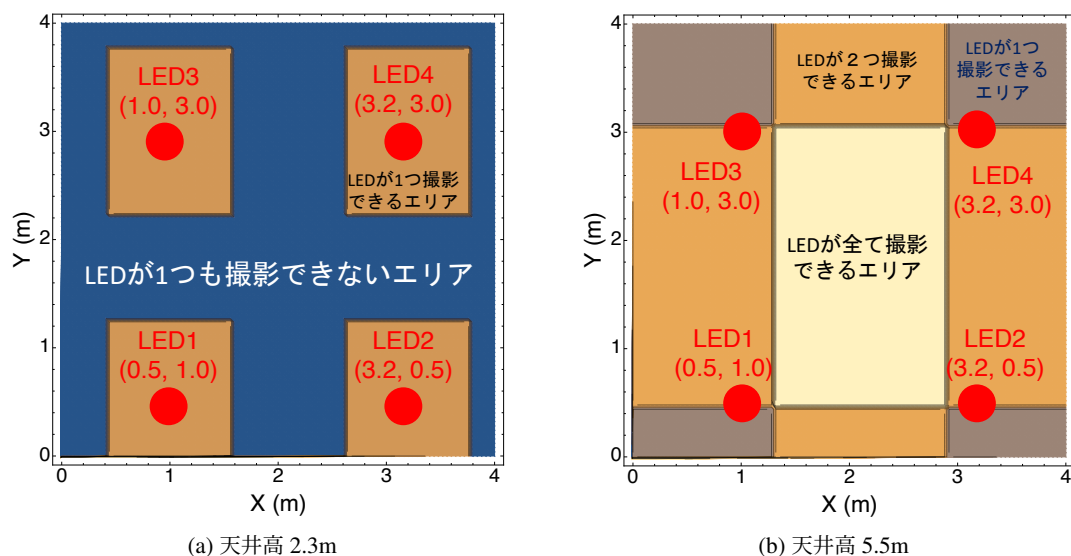


図 2.2 LED の配置と、カメラで直接撮影可能な LED の数の関係

れる。

直接光源を撮影する手法の他の問題点として、十分な高さの天井や密に配置された LED を必要とする点が挙げられる。図 2.2 は、LED が 4 つ配置された空間内において、スマートフォンが直接撮影可能な LED の数を表している。スマートフォンにおけるインカメラの FoV は通常、人の顔を撮影することを目的とし、水平 60 度、垂直 45 度以内程度で設計されている。

1 例として iPhone 6s plus を想定すると、水平 58 度、垂直 45 度である。人が立った状態で水平に iPhone を保持することを想定し、iPhone の地上からの高さを 0.9m とする。4 つの LED は図 2.2 のように、二次元座標 (0.5, 1.0), (3.2, 0.5), (1.0, 3.0), (3.2, 3.0) の位置に配置されているとする。この時、一般的なオフィス環境の天井高として 2.3m を想定すると、図 2.2a のように、約半分の場所において LED はインカメラに映らない。これは測位困難であることを意味する。また、残りの領域についても、撮影可能な LED は 1 つのみであり、LED が点光源であった場合、ここからスマートフォンの座標を幾何学に計算することは難しい。天井の高さを 5.5m とした場合であっても図 2.2b のように、全ての LED が撮影できる、すなわちスマートフォン座標が計算可能なエリアは、中央の四角い領域に限られる。

このように、直接撮影する手法においては、インカメラの FoV 及び天井高と LED の配置に制約があり、十分な測位領域の確保が難しい。また、解像度の大きな画像を使うことがボトルネックになっている。一方で、測位空間に障害がない場合、床面は必ず全ての点光源の光を反射する。すなわち、床面反射光は空間内のどこから撮影してもスマートフォン座標を計算できることが期待される。そこで次章からは、カメラのレンズを加工せず、ローリングシャッター効果も必要としない、床面反射光を用いる可視光測位手法について提案する。

第 3 章

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 3.1 に示される。スマートフォンは図 3.1a で示されるように、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) は図 3.1b で定義され、 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 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 3.1a 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、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_{L_k}, y_{L_k}, 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こと 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 [97, 98] 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 3.1a 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。この時、図 3.1c で示されるように、撮影した画像平面における画素の座標を (u, v) とすると、その画素に写った床の座標を $P_{F_{uv}}(x_{F_{uv}}, y_{F_{uv}}, 0)$ とし、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
- 撮影された床面の座標推定
- スマートフォンの 6 自由度推定

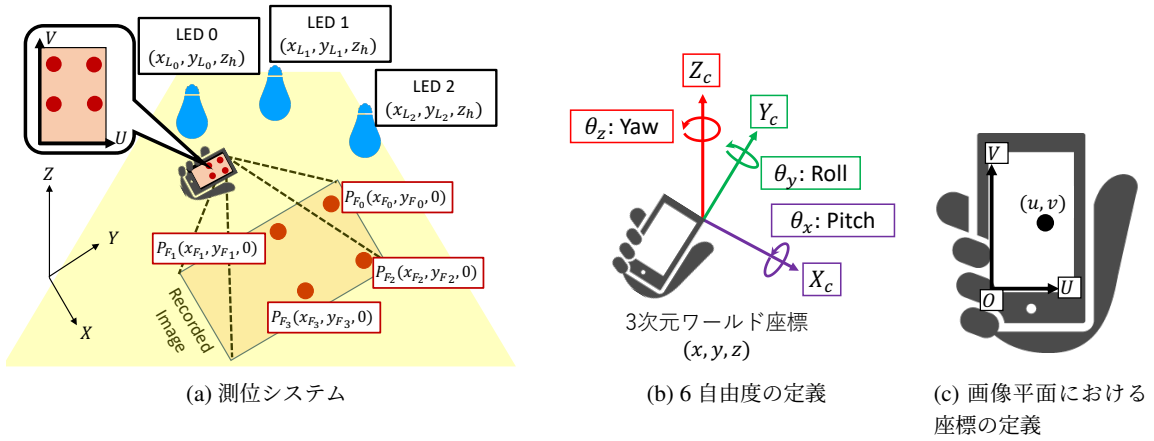


図 3.1 提案手法の概要

3.1 LED 直下と撮影された床面間の距離推定

距離推定の概要は図 3.2 で示される．測距フローでは，図 3.3a のように， k 番目の LED を通る垂線と床面の交点 $P_k(x_{L_k}, y_{L_k}, 0)$ と (u, v) の画素によって撮影された床 $P_{F_{uv}}$ の距離 $d_{uv}^k = \sqrt{(x_{L_k} - x_{F_{uv}})^2 + (y_{L_k} - y_{F_{uv}})^2}$ の推定を行う．LED k は時刻 t において信号 $b_k(t)$ を送信し，信号は床面上の座標 $(x_{F_{uv}}, y_{F_{uv}}, 0)$ の地点で反射され，カメラ画像上の画素 (u, v) で記録される．この際，信号は伝送モデル $X(d_{uv}^k)$ に従って減衰する．撮影した画像ストリームからピクセル (u, v) のストリームを抽出し，フーリエ解析によって信号の振幅スペクトルを求め，これを伝送モデルに代入することで距離を計算する．よって理想的には 1 ピクセルの撮影のみで測距が可能である．以下で，具体的な測距方法について説明する．

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．

$$b_k(t) = \sin(2\pi t(A_k f_s + m_k)) + \alpha \quad (3.1)$$

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 $b(t)$ が負の値とに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． m_k の割り当てについては後述する．

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．図 3.3a のように，LED の放射角を ϕ ，カメラが撮影した光の反射角を ψ とする．この時，図 3.3b のように，反射面は理想的なランバート反射面とすると，カメラが観測する輝度は，角度 ψ によらず一定である．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，全ピクセルが同時に

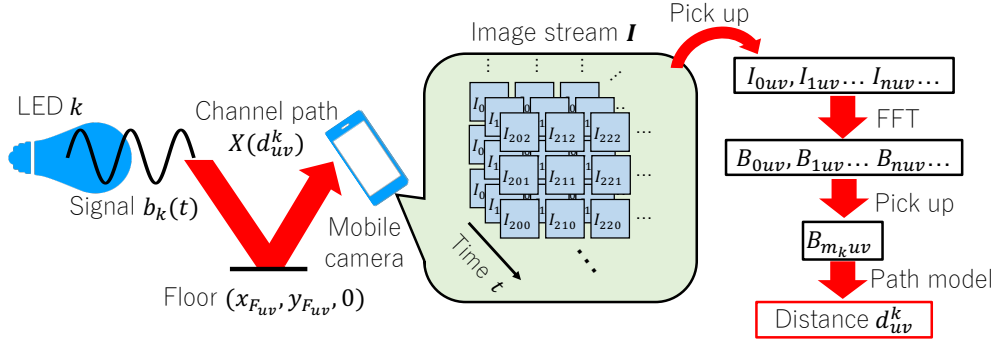
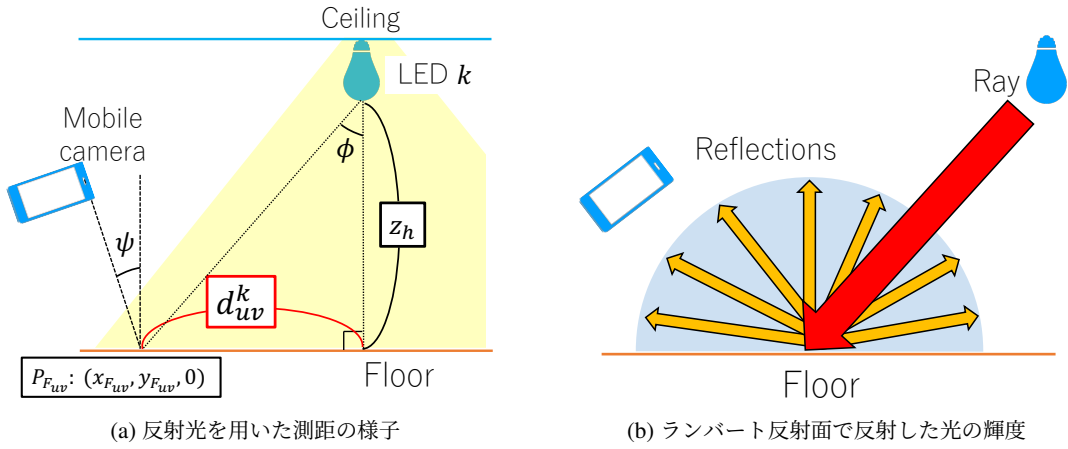


図 3.2 カメラを用いた測距フロー



(a) 反射光を用いた測距の様子

(b) ランバート反射面で反射した光の輝度

図 3.3 反射面とその測距の概略

撮像し、その受光感度も全て等しい理想的なカメラを想定すると、画像平面座標 (u, v) の画素から得る輝度値 I_{uv} は、

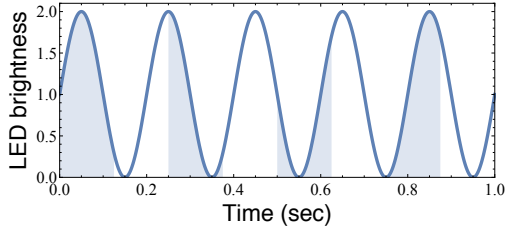
$$I_{uv} = \sum_k \frac{2\pi X(d_{uv}^k)}{T_c} \int_0^{\eta T_c} b_k(t + \delta T_c + n T_c) dt. \quad (3.2)$$

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、 $X(d_{uv}^k)$ は距離 d_{uv}^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 d_{uv}^k の計算は、 I_{uv} を用いた $X(d_{uv}^k)$ の逆関数により達成される。

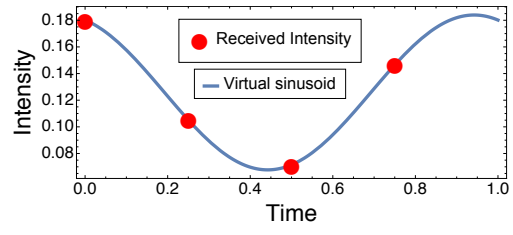
ここで、1例として、 $A_k = 5$, $\eta = 0.5$, $T_s = 1$, $N = f_c = 4$ をとる $k = 0$ 番目の LED ただ 1 つが発光した場合を想定する。この時

$$\beta_i^k = \begin{cases} 2 & (i = 0) \\ 1 & (i = -A_k, A_k) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3.3)$$

となるような β_i^k を選択すると、LED 0 が発する信号 $b_0(t)$ は図 3.4a の実線で示される。信号の減衰及び外乱が全くない場合、画素 (u, v) は実線の信号を塗り潰された区間で積分した値を輝度値 $I_{(uv)}$ ($n = 0, 1, 2, 3$) として出力する。具体的には、図 3.4b の離散点で示される。またこの時、離散点はオーバーサンプリングにより、折り返し雑音が発生し、図 3.4b の実線のような 1Hz の正弦波と見なすことができる。本研究ではこれを仮想正弦キャリアと呼ぶ。これにより人がちらつきを感じない高



(a) 送信信号及びイメージセンサの積分領域



(b) 送信信号から得られる輝度値と仮想的な正弦波

図 3.4 送信信号とカメラの動作

い周波数の変調光を用い数 10fps 程度で動作するカメラで撮影しても、信号を特定の周波数として検出できる。

受信機は得た $\mathbf{I} = (I_{0uv}, I_{1uv}, \dots, I_{nuv}, \dots)$ の離散フーリエ変換を行う。そして得られるフーリエ係数 B_{iuv} ($0 \leq i < N$) は、

$$B_{iuv} = \frac{2\pi}{NT_c} X(d_{uv}^k) \sum_{n=0}^{N-1} I_{nuv} e^{-\frac{j2\pi ni}{N}} \quad (0 \leq i < N-1). \quad (3.4)$$

この I_{nuv} に、式 (3.2) を代入する。送信信号 $b_k(t)$ を離散フーリエ変換して得られる、送信周波数キャリアのスペクトルを β_{mk}^k を用いて、

$$= \frac{2\pi}{NT_c} X(d_{uv}^k) \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{v=-K}^K \int_0^{\eta T_c} e^{j2\pi v \frac{t}{T_c} + \frac{(v-k)n}{N}} dt \beta_k. \quad (3.5)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{v=-K}^K e^{j2\pi(v-k)n/N} f(v) &= \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{v=-K}^K \delta_{vk} f(v) \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} f(k) \\ &= N f(k) \end{aligned} \quad (3.6)$$

である。なお、 δ_{vk} はクロネッカーのデルタである。これを (3.5) に当てはめると、

$$\begin{aligned} B_{m_k uv} &= e^{j2\pi k \delta} \frac{2\pi}{T_c} X(d_{uv}^k) \int_0^{\eta T_c} e^{j2\pi k \frac{t}{T_c}} dt \beta_k \\ &= \eta X(d_{uv}^k) e^{j\pi m_k (2\delta + \eta)} \text{sinc}\left(\frac{\pi m_k \eta}{T_c}\right) \beta_{m_k}^k. \end{aligned} \quad (3.7)$$

を得る。これにより、 k 番目の LED から送信された周波数キャリア $|\beta_{m_k}^k|$ が抽出できる。このキャリアの値を既知とし、カメラの η を一意に定めると振幅スペクトル $|B_{m_k uv}|$ は伝送路による減衰関数 $X(d_{uv}^k)$ 及び周波数フィルタ sinc の影響を受ける。すなわち、 sinc の減衰を補正し、 $|B_{m_k uv}|$ を $X(d_{uv}^k)$ の逆関数に代入することで、 d_{uv}^k を計算できる。

$\text{sinc}(\pi m_k \eta / T_c)$ による周波数フィルタについて説明する。伝送距離は 0 として、選択されたキャリア周波数と受信する振幅スペクトルの関係について図で示す。実際の応用例を想定し、送信信号式

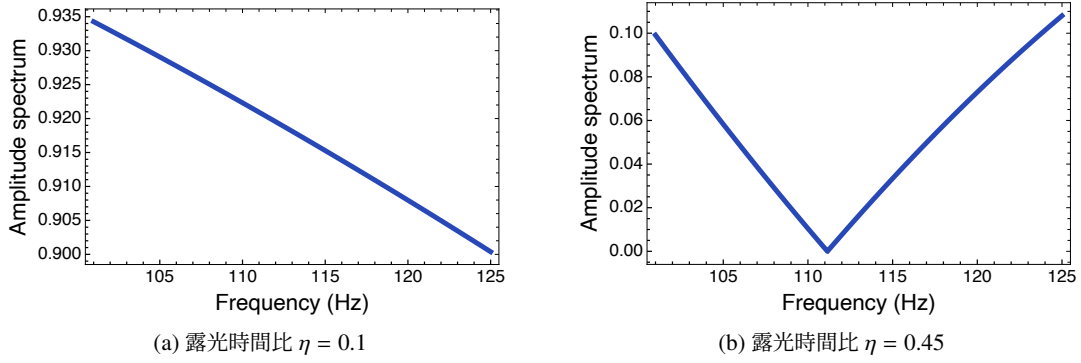


図 3.5 送信周波数と受信スペクトルの関係

(3.1) と受信画像式 (3.2) のパラメータは $A_k = 2$, $T_s = 1/50$, $N = f_c = 50$ としている．露光時間比が短い $\eta = 0.1$ の場合においても、周波数フィルタによる振幅の減衰が見られ、最大で 3.5 パーセント減衰した．後述する本稿の実験環境において、これは数 10cm 程度の測距誤差となる．露光時間比を $\eta = 0.45$ とすると、図 3.5b のように、送信信号 111Hz 付近で受信できる振幅が極端に低くなる．これは信号対ノイズ比 (Signal to Noise Ratio: SNR) が悪くなるため、大きな測距誤差になることが予想される．よってそのような露光時間比の設定は避けるべきであり、撮像素子の積分動作を考慮することによって得られた周波数フィルタ $\text{sinc}(\pi m_k \eta / T_c)$ から、定めるべき露光時間比を決めることができる．これは、反射光を用いた提案手法だけでなく、カメラを用いた他の可視光測位や可視光通信にも応用が期待される新たな発見である．

$X(d_{uv}^k)$ を反射光減衰モデルにて表現する．実際の床面反射光はランバートモデルと鏡面モデルが複雑に作用し合うため、理論的なモデル化が難しい [99]．ここでは、反射面は理想的なランバート面と仮定する．

まず、カメラが反射光から受けるエネルギーについて考える．理想的な点光源の光エネルギーは距離の二乗に反比例する．そしてこの点光源を天井に取り付けた場合、放射角の余弦に従ってエネルギーが減衰する．式を簡潔に表すために $d_{uv}^k = d$ とし、図 3.3a より点 $P_{F_{uv}}$ における光のエネルギー $E(d)$ は

$$E(d) = \frac{a_L^k}{d^2 + z_h^2} \cos^\rho \phi \quad (3.8)$$

$$= \frac{a_L^k z_h^\rho}{(d^2 + z_h^2)^{1+\rho/2}}, \quad (3.9)$$

ここで、 a_L^k は LED k が持つ固有のパワー、 ρ は光の放射角による反射光の減衰度合いを表すランバート係数で、理想的には 1 である． $X(d_{uv}^k) = X(d)$ は、信号の振幅スペクトルにかかる減衰モデルであるため、

$$X(d) = \sqrt{E(d)} = \frac{\sqrt{a_L^k z_h^\rho}}{(d^2 + z_h^2)^{(2+\rho)/4}} \quad (3.10)$$

である。これを用いて振幅スペクトル $|B_{m_k uv}|$ を書き換えると,

$$|B_{m_k uv}| = \eta X(d_k) \text{sinc}(\pi i \eta) |\beta_{m_k}^k| \quad (3.11)$$

$$= \frac{C_L^k z_h^{\rho/2}}{(d^2 + z_h^2)^{(2+\rho)/4}} \quad (3.12)$$

となる。ここで $C_L^k = \eta \sqrt{a_L^k} \text{sinc}(\pi i \eta) |\beta_{m_k}^k|$ となる送受信機間固有の伝送効率である。よって LED k 真下の床面座標 $P_k(x_{L_k}, y_{L_k}, 0)$ と (u, v) の画素によって撮影された床 $P_{F_{uv}}$ の距離 $d_{uv}^k = d$ は,

$$d = \begin{cases} \sqrt{-z_h^2 + \left(\frac{|B_{m_k uv}| z_h^{-\rho/2}}{C_L^k}\right)^{-\frac{4}{2+\rho}}} & \left(|B_{m_k uv}| \leq \frac{C_L^k}{z_h}\right) \\ 0 & \left(|B_{m_k uv}| > \frac{C_L^k}{z_h}\right) \end{cases} \quad (3.13)$$

