

スマートフォン環境光センサを用いた可視光測位の提案

佐藤 拓斗^{1,a)} 嶋田 祥太^{1,b)} 村上 弘晃^{1,c)} 渡邊 拓貴^{1,d)} 橋爪 宏達^{2,e)} 杉本 雅則^{1,f)}

受付日 2020年9月9日, 採録日 2021年1月12日

概要: 本稿では, スマートフォン搭載の環境光センサを受信機として利用するスマートフォンのための可視光測位手法について述べる. 提案手法では, 環境光センサのサンプリングにより欠損もしくは不等間隔となるデータを欠損のない等間隔データに補正し, フーリエ解析を用いて周波数に紐づけられた LED 照明が発光する送信信号を識別する. また, 各信号の受信強度を測定することで LED 照明との距離を求め, 3 辺測量の原理によりスマートフォンの位置を推定する. 複数の LED 照明から送信される信号をスマートフォン環境光センサで受信し, スマートフォン環境光センサの受信性能および測位性能について評価実験を行った. 1 m 四方で配置された 4 つの LED 照明下で実施した測位実験では, 90th-percentile での測位誤差が 0.25 m 未満であることを確認した.

キーワード: 可視光測位, 受信信号強度, 屋内位置認識, 環境光センサ, スマートフォン

Visible Light Positioning Using Smartphone Ambient Light Sensor

TAKUTO SATO^{1,a)} SHOTA SHIMADA^{1,b)} HIROAKI MURAKAMI^{1,c)} HIROKI WATANABE^{1,d)}
HIROMICHI HASHIZUME^{2,e)} MASANORI SUGIMOTO^{1,f)}

Received: September 9, 2020, Accepted: January 12, 2021

Abstract: We describe a visible light positioning (VLP) method using a smartphone ambient light sensor (ALS) as a VLP receiver. We correct missing or non-uniformity interval data captured by the ALS, and then identify the transmitted signals emitted from different LED lights associated with the frequency by Fourier analysis. In addition, smartphone localization is conducted by the principle of trilateration using the distance to LED lights calculated by measuring their received signal strength. Experiments using multiple LED lights are conducted to evaluate the signal reception and positioning performance of the smartphone ALS. We confirmed that the 90th-percentile positioning error is less than 0.25 m in the room under 4 LED lights arranged in 1 m square.

Keywords: visible light positioning, received signal strength, indoor localization, ambient light sensor, smartphone

1. はじめに

LED 照明を利用する可視光通信 (Visible Light Commu-

nication: VLC) [1], [2] は, LED の普及, 低価格化にとともに注目され始めた. その応用の 1 つである可視光位置認識 (Visible Light Positioning: VLP) は, 従来の無線通信ベースの位置認識技術と同等以上の測位性能および既存設備を用いた実装の容易性などにより, 屋内における新たな位置認識技術として注目されており, 国際標準化も検討されている [3].

VLC ならびに VLP 利用環境では, 基本的には照明装置としての利用が第一義的であり, 人がちらつき (フリッカ) を知覚しにくい 70 Hz 以上の周波数 (以降, F_{70} と呼称) で変調された信号を用いる必要がある [4]. 異なる周波数を割

¹ 北海道大学大学院情報科学院情報科学専攻情報理工学コース
Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido 060-0814, Japan

² 国立情報学研究所
National Institute of Informatics, Chiyoda, Tokyo 101-8430, Japan

a) tsato@ist.hokudai.ac.jp

b) shimadas@eis.hokudai.ac.jp

c) hmurakami@ist.hokudai.ac.jp

d) hiroki.watanabe@ist.hokudai.ac.jp

e) has@nii.ac.jp

f) sugi@ist.hokudai.ac.jp

り当てられた照明装置からの送信信号を受信機で受信することで、各々の装置を識別することが求められる。今日のVLPシステムでは、動画カメラや高時間分解能が実現可能な光センサなどを受信機として利用する。しかし、スマートフォンを受信機として利用するVLPシステムを構築する場合、スマートフォン搭載のカメラでは消費電力が高くなること、高速に動作するフォトダイオード (Photodiode: PD) を別途装着する必要があることなど、実用化に向けて有効的な技術が確立していないことが課題である [5]。

その解決策の1つとして、環境光センサ (Ambient Light Sensor: ALS) の利用が考えられる。ALSは従来受信機である動画カメラおよび高速に動作するPDよりも消費電力が非常に小さく、また、画面の明るさ自動調整を目的としてスマートフォンに広く普及している光センサである。したがって、ALSをVLPシステムの受信機として利用することで、スマートフォンを用いたVLPシステムの低消費電力化が期待できる。しかし、ALSはサンプリング周波数が低い場合一般的にはVLPの受信機としては用いられていない。さらに、スマートフォンに実装されるALS (以降、スマートフォンALSと呼称) は各スマートフォンの制御で不安定なサンプリングになるなどの問題により、受信機としての研究が十分には行われていないのが現状である。

そこで我々は、LED照明が送信する信号をスマートフォンALSで受信し、その受信信号強度 (Received Signal Strength: RSS) を利用した可視光測位を提案する。はじめに、スマートフォンALSによるサンプリングにより欠損もしくは不等間隔となるデータを欠損のない等間隔データに補正する。次に低サンプリングの結果、エイリアシングの影響を受ける周波数解析結果から周波数に紐づけられたLED照明を識別する。各周波数のRSSからLED照明との距離を計算し、3辺測量の原理によりスマートフォンの位置を推定する。我々は、複数のスマートフォンALSのサンプリング動作を調査し、そのサンプリング値を補正する2種の欠損補間手法と等間隔補正手法を提案する。LED照明が送信する信号をスマートフォンALSを用いて受信した評価実験では、提案する2種の欠損補間手法および等間隔補正手法の有効性を確認し、受信信号のSN比を計測することでスマートフォンALSの受信性能を評価した。LED照明の配置間隔を変更した複数の環境下においてスマートフォンALSを用いて測位実験を行った。1m四方で配置されたLED照明下で行った実験では、90th-percentile測位誤差0.25m未満を達成した。加えて、測位誤差に対するスマートフォンALSのサンプリング動作の影響を明らかにし、スマートフォンALSを用いた屋内測位について議論した。

本稿の貢献は下記の3点である。

- 複数のLED照明から送信される信号をスマートフォンALSで受信し、そのRSSを利用することによる2

次元測位システムの提案と実装

- スマートフォンALSのサンプリングによる欠損もしくは不等間隔となるデータの欠損のない等間隔データへの補正、および周波数エイリアシングを活用したフーリエ解析によるLED照明の識別手法の提案
- スマートフォンALSを用いた可視光測位システムの実世界での評価

2. 関連研究

スマートフォンを対象としたVLPの先行研究では、受信機に動画カメラを用いる方法と光センサを用いる方法の2種類に大別される [5], [6]。先行研究の主流である動画カメラを用いる方法では、モバイルデバイスに搭載されている動画カメラのローリングシャッター効果 [7], [8] によりサブメートルレベルの精度で位置認識を行うことができる [9], [10]。しかし、動画カメラによる撮影は高い消費電力を必要とする点が問題となる。光センサを用いる方法では、PDを用いて到来時間差 (Time Difference of Arrival: TDoA) やRSSを利用して位置認識を行うが [11], [12]、高い時間分解能を実現可能なPDを必要とするため、スマートフォンに追加でPDを実装する必要がある。したがって、従来受信機ではスマートフォンを用いたVLPシステムの長時間運用が難しいため、実用的な受信機が確立していないことが課題である。

