

平成 27 年度 博士論文

可視光通信による屋内歩行者位置計測法に関する研究

中澤 陽平

新潟大学大学院自然科学研究科 博士後期課程

電気情報工学専攻

目次

第 1 章 序論.....	4
1.1 背景・目的	4
1.2 従来の屋内測位方式	4
1.2.1 絶対測位と相対測位.....	5
1.2.2 電波による測位	6
1.2.3 その他の媒体による測位	7
1.2.4 カメラによる測位	7
1.3 可視光通信	8
1.4 視覚障害者ナビゲーションへの応用	8
1.5 論文の構成	9
第 2 章 可視光通信を用いた屋内測位方式	11
2.1 方式の条件と構成	11
2.1.1 方式の条件.....	11
2.1.2 提案方式の構成	11
2.2 可視光通信方式と VLC カメラ	14
2.2.1 可視光通信方式	14
2.2.2 VLC カメラ	16
2.2.3 ID 取得	16
2.3 計測法	19
2.3.1 座標系	19
2.3.2 カメラキャリブレーション	19
2.3.3 位置・姿勢計測法	19
2.4 実験	22
2.4.1 実画像による測位	22
2.4.2 実画像キャリブレーションによる測位.....	25
2.4.3 疑似画像を用いた測位.....	25
2.5 結果	25
2.6 考察	27
2.7 まとめ.....	27
第 3 章 初期位置導出とランドマーク ID 推定	28
3.1 提案手法の問題点	28
3.2 受信時間の低減とランドマーク追跡	29
3.3 LM 法初期値の導出	30
3.4 一次位置・姿勢導出	33

3.5 ID 推定と二次位置・姿勢導出	33
3.6 実験	33
3.6.1 実験 1：位置計測精度の実験	34
3.6.2 実験 2：利用ランドマーク数による位置計測精度の実験	36
3.6.3 実験 3：方位変化時の計測精度の実験	36
3.6.4 実験 4：手振れの影響の検証	36
3.6.5 実験 5：広域空間での実験	36
3.7 実験結果	38
3.7.1 実験 1：位置計測精度の実験	38
3.7.2 実験 2：利用ランドマーク数による位置計測精度の実験	40
3.7.3 実験 3：方位変化時の計測精度の実験	40
3.7.4 実験 4：手振れの影響の検証	40
3.7.5 実験 5：広域空間での実験	42
3.8 考察	42
3.8.1 位置・方位計測精度	42
3.8.2 計測時間	43
3.8.3 手振れによる影響	43
3.8.4 方式の条件	43
3.9 まとめ	44
第 4 章 総括	45
謝辞	47
参考文献	48
著者の論文	50
国際会議(査読あり)	50
学会発表等	50
付録	51

第1章 序論

1.1 背景・目的

近年，インターネットの普及により我々は大量の情報を瞬時に必要な場所で受け取ることが可能となってきた．さらに，それらの情報を地図上の位置と関連付けて時空間的な解析を可能とする GIS (Geographic Information System, 地理情報システム) を利用することによる新しい価値の創造が期待されている．現在，屋外では GPS (Global Positioning System, 全地球測位システム) を利用することで誰もが自分の端末で手軽に現在の位置情報を取得でき，身の回りの情報を地理空間情報として利用することが可能となっている．例えばカーナビゲーションやスマートフォンの地図アプリケーションなどのように GPS を利用した地理空間情報に基づくサービスの利用が進んでいる [1]．

一方，屋内でも地下街やショッピングモール，病院，学校など広大な空間での歩行者，特に視覚障害者用ナビゲーションや工場内での搬送用ロボットの制御といった分野へ高精度位置情報の必要性が拡大している．特に歩行者ナビゲーションなどでは屋内外でシームレスに測位できることが求められるが，屋内や地下街では GPS 信号の減衰により正確な位置情報の取得が困難である．このように複雑な屋内環境では屋外よりさらに正確な測位技術が必要と考えられる．そこで，まず次節では屋内測位技術の現状について説明する．

1.2 従来の屋内測位方式

屋内における測位手法としては，電波や画像処理などすでに数多くの提案がなされているが，いまだ多数の人間が移動する地下街や駅構内においてセンチメートル単位の安定かつ簡便な方式は確立されていない．財団法人ニューメディア開発協会が行った従来の屋内測位手法に関する調査においても，測位手法の特徴や測位精度の比較が示されているが，検出範囲は人が存在する大まかな地域の特定に留まっていたり，特定の区間内の高精度測位に限定されている [2]．ここで，現実的な屋内測位の精度については，国土地理院が文献 [3]において 10 cm 程度の値を提唱しているが，従来手法ではこの精度を満たすものは少ない．そこで本節では，屋内測位精度の向上と実用的な測位技術を開発するための背景として，絶対測位と相対測位の違いについて説明する．次に本論文で対象とする絶対測位につ

いて、利用する媒体によって電波を利用するものと、その他の超音波、赤外線、及びカメラなどの媒体を利用するものに大別しそれぞれの特徴と問題点について述べる。

1.2.1 絶対測位と相対測位

位置計測とは、ある基準点から見た測位対象地点（以下、端末）位置を計算することである。絶対測位では座標系の原点、相対測位では前回の端末位置をそれぞれ基準として測位を行う。

屋内での絶対測位では、建物内のある一点を基準としたローカル座標系を定めたうえで測位用ランドマークの位置をあらかじめ調べておく。環境中に設置したランドマークと端末の位置関係を求めることで、建物の中にいる端末の位置を知ることができる。ランドマークと端末の位置関係を求める手法は Trilateration (= Multilateration, 三辺測量), Triangulation (= Multiangulation, 三角測量) の2つに大別される。Trilateration では端末から見た複数のランドマークへの距離を求めることで端末の位置を計算する。一方 Triangulation では端末から見たそれぞれのランドマークまでの角度を基準に端末の位置を計算する [4]。

相対測位とは端末の前の位置からの相対的な移動量を計算する手法である。端末に搭載された加速度センサ・角速度センサ・地磁気センサ・気圧センサなどを組み合わせた IMU (Inertial Measurement Unit, 慣性計測装置)によって端末の動きを計算するデッドレコニング (Dead Reckoning, 自律航法)やロボットに取り付けた車輪の回転量から移動量を推定するオドメトリ (Odometry)などが代表的である。近年では、特に歩行者ナビゲーションを目的として歩行動作から人の動きを推定する PDR (Pedestrian Dead Reckoning, 歩行者デッドレコニング)といった技術も開発されている [5] [6]。デッドレコニングでは端末内部のセンサを利用するため測位用のランドマークを設置する必要がなく、計算コストが比較的小さく連続的な測位が可能である。また、測位にはランドマークを必要としないため、絶対測位が利用できない範囲で一時的に相対測位を利用することは非常に有用であると考えられる。一方、加速度・角速度センサ値の積分を行うことによる蓄積誤差の補正や、あらかじめ初期位置を設定する必要があるため、移動時の時間間隔や移動範囲などの行動形態に応じて適宜、絶対測位と組み合わせ補正を行う必要がある。

上述のように、相対測位の原理上、絶対測位による位置を基準として測位が行われるため、実用的問題として絶対測位の精度向上が重要である。そこで本論文では、屋内における高精度絶対測位に着目し、従来手法の問題点およびそれらの解決方法について述べる。次節では、従来の屋内での絶対測位手法について、それぞれの特徴と問題点を述べる。

1.2.2 電波による測位

電波を利用した屋内測位技術の代表例を以下に示す.

- ・ IMES (Indoor Messaging System) [7]
- ・ RFID (Radio Frequency Identifier)の利用 [8]
- ・ Wi-Fi (Wireless Fidelity または WLAN, Wireless Local Area Network)の利用 [9]
- ・ UWB (Ultra Wide Band)の利用 [10]

IMES 方式は GPS と互換性のある信号を利用することで, 従来の GPS 受信機をそのまま利用可能という手法である. ここでは, 対象とする環境中に設置された送信機から位置情報を送信し, 端末側では最も近い送信機の位置情報を利用する [7].

RFID とは近距離での無線通信技術の一種で, リーダ機能を持つスマートフォンや携帯電話を RFID タグにかざすことでタグの内容を読み取ることができる. さらに, あらかじめタグ情報を位置に関連付けることで, 情報を読み取った時点でのリーダ位置を推定することができる [8].

IMES や RFID による手法では, 送信機やタグの位置をそのまま利用するという性質上, 測位精度は送信機の設置間隔に依存するため高精度測位は困難である. また, これらの手法では測位専用の送信機やタグの設置といった作業が必要であり, 設置許可や景観への影響などの問題が存在する.

Wi-Fi を利用する手法では, すでに整備されている Wi-Fi アクセスポイント(以下, AP)を測位用ランドマークとして利用することで測位環境を構築することが可能である. 電波強度を利用した RSSI (Received Signal Strength Indicator)や電波の到達時間差を利用した TDOA (Time Difference Of Arrival)が代表的である. RSSI による手法は一般的に誤差が大きいため, 測位を実行する前にあらかじめ各地点での電波伝搬特性のマップを作成しておく Fingerprinting の研究が進んでいる [9]. しかしながら, 少なくとも数 m 程度の測位誤差が存在する上, AP の設置状況にも左右されることも考えられ, 測位精度と測位領域の面で課題が残っている.

UWB を用いた手法では, 誤差 30cm 程度という高精度な位置計測 [10]が期待できる一方で, 他の電波を利用する手法と同様, 送信機の設置が必要であり, また方位情報を得ることができないため, ナビゲーションへ応用するためには他手法との併用が必要である.

1.2.3 その他の媒体による測位

- ・超音波の利用 [11] [12]
- ・赤外線の利用 [13]

文献 [11]では、端末から発信した超音波を環境中に設置したスピーカで受信することで測位を行っているが、相対測位と組み合わせた場合でも平均 30cm 程度の誤差の発生が避けられない。測位用ランドマークとしての超音波センサと ID 送信用の赤外線 LED 組み合わせた方法も開発されており、最大誤差 10cm 程度の高い精度を実現している [12]。しかしながら、有線ですべてのランドマークの時刻同期が必要なため、空間が広くなるほど配線のコストが増大するという問題が考えられる。

赤外線を利用した手法としては、赤外線 LED の位置を魚眼カメラで検出する方法 [13]が提案されているが、通常の照明器具とは別に専用の赤外線 LED の設置が必要なことや、端末側からインフラ側の赤外線 LED の制御が必要となるため環境中で一つの受信機しか利用できないといった点から、不特定多数が利用する歩行者案内には不向きである。

1.2.4 カメラによる測位

カメラ画像を利用した手法は無線 LAN や IMES 方式に比べ高精度であり、方位情報まで取得することが可能であるが、画像中のランドマークの識別が課題である。カメラを用いた手法としては大きく 2 つに分けることができる。

- ・自然特徴点を利用するもの [14]
- ・人工的なマーカを利用するもの [15]

前者は、撮影画像中の特徴点を検出し複数フレーム間で追跡することでカメラの位置・姿勢を推定する手法である。画像中のあらゆる特徴点を対象とした追跡処理を行う計算量が大きいため、計算リソースに制限のある携帯型端末への実装が難しい。特徴点とカメラの相対的な位置を計算するため、この手法のみでは絶対的な位置計測はできない。絶対位置計測にはあらかじめ屋内環境の 3D モデルなどを作成し、検出した特徴点とのマッチングを行う必要があり、さらに計算量が大きくなることが予想される。また、歩行者などの移動物体が多数存在する場合など環境変化が激しい屋内ではロバスト性が低いという問題も存在する。通常の画像と距離画像を取得する RGB-D カメラ [16]の利用も提案されているが、通常のカメラを利用する手法と同様にロバスト性に問題がある。

後者は壁や天井に 2 次元コードなどの人工マーカを貼付し、これをカメラで読み取るこ

とでランドマークを識別する方式である。自然特徴点を利用する手法と比較してロバスト性が高い一方で、環境中に配置されたマーカのために景観が損なわれるという問題がある。文献 [15]では、再帰性反射材を用いたマーカを赤外線カメラで撮影することで景観の問題を解決しているが、カメラの解像度と設置するマーカのサイズによっては遠方のマーカを読み取れず、測位可能な領域が限定される可能性が存在する。

1.3 可視光通信

可視光通信は、人の目に見える帯域の電磁波（可視光）を利用した無線通信方式である。LED や蛍光灯などの照明器具を人の目に見えない速度で変調することで情報を送信し、フォトセンサやイメージセンサといった受光素子によってこれを受信・復号することで片方向の通信を実現できる。可視光通信によって一般照明だけでなく、信号機や灯台、ディスプレイのバックライトなども通信媒体となりうる [17] [18]。

フォトセンサによる可視光通信を用いた屋内測位手法としては、蛍光灯の明滅を周波数変調することで信号の送信を行い、フォトセンサで信号を受信するものが提案されている [19]。文献 [20]では精度向上のため複数のフォトセンサを組み合わせた受光器を利用しているが、フォトセンサ自体の受光角が大きいため誤差が大きく、太陽光などにより信号が飽和する可能性があり、実環境での高精度な測位は困難である。

可視光通信とイメージセンサを利用した測位手法としては、専用の情報送信用 LED とカメラを組み合わせた ID Cam が研究されている [21]。しかしながら、送信される ID のデータ長が 8bit で、送信用 LED の数が最大 256 個に制限されるため、広い屋内空間中のすべての LED に対して ID を設定することができなくなる問題がある。また、LED を ON/OFF で点滅制御しているため、照明器具として利用した際の品質に関して疑問が残る。