である。

式 (3.13) において、天井の高さ z_h が未知であった場合に距離が導出できない。そこで、式 (3.10) の近似式で、天井の高さを含み未知の 2 変数から構成されるものを提案する。まず $\rho' = \rho/2$ とおき、正規化のために $a_L^k = a_L^k h^2$ とする。式 (3.10) をマクローリン展開すると,

$$\begin{aligned} \frac{z_h^{\rho'}}{(d^2 + z_h^2)^{\rho'/2}} &= z_h^{\rho'} (z_h^2)^{-\rho'/2} - 1/2 z_h^{\rho'} (z_h^2)^{-1-\rho'/2} \rho' d^2 - 1/4 z_h^{\rho'} (z_h^2)^{-2-\rho'/2} (-1 - \rho'/2) \rho' x^4 \\ &\quad - 1/12 z_h^{\rho'} (z_h^2)^{-3-\rho'/2} (-2 - \rho'/2) (-1 - \rho'/2) \rho' x^6 \dots \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} z_h^{2n} x^{2n} \prod_{i=1}^{n-1} -\left(\frac{\rho'}{2} + i\right) \quad (3.15)$$

ここで、 $a_R^k = a_L^k z_h^{\rho'/2}$ とおき、 $z_h^{-2n} \prod_{i=1}^{n-1} -\left(\frac{\rho'}{2} + i\right)$ を $\sigma^{2n}/2n P_n$ と表す。この σ のよる新たな減衰モデルを $X'(d)$ とすると,

$$\frac{1}{X'(d)} = \frac{1}{a_R^k} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{\sigma^{2n}}{2n P_n} d^{2n} \quad (3.16)$$

$$= \frac{1}{a_R^k} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sigma}{2n!} d^{2n} \quad (3.17)$$

$$= \frac{e^{\frac{\sigma}{2} d} + e^{-\frac{\sigma}{2} d}}{a_R^k} \quad (3.18)$$

より、新たな減衰モデルは

$$X'(d) = \frac{a_R^k}{e^{\frac{\sigma}{2} d} + e^{-\frac{\sigma}{2} d}} \quad (3.19)$$

であるため、振幅スペクトル $|B_{m_k uv}|$ は次のように表せる。

$$|B_{m_k uv}| = \eta X'(d) \text{sinc}(\pi i \eta) |\beta_{m_k}^k| \quad (3.20)$$

$$= \frac{C_R^k}{e^{\frac{\sigma}{2} d} + e^{-\frac{\sigma}{2} d}} \quad (3.21)$$

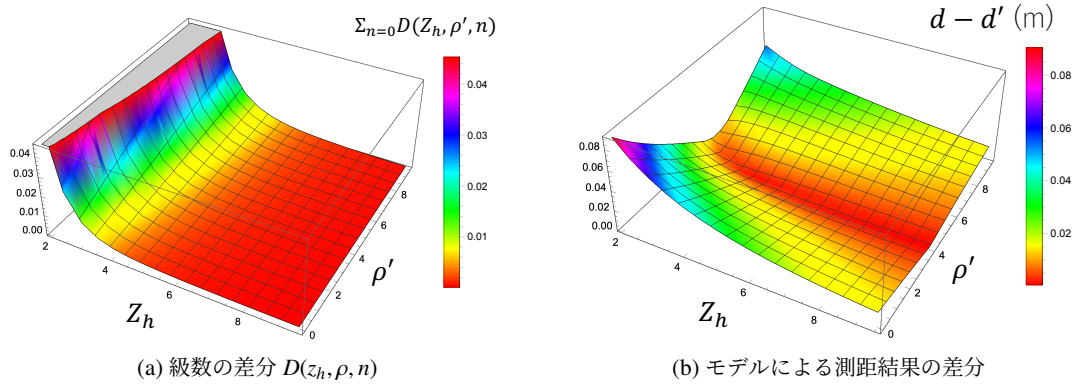


図 3.6 両モデルの比較

ただし、 $C_R^k = \eta a_R^k \text{sinc}(\pi i \eta) |\beta_{m_k}^k|$ は送受信機間の伝送効率、及びシャッタ開度 η により決定される。これより、式 (3.21) を用いて計算される距離 d' は

$$d' = \frac{1}{\sigma} \cosh^{-1}\left(\frac{C_R^k}{|B_{m_{kuv}}^k|}\right) \quad (3.22)$$

である。

式 (3.22) と (3.13) に用いた、 $z_h^{-2n} \prod_{i=0}^{n-1} (\rho' + i)$ と $\sigma^{2n}/2n\mathbf{P}_n$ の差異について説明する。この 2 つの変数の差が最小となるような σ

$$\min D(z_h, \rho, n) = z_h^{2(\rho'-n)} \prod_{i=0}^{n-1} (\rho' - i) - \frac{\sigma^{2n}}{2n\mathbf{P}_n} \quad (3.23)$$

を考える。屋内の計測環境を想定し、 $2 \leq z_h \leq 10$ (単位は m) とする。 ρ は理想的には 1 で、実際には後述の実験より、 $0 \leq z_h \leq 10$ 程度であることがわかっている。この範囲における 2 関数の差分 $D(z_h, \rho, n)$ の n に関する総和を図 3.6a に示す。差分は範囲全体において非常に小さい値を取り、 $z_h = 2$ 付近でやや増大した。最大の差分は $\rho = 10$, $z_h = 2$ における 0.32 であった。この値は、天井が非常に低く、光源がスポットライトのように極端に中心のみ明るい状態を示している。両モデルにおける測距結果の差分が図 3.6b に示されている。測距結果は両モデルにおいて非常に近似している。誤差はモデルの差分に見られた傾向と同様、 z_h の値が小さい時に増大した。最大誤差は $\rho = 0$, $z_h = 2$ における 0.09m であった。この値は測位のために十分小さい値であり、また、後述の実験により式 (3.22) を用いて高精度に測距可能であることがわかっている。

以上より、式 (3.13) 及び (3.22) を用い、反射光とその撮影画像によって d_{uv}^k が測距可能であることを説明した。

3.2 撮影点の推定

撮影点は、複数のアンカーポイント (LED 送信機) からの距離をそれぞれ求め、3 辺測量の原理を用いて計算する。式 (3.22) で求めた 3 個以上の LED からの距離 d_{uv}^k を用いて、撮影点 P_F を推定する。図 3.7a のように、各 LED の二次元位置は既知であり、撮影点から二次元位置までの距離は推定したので、図 3.7b で示されるような、円同士が重なる領域内に撮影点が存在すると推定できる。

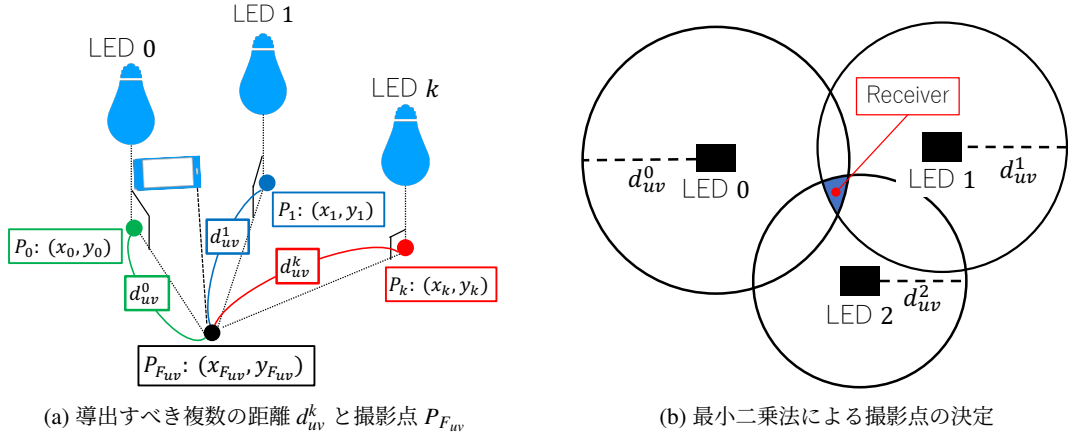


図 3.7 多点測量と撮影点の関係

ここで、複数の測距のために用いるキャリブレーション方法について説明する。提案手法では、次に示すいずれかの方法でキャリブレーションする。

- 事前計測によるキャリブレーション
- 初期状態を用いたキャリブレーション

事前計測によるキャリブレーションでは、各 LED と床面に対し、式 (3.13) または式 (3.22) のパラメータ C_L^k, z_h, ρ または C_R^k, σ を求める。モデル式 (3.22) の方がパラメータがひとつ少なく、後述する実験によって両モデルの性能差もほとんど確認されなかったため、本稿ではこちらのモデルを推奨する。パラメータの求め方は、まず既知である任意の各距離 d または d' にて送信キャリアの振幅スペクトル $|B_{m_k}|$ を求める。ここで $d, d', |B_{m_k}|$ とは、 $d_{uv}^k, |B_{m_k,uv}|$ において画像の主点位置 (u_o, v_o) をとったものを指す。主点位置については後述する。計測した各スペクトルを用い、以下の最小二乗法によってモデル式へ回帰する。すなわち、

$$\min \sum_i \left(|B_{m_{ki}}| - \frac{C_L^k \rho^{1/2}}{(d_i^2 + z_h^2)^{(2+\rho)/4}} \right)^2 \quad (3.24)$$

または

$$\min \sum_i \left(|B_{m_{ki}}| - \frac{C_R^k}{e^{\frac{\pi}{2}\sigma d_i'} + e^{-\frac{\pi}{2}\sigma d_i'}} \right)^2 \quad (3.25)$$

これを、各 k に対し実行する。ここで、 i は計測地点のインデックスを指す。そのため、少なくとも複数箇所の i を選択し、撮影する必要がある。また、より正確な回帰のため、 $|B_{m_k}|$ は、複数回計測の平均値とすると良い。

屋内の環境によっては、LED が全て同じ種類であることが考えられる。その場合、LED 固有のパワーによって変動するパラメータ C_L^k または C_R^k は k の値によらず一定であると考えられる。その場合、各 LED に対してキャリブレーションをする必要はなく、複数の LED を活用し、一回の計測でキャリブレーションが可能である。スマートフォンの初期状態 (初期位置) から、各 LED に対する距離を d_k または d'_k とすると、

$$\min \sum_k \left(|B_{mki}| - \frac{C_{L_h}^k \rho^{1/2}}{(d_k^2 + z_h^2)^{(2+\rho)/4}} \right)^2 \quad (3.26)$$

または

$$\min \sum_k \left(|B_{mki}| - \frac{C_R^k}{e^{\frac{\pi}{2}\sigma d'_k} + e^{-\frac{\pi}{2}\sigma d'_k}} \right)^2. \quad (3.27)$$

ここで、スマートフォンの初期位置は、各 d_k または d'_k が異なる値になるよう選択する必要がある。これは、LED の配置にも依存する。

これらのキャリブレーションによって求めた複数の d_k を活用し、撮影された床の座標は以下を満たす値を求めることで導出する。

$$\min \sum_k \left(\sqrt{(x_F - x_k)^2 + (y_F - y_k)^2} - d_k \right)^2. \quad (3.28)$$

この時の d_k は d'_k であっても構わない。また、3 辺測量の特性から、複数 LED の配置は、2 次元空間において 1 直線上にならないように配置することが推奨される。本稿では一般的な屋内環境として、四方に配置された 4 つの LED を仮定し、後述の実験環境としている。

3.3 スマートフォンの 6 自由度推定

導出した床面座標 $P_{F_{uv}}$ を用いてスマートフォンカメラの座標と姿勢、すなわち 6 自由度を推定する手法を 2 つ提案する。1 つはスマートフォン内部の IMU を用いる手法、もう 1 つは複数の床面座標 $P_{F_{uv}}$ による AoA を用いる手法である。

3.3.1 IMU を用いた 6 自由度の推定

前節で述べた手法で求めた P_F 、スマートフォンの姿勢、及び既知の高さから三次元空間におけるスマートフォン座標 (x, y, z) を計算する。図 3.8a のように、カメラの主点位置 (u_0, v_0) の画素にて撮影された点 P_F を考える。これを用いて 6 自由度を求める様子が図 3.8b で示される。スマートフォンは地点 (x, y, z) から床面 $(x_F, y_F, 0)$ を撮影しており、その位置関係は、カメラの向きと Y 軸及び Z 軸がなす角である θ_z 及び θ_x を用いて表される。スマートフォンの初期状態は、背面カメラが XY 平面上に水平で、通話マイクを $-Y$ 、通話スピーカを $+Y$ 方向とし、ピッチ角 (θ_x)、ヨー角 (θ_z)、ロール角 (θ_y) はゼロである。スマートフォンの各角度はスマートフォン内蔵の地磁気センサと IMU を用いて取得される [100]。保持されるスマートフォンの高さ z を与えることにより、スマートフォン座標が

$$(x, y, z) = (x_F - z / \tan \theta_x, y_F - z / \tan \theta_z, z) \quad (3.29)$$

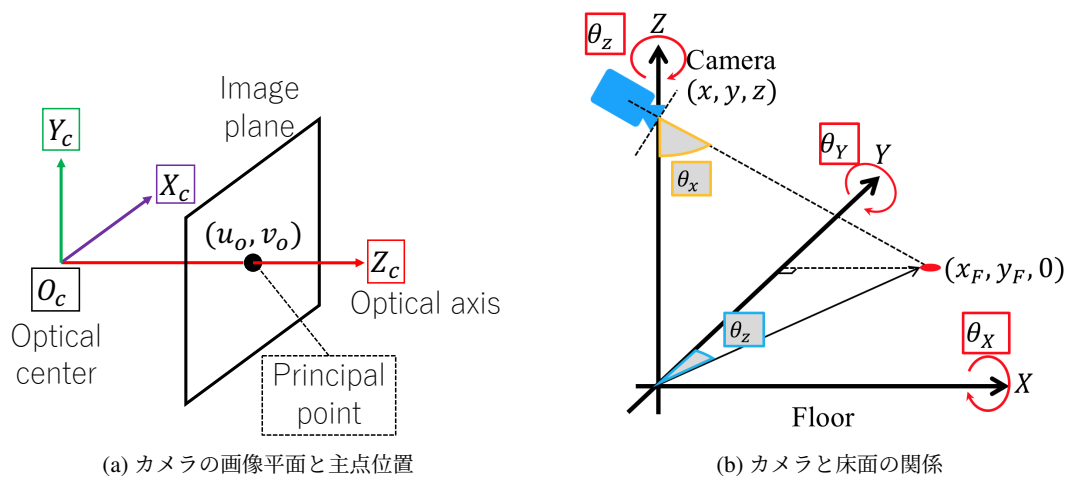


図 3.8 撮影点と 6 自由度の変換

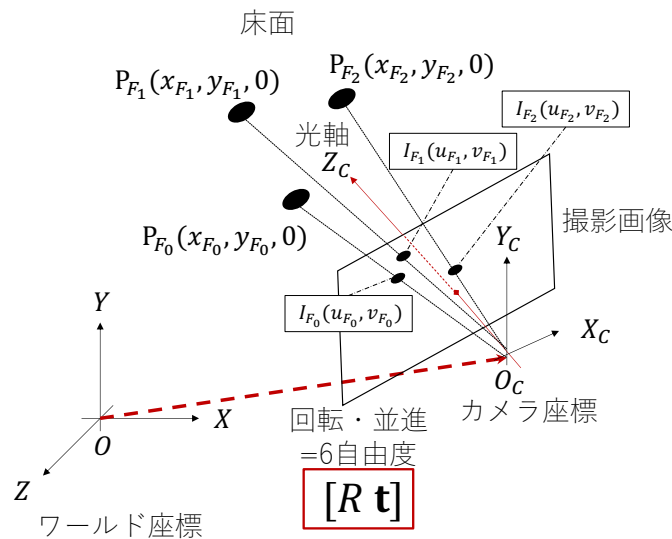


図 3.9 撮影点と 6 自由度の変換

で計算される。この時、高さ z は人がスマートフォンを持つとしておよそ $1.0m$ 前後であることが想定される。測位精度向上のためには、この高さを何らかの方法で取得する必要がある。また、屋内環境においては地磁気が不安定であり、絶対方位の取得には事前計測などが必要である [101]。そのため、方位に関しても、既知の初期状態を与え、そこからの相対変化などを計測する必要がある。そこで、これら高さや方位を既知とせず、6 自由度の 1 つとして、AoA を用いて推定する。

3.3.2 AoA による 6 自由度推定

3.2 節にて、3 つ以上の LED を用いて、画素 (u, v) によって撮影された床面座標 $P_{F_{uv}}$ を推定できることを説明した。スマートフォンカメラは通常数 100 万以上の画素を有しており、提案手法では理論的には撮影した画像ストリームから数 100 万以上の床面座標をそれぞれ求めることができる。この、推定した複数の床面座標からなる平面と、画像平面の射影関係を、カメラ行列 [102, 103] にて求める

ことによって、6自由度を導出する。

撮影された床面座標 P_{F_i} は図 3.9 で示されるように、 $X-Y$ 平面上に存在する。そしてこれを撮影する撮像素子の中心、すなわちカメラ座標の原点 O_C は、3次元座標 (x, y, z) にあり、その画像平面の向きはワールド座標に対して3軸回転角 $(\theta_X, \theta_Y, \theta_Z)$ だけ変化している。これは、ワールド座標上の原点 O に対する回転行列 R と並進行列 \mathbf{t} で表すことができる。これはそれぞれ、

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta_Z & -\sin \theta_Z & 0 \\ \sin \theta_Z & \cos \theta_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_Y & 0 & \sin \theta_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_Y & 0 & \cos \theta_Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_X & -\sin \theta_X \\ 0 & \sin \theta_X & \cos \theta_X \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

と表現する。そして、画像平面に投影された撮影点 I_{F_i} の座標 (u_{F_i}, v_{F_i}) はピクセル単位の値であるため、ワールド座標の単位とカメラ座標の単位を変換する係数 s 、そして、画像平面はカメラ座標の原点 O_C から光軸方向 Z_C に対して焦点距離 f 分だけ離れたものであるため、撮影点 P_{F_i} とその投影点 I_{F_i} の関係は

$$sI = M[R \mathbf{t}]P \quad (3.32)$$

と表現される。ここで、 $[R \mathbf{t}]$ はカメラの回転と並進、すなわち6自由度を表す行列である。 M は内部パラメータ行列

$$M = \begin{bmatrix} fs_u & fq & u_0 \\ 0 & fs_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

である。ここで、 s_u, s_v はそれぞれ U, V 方向の画素サイズ、 q は画像平面の U 軸と V 軸の傾きを示す剪断係数である。 I は画像平面からなるストリーム、 P は複数の床面座標 P_F によって構成される行列

$$I = [\mathbf{I}_0 \dots \mathbf{I}_i \dots] = \begin{bmatrix} u_{F_0} & \dots & u_{F_i} & \dots \\ v_{F_0} & \dots & v_{F_i} & \dots \\ 1 & \dots & 1 & \dots \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$P = \begin{bmatrix} x_{F_0} & \dots & x_{F_i} & \dots \\ y_{F_0} & \dots & y_{F_i} & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots \\ 1 & \dots & 1 & \dots \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

である。すなわち、カメラによって撮影された点 (x_{F_i}, y_{F_i}) は画像ピクセル上の二次元座標 (u_{F_i}, v_{F_i}) に変換される。カメラの6自由度を表す行列 $[R \mathbf{t}]$ は次のようにして得る。

$$\min \|A[R \mathbf{t}]P - sI\|_2. \quad (3.36)$$

第 4 章

実装

提案手法のプロトタイプ RefRec を実装した。RefRec は、送信機である LED ビーコンと、受信機のスマートフォンで構成される。次節から送受信機の詳細について説明する。

4.1 送信機

LED ビーコンが送信信号に基づき変調される流れがブロック図 4.1a に示される。信号はファンクションジェネレータ (日本電計社, WF-1948, 図 4.2c) から 5V 以下のパルス信号として送信される。パルス信号は MOS-FET 回路 (図 4.2b) に入力され、直流電源 (菊水社, PWR801ML, 図 4.2d) の 35.2V 電流を高速でスイッチングする。スイッチングされた電流はパルス信号として LED 照明 (CREE 社, BXRE-50C4001-B-74, 白色 LED, 全光束約 3000lm, 図 4.2a) に入力され、LED はパルス密度変調 (pulse-density modulation: PDM) として高速で明滅し、カメラで撮影すると正弦波のように記録される。提案手法において光源はランバート係数が 1 となる典型的な LED 点光源が理想的であり、使用した LED は予備実験により放射特性が、その理想的な光源に近いことが確かめられている。MOS-FET は自作の基板であり、その詳細は回路図 4.1b に示されている。