動画カメラおよび高速に動作するPDよりも消費電力が小さく、スマートフォンに広く普及しているALSを用いた先行研究が、少数ではあるが存在する。ALS-P [13] は、ALSを用いて2種のサンプリングレートから得られるエイリアス周波数により照明装置を特定し、RSSを利用して測位する。1.5m × 1.2mの環境に4つのLEDを取り付け、90th-percentileの誤差0.25mを達成している。NALoc [14] では、ALSの非線形性を活用し、2つの異なる周波数で変調される送信信号からビート信号を検出して照明装置を特定し、RSSを利用して測位する。1.5m間隔で直線状に5つのLEDを取り付け、90th-percentileの誤差0.35mを達成している。これらの先行研究は、スマートフォンに搭載された状態のALSを使用していない。ALSのサンプリング動作をマイコンボード上で制御し、そのサンプリング周波数は100Hz程度で設定している。我々の調査では、スマートフォンのオペレーティングシステム上でのALSのサンプリング動作の制御は困難であり、サンプリング周波数はたかだか18Hz程度であることを確認している。したがって、先行研究の提案手法をスマートフォン上に実装することは困難であり、これらの先行研究は現実的な利用状況を想定したVLPシステムとはいえない。また、スマートフォンALSを用いた位置情報サービスに関する研究 [15], [16] や、知的照明システムに関する研究 [17]、ジェスチャ認識に関する研究 [18] が行われているが、VLPシ

システムの単独の受信機として実現した例は筆者らの知る限りでは存在しない。次章からは、スマートフォンに搭載された ALS を受信機として用いた可視光測位手法について述べる。

3. スマートフォン ALS の概要

本稿では、LED 照明が送信する信号をスマートフォン ALS で受信し、フーリエ解析を用いて周波数に紐づけられた複数の LED 照明を識別する。また、各信号の RSS を計測してスマートフォンの位置を計算する。本章では、はじめにスマートフォン ALS の動作について説明し、VLP システムの受信機におけるスマートフォン ALS の問題点を指摘する。

3.1 周波数フィルタとしてのスマートフォン ALS

スマートフォン ALS は、内部の受光セルにより周囲の環境光のレベルを測定する光センサの 1 種である。光のない暗闇や多数の照明が配置されている屋内などの様々な環境において、人の目に適した液晶画面の明るさを自動的に調節するために、スマートフォン ALS は今日のスマートフォンに広く実装されている (図 1)。スマートフォン ALS の最大の特徴は低消費電力であり、最大消費電力が 1mW と動画カメラの 2,000mW、高速に動作する PD の 150mW に比べて非常に低い [14]。よって、スマートフォン ALS を用いることによりバッテリー効率の優れたアプリケーション開発が期待される。

スマートフォン ALS は送信信号を内部の受光セルで受光および A/D 変換し、時間長 T_s における積分値を出力する。したがって、送信信号 $s(t)$ の基本周波数を $1/(nT_s)$ とすれば、スマートフォン ALS の出力 $r(\delta)$ は

$$r(\delta) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s(t + \delta nT_s) dt \quad (1)$$

である。 δ は送信信号に対するスマートフォン ALS クロックの遅延時間比である。 $s(t)$ および $r(\delta)$ の k 次のフーリエ係数をそれぞれ S_k 、 R_k とすると、

$$S_k = \frac{1}{nT_s} \int_0^{nT_s} s(t) e^{-j2k\pi t/nT_s} dt \quad (2)$$

$$R_k = \int_0^1 r(\delta) e^{-j2k\pi\delta} d\delta = S_k e^{jk\pi/n} \text{sinc}(k\pi/n) \quad (3)$$

したがってスマートフォン ALS のサンプリング周波数を $f_s = 1/T_s$ とすると、その受信信号は、周波数 $f_k = k/(nT_s) = (k/n)f_s$ の送信信号の入力に対して伝達関数 $H(f_k)$ を持つ周波数フィルタの出力となる。

$$\begin{aligned} H(f_k) &= \frac{R_k}{S_k} = e^{jk\pi/n} \text{sinc}(k\pi/n) \\ &= e^{jf_k\pi/f_s} \text{sinc}(f_k\pi/f_s) \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 $\text{sinc } x = \frac{\sin x}{x}$ である。

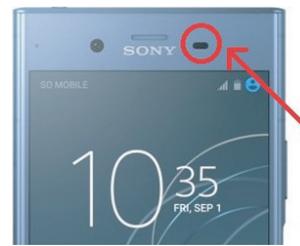


図 1 スマートフォン ALS の例

Fig. 1 An example of a smartphone ALS.

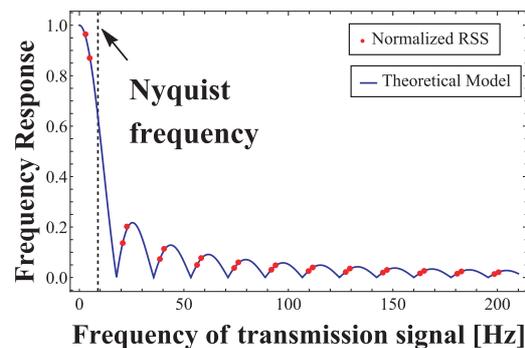


図 2 受信信号強度と周波数応答の理論モデル

Fig. 2 RSS and the theoretical model of frequency response.

図 2 は、異なる周波数の送信信号を Sony Xperia XZ1 搭載のスマートフォン ALS で受信した際の、RSS の周波数応答モデル (式 (4)) と正規化した実際の RSS である。図 2 より、スマートフォン ALS で得られた RSS が理論モデルに従って減衰することが分かる。また、送信信号の周波数が周波数エイリアシングの影響を受けて折り返すナイキスト周波数以上である場合も、その RSS は送信信号の元の周波数応答に従うことが分かる。たとえば、200.519 Hz の送信信号は周波数エイリアシングの影響により 4.939 Hz として解析できるが、その RSS は 200.519 Hz の周波数応答に従う。周波数エイリアシングの詳細は 4.1 節で後述する。

4 台のスマートフォン ALS を用いて行った我々の調査では、スマートフォン ALS の受光特性が式 (4) に従うことを確認している。4 章で説明する提案手法では、式 (4) に従う受光特性を持つスマートフォン ALS を対象として、スマートフォン ALS を用いた VLP システムを構築する。提案手法では信号の RSS を用いた測位手法によりスマートフォンの位置を推定する。したがって、送信信号の周波数に応じて各振幅を $|H(f_k)|$ の逆数で校正し、図 2 に示す周波数フィルタの影響を軽減させる。

3.2 スマートフォン ALS の特性調査

3.2.1 サンプリング動作の調査

スマートフォン ALS は各スマートフォンオペレーティングシステムの制御により非常に低いサンプリング周波数に制限され、ユーザアプリケーション上で任意のタイミ

表 1 スマートフォン ALS のサンプリング動作

Table 1 Examples of smartphone ALS sampling operations.