これまで示した通り、すでに様々な屋内測位方式が提案されているが、視覚障害者向けの歩行案内やロボットの正確な制御といった高精度な位置情報を必要とする場面に適したものは存在しない。そこで本論文では、測位用ランドマークとして可視光通信用 LED 照明を利用し、受信機としてカメラを利用する広域屋内空間でのナビゲーションを目的とした高精度測位方式を提案する。

1.4 視覚障害者ナビゲーションへの応用

屋内測位技術は移動ロボット制御や歩行者ナビゲーションなどに応用可能であるが、応用方法によって利用形態が異なるため、必要とされる屋内測位技術に求められる条件を考

慮した手法を開発する必要がある。たとえば、移動ロボットの制御では、移動中連続的に位置計測を行う必要がある。しかし、人間の場合は自律的な移動が可能であることから、連続的ではなく要所毎に離散的に位置や進行方向を計測してもナビゲーションは可能である。案内情報が移動中に絶えず流されるより、必要な時だけ位置情報を取得するほうがはるかに簡便である。そこで、本研究では移動ロボットに用いられる従来の諸方式と異なり、必要な時に指示をして直ちに必要な情報を獲得する方式（以下、スポット測位）を採用する。具体的には、本方式では魚眼レンズ付きカメラを装着した携帯電話やスマートフォンで、レンズの光軸がなるべく真上を向くようにして進行方向を指して計測開始ボタンを押すことにより、天井画像を瞬時に解析して現在地と姿勢（指した方向）を計測する。計測された現在地とあらかじめ入力された目的地情報を利用することで、歩行ルートの算出や視覚障害者への音声ナビゲーションなどへの応用が可能となる。取得した位置情報に基づくアプリケーションは、スマートフォンの読み上げ機能により視覚障害者にも利用されている[22]。

1.5 論文の構成

本博士論文の構成を図 1 に示す。第 1 章は序論であり、研究背景として屋内外での地理空間情報の利用状況について述べ、従来の屋内測位方式の問題点についてまとめている。次に可視光通信について説明し、可視光通信とカメラを利用した高精度屋内位置計測法を提案するとともに、視覚障害者ナビゲーションへの応用方法について述べている。

第 2 章では、視覚障害者が位置計測端末を利用することを想定し、実際にスポット測位を行う際に満たすべき 7 条件を示し、可視光通信を利用してこれらの条件を満足するためのインフラと機器構成について述べている。そして、空間中のカメラの位置と姿勢を求めるための具体的な位置計測手法について示す。つぎに、カメラを固定した状態での実験を行い、設定した測位精度の条件に関して満足することを示す。

第 3 章では、第 2 章で述べた手法を実用面から分析し、その問題点と対策について詳述する。さらに実際の利用環境を想定して、端末を手で把持した場合の実験によって計測精度と計測時間が、第 2 章で設定した条件を満たすことを示す。

最後に第 4 章では、第 2 章で提案した測位手法とカメラを固定した場合の実験、そして第 3 章のカメラを手で把持した場合の実験により得られた成果を総括し、今後の課題を述べる。

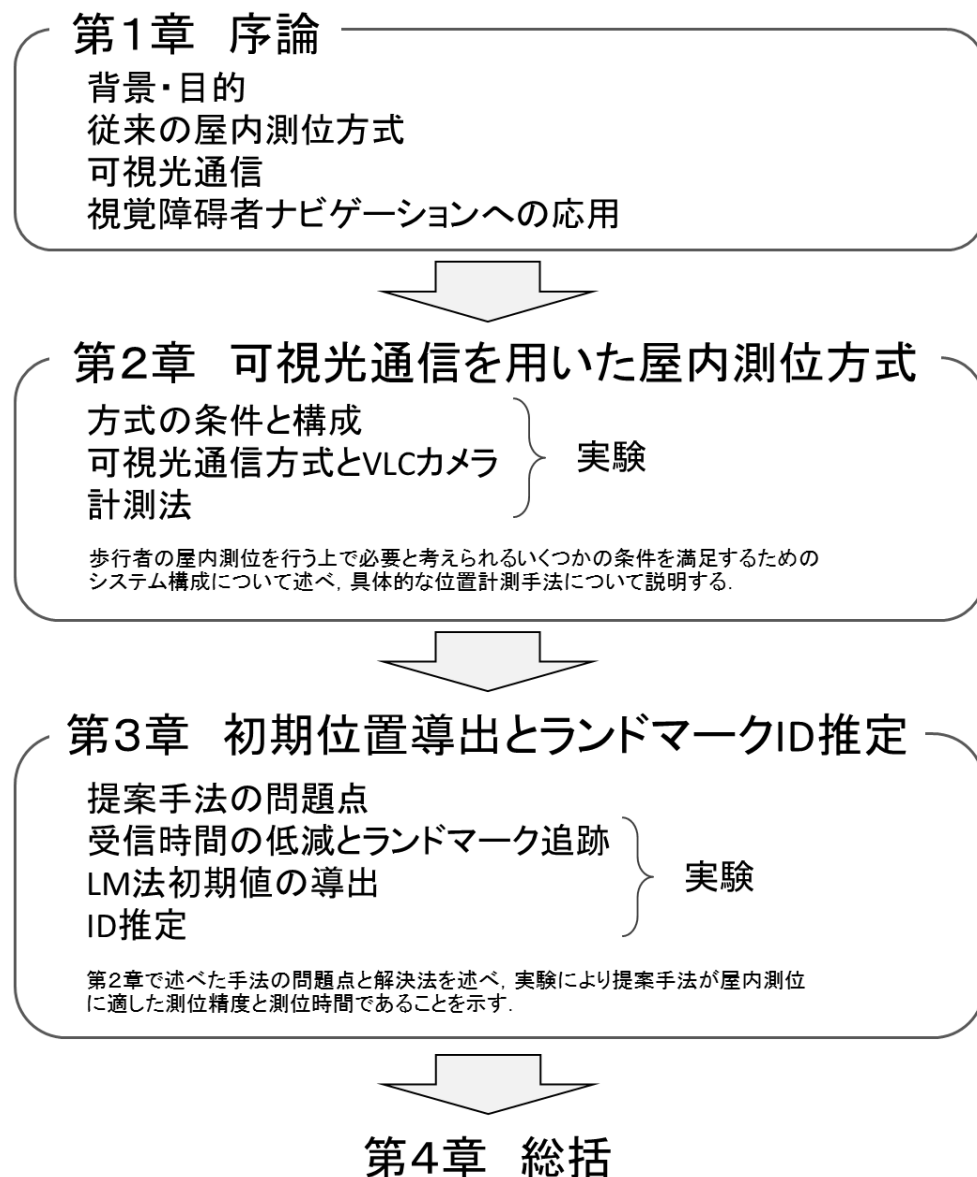


図1 構成図

Figure 1 Overview of the paper.

第2章 可視光通信を用いた屋内測位方式

第1章で述べたとおり，歩行者の屋内測位はロボット制御とは異なる条件で利用されることが想定される．そこで本章では，歩行者の屋内測位を行う上で必要と考えられるいくつかの条件を設定し，可視光通信を利用してこれらの条件を満足するためのシステム構成について述べ，具体的な位置計測手法について詳述する．

2.1 方式の条件と構成

ここでは，可視光通信用カメラ (Visible Light Communication Camera, 以下, VLC カメラ) によるスポット測位を行う際に満たすべき条件を示し，条件を満足するための構成について具体的に述べる．

2.1.1 方式の条件

本方式は次の条件を満たすことを考慮して構成する．

- ① 屋内にランドマークを多数配置しても景観に問題を生じないこと．
- ② 進行方向などに関して利用者の意図の把握が容易なこと．
- ③ 開始ボタンを押すといつでも端末のスポット測位ができること．
- ④ 実用的な時間内に計測結果が得られること．(1 秒以内を目標とする)
- ⑤ ナビゲーションに有効な精度で計測できること．

(位置精度 10 cm 程度，方位角および仰角精度 10° 程度を目標とする)

- ⑥ 多数の端末でいつでも同時に利用できること．
- ⑦ 実用的なコストで導入できること．

各条件を満たすための方策を以下に述べる．

2.1.2 提案方式の構成

ランドマークとしては屋内環境に違和感なく多数配置可能な情報送信型 LED 照明を用い，ランドマークの識別に光振幅変調による可視光通信技術を採用する．その結果，画像上でランドマークが最低 1 画素撮影できれば識別コードを復号できる．具体的には，魚眼レンズ付きカメラで広範囲に取得したランドマークの位置と識別コードにより，端末の位置と姿勢を高精度に取得することができる．また，照明器具はその設置スペースや電源が既に

確保されており、照度基準に基づいて多数設置されている。そのため、照明器具を情報送信型 LED 照明へ交換することは容易であり、複雑な構造の大型公共施設の屋内のどこにいても計測可能である。

次に、計測環境について述べる。まず屋内空間中の照明器具を位置計測用の多数のランドマークとして設定する。さらに、各ランドマークの空間座標と ID をあらかじめ計測端末に登録しておく。条件①のためランドマークには屋内で一般的に用いられる LED 照明を用いる。また、カメラで撮影した画像上のランドマークを個々に識別できるように、いくつかのランドマークは可視光通信による ID を連続送信する方式の器具を用いる [23]。また光振幅変調の変調度を 10% とすることで、ID 送信によるちらつきの知覚の防止を行っている。太陽光の直接入射などの場合にはイメージセンサの飽和が考えられるが、通常の屋内環境では外光に対して飽和することはなく、ID 信号の有無によりランドマークかどうかの選別が可能である。

次に、計測方法について述べる。まず利用者は計測端末（VLC カメラ部）を把持して腕を伸ばし、同カメラが体から離れた位置で、任意のタイミングで位置計測を行う。このとき、利用者が能動的に進行方向をポインティングするため、実際の進行方向と計測端末の方向との誤差を小さく抑えることが可能となり、条件②を満足する。

測位に使用する計測端末は VLC カメラと画像解析用 PC から構成される。将来的には小型化して携帯電話やスマートフォンに実装する計画である。また、カメラ部分に通常のレンズを使用した場合、画角が限定されるためランドマーク検索時に利用者がカメラを動かす必要がある。そこで著者は VLC カメラに視野角 180° 程度の魚眼レンズを装着し、1 点での撮影で広角の画像取得を行う。

つぎに、ランドマーク像の座標とランドマークの実空間座標を関連付ける方程式を求め、非線形最小二乗法によりカメラの位置・姿勢パラメータを求める。任意の計測点で 3 個以上のランドマークがカメラの視野に入る環境であれば条件③を満たすことができる [24]。

条件④、⑤に関しては画像の解像度の影響が大きい。解像度は精度と計測時間に相反の影響を与えるので、適切な解像度を設定し④と⑤を両立させる必要がある。また、条件⑥について、本方式は完全に受動方式の計測端末を利用するため、同一環境中でも複数の端末を同時に利用可能である。

条件⑦については、照明器具をランドマークとして利用するため、専用の LED ビーコンを追加で設置する必要がなく、設置時の許認可に関する費用も不要となるためインフラ側

のコストを低く抑えることができる。また、既に情報送信型 LED ダウンライトも開発されており、これらを量産化することにより、将来的には条件を満足すると考えている。情報送信型 LED 照明を図2に示す。



図2 情報送信型 LED 照明 (NNNH73072K)
Figure 2 VLC LED light.

2.2 可視光通信方式と VLC カメラ

本節では提案方式で利用する可視光通信方式について詳述し、さらに可視光コードを読み取るための VLC カメラについて述べる。ここでは、VLC カメラによってとらえた画像データと輝度変化波形データから可視光コードを読み取り、ランドマークの ID を特定する処理について説明する。

2.2.1 可視光通信方式

本手法では画像上の座標取得の容易さを考慮し、屋内に多数利用されている LED 照明をランドマークとして使用する。個々のランドマークを識別するために、可視光通信方式により LED 照明の光に固有の番号 (以下, ID) を含むデジタル信号を重畳して送信する。ここでは、文献 [23]に示すペイロードを 128bit から 256bit に変更したものを使用する。光振幅変調の変調度を 10%とすることで、ID 送信によるちらつきの知覚を防止する。送信信号はプリアンブル(12bit)、フレームタイプ(16bit)、ペイロード(256bit)、CRC (Cyclic Redundancy Check, 32bit)の 4 つのユニットから構成される「ID フレーム」となっており、4PPM 方式で符号化されている。ID フレームの総 bit 数は 316 bit であり、通信速度 9.6 kbps で約 33 ms 周期で繰り返し送信し続ける。4 PPM 方式の信号フォーマットと ID フレームのデータ構造をそれぞれ図 3、図 4 に示す。

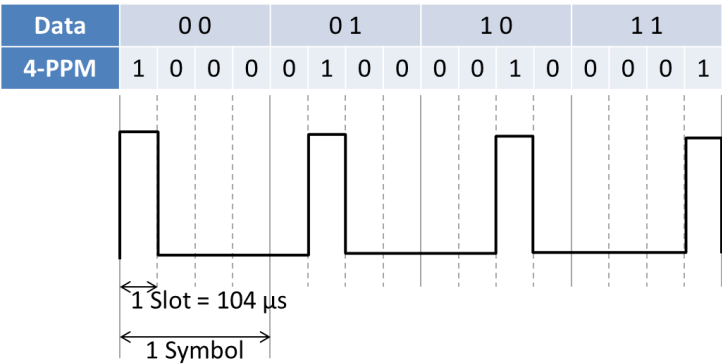


図 3 4PPM 方式の信号フォーマット
Figure 3 Signal format of 4PPM.

	Preamble (12 bits)	Frame Type (16 bits)	Data (256 bits)	CRC (32 bits)
4-PPM	0b1110 0000 0000	0b1000 1000 1000 1000	0b0001 0001 ... 1000 0010 XXXX XXXX XXXX XXXX	indefinite
HEX	—	0x00	0xFF FF ... FF F2 02 XX	indefinite

図 4 ID フレームの構造
Figure 4 ID frame data structure.