送信信号の作成方法について説明する。式 (3.1) による送信信号 $b_k(t)$ は、1 次の $\Delta\Sigma$ 変調によってビットストリーム S_n (n は $0 \leq n < N'$ を満たす自然数、 N' は任意自然数)

$$S_n = \begin{cases} 1 & (0 \leq s_n) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4.1)$$

に変換される。ここで、 s_n は

$$\Delta = b_k\left(\frac{tn}{N'f_s}\right) - 2S_{n-1} + 1 \quad (4.2)$$

を用いて $s_n = \Delta + s_{n-1}$ と表せる。ただし $s_{-1} = 0$, $S_{-1} = 0$ と定義する。 N' の値は任意に定めて良いが、大きすぎる値をとると、パルス間隔が非常に短くなり、ハードウェアの限界によってこのビットストリームを正しく出力できなくなる。そのため、プロトタイプでは $N' = 512$ とした。送信信号は式 (3.1) で $f_s = 50$, $A_0 = 2$, とした。すなわち変調信号は最低 100Hz で変調される。100Hz は東日本の蛍光灯であり、変調光はこれよりも大きな周波数になるため人の目にちらつきを感じさせない。最短のパルス間隔はこれの $1/512$ 倍であるため、周波数にすると約 50kHz である。

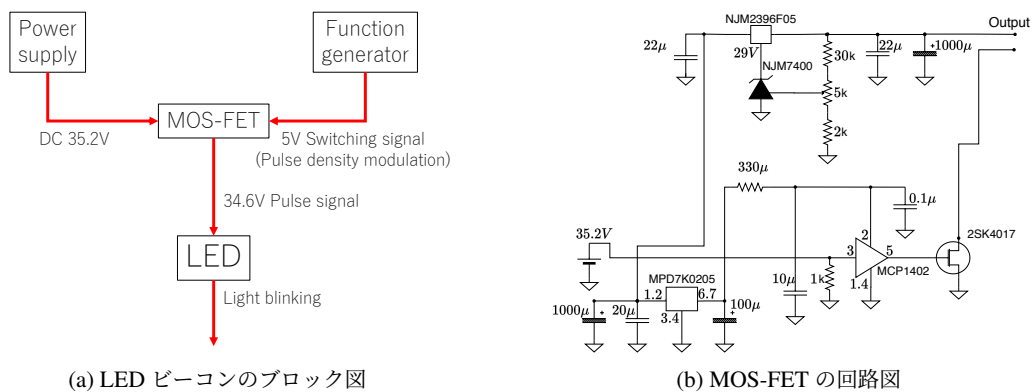


図 4.1 送信機の構成

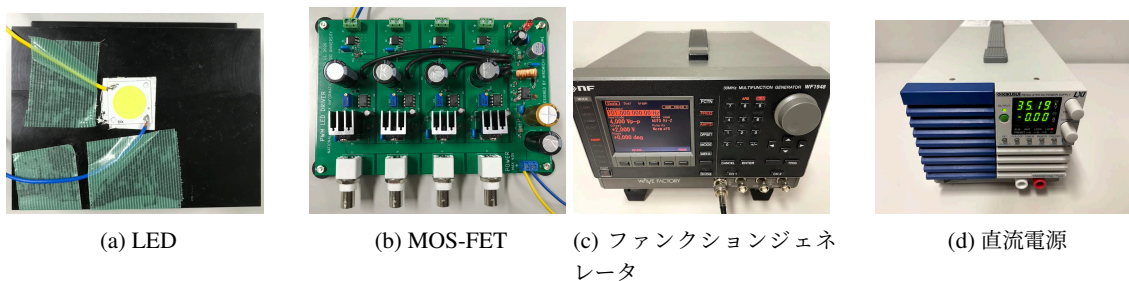


図 4.2 送信機の各機材

4.2 受信機

受信機は iPhone 7 とした。iPhone 6s plus や iPhone SE など、iOS が搭載された他のスマートフォンを用いてもほぼ同様の挙動をすることが予備実験により判明している。SWift4.0 を用いたアプリの実装では、iPhone カメラで床面を撮影し、得られた画像ストリームから振幅を計算し、提案モデルによって測距を行い、測距結果及び既知の LED 座標からターゲットの位置をリアルタイムに計算する。提案手法ではカメラのフレームレート $1/T_c$ 、露光時間 ηT_c 、そして受信特性である ISO 感度を一意にする必要がある。これらは Apple 社より提供されているライブラリ AV Foundation を用いて制御した。提案手法は理論的に 1 ピクセルだけ撮影すれば撮影点の座標を推定可能であるが、次の 2 つのハードウェア的制約により、実装では複数ピクセルを使用する。

- ライブラリのプリセットでは、1 ピクセルのみの読み出しがサポートされていない
- 読み出しは RGB 各 8bit に量子化されることによる誤差が発生する

実装に用いたライブラリにおいては、複数の解像度のプリセットが用意されているが、iPhone 7 の場合は最小でも 144×192 である。ただしこの解像度ではフレームレートが最大 30fps にしか設定できず、後述のパラメータを用いることができない。そこで 1080×1920 の解像度が用いられた。カメラは最も効率の良い処理を行うため、送信信号を最短で受信できるパラメータとした。フレームレ

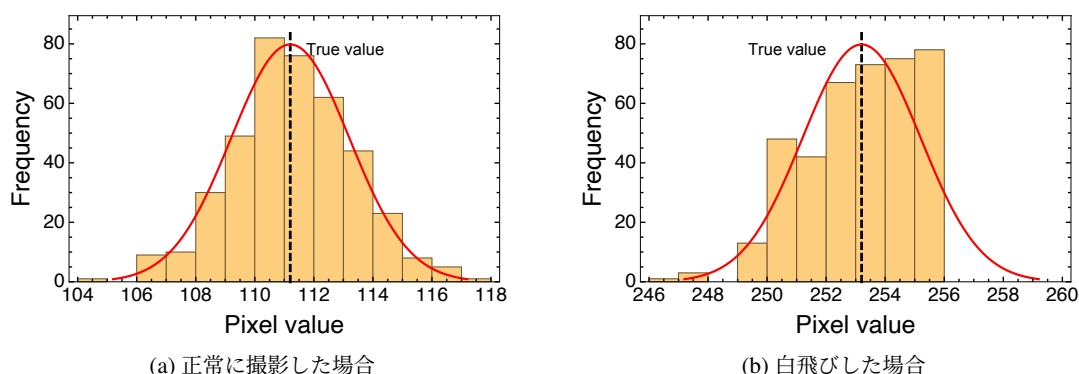


図 4.3 撮影した画像内の各画素における画素値とその出現回数，及び真値を中心とした正規分布のグラフ

トが $f_c = 50$ ，サンプリング点数が $N = 50$ である．これによって，基本周波数ちょうど 1 周期が画像ストリーム 1 周期となる．また，蛍光灯の光はカメラのフレーム時間と直交する 100Hz で変調しており，カメラに直流分として観測されるため信号に対する影響は最小限になる．1080×1920 の解像度であれば iPhone 7 では 240fps まで設定でき，設定したいパラメータに適している．ホワイトバランスはデフォルト設定で固定値とした．また，用いる輝度値 I_{uv} は次のように計算される．

$$I_{uv} = \frac{1}{2} (\max(R, G, B)_{uv} + \min(R, G, B)_{uv}) \quad (4.3)$$

ここで， $\max(R, G, B)_{uv}$ ， $\min(R, G, B)_{uv}$ はそれぞれ，撮影した n 枚目の (u, v) ピクセルにおける R, G, B 値における最大，及び最小の値を示す．これにより RGB 空間から HLS 空間へと変換し，そのうち輝度のデータを扱う．

また，使用ピクセルは注目ピクセルの周辺 64×64 pixel のブロックを標準とした．本来は 1 ピクセルのみで推定が可能であるが，実際には各画素は RGB8bit の値を出力する．これによる量子化誤差が発生するため，周囲のピクセルを含んだ平均値によって誤差を低減する．撮影されたブロック内の床面が全て同じ明るさで反射していた場合，各ピクセルが記録する画素値は，図 4.3a で示されるように，本来出力すべき画素値に内部回路によって発生する正規分布のノイズを付加し，8bit に量子化した値になる．この場合より多くの画素を用いて平均化するほど，その値は真値に近づく．ただしここで 2 点の問題がある．

1 点目は，図 4.3b で示されるように，撮影したブロック内におけるピクセルの一部が 255 を超える，すなわち白飛びしまった場合，255 を超えるべき値は全て 255 として出力され，その平均値は正しい値にならない．そのため，受信機は画面が白飛び，あるいは逆に黒つぶれしないようパラメータを設定する必要がある．このパラメータについては後述の計測実験で明らかにする．

2 点目は，床面が実際には一様に同じ明るさではない点である．式 (3.21)，(3.10) で示したように，床面の明るさは LED からの距離によって減衰する．複数ピクセル撮影した際には，それぞれのピクセルで撮影された床面の，LED に対する距離が異なるため，各ピクセルは異なる値が出力されるべきである．各ピクセルで撮影された床面同士の距離が近い場合，距離の差は無視できると予想されるが，使用するブロックの大きさによる本来得られるべき値のずれと量子化誤差はトレードオフの関係にある．従って設定すべきブロックの数についても後述の計測実験により明らかにする．

また, Zhang らの手法 [103] を用いて以下に示すカメラ行列を取得した.

$$M = \begin{bmatrix} f s_u & f q & u_o \\ 0 & f s_v & v_o \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1529.66 & 0 & 959.07 \\ 0 & 1533.86 & 524.86 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

カメラ行列の取得にあたり, 3×4 のチェッカーパターンが印刷された A4 用紙を白い壁に貼り付けた. そして iPhone7 を用いて, 距離, 姿勢をランダムに変更した 29 枚の画像を撮影し, OpenCV のライブラリを用いてカメラ行列を推定した.

第 5 章

計測実験

提案手法の有効性や、制約を明らかにするため、プロトタイプを作成し、計測実験を行った。まず予備実験として、提案した反射光減衰モデルによって正しく測距が可能であることを示し、測距誤差となる要因の調査について述べる。その後撮影した床の座標を推定する実験、スマートフォンの 6 自由度を推定する実験について説明する。

5.1 実験設定

実験環境は図 5.1 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 1.15m 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 2.6m 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、 $m_k = (1, 6, 13, 20)$ ($k = 0, 1, 2, 3$) とした。すなわち、LED はそれぞれ 101, 106, 113, 120Hz 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, 20Hz として記録される。

5.2 反射光減衰モデルのパラメータ推定及び評価

障害を排除した理想的な環境に設置された LED の反射光をスマートフォンカメラで撮影し、式 (3.22) のパラメータを推定した。反射光の減衰モデルと実際に観測された振幅スペクトルの差異によって測距精度を評価した。詳細を以下に述べる。

5.2.1 実験設定

特に断りのない限り、実験は全て次のように行った。LED 0 のみを変調させ、カメラは LED の直下 ($d^0 = 0$) の地点から、 $d^0 = 3.5\text{m}$ まで 0.5m 間隔で設置し、各点で 100 回測定を行った。その結果に基づき、式 (3.21) を回帰モデルとするパラメータ推定を行い、距離 d^0 を推定した。

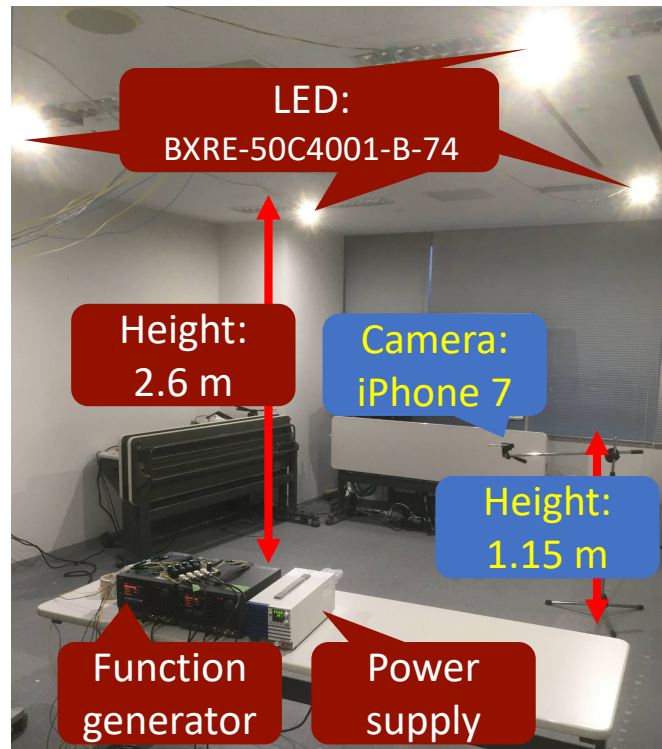


図 5.1 実験環境

5.2.2 カメラパラメータによる影響

提案手法では、スマートフォンカメラのダイナミックレンジを適切な範囲に設定しなければ、画像に白飛びや黒つぶれが発生し、信号を正しく解析できない。そこでダイナミックレンジに関するカメラのパラメータを変化させ、実験環境における適切な設定及びその測距性能を調査した。

条件

ISO とシャッタースピード (Shutter Speed: SS) をそれぞれ変化させた。ISO は 22, 100, 300, 704, SS は 16.7, 6.7, 3.3, 2.0, 0.1ms で $4 \times 5 = 20$ 通りについて調査した。iPhone 7 では設定可能な ISO の最小値が 22, 最大値が 704 である。さらにその中間的な値を持つ 100 と 300 を加え、4 通りの設定で実験をした。SS は 50fps において設定可能な最大値が 16.7ms である。50/60 より、シャッタ開度 $\eta \approx 0.804$ である。また、おおよそ SS 0.1 ms よりも短い設定では、PDM による光のちらつきが影響してしまうことが予備実験により判明したため、0.1ms を最短の SS とした。そしてその中間的な値である 6.7, 3.3, 2.0 と合わせ、5 通りの SS で実験をした。また、ホワイトバランスやフォーカスは固定とした。

結果

各 ISO と SS における、距離ごとに観測された振幅スペクトルは図 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 で示される。赤点が実際に観測された全ての振幅スペクトルで、いずれの結果においても分散は非常に小さ

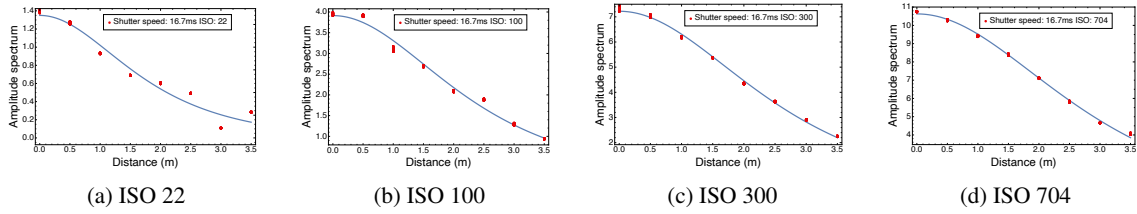


図 5.2 シャッタースピード 16.7ms における距離ごとの振幅スペクトル

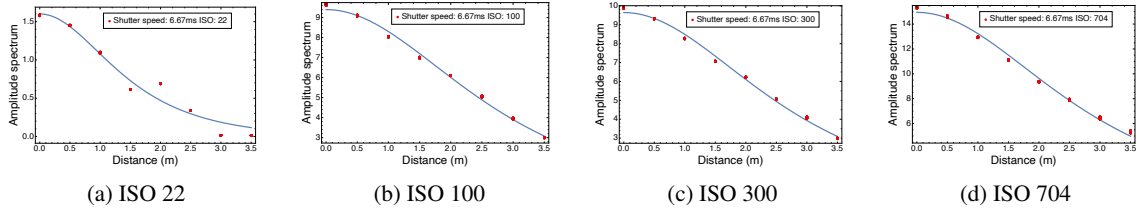


図 5.3 シャッタースピード 6.67ms における距離ごとの振幅スペクトル

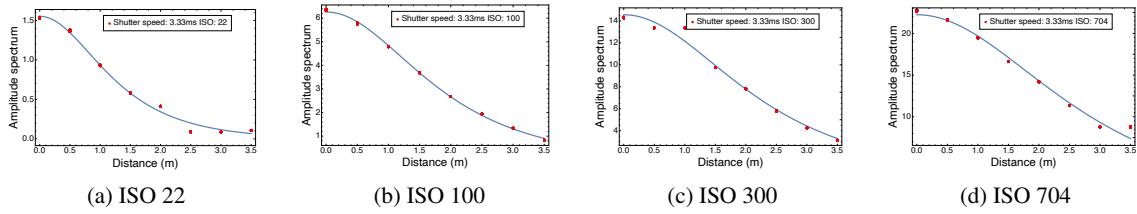


図 5.4 シャッタースピード 3.3ms における距離ごとの振幅スペクトル

かった．青い実線が観測データに対しフィッティングした提案モデル式 (3.22) である．得られたパラメータを図 5.7, 表 5.1 で示す．図 5.7 における各点が推定したパラメータ C_R^k の値, 各点線は各パラメータ C_R^k を 1 次関数に回帰し, 得られたグラフである．SS は積分時間 ηT_c , ISO は受信感度 C_R に関係し, 理想的にはこれらの値は線形に変化するため, 式 (3.22) におけるパラメータ C_R^k は SS と ISO の変化に対して線形に応答し, 本来, 図 5.7 における各点は, 回帰して得た各グラフの線上にあるべきである．しかし実際には, データによって線上からやや離れ, 全体的に非線形挙動になっている．また, ρ は本来 SS や ISO によらず一定である．しかし表 5.1 より, ρ はカメラパラメータによって変化していることがわかる．これにより, カメラパラメータの SS と ISO によって, 得られるパラメータの非線形的な挙動が確認された．そのため, 以降の実験では, カメラパラメータを 1 つに定めた．

カメラパラメータを 1 つに決定するため, 各パラメータによる測距誤差特性の比較が図 5.8 に示される．ISO が 22 の時, 全ての SS において最悪の測距結果となった．これは受光素子の感度が低すぎて画像が黒つぶれしてしまうためで, 図 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 にも見て取れるように振幅は非常に小さい値となり, SNR が悪化していることがわかる．SS 16.67 ms, すなわち露光時間比 $\eta \approx 0.804$ である時の測距誤差の CDF が図 5.8e に示される．画面の明るさが飽和し, 全パラメータの中で最も大きな誤差となった．

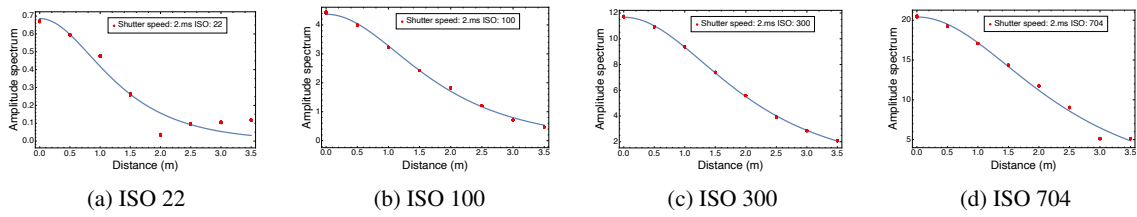


図 5.5 シャッタスピード 2.0ms における距離ごとの振幅スペクトル

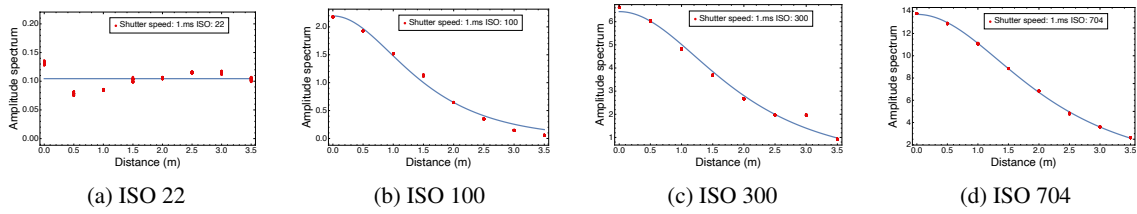


図 5.6 シャッタスピード 0.1ms における距離ごとの振幅スペクトル

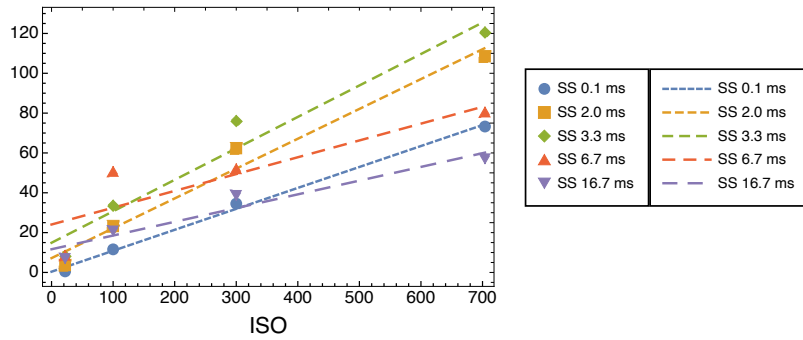


図 5.7 各設定における式 (3.22) の推定パラメータ C_R^k

表 5.1 各設定における式 (3.22) の推定パラメータ ρ

	ISO 22	ISO 100	ISO 300	ISO 704
SS 0.1ms	-2.16	2.43	1.20	0.65
SS 2.0ms	3.37	1.39	0.77	0.12
SS 3.3ms	3.18	1.10	0.34	-0.20
SS 6.7ms	2.40	-0.24	-0.21	-0.28
SS 16.7ms	1.27	0.22	-0.13	-0.40