Smartphone	Estimated sampling frequency [Hz]	Operation
Xperia XZ1	17.78	欠損値のある等間隔サンプリング, F_{70} で変調する照明光の変化を検知できる
Galaxy S10+	16.67 より小	欠損値のない不等間隔サンプリング, F_{70} で変調する照明光の変化を検知できる
Google PIXEL4	9.78	欠損値のある等間隔サンプリング, F_{70} で変調する照明光の変化を検知できない
ASUS ZenFone3	8.20	欠損値のある等間隔サンプリング, F_{70} で変調する照明光の変化を検知できない

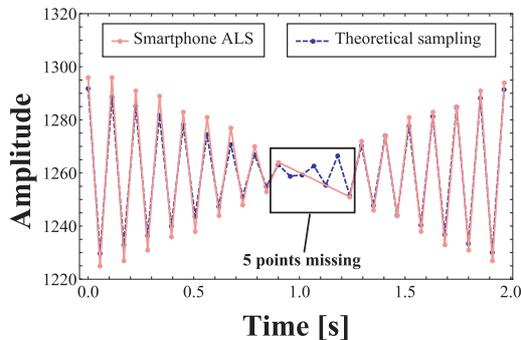


図 3 スマートフォン ALS のサンプリングによるデータの欠損

Fig. 3 Missing data by smartphone ALS sampling.

ングで任意の値に変更することができないことを、4 台のスマートフォンを用いて確認している。そこで我々はさらに、スマートフォン ALS のサンプリング動作について調査するため、LED 照明からの送信信号の周波数を細かく変化させてスマートフォン ALS で受信する実験を行った。また、1 Hz の送信信号を 1,000 周期計測することでスマートフォン ALS のサンプリング周波数を 0.01 Hz の単位まで推定した。なお、サンプリング周波数の推定には Android Sensor API [19] が提供するミリ秒単位で正確なタイムスタンプを利用している。これらの結果を表 1 で示す。サンプリングレートが実装機種に依存することを確認した。また、一般的なスマートフォン ALS について、サンプリングに欠損が発生するデバイスと、数 Hz~数十 Hz でサンプリング周波数が変化する不等間隔サンプリングを行うデバイスが存在することが確認された。

3.2.2 スマートフォン ALS の欠損動作

3.2.1 項で確認したスマートフォン ALS の欠損動作について調査した。図 3 は、204.58 Hz の送信信号を 17.78 Hz で欠損のない等間隔サンプリングを行うシミュレーションモデルと約 17.78 Hz で欠損のある等間隔サンプリングを行うスマートフォン ALS のサンプリングデータである。スマートフォン ALS によるサンプリングデータが約 1 秒間で 5 点欠損していることが分かるが、これは信号強度の変化量がスマートフォン ALS の分解能よりも小さいため、スマートフォン ALS が光の変化を検出できず、その場合、スマートフォン ALS のサンプリングデータが欠損になると推測される。

本節で述べたスマートフォン ALS のサンプリング動作

を以下にまとめる。我々はユーザアプリケーションから確認できる下記の制約において提案手法を展開し、スマートフォン ALS を用いた VLP システムを構築する。

- ユーザアプリケーション上でのサンプリング動作の制御は不可能であり、非常に低いサンプリング周波数に制限される。
- サンプリングに欠損が発生する機種が存在する。
- サンプリングが不等間隔となる機種が存在する。

したがって、欠損がない等間隔サンプリングを前提とする通常のフーリエ解析では受信信号の周波数を正しく求めることが困難である。

4. 提案手法

提案手法の概要を図 4 に、処理の流れを図 5 に示す。目標はスマートフォン位置 P_S の座標を求めることである。天井に配置された複数の LED 照明は点減周波数を ID として発光し、これをスマートフォン ALS で受光する。3.2 節で述べたスマートフォン ALS によるサンプリングデータに対して提案する欠損補間手法ならびに等間隔補正手法を適用し、欠損のない等間隔データに補正する。次に、スマートフォン ALS による受信信号を離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform: DFT) により解析することで、周波数に紐づけられた LED 照明光を識別し、各周波数の RSS を利用した測位手法によりスマートフォンの座標を求める。

4.1 周波数エイリアシング

VLP システムでは、人がフリッカを知覚しにくい F_{70} で変調する照明光を受信機で受信する必要があるが、3.2 節で述べたとおりスマートフォン ALS のサンプリング周波数はたかだか 18 Hz 程度 (たとえば、表 1 の Sony Xperia XZ1) である。そのため、サンプリング定理よりスマートフォン ALS では F_{70} で変調された照明光を復調できない。そこで、提案手法では周波数エイリアシングを活用することで、送信信号の周波数を解析し LED 照明光を識別する。

受信信号をサブナイキスト周波数でサンプリングした場合、DFT で得られる信号周波数は、下記に示す式に従って折り返される (エイリアシング)。

$$f_a = \min(f_o - (A - 1)f_s, Af_s - f_o) \tag{5}$$

式 (5) は、送信信号の周波数 f_o がサンプリング周波数 f_s

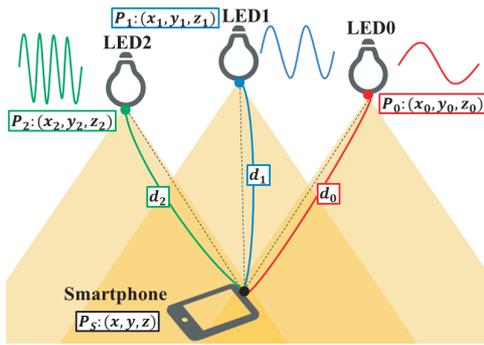


図 4 提案手法の処理の概要
Fig. 4 Overview of the proposed method.

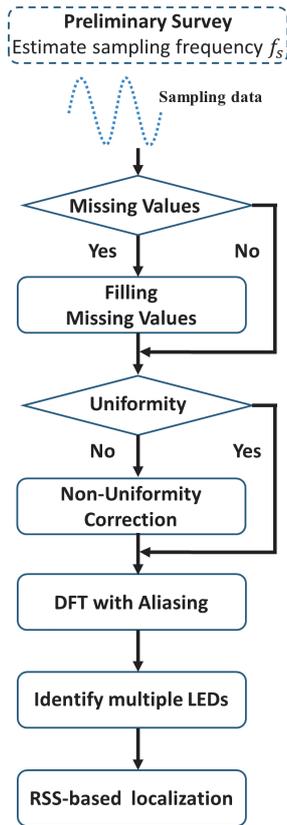


図 5 提案手法の処理の流れ
Fig. 5 Processing flow of the proposed method.

によってエイリアス周波数 f_a の信号として解析できることを示している。 A は $Af_s - f_0 \geq 0$ とする最小の自然数である。 図 6 は 200.519 Hz の送信信号を、サンプリング周波数 17.78 Hz のスマートフォン ALS で受信した波形 (図 6(a)) と、その周波数スペクトル (図 6(b)) である。 周波数エイリアシングにより、 $200.519 - 11 \times 17.78 = 4.939$ Hz の信号として解析できることが分かる。 したがって、LED 照明と紐づけられた周波数を事前に取得していれば、エイリアス周波数を解析することで各々の LED 照明を識別することができる。

4.2 欠損補間手法

3.2.2 項の結果から、欠損したサンプリング値を補間す

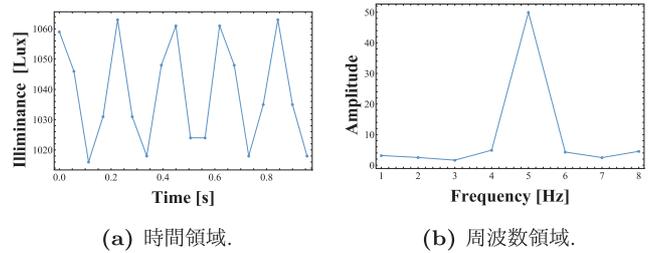


図 6 周波数エイリアシングの例: 200.519 Hz の送信信号が 4.939 Hz の信号として解析される
Fig. 6 Examples of frequency aliasing: a 200.519 Hz transmitted signal is analyzed as a 4.939 Hz signal: (a) time domain, (b) frequency domain.