2.2.2 VLC カメラ

VLC カメラは、通常の画像取得機能の他に任意に指定した数画素の輝度レベルの時間変化を高速に取得する機能を持つ特殊なカメラである。VLC カメラはイメージセンサと制御用の FPGA で構成される。ここで、イメージセンサには BV4MK と BV2MK (Brainvision Inc.)を用いた。解像度はそれぞれ 128×120 画素と 256×240 画素で、各画素はモノクロ 8bit で表される。さらに可視光通信用の制御を行うことにより任意に座標指定した画素の輝度レベルの時間変化を波形データとして取得することができる。輝度のサンプリングは $20.8\mu\text{s} \sim 52\mu\text{s}$ ($48\text{kHz} \sim 19.2\text{kHz}$) の間で選択でき、信号 1bit 当たり 2 サンプル受信できる 19.2kHz の場合は同時に観測できる画素数は BV4MK で最大 4 画素である。取得した画像データと波形データはそれぞれ FPGA 内の画像バッファ 16kB と波形バッファ 16kB に保存される。VLC カメラと処理用 PC 間は USB 接続である。

次に、位置計測の方法について述べる。計測時は、歩行者が立ち止まり、VLC カメラを把持しながら腕を伸ばして、レンズの光軸がなるべく真上を向くようにして進行方向を指し計測開始ボタンを押す。どの計測点でも天井に取り付けた 3 個以上のランドマークが撮影されるよう広視野角の魚眼レンズを装着するとともにランドマークを適切に配置する。魚眼レンズは等距離射影方式の FI-19 (FIT Corp.)を用いた。処理用 PC では、VLC カメラで取得した画像からランドマークの光点座標を読み取ると同時に取得した輝度レベルの波形データからランドマークが送信する ID を読み取る。PC にはランドマークの ID とワールド座標の対応表を用意し、ランドマークの画像上の座標と空間中の位置を対応付けて位置・姿勢を求める。PC には Latitude e5530 (Dell Inc., Core i5 2.50 GHz)を用いた。

2.2.3 ID 取得

計測開始ボタンを押すと、カメラは輝度変化を記録した波形データと 1 枚の画像データをバッファに記録し PC に転送する。画像を 2 値化して光点の面積と形状でランドマーク像の候補点を抽出し、各光点の重心をランドマーク像候補の画像座標とする。光源検出処理を図 5 に示す。誤差を低減するため、重心座標はサブピクセル単位で算出する。重心座標は以下の式で計算する。

$$(X_i, Y_i) = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} x_j, \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} y_j \right) \quad (1)$$

ここで、 (x_j, y_j) は i 番目の光点の j 番目のピクセルのイメージ座標を表し、 n は i 番目の光

点のピクセル数を表す。

ここでは、まず計測点に近いランドマークを選ぶことと、それらランドマークのすべてが直線に近い状態に並ぶことがないように選ぶことが必要である。屋内では真上に近いランドマークほどカメラとの距離が近く計測誤差が少ないと考えられるので、画像の光軸中心に近い順に候補点に順位を付け、順位に従ってこれらの条件に適合するランドマークを4個選択する（VLC カメラの波形同時取得数の制約による）。次に、これらの画像座標を VLC カメラに送って輝度変化波形データを取得し PC へ転送する。ここまでを初期サイクルとする。次のサイクルでは、4 個の信号観測点上の輝度変化がサンプリングされ、それぞれの波形データがバッファに記録され PC へ送られる。

次に、復号処理について簡単に述べる。ここでは、得られた波形データの移動平均を閾値とした二値化処理を行う。さらに二値化されたビット列に対し、文献 [23] [25] に述べられた信号書式に従い ID 情報 (16byte) を取得する。PC 上にはあらかじめランドマークの ID とワールド座標の対応表が用意してあるため、受信した ID を利用することで、そのランドマークの画像座標と空間座標を対応付けることができる。



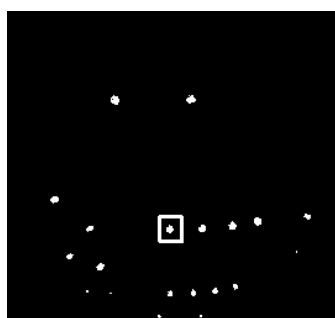
(a) HD カメラによって撮影した
天井画像 (カラー)

(a) Color image taken by the HD camera



(b) VLC カメラによって撮影した
天井画像 (モノクロ)

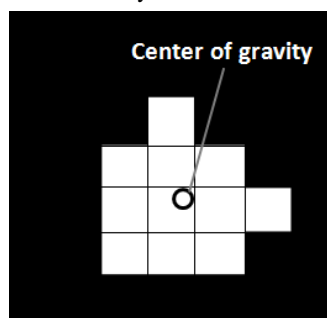
明るい点がランドマークを表している
(b) Gray scale image taken by the high-speed
fish-eye camera



(c) (b)を2値化した画像

2値化により画像上のランドマークのみを抽出
する

(c) Binary image



(d) (c)の各領域の重心を求める

x, y それぞれの座標値の合計をピクセル数
で除算することでサブピクセル単位の精度
で重心検出を行う

(d) Center of gravity

図5 光源検出

Figure 5 Landmark detection.

2.3 計測法

VLC カメラによって得られた画像データと波形データからカメラの位置と姿勢を計測する。本節では、まず計測に用いる座標系を定義し、ワールド座標とイメージ座標の対応精度を高めるためのカメラ内部パラメータのキャリブレーションを行う。次に、ランドマークのワールド座標とイメージ座標の対応関係から方程式を導出し、最小二乗法により近似解を求めることでカメラの位置・姿勢を算出する方法について述べる。

2.3.1 座標系

ランドマークの環境中の位置とカメラ画像上での位置を表すために、ワールド座標系とカメラ座標系を定義する。図6に2つの座標系の関係を示す。

① ワールド座標系 (O_w - $X_wY_wZ_w$)

水平床面の1点を原点 O_w とし、床面と平行に X_wY_w 面、垂直に Z_w 軸を設定する。

② カメラ座標系 (O_c - $X_cY_cZ_c$)

カメラの投影原点を O_c とし、光軸 Z_c を上向き、利用者が指し示す方向を Y_c 軸に設定する。また、 X_c , Y_c , Z_c 軸まわりの回転角をそれぞれ α , β , γ とする。ワールド座標における O_c でカメラの位置を表し、 α , β , γ でカメラの姿勢を表すことができる。

2.3.2 カメラキャリブレーション

視野角全体でできるだけ均一な画像分解能を得るため、魚眼レンズは等距離射影方式 (射影関数 $r=f\theta$, 焦点距離 f) を採用する。空間とカメラ画像の対応精度を高めるため、あらかじめ駒形らの手法によりカメラの内部パラメータのキャリブレーションを行う [26] [27]。具体的には、4 種のパラメータ (焦点距離 f , 光軸中心座標 (O_c の画像座標値), f と撮像素子の大きさの比および歪みパラメータ) をキャリブレーションで求める。

2.3.3 位置・姿勢計測法

あるランドマークの画像上の座標とワールド座標との関係を図7に示す。ランドマークがワールド座標 $P_{wi}(x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$ にあるとき、 P_{wi} と投影中心 O_c を結んだ直線はカメラ座標上の投影球面と点 $P_{si}(x_{si}, y_{si}, z_{si})$ で交わる。魚眼画像上の点 $P_{fi}(x_{fi}, y_{fi})$ にランドマークがある場合、 P_{fi} に対応する球面上の点 P_{si} を表す仰角 θ , 水平角 φ は、等距離射影方式の魚眼レンズの特性によりそれぞれ以下になる。

$$\theta = \sqrt{x_{fi}^2 + y_{fi}^2} / f \quad (2)$$

$$\varphi = \text{atan}(y_{fi}/x_{fi}) \quad (3)$$

球面上の点 $P_{si}(x_{si}, y_{si}, z_{si})$ は、仰角 θ ・水平角 φ を用いて以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} x_{si} &= f \sin \theta \cos \varphi \\ y_{si} &= f \sin \theta \sin \varphi \\ z_{si} &= f \cos \theta \end{aligned} \quad (4)$$

P_{wi}, P_{si}, O_c の3点が直線上にあるため、共線条件より、1つのランドマークを識別することで以下の2式が成り立つ。

$$x_{si} = -z_{si} \frac{m_{1,1}(x_{wi} - x) + m_{1,2}(y_{wi} - y) + m_{1,3}(z_{wi} - z)}{m_{3,1}(x_{wi} - x) + m_{3,2}(y_{wi} - y) + m_{3,3}(z_{wi} - z)} \quad (5)$$

$$y_{si} = -z_{si} \frac{m_{2,1}(x_{wi} - x) + m_{2,2}(y_{wi} - y) + m_{2,3}(z_{wi} - z)}{m_{3,1}(x_{wi} - x) + m_{3,2}(y_{wi} - y) + m_{3,3}(z_{wi} - z)} \quad (6)$$

ここで、 x, y, z はワールド座標上のカメラの位置、 m_{ij} は回転行列 M の要素である。

$$M = \begin{pmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} \\ m_{3,1} & m_{3,2} & m_{3,3} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} m_{1,1} &= \cos \beta \cos \gamma \\ m_{1,2} &= -\cos \beta \sin \gamma \\ m_{1,3} &= \sin \beta \\ m_{2,1} &= \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma \\ m_{2,2} &= -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \\ m_{2,3} &= -\sin \alpha \cos \beta \\ m_{3,1} &= -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ m_{3,2} &= \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \\ m_{3,3} &= \cos \alpha \cos \beta \end{aligned} \quad (8)$$

1つのランドマークを識別することで未知パラメータ6つ ($x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$) を持つ2式が求められるため、3つ以上のランドマークを識別できれば式を解くことができる [24]。共線条件から求めた2式は非線形性を持つため、非線形最小二乗法的一种である Levenberg-Marquardt 法 (以下、LM 法) により最適解を求める [28]。

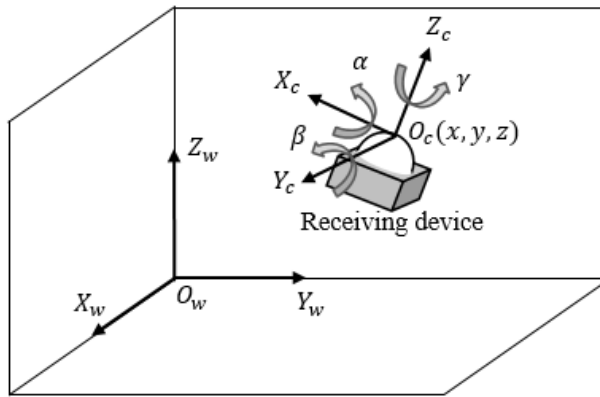


図6 ワールド座標とカメラ座標

Figure 6 World coordinates and camera coordinates.

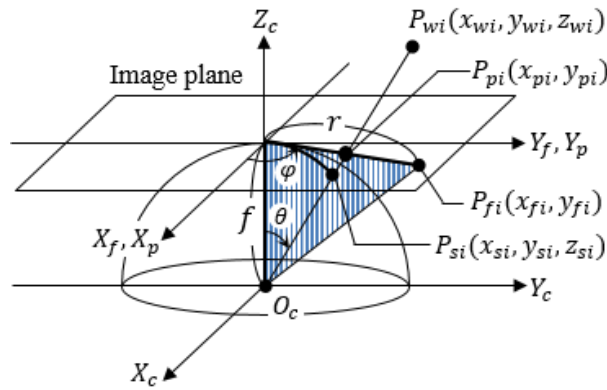


図7 ランドマークの魚眼座標, 透視投影座標, ワールド座標

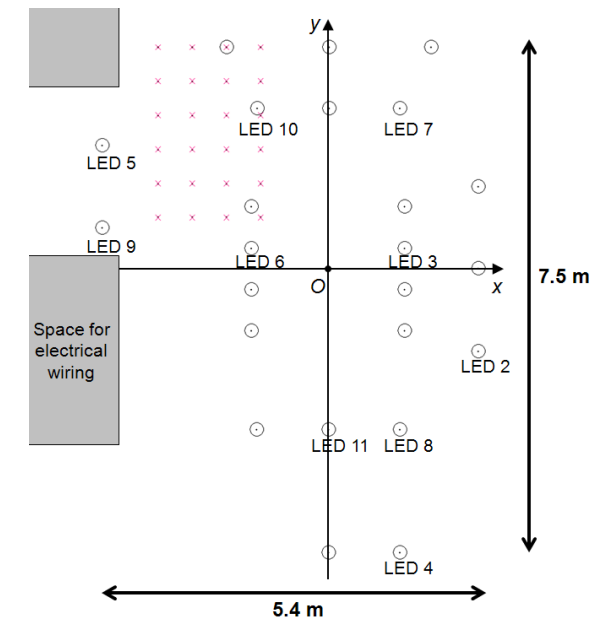
Figure 7 Fisheye image coordinates, perspective projection coordinates and world coordinates of a landmark.