5.2.3 床面の材質

7種類の床材を用い、それぞれの測距性能を評価することにより、変調光を反射する素材による提案手法への影響を調査した。

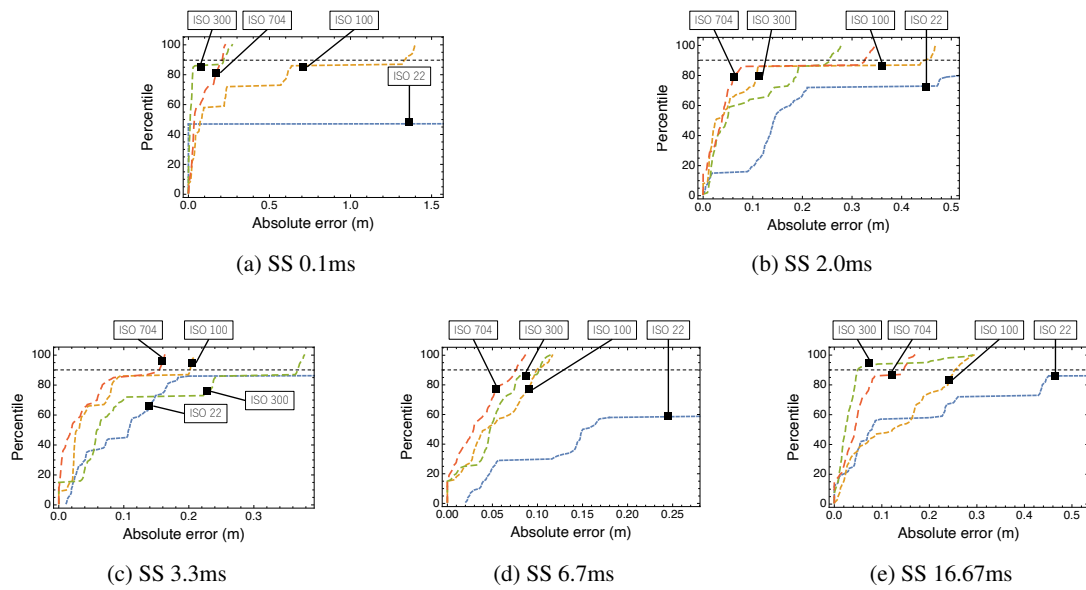


図 5.8 各 SS, ISO における測距誤差の CDF



図 5.9 7 種類の床面

条件

用いた床材は図 5.9 で示される。それぞれ黒色マット、灰色マット、白色マット、光沢のない木材、光沢のある木材風シート、光沢のある大理石風シート、人工芝と呼称する。撮影する位置に素材を敷き、同様の手順で撮影、振幅スペクトルの導出をし、それらと比較、また、得られた回帰モデルより測距誤差の検討を行った。

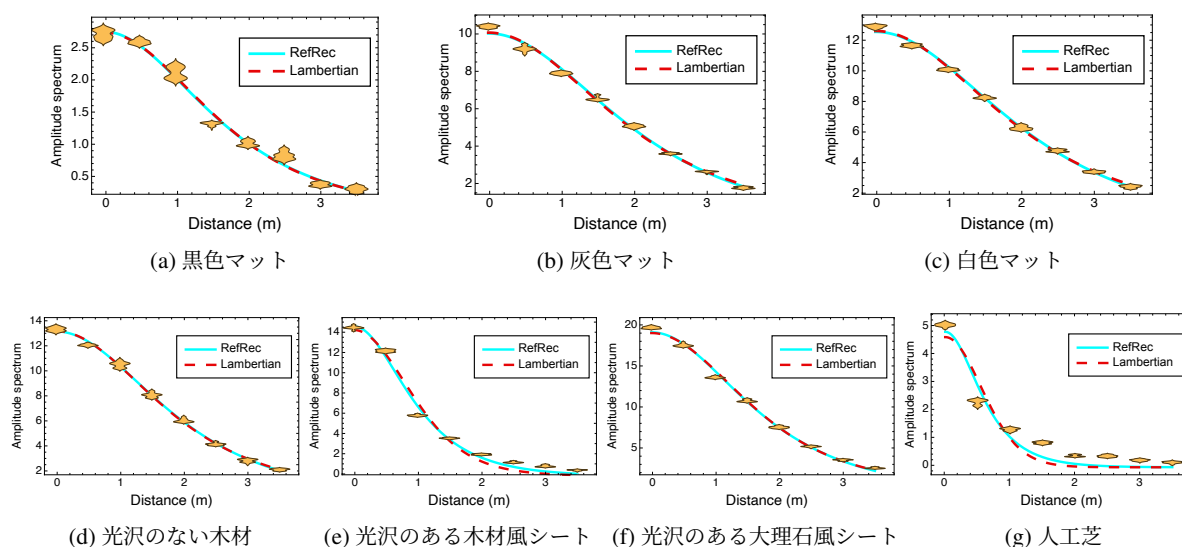


図 5.10 7 種類の床面による距離と振幅の関係

結果

各材質における距離と振幅スペクトルの関係が図 5.10 で示される。内側が潰された図形は、各距離における振幅のヒストグラムである。そして、実線がその振幅の平均値で式 (3.21) に回帰したグラフ、点線が式 3.10 に回帰したグラフである。図 5.10g に示される人工芝以外の全ての材質において、2つのグラフはほぼ一致した。よって以降ではモデル式 (3.22) のみを用いて評価を行った。図 5.10a, 5.10b, 5.10c に示されるグラフにより、黒色、灰色、白色マットはそれぞれが色の白い順に振幅が大きくなっていることが確認された。黒色マットにおける振幅値が全ての材質の中で最小であった。図 5.10d, 5.10e, 5.10f より、光沢のある材質であるほど、LED 直下の位置で振幅が強くなることが判明した。また図 5.10g では、人工芝の反射光で測定された振幅値と回帰したモデルがやや異なっている。

推定したモデル式 (3.22) を用いて、測定した振幅から距離を推定し、得られた絶対誤差が図 5.11 で示される。図 5.11a で示される黒色マットの中央誤差は 0.133m、90 パーセンタイル誤差は $d = 0.0m$ の計測地点が最大で、0.406m だった。各 90 パーセンタイル誤差の平均値は 0.243m である。灰色マット、白色マットと、色が白に近づくにつれ誤差が小さくなる様子が図 5.11b, 5.11c に示されている。灰色マットにおける中央誤差は 0.0313m、90 パーセンタイル誤差は $d = 0.5m$ の計測地点が最大で、0.198m、各 90 パーセンタイル誤差の平均値は 0.0797m であった。白色マットでは、中央誤差 0.0311m、最大の 90 パーセンタイル誤差が $d = 0.5m$ の計測地点で 0.132m、各 90 パーセンタイル誤差の平均値は 0.0621m であった。光沢のない木材における測距誤差は図 5.11d で示される。その中央誤差は 0.0399m、90 パーセンタイル誤差は $d = 3.0m$ の計測地点が最大で、0.133m だった。各 90 パーセンタイル誤差の平均値は 0.0983m である。光沢のある木材は、光沢のない木材と比較して誤差が大きかった。その誤差が図 5.11e に示されている。中央誤差 0.120m、最大 90 パーセンタイル誤差は 3.5m 地点で 0.737、平均 90 パーセンタイル誤差は 0.284m だった。図 5.11f では、大理石風

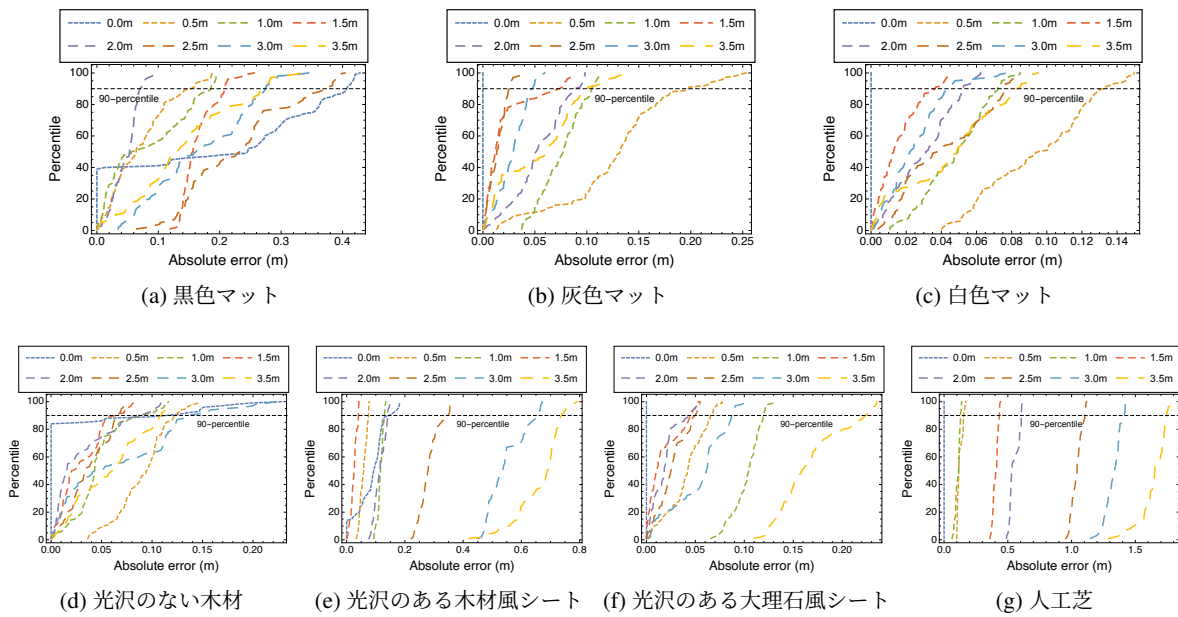


図 5.11 7種類の床面による測距誤差の CDF

シート

シートの測距誤差が示されている。中央誤差が 0.0371m，最大の 90 パーセンタイル誤差が 3.5m の地点で 0.224m だった。90 パーセンタイル誤差の平均は 0.0793m である。図 5.11g では，人工芝を床面に用いた際の測距誤差が示されている。誤差の中央値は 0.466m，3.5m の地点で 90 パーセント誤差が最大となり，1.746m だった。90 パーセンタイル誤差の平均値は 0.698m だった。これより，光沢や凹凸のある床材を用いた際には測距誤差が増大し，光沢のないマットでは白色に近づくほど高精度に測距可能であることが確認された。以降の実験では，床面の素材によるごさを最小限にするため，白いマットを用いる。

5.2.4 環境光

環境光による影響を調査した。直射日光のある昼間，直射日光のない昼間，蛍光灯のある夜間の 3 環境においてそれぞれ測距性能を求めた。

条件

直射日光のある昼間環境は図 5.12a で示される。LED 0 からの各距離において画像ストリームから振幅スペクトルを計算した際，ちょうど 2.0m の地点が直射日光となり，それ以外の箇所は屋内の構造による影となっていた。直射日光領域とそれ以外の領域では，床面の輝度が明確に異なることが図 5.12a から見て取れる。直射日光のない昼間環境は図 5.12a と同等である。ただし，直射日光を避けるように撮影された。蛍光灯のある夜間の環境は図 5.12b で示される。蛍光灯は図で示された箇所以外にも約 2.0m 間隔の格子状で存在しており，その全てが点灯していた。

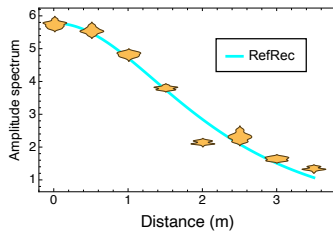


(a) 直射日光下の昼間の実験環境

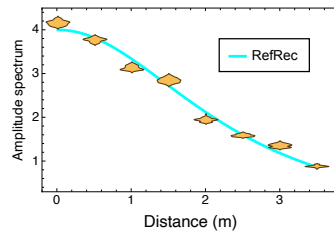


(b) 蛍光灯下の夜間の実験環境

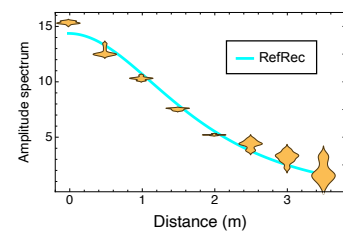
図 5.12 直射日光下における実験の様子



(a) 直射日光のある昼間



(b) 直射日光のない昼間



(c) 蛍光灯のある夜間

図 5.13 各環境における距離と振幅の関係

結果

3 環境それぞれにおける距離と振幅の関係は図 5.13 で示される。図 5.13a より、直射日光の当たっている 2.0m の地点だけ、明確に振幅が減衰していることがわかる。直射日光のない昼間と、蛍光灯下の夜間についてはおおよそ減衰モデルに従って振幅が減衰しているが、蛍光灯下の夜間では、距離が離れるほどに振幅の分散が大きくなった。

各環境で計測した振幅より推定される距離の絶対誤差の CDF が図 5.14 で示される。図 5.14a から、直射日光の当たっている 2.0m の地点では、0.4m 以上の誤差となり、これは他の地点の 2 倍以上悪い値である。図 5.14b から、直射日光のない環境であれば、最も悪い計測地点の 90 パーセント誤差でも 0.3m 未満であり、太陽光のある昼間でも十分測距可能であることを示している。蛍光灯のある夜間で観測された測距誤差の CDF は図 5.14c で示される。0.1m 未満で測距可能な箇所がある一方で、分散が増大した距離の遠い地点では、大きな測距誤差となった。

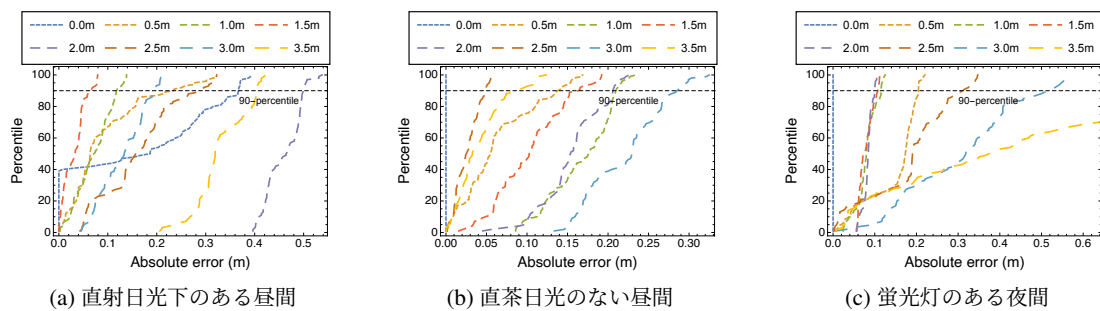
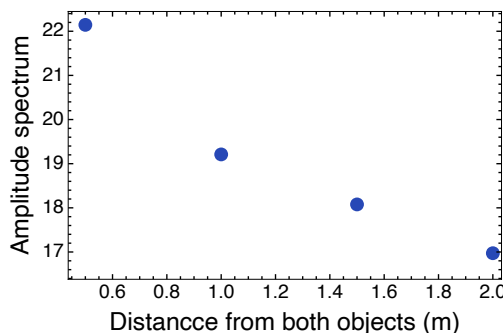


図 5.14 各環境における計測地点の CDF



(a) 実験環境



(b) 反射体への距離との受信した振幅の関係

図 5.15 二次反射とそれに伴う誤差

5.2.5 二次反射

LED からの照射光が、直接床に到来する以外に、壁などの反射物を經由する場合について検討する。実験では、ホワイトボード及び白い布を被せた壁を反射体と見立て、その反射光が床面で二次反射する状況を構築した。カメラは LED 直下でその床面反射光を撮影し、2つの反射体を図 5.15a で示されるように左右に配置した。そして、撮影箇所と反射体の直線距離を 0.5m から 2.0m まで、0.5m ずつ両反射体を同時に遠ざけ、それぞれの場合における振幅を観測した。

撮影箇所と反射体の距離に対する受信信号の振幅の関係が図 5.15b で示される。振幅は 100 回観測した値の平均値を示している。撮影箇所は 1 箇所に固定しているため、本来はいずれもおよそ同じ振幅を示すべきであるが、実際は反射体が撮影地点から遠ざかるほど小さくなっていることが確認された。

5.2.6 カメラの角度

床面を撮影するカメラの姿勢角度による影響を調査した。撮影地点は $d^0 = 1.0$ に固定し、図 5.16a のように、LED、撮影点、カメラを同一平面上に配置し、反射光を撮影する角度 θ_{c_i} を 90 度から 30

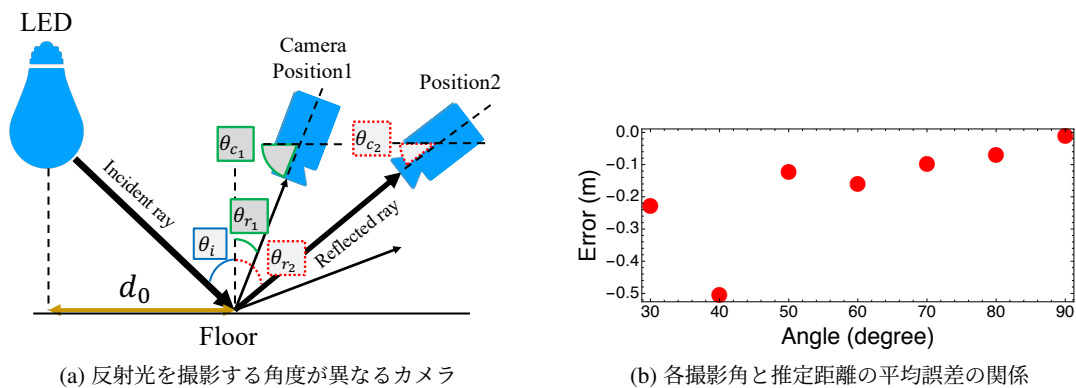


図 5.16 カメラの撮影角とそれに伴う誤差

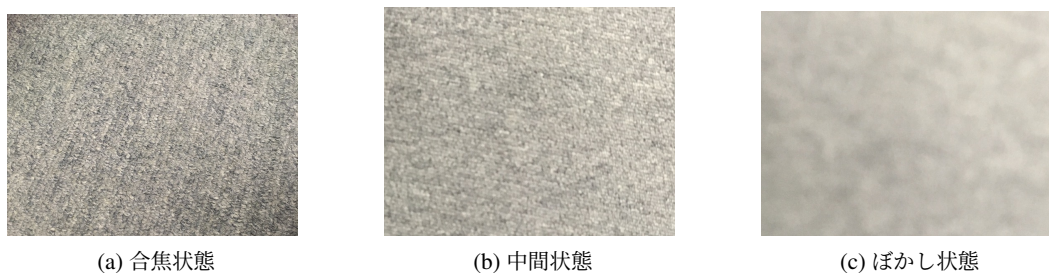


図 5.17 3種類のフォーカス

表 5.2 各フォーカスの平均測距誤差及び標準偏差

	合焦状態	中間状態	ぼかし状態
平均測距誤差 (m)	0.0293	0.0213	0.0221
標準偏差	0.00212	0.00187	0.00110

度まで 10 度ずつ変化させ、各角度 200 回ずつ計測した。

撮影角度が浅くなるごとに負の誤差が大きくなり、40 度の際に絶対誤差最大となることが図 5.16b で確認できる。また、90 度、すなわちスマートフォンが水平である場合に誤差が数 cm と最小であった。よって提案手法では、スマートフォンの水平保持を制約として追加することが推奨される。