る 2 種の欠損補間手法を提案する。 その周波数解析精度に対する影響を実験で比較し (5.2 節), より影響が小さい欠損補間手法を 5.5 節で後述する測位実験に採用する。

4.2.1 欠損前 0 次補間

3.2.2 項では、信号強度の変化量がスマートフォン ALS の解像度を越えた場合、光の変化を検出できずサンプリングデータに欠損が発生することを確認した。 したがって、サンプリングデータに欠損が発生した場合、欠損前のサンプリング値で欠損区間を補間する。

4.2.2 3 次スプライン補間

データ全体を 3 次スプライン補間によって滑らかな曲線に近似し欠損区間を補間することで、欠損値を再現することを試みる。 サンプリングレートに依る i 番目のサンプルの時刻を t_i , 値を r_i とする。 このとき、 (t_i, r_i) のフォーマットで与えられる欠損のある N 個のデータ $(t_0, r_0), (t_1, r_1), \dots, (t_{N-2}, r_{N-2}), (t_{N-1}, r_{N-1})$ ($0 \leq i \leq N-1$) を $N-1$ 個の区間でそれぞれ 3 次多項式に近似する。

4.3 等間隔補正手法

スマートフォン ALS のサンプリングが不等間隔である場合、サンプリング定理に従った最小二乗法により不等間隔データを等間隔に補正する。 N 個の不等間隔データ (t_i, r_i) ($0 \leq i \leq N-1$) を、サンプル周期 T'_s の M 個の等間隔データ ($0 \leq M \leq N$) に変換する。 その際に、残差平方和が最小となるように最適化を行う。 新たなサンプリング時刻 $j \times T'_s$ における値 p_j が元の時刻データ t_i に及ぼす影響度 b_{ij} は標準化関数により、下記の式で与えられる。

$$b_{ij} = \text{sinc} \frac{\pi(t_i - j \times T'_s)}{T'_s} \quad (6)$$

$$(0 \leq i \leq N-1, 0 \leq j \leq M-1)$$

式 (6) を b_{ij} を成分とする $N \times M$ の影響度行列 $b_{ij} \in B$ と元の値データ $\mathbf{r} = (r_0, r_1, \dots, r_{N-1})^T$ 用いて、以下に示す最小二乗問題として値 $\mathbf{p} = (p_0, p_1, \dots, p_{M-1})^T$ を解くことができる。

$$\mathbf{p} = (B^T B)^{-1} B^T \mathbf{r} \quad (7)$$

式 (7) によって求められた等間隔データ \mathbf{p} を使用することで、サンプリング定理に従う式 (8) に示す信号 $f(t)$ として元の信号を再現する。

$$f(t) = \sum_{j=0}^M p_j \text{sinc} \frac{\pi(t - j \times T'_s)}{T'_s} \quad (8)$$

4.4 位置計算手法

4.1–4.3 節ではスマートフォン ALS によるサンプリングデータを補正し、送信信号の周波数を解析することで LED 照明を識別した。本節では、解析した周波数の受信強度からスマートフォンと LED 照明との距離 d_i を計算する既存手法 [12] を用いてスマートフォンの座標 (x, y) を求める方法について説明する。スマートフォン ALS の積分効果による周波数応答 $|H(f_k)|$ を考慮すると、LED 照明が送信する信号の受信強度 P_r はランバートモデルに従う以下の式で示される。

$$P_r = C \sin(c\pi) |H(f_k)| \frac{\cos^l \theta \cos^m \varphi}{d^2} \quad (9)$$

C は LED 照明の発光強度、 $\sin(c\pi)$ は LED 照明のデューティ比である。これらは各 LED 照明に依存し、事前計測により求められる。 f_k は送信信号の周波数、 $\cos^l \theta$ は LED の放射角 θ の角度応答、 $\cos^m \varphi$ はスマートフォン ALS への入射角 φ の角度応答である。 l, m はそれぞれ LED およびスマートフォン ALS に依存する。本稿ではスマートフォンを床と水平に設置し、スマートフォンの高さ z を既知とする。すなわち、LED 照明の座標を (x_i, y_i, z_i) とすると、 $\cos \theta = \cos \varphi = |z_i - z|/d$ として、式 (9) の d_i を計算する。

式 (9) で求めた 3 つ以上の LED からの距離 d_i を用いて、三辺測量の原理からスマートフォンの座標 (x, y) を算出する。LED 照明が 3 つ以上の場合、下記に示す最小二乗法を適用することで座標 (x, y) を求める。既知のスマートフォンの高さ z を用いると、

$$\arg \min \sum_i (\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - d_i)^2 \quad (10)$$

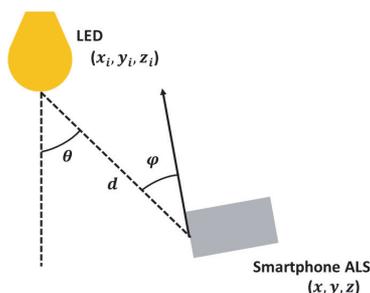


図 7 測位アルゴリズムの幾何モデル

Fig. 7 A geometric model of localization algorithm.

最小二乗法のアルゴリズムには制約なし非線形最適化問題を解く Levenberg-Marquardt 法 (LM 法) [20], [21] を用いる。

これら測位アルゴリズムに関連する位置関係を図 7 に示す。

5. 評価実験

5.1 実験設定

提案手法の評価実験、スマートフォン ALS の信号受信性能および測位性能に関する評価実験を行った。LED 照明は Bridgelux BXRE-50C4001-B-74 を放熱対策のヒートシンクに貼り付けて使用した。正弦波であるアナログ波形を入力信号として、これをファンクションジェネレータ (NF Corporation WF1948) を用いてアナログ波形の周波数に対して 512 倍のキャリア周波数でシグマデルタ変調 [22] することで、2 値のパルス密度変調 (Pulse Density Modulation: PDM) にして送信信号を表現した。これにより LED は PDM に従って高速に点滅し、スマートフォン ALS で受信すると、その周波数特性により最低域にある正弦波が記録される。この際、ファンクションジェネレータで出力した信号を電力ドライバで増幅し、35 V 定格の LED 照明を点灯させている。本稿では、周波数エイリアシングを利用した DFT により受信信号を解析し、特定周波数を ID とする LED 照明を識別する。したがって送信信号の情報点と DFT の解析点を一致させるため、下記に示す式 (11) に従って送信信号の周波数 $f_{i,A}$ を設計し、LED 照明に ID として割り当てる。

$$f_{i,A} = (i/n + A)f_s = f_{i+An} \quad (11)$$

各送信信号に異なる i を設定し LED 照明の ID とする。周波数エイリアシングにより重なって識別困難となるため、本稿では $i = 1, 2, \dots, (n/2) - 1$ とする。 f_s はスマートフォン ALS のサンプリング周波数である。また、 f_s/n は送信信号の基本周波数であり、整数 n が DFT のサンプル点数となる。 A は LED 照明光をフリッカレスにするための整数である。