2.4 実験

提案方式が測位精度の面で条件を満足することを示すため、実際に情報送信型 LED が設置された環境において計測実験を行い、実験によって得られた結果について評価する。特に、測位に魚眼カメラを使う本方式の仕様上レンズの歪みによる誤差が避けられない。そこで、内部パラメータのキャリブレーションの有無による測位精度の比較を行う。この実験では量子化誤差低減のため、解像度の高い BV2MK (256×240 画素)を利用する。

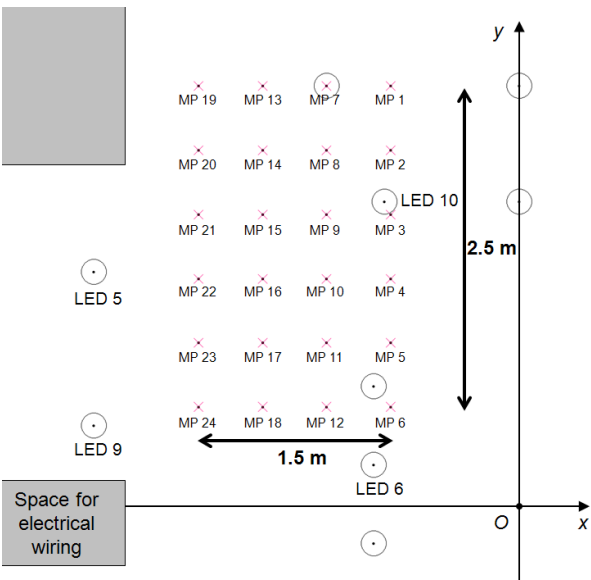
2.4.1 実画像による測位

実験環境を図 8 に示す。測位用ランドマークには LED ダウンライト (NNN62022-CF-K, NNNH73072K, Panasonic Corp.) を用いた。丸印が設置されている LED であり、そのうちの 6 個 (LED3, 5, 6, 7, 9, 10) を利用し、VLC カメラによって撮影した画像に基づいて位置計測を行う。図中に×印で示した 50cm 間隔、24 か所の計測点上で高さ 90cm の位置に VLC カメラを鉛直上向きに設置して位置計測を行い、計測結果と実際のカメラ設置位置との誤差を計測する。



(a) LED 照明と計測点の配置

(a) Arrangement of LED lights and measuring points (MPs)



(b) 拡大図

(b) Enlarged view of measuring points

図 8 実験環境 1

Figure 8 Experimental environment 1.

表1 魚眼カメラの内部パラメータ

Table 1 Internal parameters of the fish-eye camera.

<i>Parameter</i>	<i>Meaning</i>	Value
C_u	x coordinate of the optical axis	127.747
C_v	y coordinate of the optical axis	123.002
K_u	Focal length in x direction	119.489
K_v	Focal length in y direction	118.250
k_1	Distortion parameter in radius direction	0.199378
k_2		-0.198875
k_3		0.007907
k_4		0.031440
g_1	Distortion parameter in circumference direction	0.003967
g_2		0.025867
g_3		-0.011513
g_4		-0.038454



(a) HD カメラによるカラー画像 (比較用)

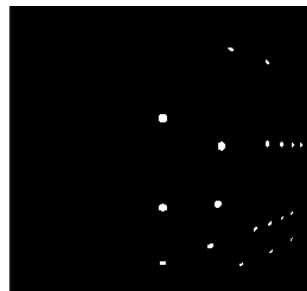
(a) HD image



(b) 実画像

実際に VLC カメラで撮影した天井画像

(b) Experimental image



(c) 疑似画像

図8の LED 配置情報とカメラ設置位置より求めたシミュレーション用の疑似画像

(c) Pseudo image

図9 計測点 MP1 での撮影画像

Figure 9 Images taken at the MP 1 measuring point.

2.4.2 実画像キャリブレーションによる測位

実画像にはレンズの歪みによる誤差が含まれることが予想されるため、内部パラメータのキャリブレーションを行った場合と行わない場合で測位精度を比較する。キャリブレーションによって得られた各パラメータを表 1 に示す。表 1 に示すパラメータを用いてランドマークの画像座標の補正を行い、このときの測位誤差をキャリブレーション後の実験結果として保存する。

2.4.3 疑似画像を用いた測位

測位精度に対してのキャリブレーションの効果を調べるため、レンズ歪みが無い場合の測位精度をシミュレーションによって求める。具体的には、計測点上に VLC カメラを設置した時の各 LED の画像上での位置を計算によって求め、BV2MK と同じ解像度の仮想的な 2 値の疑似画像を生成して位置計測を行い、実画像の場合と同様に誤差を評価する。図 9 に計測点 MP1 での実画像と疑似画像の比較を示す。図 9 (a)が HD カメラでの撮影画像、(b)が BV2MK での撮影画像、(c)がシミュレーションによって得られた疑似画像である。

2.5 結果

図 10 に全計測点の水平面上での計測結果を重ね合わせたものを示す。また、図 11 に全計測点での誤差の最大、平均、標準偏差を水平、垂直方向それぞれ示す。レンズの歪みのない疑似画像を用いた場合、水平垂誤差ともに 5cm 以内に収まった。キャリブレーションなしの場合の最大誤差は水平方向、垂直方向それぞれで 15cm, 20cm となった。キャリブレーションありの場合には水平・垂直方向ともに 10cm 以内となり、レンズ歪みのない場合の結果に近い結果となった。レンズの歪みの影響により大きく x の正の方向にばらついていた測位結果が、キャリブレーションを行うことで収束し誤差が減少する様子が図 10 より確認された。

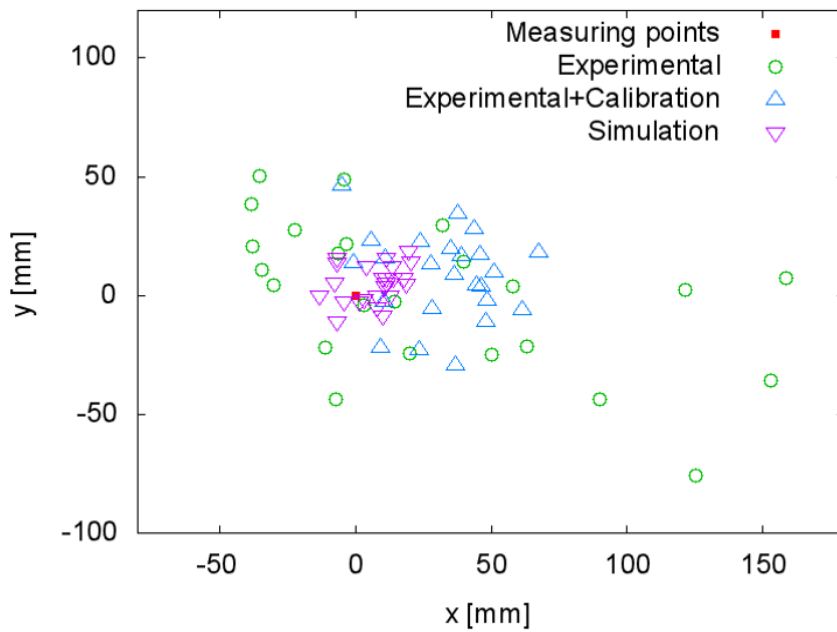


図 10 全計測点での誤差

Figure 10 Positioning error of all measuring points.

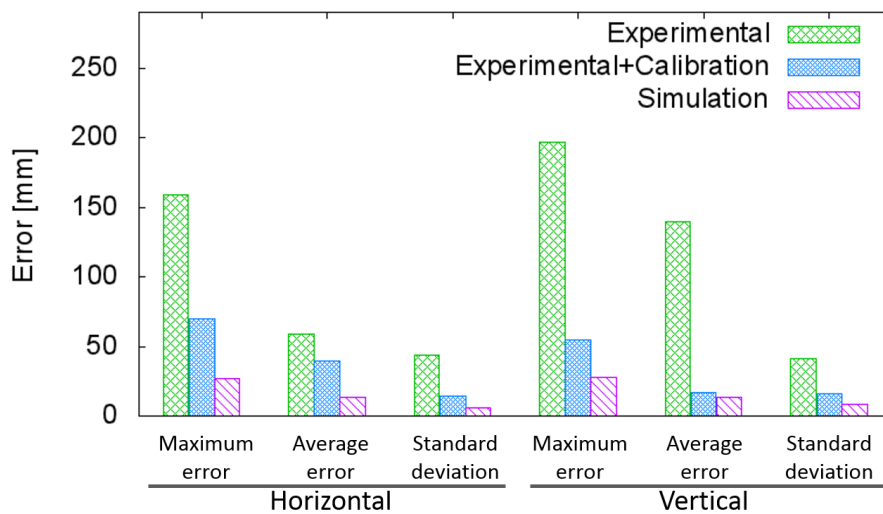


図 11 測位誤差

Figure 11 Positioning errors.

2.6 考察

図 10 より、内部パラメータのキャリブレーションを行うことで、測位結果のばらつきが抑えられていることがわかる。このことから文献 [26] [27]のキャリブレーション手法の有効性を確認できた。一方で、測位結果が全体的に x 軸正の方向へシフトし統計的誤差が生じている。これは、カメラの解像度が 256×240 画素と比較的低く、キャリブレーション精度に影響しているためと考えられる。今後高速イメージセンサの解像度が向上することでキャリブレーションの精度も改善され、今回補正しきれなかった誤差も打ち消すことができると考えている。つづいて図 11 より、疑似画像を用いたシミュレーションでは最大 3cm 程度の誤差が推定された。このことから、 256×240 画素のカメラの場合にはレンズの歪みによらないイメージセンサ解像度の量子化誤差の影響が 3cm 存在する可能性がある。ここで、内部パラメータのキャリブレーションなしの実画像による測位では 15cm 以上の誤差が発生したが、キャリブレーションを行うことで、目標である誤差 10cm 以下の測位が可能であることを確認した。

2.7 まとめ

第 2 章ではまず屋内歩行案内において必要となる 7 条件を示した。つづいて、条件を満たすための可視光通信を利用したシステム構成と測位方式の提案を行った。具体的には、測位用ランドマークとして LED 照明を利用し、利用者が携帯する計測端末との間で可視光通信を行うため、カメラには高速イメージセンサを利用し、ランドマークから送信される ID が受信可能な VLC カメラを開発した。ここで、VLC カメラには魚眼レンズを装着し、1 回の計測ですできるだけ多数のランドマークを検出する方式を用いた。次に、画像上の LED 像とあらかじめ計測した LED のワールド座標を関連付ける連立方程式を LM 法で解くことで VLC カメラの位置と姿勢を求める。疑似画像によるシミュレーションでは、天井の高さ約 3m で 256×240 画素のカメラを利用した場合の量子化誤差の影響が測位誤差として 3cm 程度存在することが確認できた。また、実環境で VLC カメラを固定した実験を行い、内部パラメータキャリブレーションにより本システムが目標とする誤差 10cm 以下での屋内測位が可能となった。

第3章 初期位置導出とランドマーク ID 推定

第2章では、屋内測位で必要と考えられる条件を設定し、それらを実現するための可視光通信による VLC カメラの位置・姿勢計測方法について述べた。そこで、第3章では視覚障害者が端末を把持する場合について、実用性の観点から問題を分析する。さらにそれぞれの問題点に対する改善方法について議論し、実験によりその有用性を確認する。

3.1 提案手法の問題点

第2章で述べた非線形最小二乗法による位置・姿勢計測法を手で把持した VLC カメラについて適用した場合、以下のような問題点が存在する。

問題点 (1) 把持したカメラを利用する場合、手振れによって画像上のランドマークの位置ずれが発生する可能性がある。

問題点 (2) 与えられた初期値によっては、非線形最小二乗法で最適解に収束しない場合がある。

問題点 (3) 受信できた最小個数のランドマークのみを利用するため、ランドマーク検出時の画像座標の量子化誤差が最終的な計測結果に大きく影響する。

そこで、以下の処理を行うことでこれらの問題を解決する。

解決法 (1) 受信時間の低減とランドマーク追跡

解決法 (2) LM 法初期値の導出

解決法 (3) 近傍の照明器具に対する ID 推定（以下、ID 推定）

以上の解決法を追加した計測処理は、1. ID 取得、2. LM 法初期値の導出、3. 一次位置・姿勢導出、4. ID 推定、5. 二次位置・姿勢導出の順序で実行する。本章ではまず、手振れの対策として光信号受信時間の低減方法とランドマーク追跡について述べる。次に、最小限のランドマークのみを利用して最小二乗法で確実に最適解に収束させるための初期値導出法について詳述する。最後に、可視光コードの受信時間を増加させずに利用ランドマーク数を増やして量子化誤差を低減するための ID 推定手法と2次位置・姿勢導出処理について述べる。実験では VLC カメラを三脚に固定した場合と人間が把持した場合のそれぞれについて測位精度と計測時間について評価し、第2章で述べた屋内測位で必要とされる7条件すべてを満たすことを示す。

3.2 受信時間の低減とランドマーク追跡

把持したカメラの姿勢変化により，受信中のランドマークの位置ずれが発生する可能性があるため，1回の信号受信時間は短いことが望ましい．受信時間短縮のためバッファサイズを ID フレーム長の2倍より小さくすると，1度の受信で完全な ID フレームが復号できない場合がある．そこで，ランドマークからは同一 ID が繰り返し受信されることを利用して，図 12 に示す手法により完全な ID フレームを復元する．具体的には，断片化した2つの ID フレーム (Data1, Data2) の順番をバッファ内に入れ替えることで，バッファの先頭に Data2 のプリアンブルが位置し，Data2 のバッファに収まらなかった部分に関しては Data1 を補完することで1つの完全な ID フレームの復元が可能となる．そのため，完全な ID フレームを受信するためには本来 ID フレームの2倍のバッファサイズが必要となるが，ID フレームと同じサイズのバッファサイズがあれば十分である．ここでは 316 bit (632 サンプル) の ID フレームに対して波形保存用バッファサイズを 768 サンプルに設定し，1回の信号受信時間を約 40 ms とした．

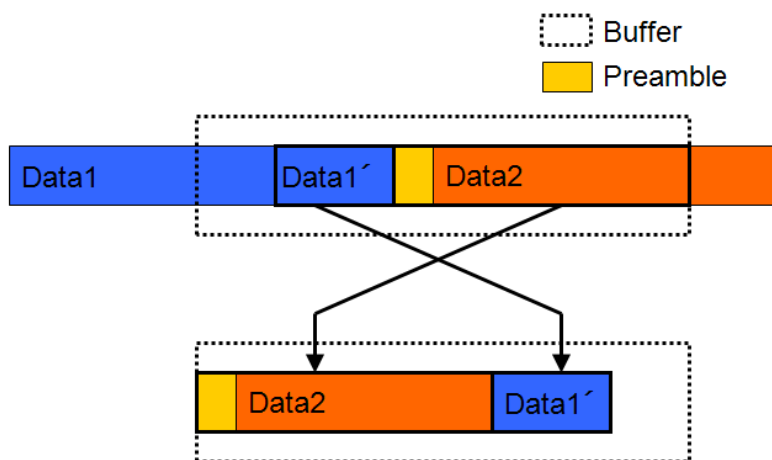


図 12 受信波形データからの ID 復元処理
Figure 12 ID frame segments and reconstruction process.