5.2.7 カメラのフォーカス

カメラのフォーカス (ピント) の違いによる測距性能の違いを調査した。通常カメラを使用する際は被写体にピントを合わせるが、ここであえてぼかすことによって、物理的に画像にガウシアンフィルタをかけたような結果が得られる。図 5.17 に示すように、合焦状態、中間状態、ぼかし状態で床面の灰色のマットを撮影した。その他の条件は前述の床面の材質を変更した実験と同様である。

各フォーカスの距離推定によって得られた平均測距誤差及び標準偏差を表 5.2 に示す。全てのフォーカス設定において、平均測距誤差 3cm 未満、標準偏差 1cm 未満の測距結果を得た。特に、フォーカスをぼかすほど良い測距精度が得られた。

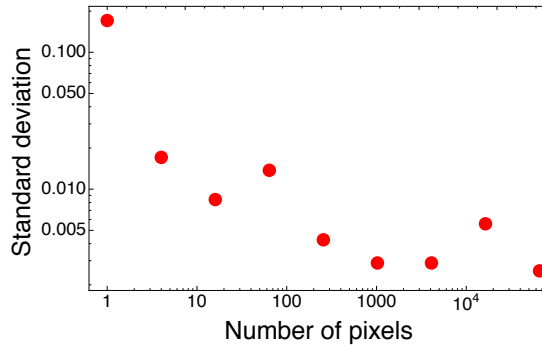


図 5.18 解像度と標準偏差の関係

5.2.8 撮影画像の解像度

提案手法は、理想的には画像の焦点位置 1 ピクセルのみを用いて計算可能である。しかし実際には量子化誤差やカメラのショットノイズなどが付加されるため、周辺のピクセルをまとめてブロックとし、ブロック内の輝度値の平均値をとる方が良好な結果が得られることが予測される。そこで解像度を $2^n \times 2^n$ ピクセル (n は整数) とし、 n を 0 から 8 まで変化させた。 $d^0 = 0.0$ から 3.0 まで 0.5m 間隔でカメラを設置し、各点 200 回ずつ計測した。

各解像度にて推定した距離の標準偏差を図 5.18 に示す。推定した距離の平均絶対誤差は各解像度ともほぼ等しかった。解像度が大きくなるほど標準偏差が小さくなり、 64×64 の解像度で標準偏差 0.05m を達成した。本研究の想定する応用例ではこの性能で十分であるため、以降の実験でも解像度を 64×64 に設定した。

5.3 測位性能の評価

前節と同様の図 5.1 の環境で、スマートフォンが撮影した床座標を推定した。得られた測位結果の誤差によって、提案手法の測位性能を評価した。詳細を以下に述べる。

5.3.1 障害のない環境における測位

条件

まず、計測環境から障害を排除した理想的な環境にて測位を行った。スマートフォンは部屋の 80 箇所にて 4 つの LED から来る反射光を撮影し、床座標を推定した。計測箇所は図 5.19a の点で示される。各 LED 0, 1, 2, 3 の二次元座標は図 5.19a の三角形で示される。スマートフォンを各 P_F の直上に三脚で固定した。4 つの LED に対しそれぞれ測距を行い、撮影した P_F の位置を式 (3.28) を用いて求めた。求めた P_F の二次元座標により測位性能を評価する。スマートフォンや LED の個体差により、式 (3.22) のパラメータに影響があることを考慮し、測位前にキャリブレーションを行った。具体的には、LED 0 の直下にカメラを設置し、一度だけ信号を受信することで $d^0 = 0$ として式 (3.22) の定数 a_R^0 を更新した。その後、各計測点で 200 回計測を行った。測位計算は全てスマートフォン上

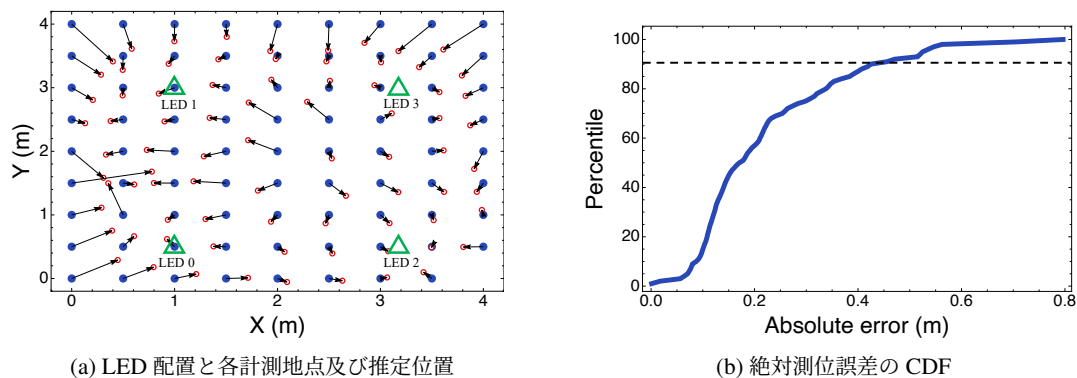


図 5.19 スマートフォンの測位誤差

で、リアルタイムで行われた。

結果

各計測点で推定された座標の重心は図 5.19a 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 10cm 以上の系統誤差が存在する箇所が見て取れた。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 5.19b で示され、90 パーセンタイル誤差 0.42m 未満を達成できることが確認された。これは、序論で述べた、高精度な屋内ナビゲーションに必要な測位誤差 1m 以内を満たしている。

光源の変更

次に、光源を変更して測位を行った。計測環境は前実験と同様である。光源は図 5.20a で示される、W-LITE 社の白色 LED を使用した。幅が 19cm×14.5cm の大きさ、全光束は 3000lm で、LED に搭載されたカバーにより、放射角は 120 度に制限される。LED は図 5.20b 上部で示されるように領域内の天井 4 隅に配置された。各 LED のキャリア周波数割り当ては他の実験と同様である。スマートフォンを図 5.20b 上部の三角形で示される 9 箇所にそれぞれ設置し、200 回ずつ測位を行った。

変更の結果

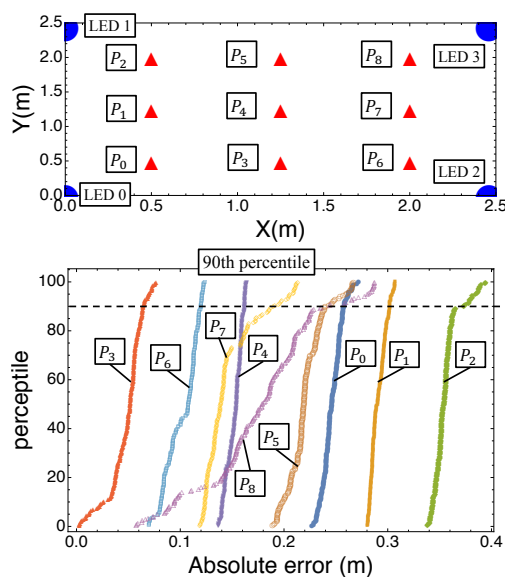
各計測点にて推定した 2 次元座標の誤差の CDF が図 5.20b で示される。系統誤差は全体を通して数 cm 程度であったが、 P_8 において分散が増大することが確認された。全体の 90 パーセンタイル誤差が 0.4m 未満であることが確認された。このことから、放射角が 120 度に制限された光源でも測位可能であることが示されている。

5.3.2 影のある環境における測位

LED が床面に到達せず、遮蔽されてしまうような非見通しについて検討する。本研究の目的はユーザが保持するスマートフォンの測位であるため、ユーザ自信が光源を遮蔽してしまうケースが想

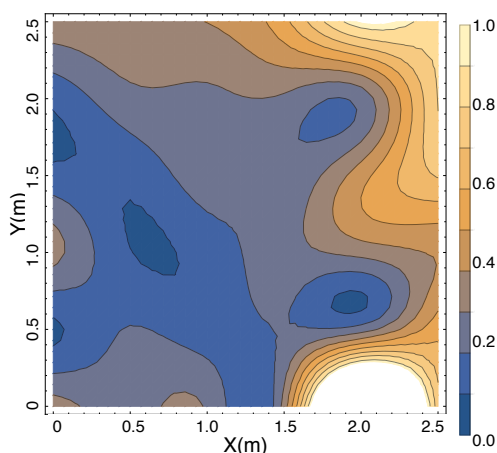


(a) 実験に用いた LED

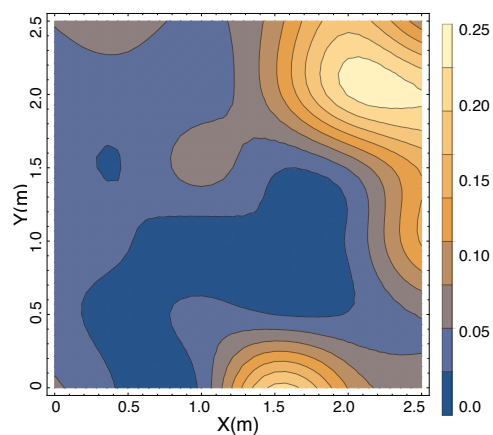


(b) (上)LED 配置と各計測地点, (下) 各計測地点における測位誤差の CDF

図 5.20 光源を変更した実験



(a) 絶対誤差



(b) 標準偏差

図 5.21 絶対誤差及び標準偏差のヒートマップ

定される．そこで iPhone 6s plus を両手で体の前に保持し，図 5.19a で示される 4 つの LED の座標を頂点とする四角形の領域内で測位を行った．この際の二次元座標は，便宜的に LED 0 を (0,0) とした．体勢は通常スマートフォンを使用するような格好で，計測中は一切動かないようにした．また，体向きを常に Y 軸に正対させた．

実験で得た測位誤差及び標準偏差のヒートマップを図 5.21 に示す．明るい色ほど，誤差や標準偏差が大きく，最大で 1m 以上の誤差となった．一方で測位エリアの左側においては，誤差 0.4m 未満と，影のない環境と同等の性能が確認された．

次に，定常的な影が存在する場合について検討する．屋内の 9 箇所において意図的にオブジェクト

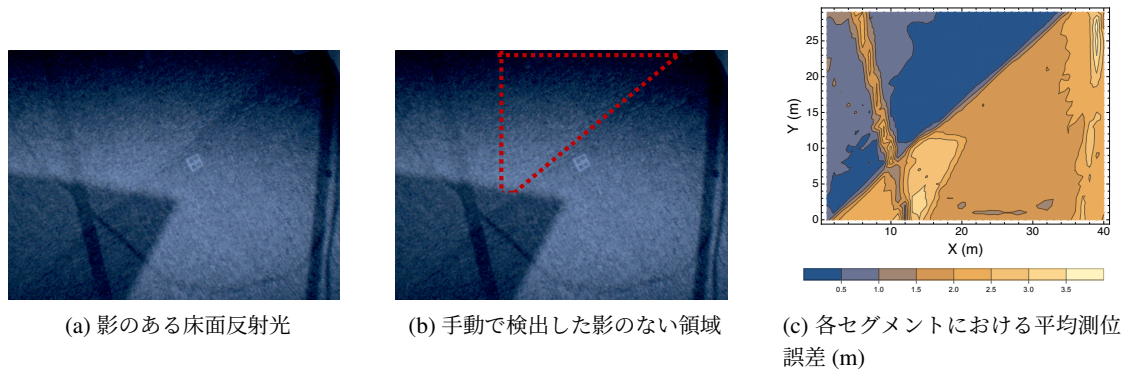


図 5.22 $(x, y) = (0, 0)$ における影の領域とその測位

を設置して非見通し環境を作成した。まず、 $(x, y) = (0, 0)$ の地点で影のある床面を撮影した。オフラインでの解析を行うため、カメラは Point Gray 社のカメラ FL3-U3-13S2C-CS を使用した。これはスマートフォンと同程度の性能を持つ汎用動画カメラである。解像度は 800×600 とし、これを 40×30 の格子状に分割し、そのブロックをセグメントとして扱った。各セグメントの輝度値は、セグメント内の全ピクセルの輝度値の平均とする。

カメラで撮影し、得られたセグメントの 1 例を図 5.22a で示す。遮蔽物によっていくつか影ができていることが確認できる。各セグメントで 100 回測位を行って得られた平均誤差が図 5.22c で示されている。セグメントによっては 3.5m 以上の測位誤差になった一方で、右上のセグメントに関しては誤差 0.5m 未満と、影のない環境で測位した結果と同程度の性能が得られた。セグメントから手動で見積もった、影のない領域は図 5.22b で示されている。これはまさに、測位が正しく行えている領域と一致しており、画像内から何らかの手法で影のない領域を検出することで、遮蔽物のある環境にも対応できる可能性を示している。

その他の遮蔽物を設置した地点での測位結果についても示す。カメラの二次元座標 (x, y) はそれぞれ、 $x = 0.0, 2.0, 4.0, y = 0.0, 2.0, 4.0$ の全ての組み合わせで 9 箇所、である。それぞれの箇所で得られた各セグメント平均測位誤差を図 5.23 で示す。いずれの場合においても、影のあるセグメントでは測位困難で、影のないセグメントでは平均誤差 0.5m 以下を達成した。

5.4 6 自由度推定性能の評価

スマートフォンの 6 自由度を推定し、その性能を評価した。

5.4.1 6 自由度推定に用いる撮影点数の決定

スマートフォンの解像度は 1920×1080 とし、その主点位置は $(u_c, v_c) = (524.86, 959.07)$ だった。 P_{F_i} は画像内より 9 点選択され、その配置 p は図 5.24 で示されるように $(u_j, v_k) = (300j + 200 - u_c, 300k + 200 - v_c)$ ($0 \leq i < 3, 0 \leq j < 3$) とした。各 P_F の位置を 100 回ずつリアルタイムで推定した結果を図に示す。 P_{F_i} の組み合わせ毎に、推定された方位角 θ_z の精度を評価した。 P_{F_i} の総数は 9 個なので、この中から複数の点を選択する組み合わせの総数は 502 個である。この評価はオフラインで

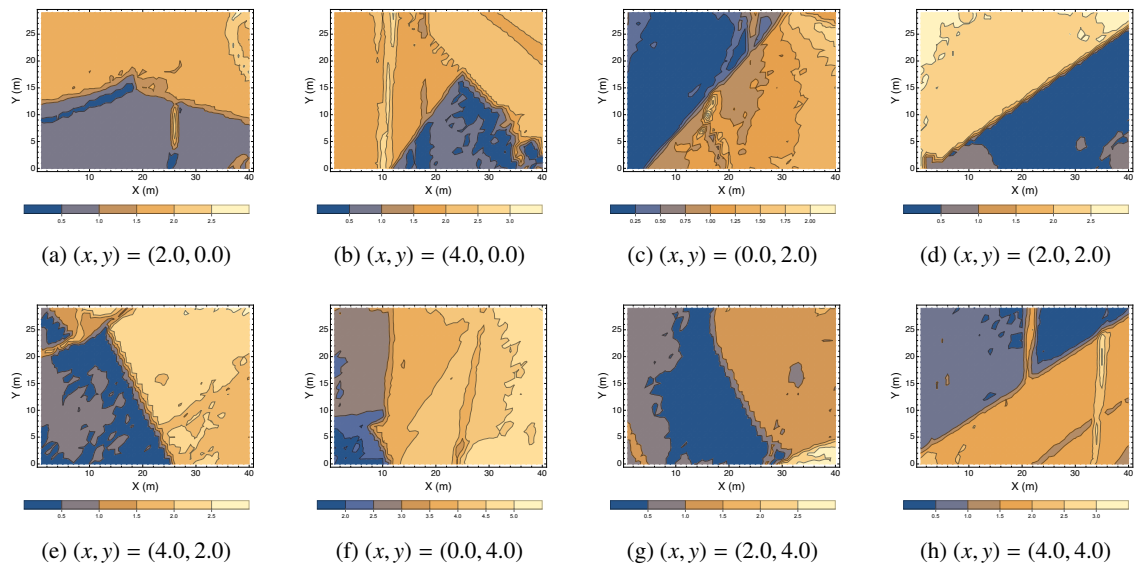


図 5.23 8箇所における各セグメントの平均測位誤差

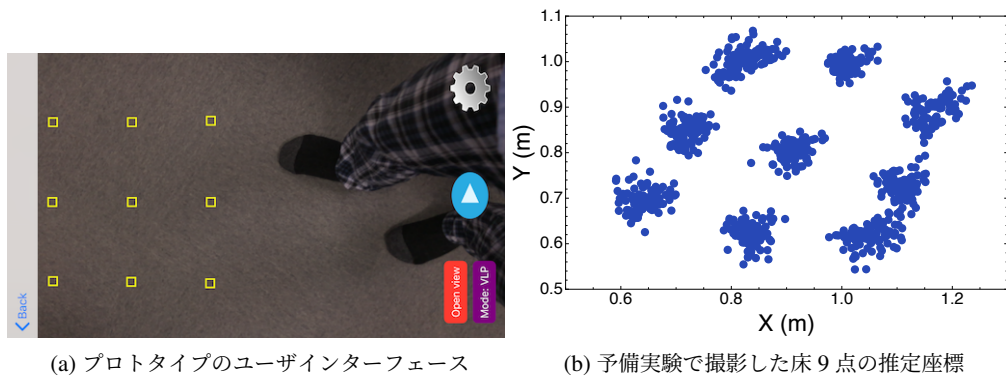


図 5.24 床面9点を撮影する様子

処理した。 θ_z の計算に用いた P_{F_i} の総数ごとの絶対中央値誤差の推定値を図に示す。使用する P_{F_i} の数が2つの場合、どの P_{F_i} を選択するかで、推定誤差が大きく異なった。

90パーセンタイルの絶対誤差は最も最低値は 6.15° 、最高値は 27.09° であった。ベースラインの長さが長い場合、例えば、 (u_{l_0}, v_{l_0}) , (u_{l_2}, v_{l_2}) では、精度が向上した。逆に、ベースラインの長さが短い場合、例えば、 (u_{l_1}, v_{l_2}) や (u_{l_2}, v_{l_2}) の結果は不正確であった。 P_{F_i} の数が増えると、組み合わせの差（標準偏差）が減少した。 P_{F_i} の数を8個にした場合、推定誤差はいずれも類似しており、最高の90パーセンタイル絶対誤差は 3.25° 、最悪の90パーセンタイル絶対誤差は 5.77° であった。次節では、 P_{F_i} で捕捉された全ての位置を使用した場合について検討する。

5.4.2 6自由度の推定性能

得られた9つの P_{F_i} を用い、スマートフォン6自由度を推定した。その結果を図 5.25 に示す。推定されたスマートフォンの3次元座標位置 (x, y, z) を図 5.25b に示す。このように、 x 、 y 、 z 座標の