スマートフォンを床と水平となるように三脚で固定し、障害物による影や遮蔽ができないようにした。スマートフォン ALS で受信したデータは PC に保存し、オフラインで解析した。

5.2 欠損補間手法の評価

2 種の欠損補間手法を実験で比較し、最適な手法を評価する。スマートフォン ALS に Sony Xperia XZ1 搭載 Avago APDS-9940 LIGHT を用いる。同機種種のサンプリング周波数は 3.2.1 項で述べたように $f_s = 17.78 \text{ Hz}$ であり、分解能 1 lux, 最大で 50,000 lux までの照度値を出力する。また、最大消費電力は 0.11 mA である。式 (11) に従って、基本周

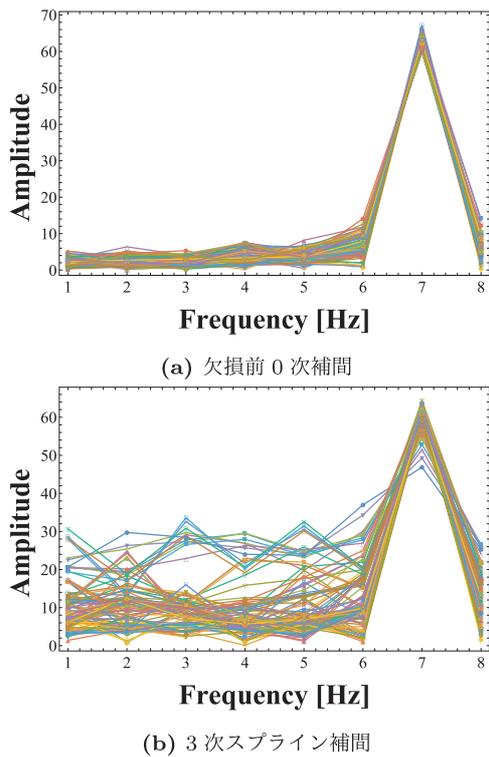


図 8 欠損補間した信号の周波数スペクトル (100 サンプル)
 Fig. 8 Frequency spectrums of interpolated signal (100 samples): (a) 0th-order interpolation, (b) Cubic spline interpolation.

波数 $f_s/n = 17.78/18 = 0.988$ Hz として送信信号を設計した。また、スマートフォンと LED 照明の距離は 1.0 m である。

202.494 Hz の送信信号 1 周期分を 100 回計測し、各欠損補間手法で得られた周波数スペクトルを図 8 に示す。いずれの手法も、100 回の計測において送信信号を $202.494 - 11 \times 17.78 = 6.914$ Hz の信号として正しく解析できていることが分かる。一方で、3 次スプライン補間による欠損補間では、目的周波数である 6.914 Hz のスペクトルに対して、それ以外のスペクトル (ノイズフロア) が増大していることが分かる。

欠損前 0 次補間および 3 次スプライン補間を適用した時間領域表示のデータを、図 9 に示す。3 次スプライン補間による欠損補間では、サンプリングデータの開始点付近が欠損した場合、補間値が発散するため、量子化誤差が大きくなりノイズフロアが増大したと考えられる。したがって、欠損前 0 次補間による欠損補間がより正しく欠損値を補間できると考え、以降の評価実験では欠損補間に欠損前 0 次補間を用いる。

5.3 等間隔補正手法の評価

等間隔補正手法の有効性を検証するために、不等間隔サンプリングとなる機種を用いて周波数解析性能の評価実験を行った。スマートフォン ALS に Galaxy S10+ 搭載 AMS

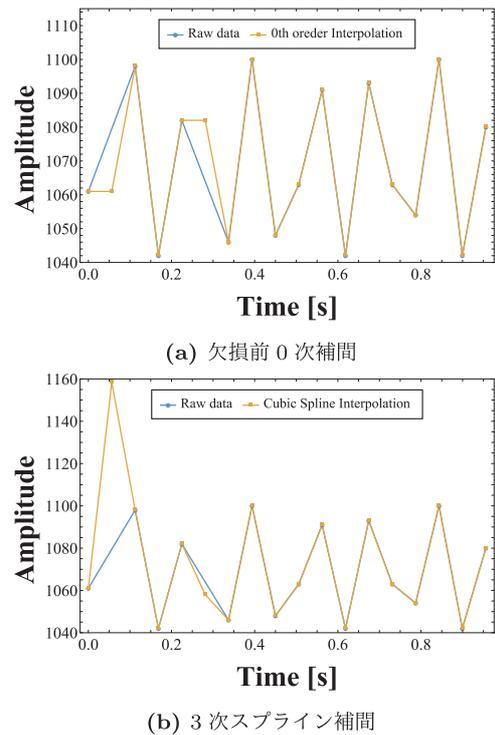


図 9 時間領域における欠損補間手法の比較
 Fig. 9 Comparing interpolation methods in the time domain: (a) 0th-order interpolation, (b) Cubic spline interpolation.

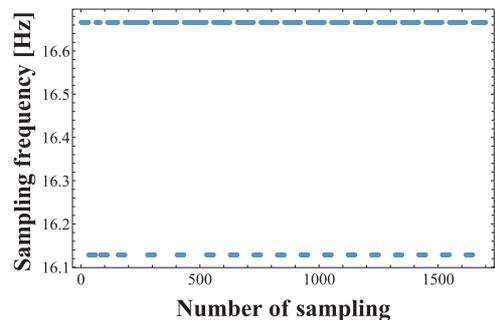


図 10 GalaxyS10+ のサンプリング周波数の推移
 Fig. 10 Transition of GalaxyS10+ sampling frequency.

TCS3407 を用いる。そのサンプリング動作は表 1 に示され、サンプリング周波数が 16.67 Hz 以下で不等間隔となることを確認した。

4 Hz の送信信号およそ 1 周期分を 100 回計測した場合のサンプリング周波数の推移を図 10 に、周波数スペクトルを図 11 に示す。等間隔補正手法によりノイズフロアを抑えられていることが分かる。また、送信信号を正しく解析することができた周波数帯域は周波数エイリアシングを使用しない 1~7 Hz であった。

5.4 スマートフォン ALS の受信性能評価実験

本稿の目的の 1 つは、スマートフォン座標を算出するため、DFT を用いてスマートフォン ALS による受信信号強度を解析し、特定周波数を ID とする LED 照明を識別する

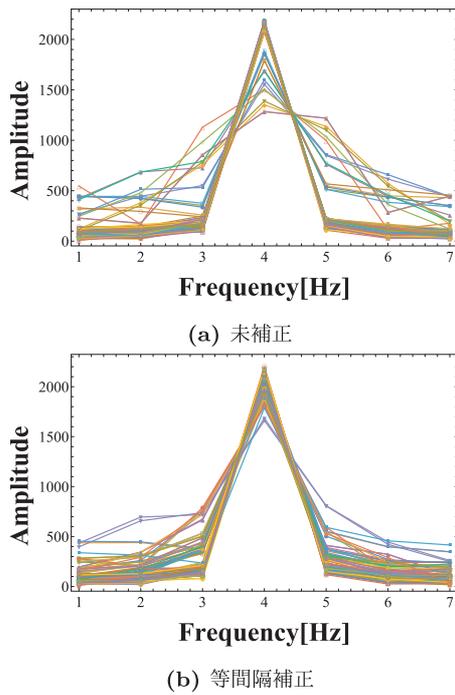


図 11 等間隔補正した信号の周波数スペクトル (100 サンプル)
 Fig. 11 Frequency spectrums of non-uniformity corrected signal (100 samples): (a) Uncorrected, (b) Non-uniformity corrected.