つづいて、カメラのぶれによりランドマーク候補点の画像座標が変化する可能性があるため、連続する画像間で候補点の対応付けを行う。前のサイクルでのランドマーク候補点と現在のサイクルでの候補点をオプティカルフローで対応付けて、全候補点の画像座標を更新する。ID の受信が複数サイクルに渡った場合でも、最後に得られた 1 枚の画像上のランドマーク座標を利用して位置計測処理が行われるため、手振れが位置計測精度に影響することはない。オプティカルフローの処理には画像処理ライブラリである OpenCV 内の `calcOpticalFlowPyrLK` 関数を利用する [29]。ID が復号できた候補点を A 型ランドマークと呼び、ID の復号に失敗したランドマークに関して以下のようにさらに 2 種類に分類する。信号の輝度変化をチェックし、一定以上の輝度変化が認められるものは、信号が送信されているとみなし B 型ランドマークに分類する。信号送信がないものは C 型ランドマークに分類し、それ以降の受信を行わない。

信号観測点数は最大 4 点という制限があるため、望む数のランドマーク ID が取得できていない場合、次のサイクルで新たに 4 点の候補点を選択し同様の処理を繰り返す。ここでは B 型ランドマークと前サイクルまでに選ばれなかったランドマークから新たな 4 点を候補点として選択する。

ID を取得し画像座標と空間座標を対応付けたランドマークが 4 個以上になった時点で ID の受信を打ち切り、カメラの位置と姿勢を求める。一次位置・姿勢導出で利用できるランドマーク数は 4～7 個となる。

3.3 LM 法初期値の導出

LM 法による最適化収束計算で用いられる評価関数は複数の局所解を持ち、パラメータ値が最適解以外の局所解に収束する可能性がある。本方式は広い屋内空間での利用を前提としているため、最適解に収束するためには、最適解に近い初期値を LM 法に与えることが必要である。

初期値の導出には「腕を伸ばしてレンズの光軸がなるべく真上を向くようにして進行方向を指して開始ボタンを押す」という条件を利用する。この条件により概略的に $X_c Y_c$ 面、 $X_f Y_f$ 面、 $X_p Y_p$ 面は $X_w Y_w$ 面に平行、 Z_c 軸は Z_w 軸に平行で、 Y_c 軸、 Y_f 軸、 Y_p 軸は進行方向を指していると仮定できる。なお、以降の計算は魚眼画像 $X_f Y_f$ 上の点を透視投影画像面 $X_p Y_p$ に投影した点の座標を利用して行う。

ID が受信できたランドマーク像から、高さが同じものを 2 個選び、それぞれ p_1 、 p_2 とする。図 13 にこれら 2 点の(a)透視投影画像座標、(b)空間座標そして(c)2 つの座標系の関係を

示す．図 13 (b), (c)の P_1, P_2 は(a)の p_1, p_2 の空間座標上でのランドマーク点である． $X_w Y_w$ 面と $X_p Y_p$ 面が平行であるという仮定から，図 13 (b)の X_p', Y_p' 軸は(a)の X_p, Y_p 軸の $X_w Y_w$ 面への平行投影像である．これらの条件から，図 6 に示した VLC カメラの傾きを表すパラメータはそれぞれ $\alpha=0, \beta=0$ となり， Y_w 軸と Y_p' 軸のなす角が方位角 γ と等しくなる．図 13 (a)で Y_p 軸と $p_1 p_2$ のなす角 δ_1 を求め，また，図 13 (b)で Y_w 軸と $P_1 P_2$ のなす角 δ_2 を求める．これにより方位角は $\gamma=\delta_2-\delta_1$ である．

図 13 (b)の点 $Q (Q_x, Q_y)$ は図 13 (a)の O_p の Z_w 軸平行投影点であり，天井面と同じ高さに図 13 (c)の点 $Q'(Q_x, Q_y, Q_z)$ を定義する．図 13 (c)の p_1', p_2' は p_1, p_2 の方位角を γ だけ回転させたものである．さらに，直線 $p_1' p_2'$ の長さを l_p ，直線 $P_1 P_2$ の長さを l_w とすると， $\triangle p_1' p_2' O_p$ の $\triangle P_1 P_2 Q'$ であることから相似比は $\omega=l_w/l_p$ と表せる． p_1', p_2' の座標と相似比 ω より， Q_x, Q_y を求めることができる．また， O_c から見たランドマークの高さを h とすると，カメラの高さは $h_c=Q_z-h$ と表すことができる．カメラ座標原点 O_c と透視投影面の距離が f であることから $h=\omega f$ となる．以上の計算により，カメラの位置を $x=Q_x, y=Q_y, z=h_c$ と求めることができる．

以上の処理で得られた $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ を LM 法の初期値として利用する．

3.4 一次位置・姿勢導出

カメラを把持して計測するため、実際には初期値の導出で用いる $X_p Y_p$ 面と $X_w Y_w$ 面が平行となる条件に対し、そのずれによる誤差が生じる。そこで、3.2 節で ID を取得した 4～7 個のランドマークに対して LM 法により位置・姿勢計算を行う。この処理を一次位置・姿勢導出と呼ぶ。

VLC カメラでは、水平方向・垂直方向の有効画角が 120° となるため、 128×120 画素の場合 1 画素当たり約 $\pm 0.5^\circ$ の量子化誤差が生じる。一次位置・姿勢導出では利用するランドマーク数が少ないので、量子化誤差による影響が大きい。そこで、次節の ID 推定により利用するランドマーク数を増やして量子化誤差の影響を平均化する。

3.5 ID 推定と二次位置・姿勢導出

新たなランドマークを追加するためには ID 取得のための信号受信が必要となり処理時間が増大する。そこで、新たに信号受信を行うことなくランドマークを追加する方法として ID 推定を考案した。ここでは、一次位置・姿勢導出後に、ID 受信を実施していない近傍のランドマーク候補像の ID を以下の手順で推定し、新たなランドマークとして追加する。まず、ID とワールド座標の対応表の中から、画像上のランドマーク像と対応付けられていない、ID:A を持つランドマークを一つ選択し、このワールド座標を P_{wA} とする。一次位置・姿勢導出ですでに計算済みのカメラの位置・姿勢パラメータを利用してこのランドマークのカメラ投影球面上の点 P_{sA} の座標を求める。つぎに式(4)(5)(6)より、投影原点から P_{sA} への仰角 θ ・水平角 φ を求める。続いて式(2)(3)より、画像上での投影座標 P_{fA} を求める。そして実際の撮影画像上の、 P_{fA} に最も近いランドマーク像候補 L に対して ID:A を対応付ける。以上の処理を、ランドマーク像との対応付けがされていない ID を持つ全てのワールド座標に関して順次適用する。ID を対応付けることができたランドマークを全て利用し、LM 法により位置・姿勢計算を行い、この結果を二次位置・姿勢導出結果として記録する。

3.6 実験

地下街での利用を想定し、高さ 3m 程度の実験環境 1 (新潟大学情報理工棟 1 階の可視光通信プラットフォーム、図 14 (a)) で実験を行った。図 15 は環境 1 の平面図で、ワールド座標原点 O_w と X_w 軸、 Y_w 軸を床面に設定した。図 15 中の 20 個の×印は計測点 (Measuring Point, MP1～MP20)を表している。まず、利用可能なランドマーク数が限られる壁際での計

測を想定した環境周辺部の MP1～MP4 を設定する．次に，目標とする精度 10cm での計測を確認するため MP5～MP20 を環境中心付近の 20cm の正方格子交点上に配置する．人が計測端末を把持して利用することを想定し，床面からの計測点の高さを 1.30m とする．#2～#25 を付した 24 個の点は天井に設置したランドマークである．高さが異なるランドマークでも計測できることを確認するため，2 種類の高さのランドマークを設定した．ランドマークの設置密度は 0.50 個/ m^2 である．第 2 章での実験と同様にランドマークには LED ダウンライト (NNN62022-CF-K, NNNH73072K, Panasonic Corp.) を用いる．#12, #20 および #21 を除く 21 個が固有の ID を送信しており，送信していないランドマークにも ID を設定しておく．各ランドマークのワールド座標と計測点のワールド座標を付録の表 x1, 表 x2 に示す．

ランドマークの座標値は，各ランドマークの中心から測量用の分銅を吊り下げ，印を付けて巻尺によって 5mm 単位で実測する．計測点は設定した床面上の座標点を巻尺で実測して印を付ける．計測実験時には図 14 (b)のように三脚に固定した 128×120 画素の VLC カメラの下に分銅を吊り下げて計測点の印の位置に重なるように設置する．実験結果はこれらの計測点座標に対する 3 章で述べた計測法による座標値または誤差として示す．なお，方位角は X_w 軸方向を 0° とし，反時計回りの角度で示す．

3.6.1 実験 1：位置計測精度の実験

三脚に固定した VLC カメラを用い，方位角 γ を 135° に固定して 20 箇所の計測点で各 10 回ずつの位置計測を 3 章に述べた手順で行う．各計測点において，一次位置・姿勢導出結果と ID 推定後の二次位置・姿勢導出結果それぞれの最大測位誤差を求める．また，一次位置・姿勢導出と二次位置・姿勢導出に利用されたランドマーク数の平均値ならびに二次位置・姿勢導出完了までの処理時間を求める．

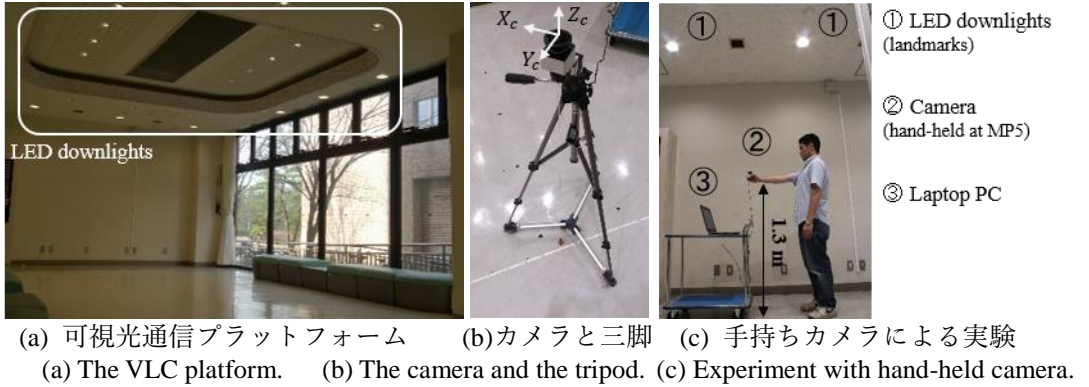


図 14 可視光通信プラットフォームと計測の様子
 Figure 14 Views of VLC platform and measurement.

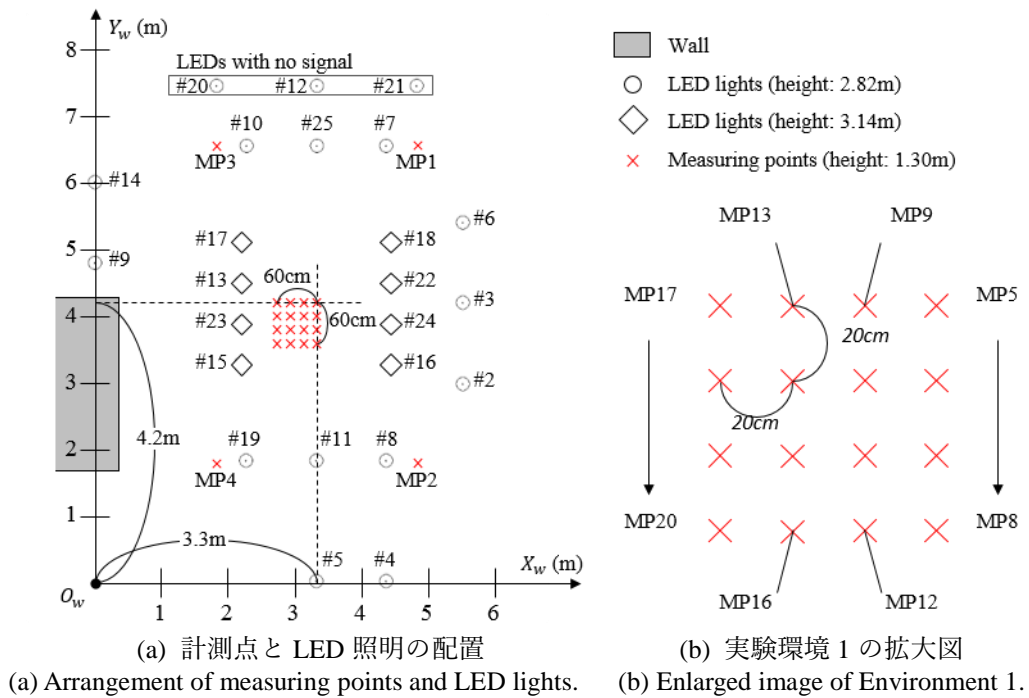


図 15 実験環境 1
 Figure 15 Environment 1.