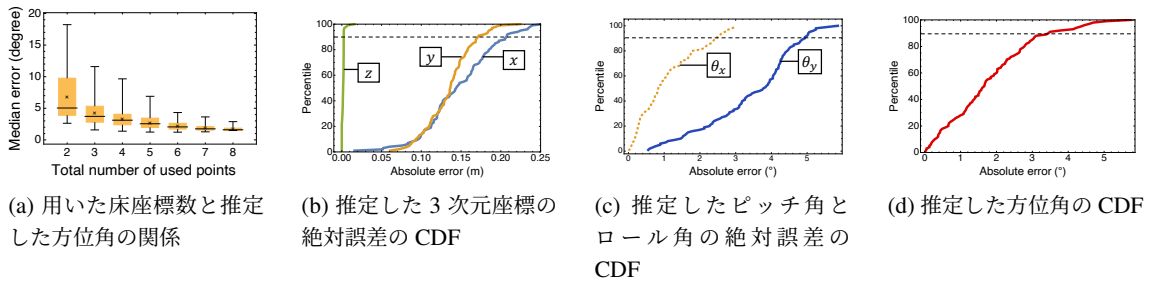


図 5.25 スマートフォン 6 自由度の推定結果

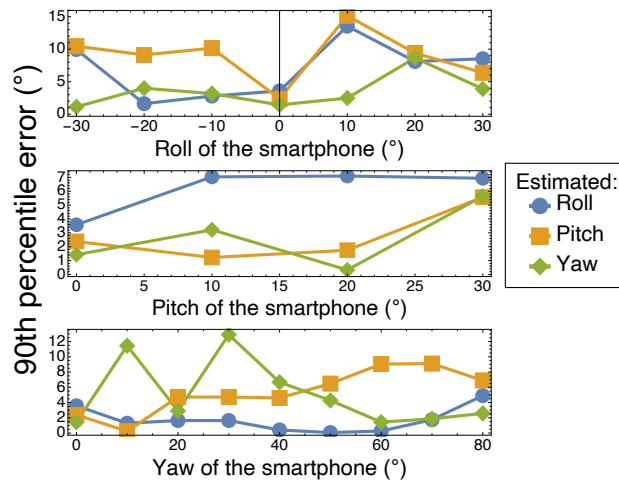


図 5.26 スマートフォンの各姿勢における各推定角度の 90 パーセントイル誤差

90 パーセントイルの絶対誤差は 0.2073m、0.1713m、0.002464m となっており、3 次元定位の絶対誤差は 0.27m 以下となっている。x と y は z よりも敏感である。推定された姿勢 (θ_x, θ_y) を図 5.25c に示す。90 パーセントイルの推定姿勢誤差はピッチ角とロール角については、2.47° 以下、4.93° 以下であった。方位 θ_z の累積分布関数は、90 パーセントイルの絶対誤差が 3.45° 以下であることを示している。また、スマートフォンのピッチやロールは、慣性計測ユニット (IMU) を用いて正確に求めることができる。しかし、部屋の中では磁場が不安定であるため、IMU を用いて方位を推定することは困難である。今回の結果から、RefRec はより多くのモバイルアプリケーションに応用できる可能性を秘めていることがわかる。

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 -30° から 30° 、 0° から 30° 、 0° から 90° 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 パーセントイル誤差を図 5.26 で示す。各角度の 90 パーセントイル誤差の平均は、ピッチ、ロール、ヨーでそれぞれ 5.78° 、 5.69° 、 3.96° であった。

第 6 章

考察

提案手法では、床面反射光と送受信機間の距離の関係をモデル化することにより、直接光源を撮影する従来手法の制約を回避しつつ、スマートフォンの 6 自由度が推定可能であることを示した。具体的に実験結果及び実用化のための課題について考察し今後の展望を議論する。

6.1 測距誤差の要因とその影響

5.2 節では、提案手法の性能に直結する測位に関して、様々な要因を変化させ、その影響を調査した。得られた実験結果を参照して、提案手法の有効性と制約、そして性能改善の可能性について議論する。

6.1.1 カメラ行列及びレンズ歪み

提案手法では、事前にカメラ行列を取得する必要がある。また、カメラはレンズの公差によって理想的な平面から歪んだ画像が取得される。これは事前計測でカメラ行列を得ることによってキャリブレーションすることができる。しかしユーザがそれぞれ端末をキャリブレーションすることはオーバーヘッドの増加につながるため、避けることが好ましい。まず今回の実験で得たカメラ行列を別の iPhone7 で同様の手順にて得たカメラ行列と比較する。

$$M = \begin{bmatrix} 1560.01 & 0 & 936.18 \\ 0 & 1558.77 & 512.34 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.1)$$

これは今回使用した iPhone7 のカメラ行列とほとんど一致しており、測位誤差にしてミリ単位に相当する。カメラ行列に発生する公差について Apple 社は公表していないが、被写体を撮影するというカメラ本来の機能を考えると、他の端末においても数 cm ないし数 m の測位誤差になるような公差があるとは考えにくい。よって、同機種スマートフォンに対しては、標準的なカメラ行列を事前に測定し、適用することでユーザの負担を避けることができると考えられる。

また、この手順において歪み行列も推定された。レンズ歪みは次のように表現する [103].

$$\begin{bmatrix} u'' \\ v'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u' \left(1 + k_1(u'^2 + v'^2) + k_2(u'^2 + v'^2)^2 \right) f s_u + u_O \\ v' \left(1 + k_1(u'^2 + v'^2) + k_2(u'^2 + v'^2)^2 \right) f s_v + v_O \end{bmatrix}. \quad (6.2)$$

ここで、 $u' = u/f_s u$, $v' = v/f_s v$ である。これによって、本来得るべき座標 (u, v) は (u'', v'') に移動する。2台の iPhone7 を測定した結果、歪み係数 k_1, k_2 はそれぞれ、 $(0.214, -0.874)$, $(0.219, -0.727)$ であった。これは、撮影した画像がタル型に歪むことを意味し、同機種全般で同じ傾向が見られると予測される。しかし、これにより算出される歪みピクセル数は 10 未満であり、後述の理由により測位誤差にほとんど影響がないことがわかる。このことから、提案手法の実験ではレンズ歪みに対する補正は行っていない。

6.1.2 カメラパラメータによる影響

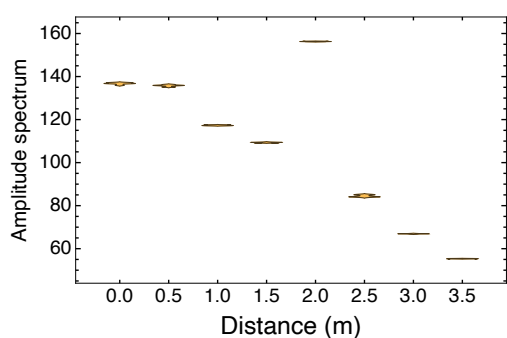
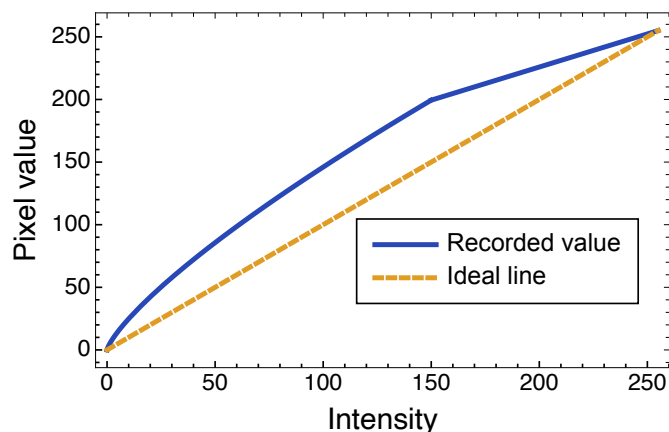
5.2.2 節では、カメラパラメータである SS と ISO を変化させ、測距性能の変化を調査した。用いたカメラの SS は 0.1ms から 16.67ms の範囲で設定されており、これは、ローリングシャッタ効果を利用して直接光源を撮影する先行研究 [24, 7] よりも遥かに大きい値であることがわかる。先行研究において SS を非常に小さい値としているのはローリングシャッタ効果により画像内に出現するストライプパターンをより強調するためで、そのように極端に短い SS を設定した場合、撮像素子としての昨日は損なわれ、通常インカメラに想定されている用途での使用は難しい。一方提案手法で設定した SS では、通常の被写体を撮影するカメラとしての機能が十分確保されている。逆に、提案手法のように SS を極端に短い値とした場合、図 5.6a に示されるように信号の受信が困難になると考えられる。また、今回の評価実験ではホワイトバランスを固定とした。ホワイトバランスを変更すると、取得される RGB 値が変化し、撮影画像の色味が変化する。提案手法では RGB-HLS 変換によって取得した輝度値にて解析を行っているため、ホワイトバランスの動的な変更は測位結果に大きな影響を及ぼすと考えられる。しかし実際のカメラとしての機能を確保したい場合、ホワイトバランスの動的な変更も重要な機能の 1 つであるため、この変更に対する逆変換なども今後サポートすべき課題として残っている。

6.1.3 床面の材質

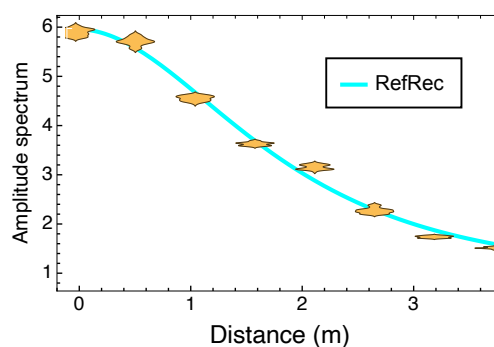
5.2.3 節にて、床の材質の違いによる測距性能の変化を調査した。図 5.11 より、白色のマットが最も良い結果を示すことが分かる。また、床面の反射率が高いほど鏡面反射の影響を受け、床面の反射率が低いほど受信する信号強度が弱くなり、SN が悪くなるため、測距性能が悪くなっていると考えられる。

6.1.4 環境光

5.2.4 節にて、環境光の違いによる測距性能への影響を調査した。測距実験において、各計測点における振幅、及びそれによる推定距離に cm 単位の系統誤差が観測された。これはカメラをマウントした三脚を手で設置したために生じた誤差であると推測する。また、距離 d_0 が増加するほど、分散が大きくなった。特に蛍光灯のある夜間における測距では、図 5.14c で示されるように $d_0 = 3.5$ の時に標準偏差は最大となり、0.357cm であった。これは、距離が光源から遠くなるほどに受信する信号強度が弱くなり、SN 比が悪化するためであると考えられる。また、同様の理由から、蛍光灯のように、周波数を含む環境光はない状態が望ましいと言える。直射日光を含む環境下では、図 5.13a のよ



(a) 図 5.13a における直流分



(b) 直流分を考慮して図 5.13a を補正したもの

図 6.1 直射日光による直流分を加味して振幅を補正する例

うに、直射日光のある地点において振幅が減衰することが確認された。理論的には、式 (3.2) より、送信信号に太陽光のような直流分が印加されたとしても、周波数成分には影響がない。しかし、観測される輝度値が高くなることによって、カメラの非線形的応答により、振幅が弱く観測されていると考えられる。例として、図 6.1.4 に、カメラの非線形性を示す。横軸が被写体の輝度値、縦軸が、カメラが観測する輝度値を表す。カメラが線形だった場合の理想応答は点線で表され、実線が、実際のカメラの応答例である。カメラには、白飛びを防ぐために、ある地点を超えると被写体の信号を圧縮するよう設計され、その地点の事をニーポイントと呼ぶ。図 6.1.4 では輝度 150 の地点がニーポイントとして設定され、これを超える輝度は圧縮される、すなわち振幅が小さくなる。よって提案手法では、ニーポイントを考慮したカメラパラメータの設定、あるいはこれを逆補正する事でカメラの応答特性を線形にする、といった対策が考えられる。ニーポイントの逆補正として、直流分を活用する例を図 6.1 で示す。図 5.13a の計測をした際に観測された各地点での直流分が図 5.14a で示される。この実験においては、LED を 1 つのみ点灯させたため、直流分も距離に従って減衰している一方で、直射日光が照射された 2.0m の地点で直流分が増大していることがわかる。この直流分の情報を加味して図 5.13a で示した振幅を補正した例を図 6.1b で示す。これは単純に、直流分と振幅の積である。直射日光により直流分が増大し、その反面で振幅が減衰するという特性から、おおよそではあるが直射日光の当たっている箇所の振幅を補正することができる可能性を示唆している。具体的にどのように直射日光のある箇所を補正するかについては、今後の取り組み予定である。

6.1.5 二次反射

5.2.5 節では、二次反射物が測距結果に及ぼす影響について調査した。図 5.15b では、反射体を撮影地点から遠ざけるほど振幅が小さくなることが確認された。これは、反射体による 2 次反射光が床面に重畳することにより、振幅が増幅されるためと考えられる。電波を用いる手法では、数 GHz の変調信号を用いるため、このような経路の差が干渉を生む場合も考えられるが、提案手法における変調信号は高々数 100Hz であり、経路の差による位相差などは無視できるほどに小さい。そのため、2 次反射による重畳では純粹に振幅は増大すると言える。最も反射体が近い場合と遠い場合の差は測距精度にして誤差 1m 未満程度である。しかしこれは極端な例であり、実際の応用例においてターゲットの両隣を白い反射体に挟まれるケースは少ないと考える。仮にそのような例を想定しなければいけない場合、あらかじめユーザに与えるマップ情報に壁面などの反射体の情報も含め、測位結果に近接した反射体がある場合それを加味して測距結果を補正し、再び測位を行う、反復計算をすることによって測距誤差を軽減できると考えている。具体的なその手法に関しては今後提案予定である。

6.1.6 カメラの角度

5.2.6 節では、カメラの撮影角による測距性能への影響を調査した。図 5.16b では、スマートフォンが水平から傾くほどに誤差が増大し、40 度で最大誤差となることを示した。これは図 5.16a で示されるように、反射の法則により、床の反射性質が鏡面に近いほど、 $\theta_i = \theta_r = \pi/2 - \theta_c$ となる時に反射光が強く観測されるためであると考えられる。先行研究では、ユースケースとしてユーザはスマートフォンを水平に持つことを想定している場合が多いが、提案手法においても、スマートフォンは水平保持が推奨される。測距誤差は 70 度未満であった場合 0.1m 未満に抑えられ、この精度であれば十分な測位が可能であると考えられる。そのため提案手法においてはスマートフォンの保持は水平から 30 度のピッチ角までと制限すべきであるが、これはユーザにとって通常のスマートフォンのユースケースの範囲内であり、負担増加にはならないと考えている。逆に、コンピュータビジョンを用いる先行研究の例 [65] ではスマートフォンを垂直に近い角度で保持することを想定している。しかしこれは公共の場で第三者にカメラを向ける場合が想定され、プライバシーの問題に対処する必要がある。そのため、カメラの水平保持も提案手法の 1 つの強みであると考えている。

6.1.7 カメラのフォーカス

5.2.7 節では、カメラのフォーカスの違いによる測距性能を比較した。表 5.2 より、撮影画像はぼかしたほうがやや精度が良い。これは、床面の模様による影響が低減されるためであると考えられる。これらの実験により、床面の材質、模様は測距性能に影響を及ぼすことが確認された。

6.1.8 撮影画像の解像度

5.2.8 節では、カメラの解像度の違いによる測距性能の差を調査した。本来は、提案手法はカメラの主点位置 (u_0, v_0) の解析のみで測位が可能であるが、その周辺のピクセルを含めて撮影し、平均化

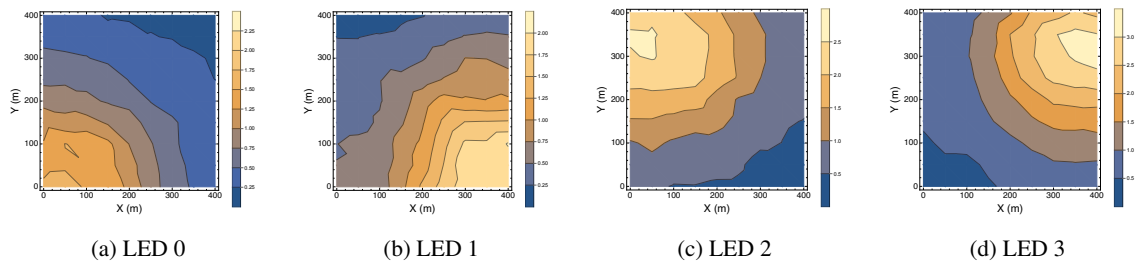


図 6.2 各 LED の振幅のマップ

することによって標準偏差の改善が見られた．周囲のピクセルは本来の座標とは異なる位置を撮影している．今回の実験で設定した最大の解像度は 256×256 で、高さは 1.15 であるため、角のピクセルにおける 2 次元座標の真値との差は x 座標に対して $128/1529.66 = 0.0837\text{m}$ 、 y 座標に対して $128/1533.86 = 0.0835\text{m}$ である．そして、主点位置を中心としていることによりこの差異が無視できるほどに小さく、結果として系統誤差は全ての解像度でほぼ一致したと考えられる．さらに解像度を大きくした場合、周辺のピクセルが主点位置より大きく異なる位置を撮影してしまうため、誤差になることが予測されるが、これ以上大きい解像度の画像は、リアルタイム、すなわち 20 ミリ秒未満で計測不可能であったため検討できなかった．

6.2 測位誤差の要因とその影響

5.3 節では、提案手法の 2 次元測位性能について評価された．図 5.19a で見られた絶対誤差の原因は、三脚の設置誤差及びモデル式と実際の反射光の発光強度の差異であると考えられる．また、4 つの LED の座標を頂点とする四角形の領域外で誤差が大きくなった．そのため、さらに広い領域の測位には、さらに多くの LED を配置し、四角形の領域を増やすことが必要だと考えられる．逆に領域内においては精度が良く、50cm 間隔の測位点が明確に区別できる．また、発生する系統誤差の要因として、LED の不均一性が考えられる．計測領域内で観測された各 LED の振幅が図 6.2 で示される．LED が理想点光源であれば、各グラフは真円となる．しかし実際には LED の不均一性によりがたつきがあることが確認できる．また、実験で用いた LED は同じ型番であるが、各 LED の個体差により、パワーに差があることが見て取れる．これにより、測位に系統誤差が発生していると考えられる．先行研究の iLAMP[104] では、この不均一性をカメラで事前に撮影する事で、フィンガープリントとして測位を可能にしている．しかし、これら不均一性を事前に 1 つ 1 つ計測することは設置者にとって大きな負担となるため、提案手法ではこれを事前に計測することによる補正は想定しない．そのため、提案手法での測位精度改善には LED 不均一性による限界があると考えられる．

また、光源を変更した場合についても検討した．放射角が 120 度に制限された光源であっても、測位精度は大きく低下しなかった．これは要因として、測位領域が制限された放射角内にあること、放射角内の放射特性はあくまでランバート係数が 1 に近い理想的なものに近いこと、が考えられる．この光源は幅が $19\text{cm} \times 14.5\text{cm}$ の大きさであり、やや面光源に近い形状になっているが、天井高 2.6m と比較して小さな値であるため影響が少なかったと考えられる．

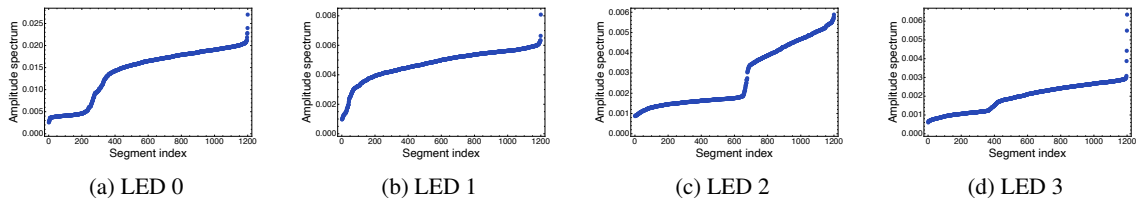


図 6.3 振幅ごとにソートされたセグメント $|B_m^k|$

6.3 影による測位誤差への対処

5.3.2 節では、撮影領域に影を含む場合について検討し、障害物による影が測位に悪影響を及ぼすことを明らかにした。図 5.21 においては、図中右側で特に誤差が大きくなった。これは、スマートフォンを保持している体の向きが図中における左であるため、右の LED、すなわち LED 2 及び LED 3 付近では、それらの信号が遮断され、影を撮影してしまうことが誤差の要因と考えられる。図 5.23 においても、影のある領域では測位困難で、影のない領域では理想環境に近い測位精度が達成できることが確認された。そこでそこで、影のない領域を画像内から抽出し、測位する手法について考察する。影のある領域で測位が困難になるのは、光の遮蔽によって床面で反射する信号が理想よりも著しく減衰するためである。すなわち、各セグメントの振幅の微分によって、影を抽出できると推察できる。その 1 例を示す。まず、セグメントごとに計算された LED k の振幅を $|B_{uv}^k|$ とする。この時の (u, v) はセグメントの重心を表すピクセル座標と考えても良い。これを、振幅値の降順でソートし、その配列を $|B_m^k|$ とする (m は $0 \leq m$ のインデックス)。具体的に、5.3.2 の実験にて、 $(x, y) = (0, 0)$ の地点で撮影したセグメントについて $|B_m^k|$ を図 6.3 に示す。LOS が確保できている面と影になっている面で、振幅に大きな差があり、段差となっていることがわかる。