ことである。したがって、ID となる特定周波数で変調する送信信号に対して、スマートフォン ALS の受信性能を明らかにする必要がある。そこで、DFT のサンプル点数 $n = 18$ 点 (サンプル長 1.012 秒) として、LED 照明が発光する信号をスマートフォン ALS を用いて受信し、その SN 比を測定する実験を行った。この場合、基本周波数を $f_s/n = 17.78/18 = 0.988$ Hz として送信信号を設計する。スマートフォンに Sony Xperia XZ1 を使用し、欠損前 0 次補間を用いて受信信号の欠損補間処理を行う。計測回数は各々 100 回である。

実験では、フリッカを知覚しにくい F_{70} で変調する周波数の受信に成功した。今回実験で使用した最も高い (最も受信減衰が大きい) 196.568 Hz ~ 203.482 Hz の信号について SN 比を計測した。これを図 12 に示す。周波数応答の良い信号ほど SN 比が良いことが分かる。一方で、周波数応答が低下すると SN 比が悪化した。また、196.568 Hz および 197.556 Hz の信号はスマートフォン ALS で受信することができなかった。

5.5 測位性能の評価実験

4 つの LED 照明の配置間隔および送信信号の周波数を変化させて計測実験を行い、スマートフォン ALS の測位性能を評価した。実験環境は図 13 で示され、一般的な屋内環境を想定し LED 照明を高さ 2.24 m の天井に設置した。LED0 の 2 次元座標 (1.0, 1.0) を基準に LED の配置間隔 $L = 1.0, 0.50, 0.25$ m とし、各 LED1, 2, 3 の 2 次元座

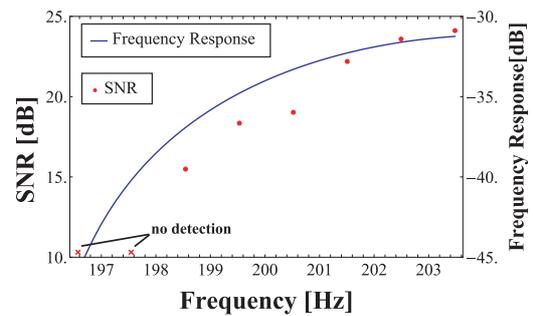


図 12 196.568 Hz ~ 203.482 Hz の送信信号の SNR と周波数応答
 Fig. 12 SNR and frequency response of transmitted signals from 196.568 Hz to 203.482 Hz.

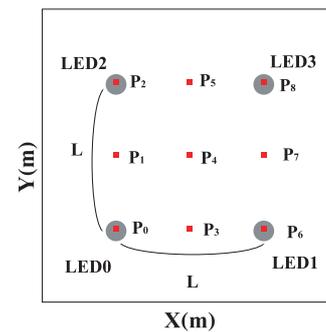


図 13 LED 照明の配置と各計測点
 Fig. 13 Arrangement of LEDs and measurement spots.

表 2 送信信号の周波数パターン

Table 2 Frequency pattern of transmitted signals.

	LED0 [Hz]	LED1 [Hz]	LED2 [Hz]	LED3 [Hz]
1	0.988	1.976	2.963	3.951
2	56.303	57.291	58.279	59.267
3	109.643	110.631	111.619	112.607

標を変化させた 3 つの実験環境を設定した。また、基本周波数 $f_s/n = 17.78/18 = 0.988$ Hz として送信信号の周波数を 3 パターン設計する。これを表 2 に示す。したがって実験は実験環境 3 パターン × 周波数 3 パターン = 9 パターンで行われた。スマートフォンに Sony Xperia XZ1 を使用し、高さは 1.40 m の位置で床と水平となるように三脚で固定した。4 つの LED を検出し、式 (9) を用いてスマートフォンの位置を求めた。また、サンプル点数は $n = 18$ 点で、計測回数は各々 100 回である。

5.5.1 LED 照明およびスマートフォン ALS の角度応答

実験で使用した LED 照明およびスマートフォンの角度応答を最小二乗法を用いて式 (9) に示すランバートモデルに最適化した。これを図 14 に示す。離散点は、各計測角度において計測された 300 個の振幅スペクトルの平均である。図 14 (a) では LED の放射角特性を表すランバートモデルのパラメータが $l = 0.82$ に、図 14 (b) では ALS の入射角特性を表すランバートモデルのパラメータが $m = 5.35$ に最適化される。これらのパラメータを用いて、式 (9) を