3.6.2 実験 2：利用ランドマーク数による位置計測精度の実験

実験 1 と同様のカメラ設定で利用ランドマーク数による位置計測精度の関係を以下の手順で実験により求める。まず、各計測点での撮影画像から画像中心に近いランドマーク 3 個を直線上に並ばないように選択する。選択したランドマークを用いて位置計測を行い、各計測点での水平方向誤差を算出する。また、ランドマーク 3 個の場合の全計測点の水平方向の最大誤差と平均誤差を求める。つぎに、選択されなかったランドマークの中から画像中心に最も近いものを 1 個選択して追加し、ランドマーク 4 個の場合の位置計測誤差を 3 個の場合と同様に求める。以下同様に、画像中心に近い順にランドマークを追加していき、ランドマーク数に対する位置計測時の最大誤差と平均誤差の変化を求める。

3.6.3 実験 3：方位変化時の計測精度の実験

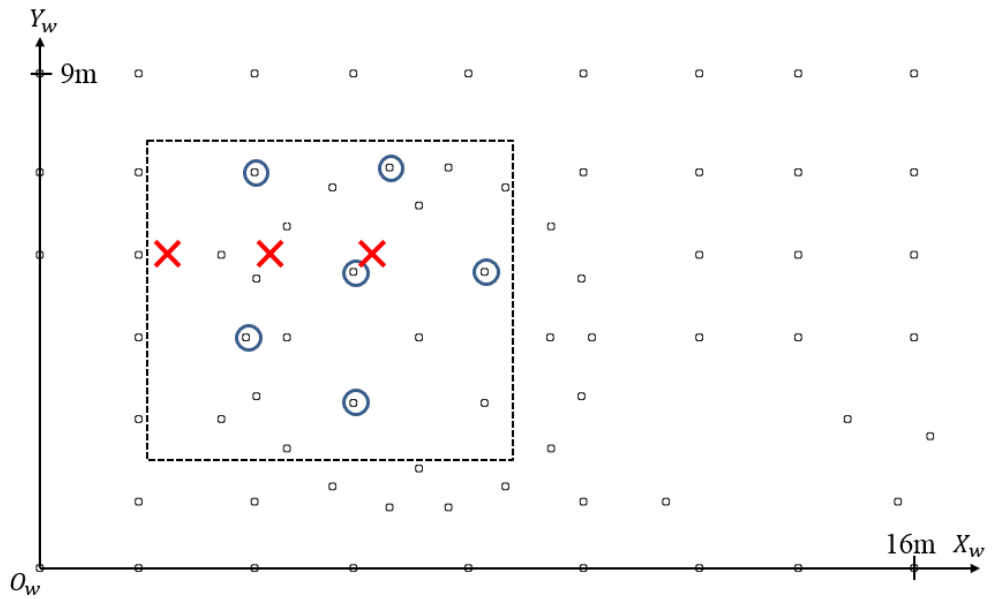
計測点を MP5 に固定し、カメラの方位角 γ を 45° , 135° , 225° , 315° の 4 方位に変化させ、それぞれ 10 回ずつ計測を行い、位置誤差と方位誤差を求める。

3.6.4 実験 4：手振れの影響の検証

図 14 (c)のように、カメラを手で把持して腕を伸ばし、MP5 の上空でカメラを $\gamma=135^\circ$ 方向に向けて連続 100 回の位置・姿勢計測を行う。手振れによる水平方向の位置ならびに方位角の最大誤差、平均誤差、標準偏差をそれぞれ求める。

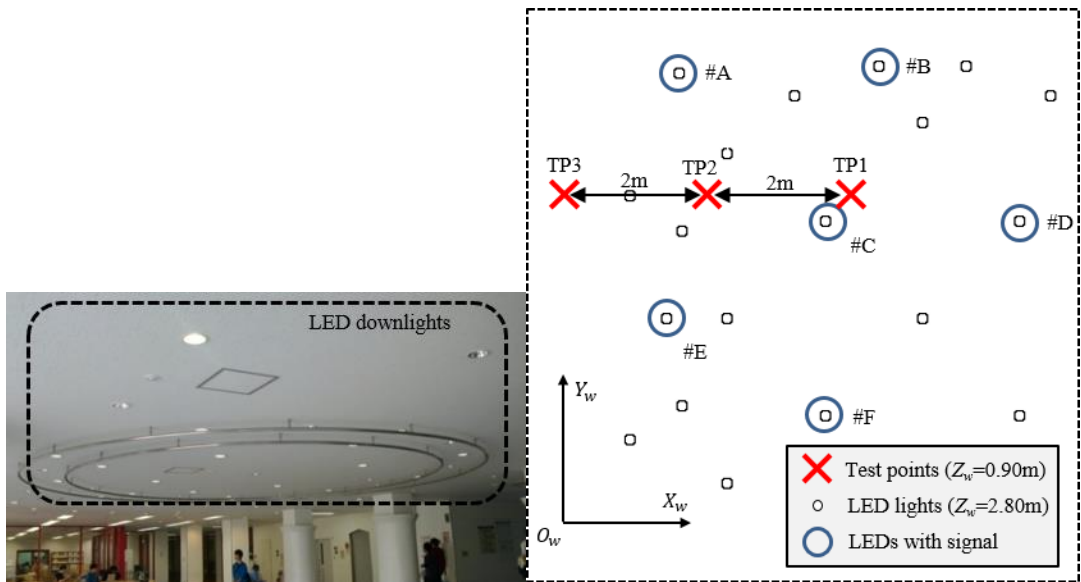
3.6.5 実験 5：広域空間での実験

より広域な空間での利用を想定し、実験環境 2 (新潟大学工学部学生ホール, $16\text{m} \times 9\text{m}$, 天井高 2.80m , 図 16 (a), (b)) での実験を行う。照明器具の設置密度は $0.49 \text{ 個}/\text{m}^2$ で、これらをランドマークとして利用する。照明配置の拡大図を図 16 (c)に示す。計測点周辺には、隣り合う距離がおおよそ $3\text{m} \sim 4\text{m}$ となるように情報送信型ランドマークを 6 個設置する。カメラで観測可能な範囲を天頂角 $\theta=55^\circ$ と設定し、半径 2.7m に入る情報送信型ランドマークの個数によって、3 個の計測点 (Test Point, TP1~TP3, 床面からの高さ 0.90m) を設ける。周辺の情報送信型ランドマークの密度が最も高くなる箇所に TP1、観測可能範囲内に情報送信型ランドマークが 3 個入る箇所に TP2、2 個入る箇所に TP3 をそれぞれ設置する。各ランドマークのワールド座標と計測点のワールド座標を付録の表 x3, 表 x4 に示す。TP3 においては 2 個のランドマークから LM 法の初期値導出を行った結果を利用して直接 2 次位置・姿勢導出を行う。



(a) 実験環境 2 の計測点と LED 照明の配置

(a) Arrangement of test points and LED lights.



(b) 実験環境 2 の様子

(b) View of Environment 2.

(c) 実験環境 2 の拡大図

(c) Enlarged image of Environment 2.

図 16 実験環境 2

Figure 16 Environment 2.

3.7 実験結果

3.7.1 実験1：位置計測精度の実験

まず、図 17 に MP1～MP4 での最大測位誤差を示す。図 17 (a) は水平方向の誤差を表しており、最大誤差が一次位置・姿勢導出で 156mm、二次位置・姿勢導出で 56mm となった。また、図 17 (b)は垂直方向の誤差を表しており、最大誤差が一次位置・姿勢導出で 98mm、二次位置・姿勢導出で 33mm となった。どの計測点でも二次位置・姿勢導出の誤差は一次位置・姿勢導出結果よりも減少した。方位計測に関しては、二次位置・姿勢導出時で最大誤差が 3.4° であった。誤差の標準偏差は二次位置・姿勢導出時に、水平方向の距離で 4mm 以下、方位角では 0.05° 以下であった。

つぎに、図 18 (a), (b)に MP5～MP20 の一次位置・姿勢導出、二次位置・姿勢導出それぞれの結果を示す。水平方向の最大誤差が図 18 (a)で 223mm, (b)で 33mm となった。二次位置・姿勢導出時の最大方位誤差は 3.8° となった。図 18 (a)からは 20cm 四方の格子点の判別がやや困難であるが、(b)では格子点が明らかに判別できる。

つづいて、一次位置・姿勢導出と二次位置・姿勢導出で利用したランドマークの平均個数はそれぞれ 4.2 個、18.4 個であった。どの計測点でも一次位置・姿勢導出時に 4～5 個だったランドマーク数が ID 推定により、MP1～MP4 では 12～15 個、MP5～MP20 では 17～21 個にそれぞれ増加した。

二次位置・姿勢導出完了時点での処理時間は 220ms～560ms となった。ID 推定+二次位置姿勢導出の処理時間は 1ms～2ms であった。

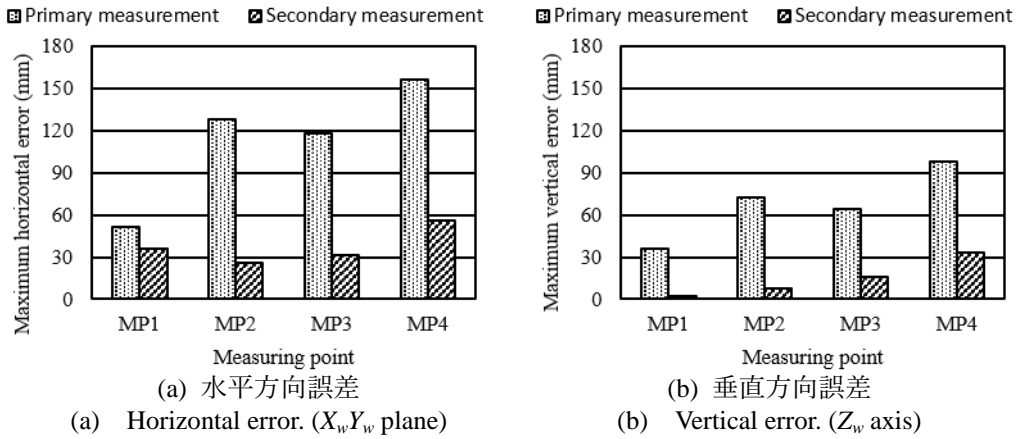


図 17 実験 1, MP1~MP4 での最大測位誤差
Figure 17 Maximum positioning errors at MP1-MP4, for experiment 1.

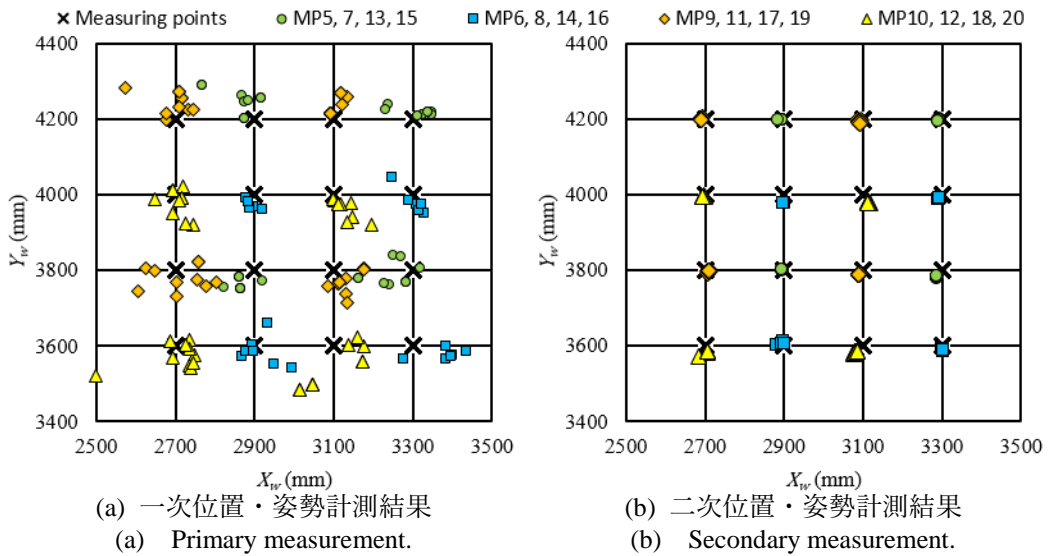


図 18 実験 1, MP5~MP20 での測位結果
Figure 18 Measurement results at MP5-MP20, for experiment 1.