これを、2 階の微分フィルタ

$$D(B_m^k) = |B_m^k| - 2|B_{m-1}^k| + |B_{m-2}^k| \quad (6.3)$$

によって差分を計算する。この時 m は $2 \leq m$ である。任意のスージング係数 α で平滑化する。

$$F(B_n^k) = \sum_{m=n+2}^{\alpha+n+2} D(B_m^k). \quad (6.4)$$

図 6.3 に対する $F(B_n^k)$ を図 6.4 のグラフで示す。各 LED の振幅に対し、段差の箇所をエッジとして検出している。そして、得られた配列 $F(B_n^k)$ に対し、LOS が確保できている領域 $n_{\min} \leq m \leq n_{\max}$ のみを抽出する。これは、閾値 J に対して、 $F(B_n^k) < J$ を満たす最大の $n = n_{\max}$ 、及び $F(B_n^k) < J$ かつ $F(B_{n-1}^k) > J$ を満たす最大の $n = n_{\min}$ によって決定される。 J を $F(B_n^k)$ の平均値とした場合の例が図 6.4 の直線で示されている。この例においては、この直線よりも低い位置、かつ最も右に存在する領域を LOS 信号とみなす。

各 LED において LOS 信号と判別されたセグメントを図 6.5 の単色領域で示す。各 LED は 4 方に配置されているため、それぞれ異なる向きに影が形成されているが、遮蔽物による影のエッジのようなものが見て取れる。

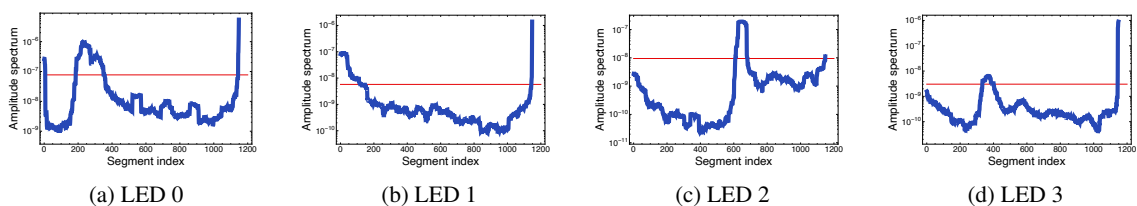


図 6.4 2 階微分し、スムージング処理をしたセグメント

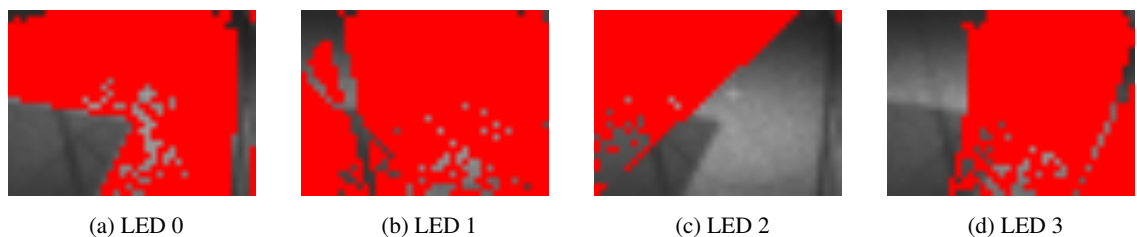


図 6.5 各 LED の抽出された LOS 領域

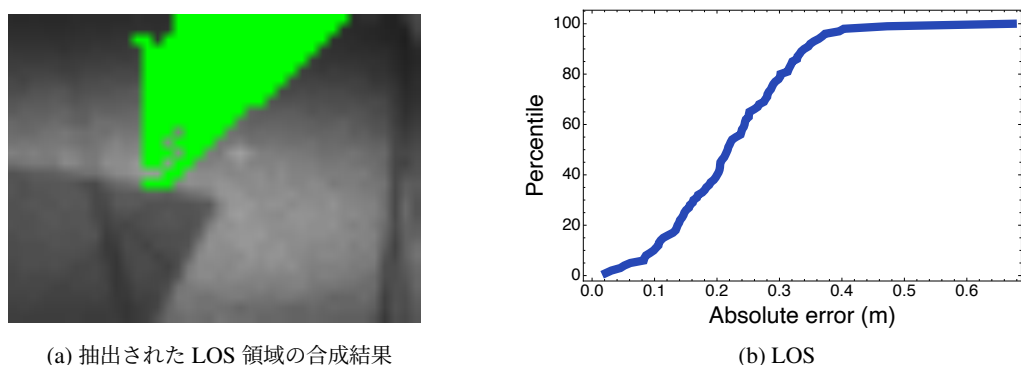


図 6.6 LOS を用いた測位

これら 4 つの領域の積集合となるセグメントを図 6.6a の単色領域で示す。すなわちこれは全ての LED が遮蔽されていない領域と解釈することができる。実際、この領域は図 5.22b で示した、手動で抽出した LOS 領域、及び図 5.22c で示した測位誤差の小さい領域と一致している。抽出した領域内における 2 次元測位誤差の CDF が図 6.6b で示されている。90 パーセンタイル誤差は 0.334m、平均誤差は 0.224m であった。これは、障害物のない測位実験と同等の性能である。このように、LOS 領域を抽出するアルゴリズムにより、遮蔽物のある実環境においても、高精度測位のポテンシャルが考えられる。

他に 5.3.2 節の実験にて示した 8 箇所を取得したセグメントでも同様に LOS 領域を抽出し、測位した。そして、得られた測位誤差の CDF を図 6.7 で示す。(0.0, 2.0) では 90 パーセンタイル誤差は 0.255m、平均誤差は 0.143m、(0.0, 4.0) では 90 パーセンタイル誤差は 0.479m、平均誤差は 0.357m、(2.0, 0.0) では 90 パーセンタイル誤差は 0.871m、平均誤差は 0.738m、(2.0, 2.0) では 90 パーセンタイル誤差は 0.437m、平均誤差は 0.299m、(2.0, 4.0) では 90 パーセンタイル誤差は 0.629m、平均誤差は 0.478m、(4.0, 0.0) では 90 パーセンタイル誤差は 2.33m、平均誤差は 2.25m、(4.0, 2.0) では 90 パー

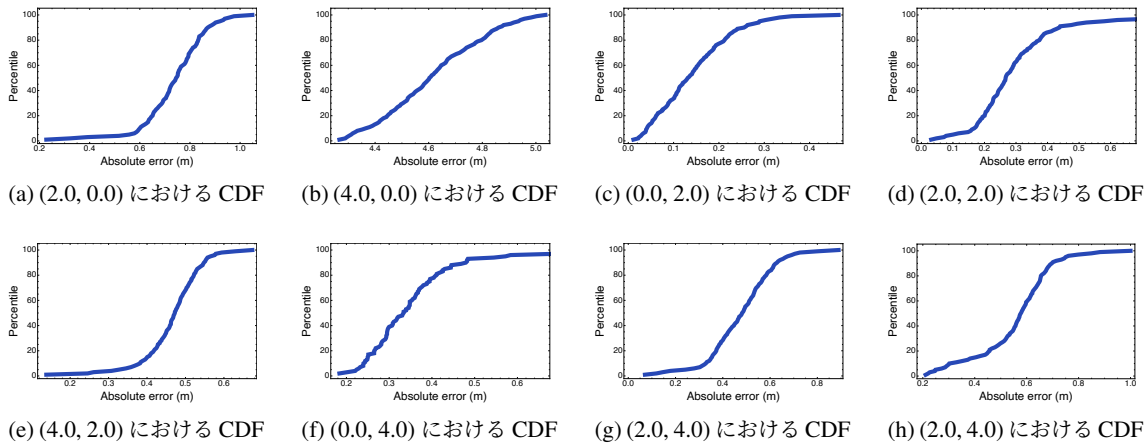


図 6.7 各 LED の抽出された LOS 領域における CDF

センタイル誤差は 0.548m, 平均誤差は 0.467m, (4.0, 4.0) では 90 パーセンタイル誤差は 0.697m, 平均誤差は 0.558m, であった. (4.0, 0.0) の地点においてのみ著しく誤差が発生した. これは, 撮影画像に壁面が含まれており, 影抽出のアルゴリズムが壁面を抽出してしまったためである. ゆえに今後の課題として, 床面以外の物体が画像内に写った場合における領域抽出も考慮する必要がある.

6.3.1 先行研究との比較

先行研究との比較を表 6.1, 6.2 で示す. 提案手法で使用するカメラ画像のピクセル数は既存手法の 1/4 から 1/10000 であるが, 測位範囲は Rajagopal ら [7] の手法を除き最大である. 測位誤差は, 数値的に計算可能な手法中では最大だが, 90 パーセンタイル誤差 0.42m 未満の精度は, 序論で述べた, 本研究が満たすべき条件である測位誤差 1 メートル以内である. また, 本研究の目的である, 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 (Performance Index: PI) を提案した [13]. 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い, すなわち良い値であることがわかる. 中澤らの手法 [92] と比較すると PI はやや高い値になっている. しかし, 中澤らの手法では両面カメラ使用しており, これはスマートフォンでサポートされていない点, 解像度が本研究の約 2300 倍と大きく, 計算コストがかかる点が短所として挙げられる.

6.3.2 提案手法の制限

測位実験では, スマートフォンの角度を水平に設定したため, 床座標 P_F とスマートフォン座標は等しいと仮定した. しかし, 実際にはユーザがスマートフォンを傾けて保持することも考えられる. その場合, P_F とスマートフォンの二次元座標は一致しない. そこでスマートフォンの姿勢を内部センサーにより推定 [100] することで, 水平以外の状態における誤差を軽減できると考えられる. 具体的手法の提案は, 今後の予定である.

本稿の実験では, 人や物などの障害物がない状態で実施された. 本手法は床面反射光のモデルを使用し, そのパラメータ σ は床の材質, C_L^k は LED の輝度に依存するため, 実際の利用においては本

表 6.1 カメラを用いた可視光測位手法の比較 1

	Rajagopal[7]	中澤 [92]	提案手法
90 パーセントイル誤差	N/A	~0.1m	~0.42m
要素技術	パケット受信率	鏡像モデル	信号受信強度
測位範囲	3.9m×8.0m	1.0m×2.4m	4.0m×4.0m
PI	N/A	0.025	0.0675
カメラの向き	床	光源と床	床
カメラの加工	不要	不要	不要
ローリングシャッタ効果	必要	必要	不要
LED の数	4	2	4
ピクセル数	1280×720	3280×2460 1472×1104	64×64

表 6.2 カメラを用いた可視光測位手法の比較 2

	Luxapose[24]	PIXEL[89]
90 パーセントイル誤差	~0.1m	~0.3m
要素技術	到来角推定	偏光
測位範囲	1.0m×1.0m	2.4m×1.8m
PI	0.96	0.56
カメラの向き	光源	光源
カメラの加工	不要	必要
ローリングシャッタ効果	必要	不要
LED の数	5	8
ピクセル数	7712×5360	120×160

稿の計測実験で述べた手法を用いてこれらの値を事前に取得する必要がある。本モデルでは均一な材質の床，単一の型番の LED を想定しており，1つの計測エリアに異なる材質の床や LED が混ざり合う環境への対応は今後の取り組み予定である。

6.4 電力消費

スマートフォンのカメラは，およそ 300mW の電力を消費する [105] ため，カメラを起動し続けると端末に負荷がかかる。提案手法では，既存手法よりも低解像度である 64 × 64 ピクセルの画像で測位ができる。そのため，市場での展開が今後期待される読み出し範囲制限可能なイメージセンサにより，提案手法で用いるカメラの電力消費の大幅な低減が期待される。

6.5 デバイスの製造コスト

LED 変調光生成のため、本実験ではファンクションジェネレータを用いて直流電源をスイッチングし、パルスによって信号を表現した。パルス制御することで、調光機能を実現する LED はすでに普及しており、本手法に用いる送信機も、調光機能つき LED と同程度のコストで製造可能であると考えている。

第 7 章

結論

スマートフォンカメラと LED 変調光を用いた屋内位置認識手法を提案した。

第 1 章では序論として、本研究の背景と貢献を述べた。屋内位置認識に注目した背景として、近年のスマートフォン普及に伴う屋内位置認識技術の需要増加と、その具体的な内容を述べ、標準的な測位技術が確立されていないことを説明した。そして、既存のアプローチを列挙し、中でも可視光測位技術に注目するメリットとしてインフラ整備の容易性と精度の良さを挙げた。しかし可視光測位の先行研究で高速で動作する PD を用いた手法ではスマートフォン上の実装が困難であり、カメラを用いた手法では光源を直接撮影しているために測位困難になる場合があることに言及し、この問題を解決するために、新たな手法として床面反射光を撮影し、測位するシステムに着想したことを説明した。提案手法とそのプロトタイプを用いた実験結果について概要を述べ、本研究の貢献を要約した。

第 2 章では、本研究の詳細な位置付けと、意義を説明するために屋内測位に関する先行研究について述べた。既存の測位手法として電波、音波、赤外線、可視光などの信号を送受信機でやり取りするアクティブな手法と、地磁気やオブジェクトをカメラで撮影することによるパッシブな手法を挙げた。信号を用いる手法ではターゲットの位置を計算する方法が ToF, AoA, RSS の 3 種類に大別され、具体的な先行研究の事例とその測位精度や制約について述べた。各手法の大まかな傾向を比較し、可視光測位の特徴を述べた。そして、可視光測位に関して PD を用いる手法とカメラを用いる手法について大別し、PD はスマートフォン上に実装困難であること、カメラを用いる手法はリアルタイム性や照明配置により測位困難になる場合があることについて強調した。そして反射光を用いる本研究と比較し位置付けを説明した。

第 3 章では提案手法の理論を説明した。床面反射光をランバートモデルとし、送信信号とカメラで撮影した画像の式を用いて、LED からの距離による減衰モデル式 (3.13) 及び条件付き近似式 (3.22) を導出した。そして、計算した複数の 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説明した。最後に、画像内から撮影した床座標を複数用いて、AoA 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。

第 4 章では、RefRec と呼称する提案手法のプロトタイプ実装について言及した。自作の回路による LED ビーコンを送信機とし、送信信号は PDM によって変調されること、受信機は iOS 搭載のスマートフォンを用い、実装のフレームワークと、取得する画素数の決定について説明した。

第 5 章では、プロトタイプを用いた計測実験について説明した。実験ではまず、提案モデルによる

測距性能について調査した。カメラのパラメータを変更しながら測距をした結果、画像が白飛びや黒つぶれしないような適切なダイナミックレンジになるように SS や ISO を設定する必要があることを明らかにした。また、カメラはこれらのパラメータに対し非線形的な応答特性を持っていることを確認した。この実験により求めた適切なカメラパラメータにより、様々な床材による測距性能の違いについて調査した。調査の結果、光が正しく反射しない人工芝のような材質では中央測距誤差 0.466m となったが、それ以外の平坦な床材では、中央誤差 0.2 未満で測距可能であることを示した。またその中でも、反射率の低い黒色や、反射率の高い光沢のある床材の誤差が大きくなる傾向を明らかにした。また、カメラの角度による誤差の増大や、フォーカスの影響、そして解像度と測距性能のトレードオフを示した。続いて、撮影した床の二次元座標推定精度を調査し、90 パーセントイル誤差 0.42m であること、撮影領域に影を含むと 1m 以上の誤差が生じることを明らかにした。最後に、スマートフォンの 6 自由度推定実験に取り組んだ。9 つの撮影点による AoA で 6 自由度を推定し、(x,y,z) 座標について 90 パーセントイルの絶対誤差は 0.2073m、0.1713m、0.002464m、ピッチ、ロール、ヨー角についてそれぞれ 5.78°、5.69°、3.96° であった。

第 6 章では第 5 章の計測実験にて生じた誤差の要因について考察し、PI が 0.0675 と算出され、先行研究と比較して非常に良好な値であることを述べた。また、カメラの撮影角度によって反射光の強度が強まることを明らかにした。提案手法の制限として、異なる材質の床や LED が混ざり合う環境では、提案手法が適用できないこと、影によって信号が遮断された場合、大きな測位誤差になることを述べた。

謝辞

本研究の遂行にあたり、北海道大学 大学院情報科学院 情報理工学コース 数理科学分野 知能情報学研究室 教授 杉本雅則先生から、終始、直接のご指導、並びに十二分な実験環境の貸与や、様々なご支援をいただいた。ここに感謝の意を表す。

同専攻教授 工藤峰一先生、同専攻教授 今井英幸先生、同専攻教授 田中章先生には、学位論文審査をはじめとした様々な機会において研究へのご助言をいただいた。ここに感謝の意を表す。

国立情報学研究所 アーキテクチャ科学研究系教授 橋爪宏達先生には、終始多大なるご鞭撻をいただいた。ここに感謝の意を表す。

北海道大学 大学院情報科学院 情報理工学コース 数理科学分野 情報数理学研究室 助教 中村将成先生には、学位論文執筆や研究内容について懇意にご教示いただいた。ここに感謝の意を表す。

北海道大学 大学院情報科学院 情報理工学コース 数理科学分野 知能情報学研究室 助教 渡邊拓貴先生、同研究室 新浜円氏には、研究遂行にあたって日頃からご支援をいただいた。ここに感謝の意を表す。

同研究室 村上弘晃氏とは、研究室配属から今日まで、研究生活において互いに議論、協力しあえ、学位論文の執筆に至ることができた。ここに深謝の意を表す。

また、家族からは経済的、精神的に多大なる応援をいただいた。ここに深謝の意を表す。

本研究の1部は、北海道大学国際連携研究教育局ビッグデータ・サイバーセキュリティグローバルステーションによる支援、並びに公益財団法人立石科学技術振興財団 研究助成 (C) による支援を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Research and Markets Ltd, “Indoor location market by component (hardware, solutions, and services), deployment mode, organization size, technology, application, vertical (retail, transportation and logistics, entertainment), and region - global forecast to 2025,” <https://www.researchandmarkets.com/reports/5026936/>. 参照 may 2020.
- [2] J. Xiao, Z. Zhou, Y. Yi, and L.M. Ni, “A survey on wireless indoor localization from the device perspective,” *ACM Computing Surveys*, vol.49, no.2, pp.1–31, 2016. DOI: 10.1145/2933232.
- [3] T. Li, Q. Liu, and X. Zhou, “Practical human sensing in the light,” *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp.71–84, 2016. DOI: 10.1145/2906388.2906401.
- [4] T. Li, C. An, Z. Tian, A.T. Campbell, and X. Zhou, “Human sensing using visible light communication,” *Proceedings of the 21st Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.331–344, 2015. DOI: 10.1145/2789168.2790110.
- [5] D. Konings, B. Parr, F. Alam, and E.M.-K. Lai, “Falcon: Fused application of light based positioning coupled with onboard network localization,” *IEEE Access*, vol.6, pp.36155–36167, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2847314.
- [6] P. Davidson and R. Piché, “A survey of selected indoor positioning methods for smart-phones,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.19, no.2, pp.1347–1370, 2016. DOI: 10.1109/COMST.2016.2637663.
- [7] N. Rajagopal, P. Lazik, and A. Rowe, “Visual light landmarks for mobile devices,” *Proceedings of the 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, pp.249–260, 2014. DOI: 10.1109/IPSNS.2014.6846757.
- [8] Y. Agarwal, B. Balaji, R. Gupta, J. Lyles, M. Wei, and T. Weng, “Occupancy-driven energy management for smart building automation,” *Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Building*, pp.1–6, 2010. DOI: 10.1145/1878431.1878433.
- [9] K. Yatani, K. Tamura, K. Hiroki, M. Sugimoto, and H. Hashizume, “Toss-it: Intuitive information transfer techniques for mobile devices using toss and swing actions,” *IEICE transactions on information and systems*, vol.89, no.1, pp.150–157, 2006. DOI: 10.1093/ietisy/e89-d.1.150.
- [10] F. Jann, S. Reinhold, and M. Teistler, “Nutzung eines smartphones als virtuelle sonde im medizinischen ultraschalltraining: Six-degrees-of-freedom-tracking mittels arcove,” 2019.