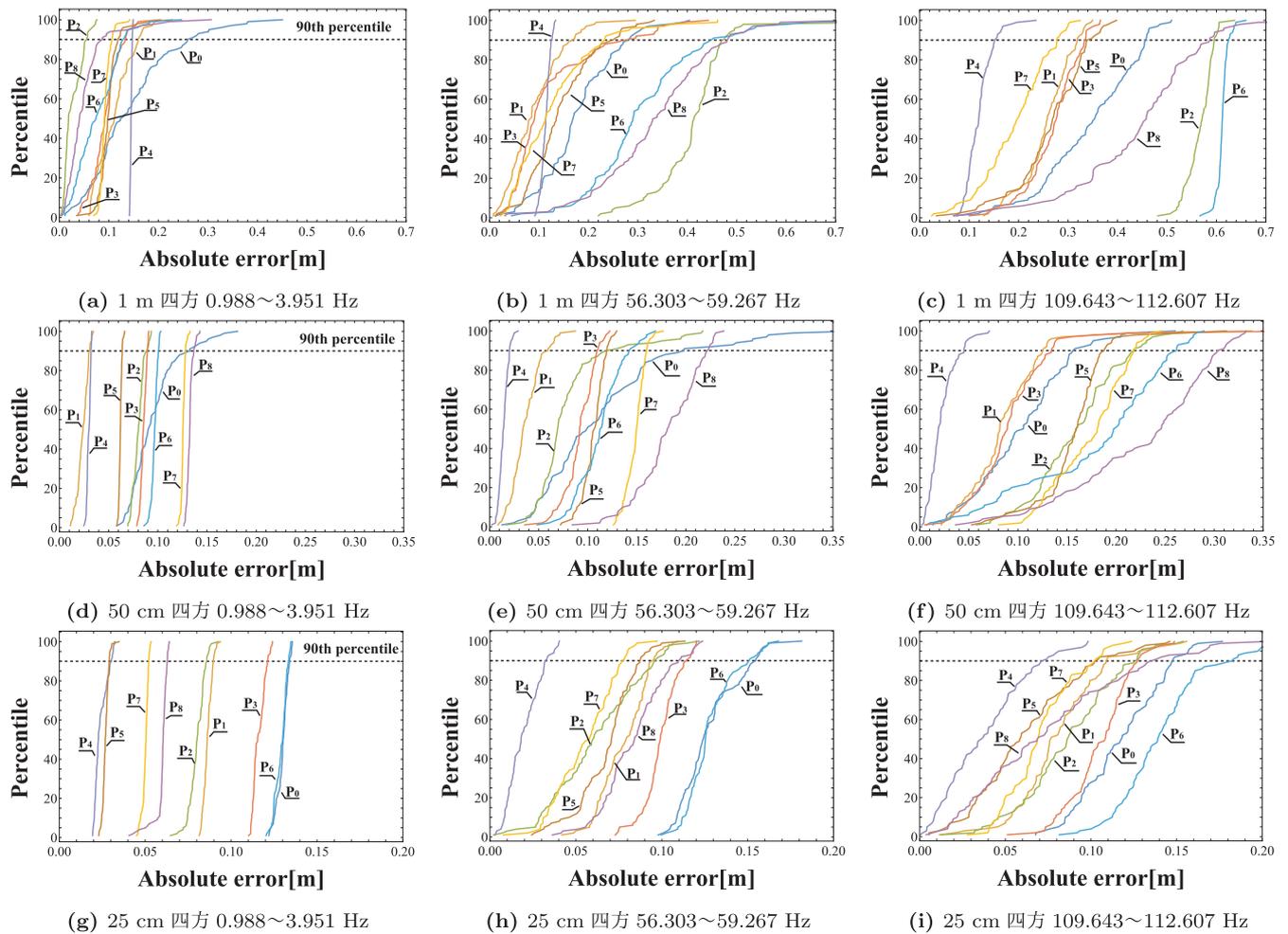


図 15 測位誤差の累積分布関数

Fig. 15 Cumulative distribution function of positioning errors: (a)–(c) LEDs arranged in 1 m square, (d)–(f) LEDs arranged in 50 cm square, (g)–(i) LEDs arranged in 25 cm square, (a), (d), (g) Frequencies of transmitted signals are 0.988 Hz to 3.951 Hz, (b), (e), (h) Frequencies of transmitted signals are 56.303 Hz to 59.267 Hz, (c), (f), (i) Frequencies of transmitted signals are 109.643 Hz to 112.607 Hz.

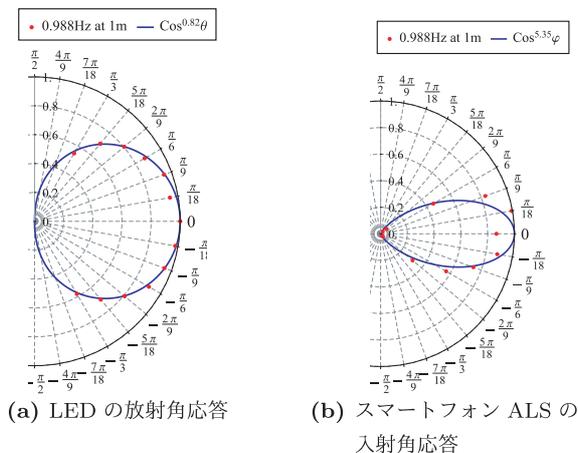


図 14 正規化した実測値と角度応答モデル

Fig. 14 Normalized received energy and angle response model: (a) Radiation angle response of LED, (b) Incident angle response of smartphone ALS.

計算する。

5.5.2 実験結果

図 15 に測位誤差の累積分布関数を示す。90th-percentile の測位誤差について、1 m 四方環境では低い周波数からそれぞれ 0.25 m 未満、0.48 m 未満、0.62 m 未満、50 cm 四方では低い周波数からそれぞれ 0.14 m 未満、0.22 m 未満、0.30 m 未満、25 cm 四方では低い周波数からそれぞれ 0.13 m 未満、0.15 m 未満、0.18 m 未満であった。送信信号の周波数が低いほど 90th-percentile での測位誤差が小さく、各計測点における測位誤差の分散が小さいことが分かる。また、LED 照明の間隔が狭いほど 90th-percentile での測位誤差が小さいことが分かる。

6. 考察

評価実験で、スマートフォン ALS による受信信号を DFT により解析し、周波数を ID とする複数の LED 照明との

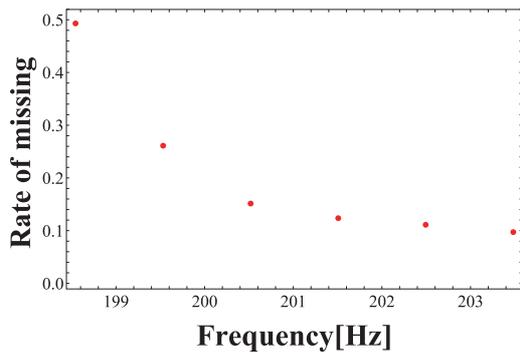


図 16 送信信号の周波数と受信信号の平均サンプリング欠損率の関係

Fig. 16 Frequency of transmitted signal and average rate of missing sampling values.

距離を計測することで、スマートフォン ALS を用いた可視光測位が可能であることを確認できた。本章では、評価実験の結果をふまえ、測位誤差の要因を考察し、スマートフォン ALS を用いた可視光測位の今後の展望について議論する。

6.1 異なる周波数応答による受信性能

スマートフォン ALS の受信性能を SN 比を用いて評価した 5.4 節について、受信信号の欠損率を用いて考察する。図 16 に、送信信号の周波数と 100 サンプルの受信信号の平均サンプリング欠損率の関係を示す。この周波数領域では、低い周波数ほど周波数応答が悪く受信信号のサンプリング欠損率が高いことが分かる。評価実験で使ったスマートフォン ALS の特性として、信号のレベル変化の少ない場合は欠損となり、そのため 196.568 Hz および 197.556 Hz の信号は受信できなかった。また、ノイズは通常のホワイトノイズではなく、欠損補間処理で導入されたノイズが主となっていると考えられる。そのため、信号を重ね合わせて平均化処理をしてもノイズを減衰させることができなかった。サンプリング欠損値をより正確に再現する欠損補間手法の改善は、今後の研究課題である。

6.2 周波数割当て問題

提案手法では、周波数エイリアシングを活用した DFT により受信信号を解析し、周波数を ID とする LED 照明を識別する。スマートフォン ALS はサンプリングレートがたかだか 18 Hz と非常に低いため、従来受信機である動画カメラおよび高速に動作する PD を用いた VLP システムと比べて、LED 照明に対する割り当て可能な周波数が少ないことが課題である。したがって、照明装置が多数配置される屋内環境で VLP システムを構築する場合、LED 照明数減少により位置認識精度に制約が発生すると考えられる。LED 照明に対して最適な周波数割当てが必要であり、今後の研究課題である。

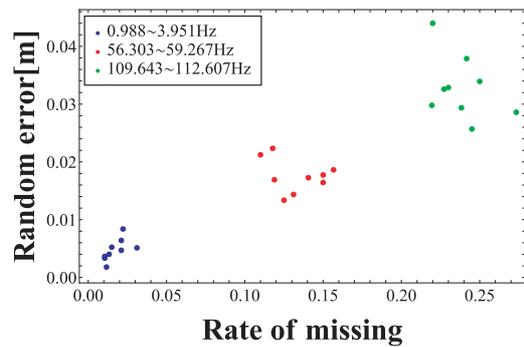


図 17 受信信号の平均サンプリング欠損率と偶然誤差の関係

Fig. 17 Average rate of missing sampling values and random positioning error.