3.7.2 実験 2：利用ランドマーク数による位置計測精度の実験

実験 1 で ID 推定後の二次位置・姿勢導出により精度が大幅に改善されることが分かった。その要因は計測に利用するランドマーク数の増加である。実験 2 では計測に利用するランドマーク数と誤差の関係を求めた。図 19 に位置計測に利用するランドマーク数に対する最大誤差と平均誤差の結果を示す。ランドマーク数が 5 以上で測位精度がほぼ 10cm 以内となり実用精度になることが確認できた。

3.7.3 実験 3：方位変化時の計測精度の実験

図 20 に計測点 MP5 でカメラの方位を変化させた場合の測位結果を示す。水平方向の最大誤差は方位角 $\gamma=45^\circ$ のときの 42mm，すべての方位角での標準偏差は 11mm であった。方位計測の誤差はいずれの場合も 4° 以内であった。

3.7.4 実験 4：手振れの影響の検証

図 21 にカメラを把持した状態での測位結果を示す。水平方向の最大誤差，平均誤差，標準偏差はそれぞれ 96mm，72mm，10mm であった。方位角の最大誤差，平均誤差，標準偏差はそれぞれ 8.9° ， 8.1° ， 0.54° であった。

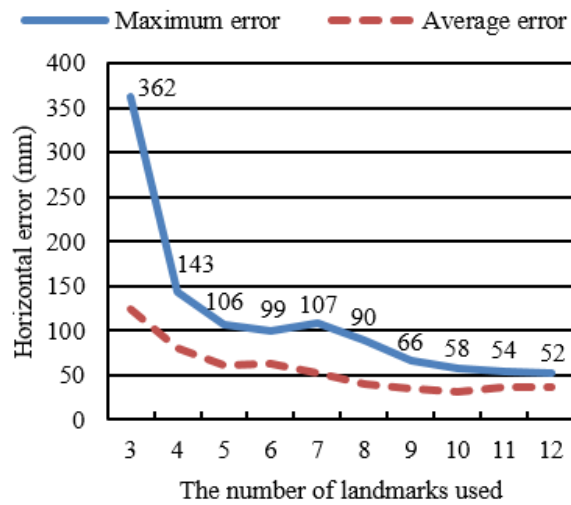


図 19 実験 2, ランドマーク数に対する水平方向誤差

Figure 19 Horizontal error for the number of landmarks used, for experiment 2.

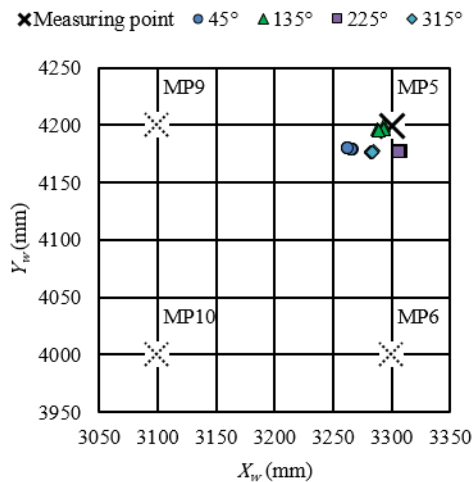


図 20 実験 3, 方位変化時の計測結果

Figure 20: Positioning results in various directions, for experiment 3.

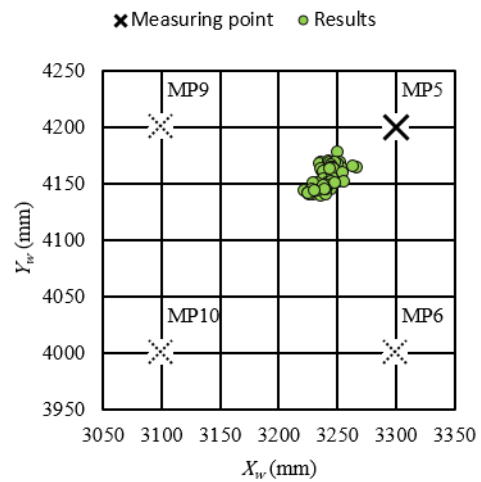


図 21 実験 4, 手振れによる影響

Figure 21: Positioning results, while holding the camera, for experiment 4.

3.7.5 実験 5：広域空間での実験

環境 2 における実験では、水平方向の測位誤差が、情報送信型ランドマークを 4 個利用した TP1 では 9mm, 3 個の TP2 では 17mm, 2 個の TP3 でも 30mm と環境 1 での実験と同程度の精度が得られた。カメラを中心として半径 2m の範囲に情報送信型ランドマークが 2 個以上存在すれば位置計測が可能であった。

3.8 考察

3.8.1 位置・方位計測精度

実験 1, 実験 3 とともに二次位置・姿勢導出での最大誤差が水平、垂直方向それぞれ 6cm 以内であることから、カメラの設置位置・方位によらず、ランドマークの数を増加させるための ID 推定により十分に高精度な位置計測が可能である。

実験 3 では、図 20 より、カメラの方位角を変化させた場合、方位によって標準偏差で 1cm 程度のばらつきが発生した。このばらつきの要因としてはカメラの設置位置の誤差、レンズの歪みの影響などが考えられる。

方位計測の最大誤差は今回の比較ではランドマーク数によらず 4° 以内となり、目標とする 10° 以内での方位計測が可能であった。

実験 2 では、位置計測精度は利用するランドマーク数に依存することが示された。図 19 より、5 個以上のランドマークを利用した場合、測位精度がほぼ 10cm 以内となっており、ID 推定による利用ランドマーク数の増加は測位精度向上に有効と考えられる。広範囲に配置したすべての計測点で誤差 10cm 以下の高精度位置計測が可能なることから、2.1 節で示した方式の条件③⑤を満足する。

本方式では解像度を考慮して画像中心に近いランドマークを選択したが、画像上のランドマークの位置(配置)によっても計測精度への影響は考えられる。GPS における DOP (Dilution Of Precision, 精度低下率) [30]のような指標を導入し、精度の低下が避けられない場合は他の手法との併用も検討する必要がある。

実験 5 では、さらに広い環境 2 で情報送信型ランドマークの設置密度が低い場合での実験を行った。その結果、情報送信型の設置個数が少ない場合でも高い精度が確認でき、非送信型照明器具の ID を推定する処理の有効性が示された。

3.8.2 計測時間

全処理時間は 220ms～560ms, ID 推定+二次位置・姿勢導出の処理時間は 1ms～2ms であり, ID 推定にかかる時間は全処理時間の 1%未満である. ID 推定を行うことで, 処理時間を増加させることなく高精度な位置計測が可能であることを確認した. その結果, いずれの計測点でも平均測位時間は 1 秒以下であり, 方式の条件④を満たすことができる. 1 サイクル当たりの処理時間 60ms に対して, 可視光通信時間を除いた, 画像処理や光源追跡処理は約 15ms (25%)と短いため, スマートフォンなどの携帯端末での処理に適した方式と考えられる. また, オプティカルフローによるランドマーク追跡によりカメラの姿勢変化によるぶれにも頑強であると考えられる.

3.8.3 手振れによる影響

実験 4 では, 水平方向の位置と方位角の標準偏差はカメラ固定時でそれぞれ 4mm, 0.05° となった一方, カメラを手で把持した場合はそれぞれ 10mm, 0.54° であった. このように, 手振れのある影響下でも位置計測が可能である. 2.1 節で述べた方式の条件②に関して, 本方式では進行方向を把握するために, 利用者がカメラを把持して能動的にポインティングを行う. このような手振れがある状態でも, 高い精度で位置計測可能であることが示された.

3.8.4 方式の条件

実験の結果, ランドマークの配置について, どの計測点からも直線状に並んでいない 3 個以上の ID 送信型ランドマークが見えること, 計測精度の観点で ID 非送信型も含めて 5 個以上のランドマークが見えるのが望ましいことが分かった. また, 本方式が 2.1 節に示した条件②～⑤を満たすことが実験で示された. さらに, 本方式は LED 照明を位置計測用ランドマークとして利用し, 景観への影響がないため条件①を満たす. そして, 完全に受動方式の VLC カメラを利用することで, 多人数で同時利用が可能であり条件⑥も満足する. 照明器具を情報送信型 LED に交換するだけでランドマークとして利用でき, ランドマークは通常の LED ダウンライトに 87mm×56mm×26mm のサイズの制御装置を追加するのみで利用可能である. さらに, ランドマーク設置時の許認可に関する費用が不要であることから低コストで導入可能であり, 条件⑦を満たす. よって, 本方式が屋内位置計測で必要となる 7 条件をすべて満たすことが示された.

3.9 まとめ

第3章では第2章で提案した手法の問題点を挙げ、それに対する解決法について述べた。具体的には、受信信号の順序を入れ替えることによる受信時間の低減、LM法で確実に最適解に収束させるための初期値の導出、信号受信時間を増加させることなく利用可能なランドマークを追加するためのID推定の3点である。

まず、ランドマークから同一のIDが繰り返し受信されることを利用して、受信波形をバッファ内部で入れ替える処理を行うことで受信時間の低減を行った。次に、カメラの光軸が上を向くようにして端末を把持するという条件から4変数の方程式を導き、直接それを解くことでLM法の初期値導出を行った。最後に、ID推定では、最小限の個数のランドマークからの一次位置・姿勢計測結果を利用して、受信処理を行わないランドマークに対してIDの追加割り当てを行った。

測位精度と処理時間が条件を満たすことを示すため、VLCカメラを手に持った状態で実環境での実験を行った。その結果、最低2個の情報送信型ランドマークが存在すれば、ID推定によってその他のランドマークを利用することで誤差3cm程度の高精度な測位が可能であった。処理時間に関しては、すべての測位処理にかかる時間が220ms～560msであるのに対しID推定にかかる時間は1%未満の1ms～2msであった。これらのことからID推定によって、全体の処理時間をほとんど増加させることなく高精度な位置計測が可能であることを確認した。第2章で述べた測位精度と処理時間を満たしているため、第3章で述べた処理を追加した本提案方式が屋内位置計測で必要となる7条件をすべて満たすことが示された。

第4章 総括

本論文では視覚障害者ナビゲーションを目的とした新しい測位方式を提案した。特に、地下街などの広大な屋内空間を対象とした測位方式においては、広範囲に多数配置したランドマークの検出と識別方法が課題である。そこで著者は可視光通信方式を利用して LED 照明からランドマークの識別 ID を送信する技術を採用した。

第1章では、現在の位置情報サービスの利用状況と屋内/屋外での位置計測技術の違いについて述べた。また、従来の屋内測位技術について、利用する通信方式ごとに分類し、それぞれの手法を歩行者ナビゲーションやロボット制御といった屋内での位置情報サービスに応用する際の問題点を詳述した。

第2章では屋内測位で必要と思われる7条件を設定し、条件を満足するためのシステム構成と測位手法について述べた。具体的には、利用者が携帯する計測端末には魚眼レンズを装着したカメラを装備し、1計測点で広範囲を撮影してできるだけ多数のランドマークを検出する。カメラには画像撮影機能に加えランドマークから送信される ID の受信機能を装備する VLC カメラを開発した。画像上の LED 像とあらかじめ計測した LED のワールド座標を関連付ける連立方程式を最小二乗法で解くことで VLC カメラの位置姿勢を求めることができる。天井の高さおよそ 3m での環境で VLC カメラを固定した状態で実験を行い、測位精度の面で有効な結果を得た。

次に、第3章について述べる。本論文で使用した VLC カメラは機能と処理時間を両立させるため、同時に取得できる ID 波形データが画像上の4点に制約されている。従って、画像上に窓からの外光などが存在する場合には判別対象となるランドマーク候補が増えることから、処理時間が大きくなる可能性があり、計測精度と処理時間の調整が必要となる。また、第2章に述べた方式では、画像上のランドマーク像座標と空間中のランドマーク座標とを対応付ける方程式の解を LM 法により求めているが、初期値の設定によっては最適解以外の局所解に収束する可能性が存在する。そこで、第3章ではまず、画像上でランドマーク像候補となる光点群から ID 受信対象を選択する方法と、広大な対象空間の中で LM 法の最適解に確実に収束させるための初期値計算を実現した。つぎに、同時に ID 受信できる点数が4点に制限されている中で最少4個のランドマークによる一次位置・姿勢導出を行い、さらに新たな ID を受信することなく多数のランドマークを利用し計測精度を向上で

きる ID 推定と二次位置・姿勢導出を組み合わせた解析方法を実現した。実験結果より、提案手法が計測精度と計測時間について条件を満足することを示した。VLC カメラの小型化の前段階としてノート PC を利用した計測端末を試作し、天井高約 3m の、広さの異なる 2 種類の実験環境で位置計測実験を行った。その結果、屋内位置計測で必要と思われる 7 個の条件をすべて満たすことが示された。

本方式は電波を利用しないため、関連の法的許可が不要で、既存の照明器具を情報送信型 LED 照明に交換するだけで構築できることが大きな特徴である。実用化の面からは、スマートフォンのカメラ前面に魚眼レンズアダプタを取り付けることにより天井画像を撮影することができる。また高速化の面では、高速イメージセンサを内蔵した視覚障害者向けの専用スマートフォン、もしくは通常のスマートフォンに小型の高速魚眼カメラユニットを外付けする形で利用可能と考えている。さらに本方式を携帯型端末に実装し音声案内と組み合わせることで、視覚障害者向けナビゲーションシステムの構築が期待できる。

前提条件としては、ランドマークとして利用する LED 照明の空間中の位置情報をあらかじめデータベースとして登録する作業が必要である。これは、位置情報が既知の数個のランドマークを元に、本提案手法で求めたカメラの位置から未知のランドマークの位置を逆算することが可能である。このようなランドマーク位置情報のデータベース作成コストを低減する手法を開発することで、さらに広域な環境への対応が容易になると考えられる。

今後の課題は、天井窓や吹き抜けが存在する環境への対応方法の検討ならびに、カメラを把持した場合のカメラの傾きと誤差の関係の調査が必要と考えられる。また、階段などの案内を必要とする箇所に照明器具がない場合も存在するため、BLE (Bluetooth Low Energy)による測位 [31]などを併用することでより高精度の案内が可能になると考えられる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，多くの方々から様々なご協力をいただきました．特に，指導教官である牧野秀夫教授には，学部時代から大学院修士課程・博士課程を通して非常に多くのご助言をいただき，深く感謝の意を表します．また，副査の山本正信教授，前田義信教授，西森健太郎准教授に深く感謝いたします．本研究の要であるカメラ画像による計測手法や実験における評価方法などについて，細にわたり終始適切なご助言をいただいた新潟大学名誉教授石井郁夫先生に感謝いたします．