- [11] M.D. Rodriguez, J. Favela, E.A. Martínez, and M.A. Muñoz, “Location-aware access to hospital information and services,” *IEEE Trans. Information Technology in Biomedicine*, vol.8, no.4, pp.448–455, 2004. DOI: 10.1109/TITB.2004.837887.
- [12] X. Liu, H. Makino, S. Kobayashi, and Y. Maeda, “Design of an indoor self-positioning system for the visually impaired-simulation with rfid and bluetooth in a visible light communication system,” 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp.1655–1658, 2007. DOI: 10.1109/IEMBS.2007.4352625.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 国土交通省, “平成 30 年度 第 2 回「高精度測位社会プロジェクト検討会」(平成 31 年 3 月 5 日開催),” https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk1_000109.html. 参照 Dec 2020.
- [16] 国土交通省, “国土交通省総合技術開発プロジェクト「3次元地理空間情報を活用した安全・安心・快適な社会実現のための技術開発」,” <https://www.gsi.go.jp/chirijoho/chirijoho40073.html>. 参照 Dec 2020.
- [17] 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.
- [18] 中川正雄, “ユビキタス可視光通信,” *電子情報通信学会論文誌 B*, vol.88, no.2, pp.351–359, 2005.
- [19] 春山真一郎, “可視光通信,” *電子情報通信学会論文誌 A*, vol.86, no.12, pp.1284–1291, 2003.
- [20] J. Luo, L. Fan, and H. Li, “Indoor positioning systems based on visible light communication: State of the art,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.19, no.4, pp.2871–2893, 2017. DOI: 10.1109/COMST.2017.2743228.
- [21] L. Li, P. Hu, C. Peng, G. Shen, and F. Zhao, “Epsilon: A visible light based positioning system,” 11th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation, pp.331–343, 2014. DOI: 10.5555/2616448.2616479.
- [22] Z. Wang, Z. Yang, Q. Huang, L. Yang, and Q. Zhang, “Als-p: Light weight visible light positioning via ambient light sensor,” 2019-IEEE Conference on Computer Communications, pp.1306–1314, 2019. DOI: 10.1109/INFOCOM.2019.8737575.
- [23] L. Yang, Z. Wang, W. Wang, and Q. Zhang, “Naloc: Nonlinear ambient-light-sensor-based localization system,” *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, vol.2, no.4, pp.1–22, 2018. DOI: 10.1145/3287077.
- [24] 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.

- [25] L. Mainetti, L. Patrono, and I. Sergi, “A survey on indoor positioning systems,” 2014 22nd international conference on software, telecommunications and computer networks (SoftCOM)IEEE, pp.111–120 2014. DOI: 10.1109/SOFTCOM.2014.7039067.
- [26] D. Pai, I. Sasi, P.S. Mantripragada, M. Malpani, and N. Aggarwal, “Padati: A robust pedestrian dead reckoning system on smartphones,” 2012 IEEE 11th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and CommunicationsIEEE, pp.2000–2007 2012. DOI: 10.1109/TrustCom.2012.218.
- [27] W. Kang and Y. Han, “Smartpdr: Smartphone-based pedestrian dead reckoning for indoor localization,” IEEE Sensors journal, vol.15, no.5, pp.2906–2916, 2014. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2382568.
- [28] A.R. Pratama, R. Hidayat, et al., “Smartphone-based pedestrian dead reckoning as an indoor positioning system,” 2012 International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)IEEE, pp.1–6 2012. DOI: 10.1109/ICSEngT.2012.6339316.
- [29] Y. Wu, H.-B. Zhu, Q.-X. Du, and S.-M. Tang, “A survey of the research status of pedestrian dead reckoning systems based on inertial sensors,” International Journal of Automation and Computing, vol.16, no.1, pp.65–83, 2019. DOI: 10.1007/s11633-018-1150-y.
- [30] R.F. Brena, J.P. García-Vázquez, C.E. Galván-Tejada, D. Muñoz-Rodríguez, C. Vargas-Rosales, and J. Fangmeyer, “Evolution of indoor positioning technologies: A survey,” Journal of Sensors, vol.2017, pp.1–22, 2017. DOI: 10.1155/2017/2630413.
- [31] G. De Angelis, A. Moschitta, and P. Carbone, “Positioning techniques in indoor environments based on stochastic modeling of uwb round-trip-time measurements,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol.17, no.8, pp.2272–2281, 2016. DOI: 10.1109/TITS.2016.2516822.
- [32] W.C. Davidon, “Variance algorithm for minimization,” The Computer Journal, vol.10, no.4, pp.406–410, 1968. DOI: 10.1093/comjnl/10.4.406.
- [33] J. Zhou, K.-K. Chu, and J.-Y. Ng, “Providing location services within a radio cellular network using ellipse propagation model,” 19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA’05) Volume 1 (AINA papers), vol.1IEEE, pp.559–564 2005. DOI: 10.1109/AINA.2005.286.
- [34] F. Dwiyasa and M.-H. Lim, “A survey of problems and approaches in wireless-based indoor positioning,” 2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)IEEE, pp.1–7 2016. DOI: 10.1109/IPIN.2016.7743591.
- [35] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, “Survey of wireless indoor positioning techniques and systems,” IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part C, vol.37, no.6, pp.1067–1080, 2007. DOI: 10.1109/TSMCC.2007.905750.
- [36] 別所正博, 小林真輔, 越塚登, 坂村健, “ユビキタスコンピューティングと屋内環境の位置認識,” 電子情報通信学会誌, vol.92, no.4, pp.249–255, 2009.
- [37] X. Guo, N. Ansari, F. Hu, Y. Shao, N.R. Elikplim, and L. Li, “A survey on fusion-based indoor

- positioning,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.22, no.1, pp.566–594, 2019. DOI: 10.1109/COMST.2019.2951036.
- [38] H. Murakami, M. Nakamura, S. Yamasaki, H. Hashizume, and M. Sugimoto, “Smartphone localization using active-passive acoustic sensing,” *9th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pp.206–212, 2018. DOI: 10.1109/IPIN.2018.8533764.
- [39] R. Mautz and S. Tilch, “Survey of optical indoor positioning systems,” *2nd International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pp.1–7, 2011. DOI: 10.1109/IPIN.2011.6071925.
- [40] X. Bai, M. Huang, N.R. Prasad, and A.D. Mihovska, “A survey of image-based indoor localization using deep learning,” *22nd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications* IEEE, pp.1–6 2019. DOI: 10.1109/WPMC48795.2019.9096144.
- [41] D. Hauschildt and N. Kirchhof, “Advances in thermal infrared localization: Challenges and solutions,” *1st International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pp.1–8, 2010. DOI: 10.1109/IPIN.2010.5647415.
- [42] Y. Zhuang, L. Hua, L. Qi, J. Yang, P. Cao, Y. Cao, Y. Wu, J. Thompson, and H. Haas, “A survey of positioning systems using visible led lights,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.20, no.3, pp.1963–1988, 2018. DOI: 10.1109/COMST.2018.2806558.
- [43] M. Liu, L. Cheng, K. Qian, J. Wang, J. Wang, and Y. Liu, “Indoor acoustic localization: a survey,” *Human-centric Computing and Information Sciences*, vol.10, no.1, p.2, 2020. DOI: 10.1186/s13673-019-0207-4.
- [44] S. Yun, Y.-C. Chen, and L. Qiu, “Turning a mobile device into a mouse in the air,” *Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp.15–29, 2015. DOI: 10.1145/2742647.2742662.
- [45] W. Mao, J. He, and L. Qiu, “Cat: high-precision acoustic motion tracking,” *Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.69–81, 2016. DOI: 10.1145/2973750.2973755.
- [46] 村上弘晃, 中村将成, 橋爪宏達, 杉本雅則他, “鏡像スピーカを用いたスマートフォン高精度3次元測位手法,” *情報処理学会論文誌*, vol.60, no.12, pp.2314–2324, 2019.
- [47] S. He and S.-H.G. Chan, “Wi-fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.18, no.1, pp.466–490, 2015. DOI: 10.1109/COMST.2015.2464084.
- [48] A. Rai, K.K. Chintalapudi, V.N. Padmanabhan, and R. Sen, “Zee: Zero-effort crowdsourcing for indoor localization,” *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp.293–304, 2012. DOI: 10.1145/2348543.2348580.
- [49] K. Chintalapudi, A. Padmanabha Iyer, and V.N. Padmanabhan, “Indoor localization without the pain,” *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, pp.173–184, 2010. DOI: 10.1145/1859995.1860016.
- [50] M. Youssef and A. Agrawala, “The horus wlan location determination system,” *Proceedings of*

- the 3rd international conference on Mobile systems, applications, and services, pp.205–218, 2005. DOI: 10.1145/1067170.1067193.
- [51] J. Xiong and K. Jamieson, “Arraytrack: A fine-grained indoor location system,” Presented as part of the 10th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI 13), pp.71–84, 2013.
- [52] M. Kotaru, K. Joshi, D. Bharadia, and S. Katti, “Spotfi: Decimeter level localization using wifi,” Proceedings of the 2015 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication, pp.269–282, 2015. DOI: 10.1145/2785956.2787487.
- [53] X. Zhao, Z. Xiao, A. Markham, N. Trigoni, and Y. Ren, “Does btle measure up against wifi? a comparison of indoor location performance,” European Wireless 2014; 20th European Wireless ConferenceVDE, pp.1–6 2014.
- [54] R. Ayyalasomayajula, D. Vasisht, and D. Bharadia, “Bloc: Csi-based accurate localization for ble tags,” Proceedings of the 14th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies, pp.126–138, 2018. DOI: 10.1145/3281411.3281428.
- [55] S.-H. Fang, C.-H. Wang, T.-Y. Huang, C.-H. Yang, and Y.-S. Chen, “An enhanced zigbee indoor positioning system with an ensemble approach,” IEEE Communications Letters, vol.16, no.4, pp.564–567, 2012. DOI: 10.1109/LCOMM.2012.022112.120131.
- [56] B. Kempke, P. Pannuto, B. Campbell, and P. Dutta, “Surepoint: Exploiting ultra wideband flooding and diversity to provide robust, scalable, high-fidelity indoor localization,” Proceedings of the 14th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems CD-ROM, pp.137–149, 2016. DOI: 10.1145/2994551.2994570.
- [57] Z. Song, G. Jiang, and C. Huang, “A survey on indoor positioning technologies,” International Conference on Theoretical and Mathematical Foundations of Computer ScienceSpringer, pp.198–206 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-24999-0_28.
- [58] L.M. Ni, Y. Liu, Y.C. Lau, and A.P. Patil, “Landmarc: indoor location sensing using active rfid,” Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2003.(PerCom 2003).IEEE, pp.407–415 2003. DOI: 10.1109/PERCOM.2003.1192765.
- [59] L. Yang, Y. Chen, X.-Y. Li, C. Xiao, M. Li, and Y. Liu, “Tagoram: Real-time tracking of mobile rfid tags to high precision using cots devices,” Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking, pp.237–248, 2014. DOI: 10.1145/2639108.2639111.
- [60] 村田正秋, 瀬川爾朗, 鳥本秀幸, “Imes の技術動向: シームレス三次元測位・航法の新技术,” 電子情報通信学会誌, vol.95, no.2, pp.119–124, 2012.
- [61] 川口貴正, 久保信明, 谷川原誠, 坂本義弘, 菅野重樹, 藤井健二郎, “3. 屋内測位技術 imes 対応スマートフォン事例と imes 高精度測位方式の研究動向,” 写真測量とリモートセンシング, vol.55, no.4, pp.240–244, 2016.
- [62] B. Xie, G. Tan, and T. He, “Spinlight: A high accuracy and robust light positioning system for indoor applications,” Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp.211–223, 2015. DOI: 10.1145/2809695.2809713.

- [63] M. Werner, M. Kessel, and C. Marouane, "Indoor positioning using smartphone camera," 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation IEEE, pp.1–6 2011. DOI: 10.1109/IPIN.2011.6071954.
- [64] A. Mulloni, D. Wagner, I. Barakonyi, and D. Schmalstieg, "Indoor positioning and navigation with camera phones," IEEE Pervasive Computing, vol.8, no.2, pp.22–31, 2009. DOI: 10.1109/MPRV.2009.30.
- [65] J. Dong, M. Noreikis, Y. Xiao, and A. Ylä-Jääski, "Vinav: A vision-based indoor navigation system for smartphones," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol.18, no.6, pp.1461–1475, 2018. DOI: 10.1109/TMC.2018.2857772.
- [66] B. Gozick, K.P. Subbu, R. Dantu, and T. Maeshiro, "Magnetic maps for indoor navigation," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.60, no.12, pp.3883–3891, 2011. DOI: 10.1109/TIM.2011.2147690.
- [67] C.E. Galván-Tejada, J.P. García-Vázquez, and R.F. Brena, "Magnetic field feature extraction and selection for indoor location estimation," Sensors, vol.14, no.6, pp.11001–11015, 2014. DOI: 10.3390/s140611001.
- [68] S. De Lausnay, L. De Strycker, J.-P. Goemaere, B. Nauwelaers, and N. Stevens, "A survey on multiple access visible light positioning," 2016 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech) IEEE, pp.38–42 2016. DOI: 10.1109/EmergiTech.2016.7737307.
- [69] K. Mannay, N. Benhadjyoussef, M. Machhout, and J. Ureña, "Location and positioning systems: Performance and comparison," 2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT) IEEE, pp.1–6 2016. DOI: 10.1109/CEIT.2016.7929105.
- [70] T.Q. Wang, Y.A. Sekercioglu, A. Neild, and J. Armstrong, "Position accuracy of time-of-arrival based ranging using visible light with application in indoor localization systems," Journal of Lightwave Technology, vol.31, no.20, pp.3302–3308, 2013. DOI: 10.1109/JLT.2013.2281592.
- [71] S.-Y. Jung, S. Hann, and C.-S. Park, "Tdoa-based optical wireless indoor localization using led ceiling lamps," IEEE Trans. Consumer Electronics, vol.57, no.4, pp.1592–1597, 2011. DOI: 10.1109/TCE.2011.6131130.
- [72] U. Nadeem, N. Hassan, M. Pasha, and C. Yuen, "Highly accurate 3d wireless indoor positioning system using white led lights," Electronics Letters, vol.50, no.11, pp.828–830, 2014. DOI: 10.1049/el.2014.0353.
- [73] S.-H. Yang, H.-S. Kim, Y.-H. Son, and S.-K. Han, "Three-dimensional visible light indoor localization using aoa and rss with multiple optical receivers," Journal of Lightwave Technology, vol.32, no.14, pp.2480–2485, 2014.
- [74] H. Steendam, T.Q. Wang, and J. Armstrong, "Theoretical lower bound for indoor visible light positioning using received signal strength measurements and an aperture-based receiver," Journal of Lightwave Technology, vol.35, no.2, pp.309–319, Jan. 2017. DOI: 10.1109/JLT.2016.2645603.
- [75] J. Vongkulbhisal, B. Chantaramolee, Y. Zhao, and W.S. Mohammed, "A fingerprinting-based in-

- door localization system using intensity modulation of light emitting diodes,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.54, no.5, pp.1218–1227, 2012. DOI: 10.1002/mop.26763.
- [76] 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.
- [77] Y.-L. Wei, C.-J. Huang, H.-M. Tsai, and K.C.-J. Lin, “Celli: Indoor positioning using polarized sweeping light beams,” *Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp.136–147, 2017. DOI: 10.1145/3081333.3081352.
- [78] P. Du, S. Zhang, C. Chen, H. Yang, W.-D. Zhong, R. Zhang, A. Alphones, and Y. Yang, “Experimental demonstration of 3d visible light positioning using received signal strength with low-complexity trilateration assisted by deep learning technique,” *IEEE Access*, vol.7, pp.93986–93997, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2928014.
- [79] S. Ma, Q. Liu, and P.C.-Y. Sheu, “Foglight: Visible light-enabled indoor localization system for low-power iot devices,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol.5, no.1, pp.175–185, 2017. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2776964.
- [80] W. Wang, Q. Wang, J. Zhang, and M. Zuniga, “Passivevlp: Leveraging smart lights for passive positioning,” *ACM Transactions on Internet of Things*, vol.1, no.1, pp.1–24, 2020. DOI: 10.1145/3362123.
- [81] D. Konings, N. Faulkner, F. Alam, E.M.-K. Lai, and S. Demidenko, “Fieldlight: Device-free indoor human localization using passive visible light positioning and artificial potential fields,” *IEEE Sensors Journal*, vol.20, no.2, pp.1054–1066, 2019. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2944178.
- [82] E.A. Jarchlo, X. Tang, H. Doroud, V.P.G. Jimenez, B. Lin, P. Casari, and Z. Ghassemlooy, “Litect: 3-d monitoring and shape detection using visible light sensors,” *IEEE Sensors Journal*, vol.19, no.3, pp.940–949, 2018. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2879398.
- [83] M.S. Rahman, M.M. Haque, and K.-D. Kim, “Indoor positioning by led visible light communication and image sensors,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol.1, no.2, p.161, 2011. DOI: 10.11591/ijece.v1i2.165.
- [84] M. Yoshino, S. Haruyama, and M. Nakagawa, “High-accuracy positioning system using visible led lights and image sensor,” *Proc. Radio and Wireless Symposium*, pp.439–442, Orlando, FL, United States, 2008. DOI: 10.1109/RWS.2008.4463523.
- [85] 橋爪宏達, 杉本雅則, “汎用ビデオカメラを用いた可視光通信: 仮想正弦波による高効率な可視光通信 (小特集 可視光通信の最新動向),” *電子情報通信学会誌*, vol.101, no.1, pp.44–51, 2018.
- [86] 山里敬也, 岡田啓, “可視光通信実用化技術 (小特集 可視光通信の最新動向),” *電子情報通信学会誌*, vol.101, no.1, pp.59–65, 2018.
- [87] C.-K. Liang, L.-W. Chang, and H.H. Chen, “Analysis and compensation of rolling shutter effect,” *IEEE Trans. Image Processing*, vol.17, no.8, pp.1323–1330, 2008. DOI: 10.1109/TIP.2008.925384.

- [88] X. Liu, X. Wei, and L. Guo, “Dimloc: Enabling high-precision visible light localization under dimmable leds in smart buildings,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol.6, no.2, pp.3912–3924, 2019. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2893251.
- [89] 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.
- [90] Z. Yang, W. Zeyu, J. Zhang, C. Huang, and Q. Zhang, “Polarization-based visible light positioning,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol.18, no.3, pp.715–727, 2018. DOI: 10.1109/TMC.2018.2838150.
- [91] 中澤陽平, 牧野秀夫, 西森健太郎, 若月大輔, 小林真, 駒形英樹, “ナビゲーションを目的とした可視光通信による屋内歩行者位置計測法,” *電子情報通信学会論文誌 D*, vol.99, no.2, pp.165–177, 2016.
- [92] Y. Nakazawa, H. Makino, K. Nishimori, D. Wakatsuki, M. Kobayashi, and H. Komagata, “Precise indoor localization method using dual-facing cameras on a smart device via visible light communication,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.100, no.11, pp.2295–2303, 2017.
- [93] 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.
- [94] F. Yang, S. Li, H. Zhang, Y. Niu, C. Qian, and Z. Yang, “Visible light positioning via floor reflections,” *IEEE Access*, vol.7, pp.97390–97400, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2929160.
- [95] Sony Semiconductor Solutions Corporation, “Sony Develops the Industry’s First*1 3-Layer Stacked CMOS Image Sensor with DRAM for Smartphones,” <https://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/201702/17-013E/>. 参照 April 2020.
- [96] H. Zheng, Z. Xu, C. Yu, and M. Gurusamy, “A 3-d high accuracy positioning system based on visible light communication with novel positioning algorithm,” *Optics Communications*, vol.396, pp.160–168, 2017. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.03.058.
- [97] S. Shimada, T. Akiyama, H. Hashizume, and M. Sugimoto, “Ofdm visible light communication using off-the-shelf video camera,” *Proc. 15th ACM Conf. Embedded Network Sensor Systems*, p.57, Delft, Netherlands, 2017. DOI: 10.1145/3131672.3136968.
- [98] 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.
- [99] H. Zhang and F. Yang, “Push the limit of light-to-camera communication,” *IEEE Access*, vol.8, pp.55969–55979, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2982209.
- [100] P. Zhou, M. Li, and G. Shen, “Use it free: Instantly knowing your phone attitude,” *Proceedings of the 20th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp.605–616, 2014. DOI: 10.1145/2639108.2639110.
- [101] S. Lee, S. Chae, and D. Han, “Iloa: Indoor localization using augmented vector of geomagnetic field,” *IEEE Access*, vol.8, pp.184242–184255, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029281.

- [102] G. Bradski and A. Kaehler, Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library, " O'Reilly Media, Inc.", 2008.
- [103] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," IEEE Trans. pattern analysis and machine intelligence, vol.22, no.11, pp.1330–1334, 2000. DOI: 10.1109/34.888718.
- [104] S. Zhu and X. Zhang, "Enabling high-precision visible light localization in today's buildings," Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, pp.96–108, 2017. DOI: 10.1145/3081333.3081335.
- [105] R. LiKamWa, B. Priyantha, M. Philipose, L. Zhong, and P. Bahl, "Energy characterization and optimization of image sensing toward continuous mobile vision," Proceeding of the 11th annual international conference on Mobile systems, applications, and services, pp.69–82, 2013. DOI: 10.1145/2462456.2464448.