そして，高速イメージセンサを使った試作機作製にご協力いただいたブレインビジョン株式会社代表取締役・市川道教氏に厚く御礼を申し上げます．

さらに，研究室の中村浩之君，織田健吾君，野田祥平君や，卒業生の小山拓巳君，澁谷祐太君，椎名俊憲君をはじめとする皆様との検討会などでの議論では多くの知識を得ることができました．また，計測実験においても多くの時間を割いて協力していただきました．研究室の皆様にも深く感謝申し上げます．

最後に，これまでサポートし見守ってくれた両親に心より感謝いたします．本当にありがとうございました．

平成 28 年 3 月

中澤 陽平

参考文献

- [1] A. Kupper, *Location-Based Services : Fundamentals and Operation*, Wiley, 2005.
- [2] 財団法人 ニューメディア開発協会, 屋内測位普及発展に関する調査研究, 東京: 屋内測位調査研究事業コンソーシアム, 2009.
- [3] 国土交通省国土地理院, "第6次基本測量長期計画," pp. 7-8, 2004.
- [4] K. W. Kolodziej and J. Hjelm, *Local Positioning Systems: LBS Applications and Services*, CRC Press, 2006.
- [5] R. Feliz, E. Zalama and J. G. García-Bermejo, "Pedestrian tracking using inertial sensors," *JOURNAL OF PHYSICAL AGENTS*, vol. 3, no. 1, pp. 35-43, Jan. 2009.
- [6] 興梠正克, 石川智也, 蔵田武志, "歩行者デッドレコニングに基づくハンドヘルド端末の屋内外測位技術," *電子情報通信学会技術研究報告. MVE, マルチメディア・仮想環境基礎*, vol. 110, no. 382, pp. 171-176, Jan. 2011.
- [7] 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・航法の新技術," *電子情報通信学会誌*, vol. 95, no. 2, pp. 119-124, Feb. 2012.
- [8] O. Ogundipe, "Passive RFID Indoor Localisation to Aid the Blind," in *Proceedings of the 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN'12)*, 2012.
- [9] 辻宏之, "アレーアンテナを用いた屋内外の無線局位置推定の実験的検証," *電子情報通信学会論文誌. B*, Vols. J90-B, no. 9, pp. 784-796, Sep. 2007.
- [10] 水垣健一, "UWB-IR 無線方式による屋内位置検知," *電子情報通信学会誌*, vol. 92, no. 4, pp. 256-261, 4 2009.
- [11] F. Hoflinger, R. Zhang, J. Hoppe, J. Wendeberg, and M. Buhner, "Acoustic Self-calibrating System for Indoor Smartphone Tracking (ASSIST)," *Proceedings of the 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN'12)*, 2012.
- [12] 秋山征己, 須永光, 五百蔵重典, 田中博, "超音波センサを用いた広域屋内測位システムの構成と検証実験," *測位航法学会論文誌*, vol. 3, no. 1, pp. 1-8, 2012.
- [13] B. Sohn, J. Lee, H. Chae and W. Yu, "Localization system for mobile robot using wireless communication with IR landmark," *RoboComm '07 Proceedings of the 1st international conference on Robot communication and coordination*, vol. 6, pp. 61-66, 2007.
- [14] 横地裕次, 池田聖, 佐藤智和, 横矢直和, "特徴点追跡と GPS 測位に基づくカメラ外部パラメータの推定," *情報処理学会論文誌. コンピュータビジョンとイメージメディア*, vol. 47, no. SIG_5(CVIM_13), pp. 69-79, Mar. 2006.
- [15] 中里祐介, 神原誠之, 横矢直和, "再帰性反射マーカと赤外線カメラを用いたユーザの位置姿勢同定," *電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解*, vol. 104, no. 193, pp. 25-28, Jul. 2004.
- [16] 水谷仁, マルティネスモゾスオスカル, 倉爪亮, 岩下友美, 長谷川勉, "RGB-D カメラ

- を用いた屋内環境のカテゴリ識別," 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2012), Aug. 2012.
- [17] 中川正雄, 可視光通信の世界〜LED で拓く「あかりコミュニケーション」, 可視光通信コンソーシアム, 東京: 株式会社工業調査会, 2006.
- [18] 春山真一郎, "可視光通信," 電子情報通信学会誌, vol. 94, no. 12, pp. 1055-1059, Dec. 2011.
- [19] X. Liu, H. Makino, S. Kobayashi, and Y. Maeda, "Research of Practical Indoor Guidance Platform Using Fluorescent Light Communication," 電子情報通信学会論文誌, Vols. E91-B, no. 11, 2008.
- [20] X. Liu, H. Makino, and K. Mase, "Improved Indoor Location Estimation Using Fluorescent Light Communication System with a Nine-Channel Receiver," 電子情報通信学会論文誌, Vols. E93-B, no. 11, 2010.
- [21] 松下伸行, 日原大輔, 後輝行, 吉村真一, 暦本純一, "ID Cam: シーンと ID を同時に取得可能なスマートカメラ," 情報処理学会論文誌, vol. 43, no. 12, pp. 3664-3674, Dec. 2002.
- [22] 渡辺哲也, 視覚障害者の携帯電話・スマートフォン・タブレット・パソコン利用状況調査 2013, 新潟: 電気通信普及財団, 2014.
- [23] A. 標準化委員会, JEITA CP-1223 可視光ビーコンシステム, 東京: (社) 電子情報技術産業協会, 2013.
- [24] M. Yoshino, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor," *Radio and Wireless Symposium, 2008 IEEE*, pp. 439-442, 2008.
- [25] A. 標準化委員会, JAITA CP-1222 可視光 ID システム, 東京: (社) 電子情報技術産業協会, 2007.
- [26] 駒形英樹, 石井郁夫, 高橋章, 若月大輔, 今井博英, "魚眼カメラ内部パラメータの幾何学的キャリブレーション法," 電子情報通信学会論文誌(D-II), Vols. J89-D, no. 1, pp. 64-73, Jan. 2006.
- [27] 駒形英樹, 石井郁夫, 牧野秀夫, 高橋章, 若月大輔, "輝度傾斜パターンを用いた魚眼カメラ内部パラメータの校正," 電子情報通信学会論文誌(D), Vols. J93-D, no. 5, pp. 621-631, May. 2010.
- [28] D. W. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters," *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 11, no. 2, pp. 431-441, Jun. 1963.
- [29] opencv dev team, "Motion Analysis and Object Tracking," 11 1 2016. [Online]. Available: http://docs.opencv.org/2.4/modules/video/doc/motion_analysis_and_object_tracking.html.
- [30] R. B. Langley, "Dilution of Precision," *GPS World*, 1999.
- [31] 佐々木和志, 中野亨, 若月大輔, 小林真, 西森健太郎, 牧野秀夫, "視覚障害者歩行案内のための BLE ビーコン基本特性," 電子情報通信学会福祉情報工学研究会 2015, Vols. IEICE-115, no. 100, pp. IEICE-6, Jun. 2015.

著者の論文

- [A1] 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.J99-D, No.2, pp.165-177, 2016.

国際会議(査読あり)

- [B1] Y. Nakazawa, H. Makino, K. Nishimori, D. Wakatsuki and H. Komagata, “High-Speed, Fish-Eye Lens-Equipped Camera Based Indoor Positioning Using Visible Light Communication,” in Proceedings of the 2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN’15), 13-16 October 2015, Banff, Alberta, Canada.
- [B2] Y. Nakazawa, H. Makino, K. Nishimori, D. Wakatsuki and H. Komagata, “LED-Tracking and ID-Estimation for Indoor Positioning using Visible Light Communication,” in Proceedings of the 2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN’14), 27-30 October 2014, Busan, Korea, DOI: 10.1109/IPIN.2014.7275471.
- [B3] Y. Nakazawa, H. Makino, K. Nishimori, D. Wakatsuki and H. Komagata, "Indoor positioning using a high-speed, fish-eye lens-equipped camera in visible light communication," in Proceedings of the 2013 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN’13), 28-31 October 2013, Montbeliard-Belfort, France, DOI: 10.1109/IPIN.2013.6817855.

学会発表等

- [C1] 中澤陽平, 渋谷祐太, 小林真, 若月大輔, 西森健太郎, 牧野秀夫, “高速魚眼カメラによる可視光信号復号方法,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-19-58, p.602, 岐阜大学, 2013 年 3 月.
- [C2] 中澤陽平, 渋谷祐太, 小林真, 若月大輔, 牧野秀夫, “高速度魚眼カメラによる可視光通信用受光器,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-19-41, p.664, 岡山大学, 2012 年 3 月.
- [C3] 中澤陽平, 牧野秀夫, 水口雄介, 西森健太郎, 小林真, 若月大輔, “高速イメージセンサと魚眼カメラを用いた可視光受信器,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-20-10, p.605, 東京都市大学, 2011 年 3 月.
- [C4] 牧野秀夫, 中澤陽平, 小山拓巳, 若槻裕太, 渋谷祐太, 椎名俊憲, 吉井孝侑, 野田祥平, 中村浩之, “可視光通信と GPS による高精度屋内外案内システム,” Geo アクティビティフェスタ 2013 最優秀賞, 2013 年 11 月.
- [C5] 牧野秀夫, 中澤陽平, 佐々木和志, 西森健太郎, 若月大輔, 小林真, 小出富夫, “可視光通信と照度センサを用いた屋内音声案内装置,” 電子情報通信学会 HCG シンポジウム 2014, 2014 年 12 月.

付録

表 x1 環境 1 の計測点のワールド座標

Table x1 World coordinates of measuring points of Environment 1.

計測点	World coordinates $P_w (x_w, y_w, z_w)$		
	x_w	y_w	z_w
MP1	4800	6600	1300
MP2	4800	1800	1300
MP3	1800	6600	1300
MP4	1800	1800	1300
MP5	3300	4200	1300
MP6	3300	4000	1300
MP7	3300	3800	1300
MP8	3300	3600	1300
MP9	3100	4200	1300
MP10	3100	4000	1300
MP11	3100	3800	1300
MP12	3100	3600	1300
MP13	2900	4200	1300
MP14	2900	4000	1300
MP15	2900	3800	1300
MP16	2900	3600	1300
MP17	2700	4200	1300
MP18	2700	4000	1300
MP19	2700	3800	1300
MP20	2700	3600	1300

表 x2 環境 1 のランドマーク ID-
ワールド座標対応表

Table x2 Correspondence between IDs and world coordinates of landmarks, Environment 1.

ID	World coordinates $P_w (x_w, y_w, z_w)$		
	x_w	y_w	z_w
#2	5510	3000	2820
#3	5510	4200	2820
#4	4350	0	2820
#5	3300	0	2820
#6	5510	5400	2820
#7	4350	6600	2820
#8	4350	1800	2820
#9	0	4800	2820
#10	2250	6600	2820
#11	3300	1800	2820
#12	3300	7500	2820
#13	2175	4500	3140
#14	0	6000	2820
#15	2175	3300	3140
#16	4425	3300	3140
#17	2175	5100	3140
#18	4425	5100	3140
#19	2250	1800	2820
#20	1800	7500	2820
#21	4800	7500	2820
#22	4425	4500	3140
#23	2175	3900	3140
#24	4425	3900	3140
#25	3300	6600	2820

表 x3 環境 2, 計測点のワールド座標
Table x3 World coordinates of measuring points of Environment 2.

計測点	World coordinates $P_w(x_w, y_w, z_w)$		
	x_w	y_w	z_w
TP1	6200	5700	900
TP2	4200	5700	900
TP3	2200	5700	900

表 x4 環境 2 のランドマーク ID-ワールド座標対応表

Table x4 Correspondence between IDs and
world coordinates of landmarks, Environment 2.

ID	World coordinates $P_w(x_w, y_w, z_w)$ (mm)		
	x_w	y_w	z_w
#1	4500	4200	2800
#2	5700	5400	2800
#3	6900	6600	2800
#4	5700	3000	2800
#5	6900	4200	2800
#6	8100	5400	2800
#7	6900	1800	2800
#8	8100	3000	2800
#9	9300	4200	2800
#10	3750	4200	2800
#11	3940	5277	2800
#12	4487	6225	2800
#13	5325	6928	2800
#14	6353	7302	2800
#15	7447	7302	2800
#16	8475	6928	2800
#17	9313	6225	2800
#18	9860	5277	2800
#19	10050	4200	2800
#20	9860	3123	2800
#21	9313	2175	2800
#22	8475	1472	2800
#23	7447	1098	2800
#24	6353	1098	2800
#25	5325	1472	2800
#26	4487	2175	2800
#27	3940	3123	2800
#28	0	0	2800
#29	0	5700	2800
#30	0	7200	2800
#31	0	9000	2800
#32	1800	0	2800
#33	1800	1200	2800
#34	1800	2700	2800
#35	1800	4200	2800
#36	1800	5700	2800

ID	World coordinates $P_w(x_w, y_w, z_w)$ (mm)		
	x_w	y_w	z_w
#37	1800	7200	2800
#38	1800	9000	2800
#39	3900	0	2800
#40	3900	1200	2800
#41	3300	2700	2800
#42	3300	5700	2800
#43	3900	7200	2800
#44	3900	9000	2800
#45	5700	0	2800
#46	5700	9000	2800
#47	7800	0	2800
#48	7800	9000	2800
#49	9900	0	2800
#50	9900	1200	2800
#51	9900	7200	2800
#52	9900	9000	2800
#53	12000	0	2800
#54	11400	1200	2800
#55	12000	4200	2800
#56	12000	5700	2800
#57	12000	7200	2800
#58	12000	9000	2800
#59	13800	0	2800
#60	14700	2700	2800
#61	13800	4200	2800
#62	13800	5700	2800
#63	13800	7200	2800
#64	13800	9000	2800
#65	15900	0	2800
#66	15600	1200	2800
#67	16200	2400	2800
#68	15900	4200	2800
#69	15900	5700	2800
#70	15900	7200	2800
#71	15900	9000	2800