6.3 系統誤差の評価

5.5 節における計測結果を系統誤差と偶然誤差を用いて評価する。計測位置 p での $N (= 100)$ 個のデータを \mathbf{x}_i^p ($i \in 1, 2, \dots, N$)、その平均値を $\bar{\mathbf{x}}^p = (1/N) \sum_i \mathbf{x}_i^p$ 、真値を \mathbf{X}^p とおくと、

- 系統誤差： $|\mathbf{X}^p - \bar{\mathbf{x}}^p|$
- 偶然誤差： $\sqrt{(1/N) \sum_i |\mathbf{x}_i^p - \bar{\mathbf{x}}^p|^2}$

系統誤差の要因について考察する。図 15 (a)–図 15 (c) における平均系統誤差はそれぞれ 0.08 m, 0.15 m, 0.29 m であるが、LED 照明の間隔を狭めた図 15 (d)–図 15 (f) における平均系統誤差はそれぞれ 0.07 m, 0.09 m, 0.11 m, 図 15 (g)–図 15 (i) における平均系統誤差はそれぞれ 0.08 m, 0.08 m, 0.08 m である。第 1 に、実験機材やスマートフォン設置時の測定誤差が影響しているものと考えられ、より厳密な機器を用いた測定により改善が見込める。次に、図 15 (b), 図 15 (c) では、式 (4) に示す周波数特性の影響により SN 比が悪化し、特定の計測点においてスマートフォン ALS で得られた RSS がランバートモデルから外れたため、誤差が増大したと考えられる。間接光および環境光の影響を考慮したランバートモデルの設計は今後の研究課題である。また、3.2.1 項で推定したスマートフォン ALS のサンプリング周波数の推定誤差も影響していると考えられ、より精密な計測により改善が見込める。

6.4 偶然誤差の評価

次に、偶然誤差の要因について受信信号のサンプリング欠損率を用いて説明する。図 17 は、図 15 (g)–図 15 (i) のそれぞれ 9 つの計測点における 100 サンプルの受信信号の平均サンプリング欠損率と偶然誤差である。送信信号の周波数が高くなるにつれてスマートフォン ALS による受信信号のサンプリング欠損率が増大し、測位の偶然誤差が増大することが分かる。これは、式 (4) に示す周波数特性の影響により、周波数が高くなるにつれて SN 比が悪化するためであると考えられる。また、6.1 節で述べたように欠損補間処理による SN 比の悪化も要因であると考えられる。

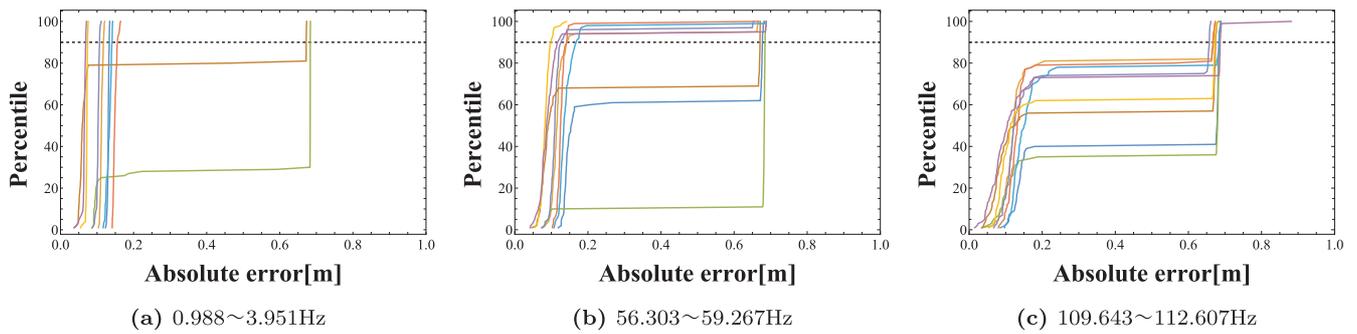


図 18 3次元測位誤差の累積分布関数

Fig. 18 Cumulative distribution function of 3D-positioning errors: (a) Frequencies of transmitted signals are 0.988 Hz to 3.951 Hz, (b) Frequencies of transmitted signals are 56.303 Hz to 59.267 Hz, (c) Frequencies of transmitted signals are 109.643 Hz to 112.607 Hz.

6.5 スマートフォン ALS の入射角特性

図 14(b) に示すスマートフォン ALS の入射角度応答は、角度 0° および $40^\circ \sim 50^\circ$ 以降においてランバートモデルに従わないことが分かる。これは、スマートフォン ALS の構造や FoV (Field of View) がランバートモデルで想定される光センサや ALS と異なるためであると考えられる。また、我々の調査では搭載されるスマートフォンの機種間でスマートフォン ALS の入射角度応答が異なることを確認している。したがって、スマートフォンの方向、LED 照明との位置関係、スマートフォン機種の違いが測位精度に影響を及ぼすと考えられる。一方で、スマートフォン ALS の入射角度応答がランバートモデルに従うと仮定して行った評価実験では、これらランバートモデルに従わない特定の角度が測位精度に大きな影響を及ぼさかった。これは、一般的な屋内環境を想定して構築した実験環境において、スマートフォン ALS で得られた RSS が強いから、わずかな測距誤差となったと考えられる。より精密な調査によるスマートフォン ALS の角度応答モデルの作成ならびに LED 照明数の増加によって、測位誤差の改善が見込める。

6.6 3次元測位の検討

提案手法ではスマートフォンの高さを既知とした2次元測位を行った。一方で、高さを未知としたスマートフォンの3次元測位も原理的には可能である。そこで、LED 照明が 25 cm 四方で配置される環境で行ったスマートフォンの3次元測位結果を図 18 に示す。提案手法で使用した LM 法では目的関数の複雑化により大域的最適解を得られず、残差平方和が大きくなる局所的最適解が得られたため測位誤差が増大したと考えられる。文献 [23] で提案されるような大域的最適解を得られる非線形最適化問題アルゴリズムの導入により測位誤差の改善が見込まれる。

6.7 スマートフォン ALS を用いた可視光測位の限界と展望

一般的な屋内環境での位置認識を想定する場合、LED 照明は人がフリッカを知覚しにくい F_{70} で変調する必要がある。評価実験では低周波数信号での高精度な測位が可能であることを示し、 F_{70} で変調する信号を用いた測位も原理的には可能であることを示した。また、1 m 四方および 50 cm 四方による LED 照明の配置は先行研究 [13] と同等以上であることを確認できた。一方で、 F_{70} で変調する信号を用いる場合は測位結果が悪化するため、送信信号電力増大による SN 比向上や背面カメラとの併用による受信機性能強化、ジェスチャ認識応用に特化することによる測位可能空間の限定などが考えられる。また、従来受信機である動画カメラおよび高速に動作する PD に比べて非常に消費電力が小さいことから、たとえば長時間の運用が必要なトラッキングや数十 cm 程度の測位誤差で十分なナビゲーションなど、消費電力を抑えた VLP システムに対してスマートフォン ALS の応用が期待できる。

7. むすび

本稿では、スマートフォン ALS を受信機として用いた可視光測位手法を提案した。提案手法では、スマートフォン ALS のサンプリングにより欠損もしくは不等間隔となるサンプリングデータを補正し、周波数エイリアシングを利用した DFT により、周波数を ID とする LED 照明の識別を可能とした。また、RSS を利用した測位により、スマートフォン ALS と低周波数信号を用いた高精度な測位が可能であることを示し、人がフリッカを知覚しにくい周波数で変調させた信号を用いた測位も可能であることを示した。また、スマートフォン ALS のサンプリング動作・角度特性による測位精度への影響などを明らかにし、スマートフォン ALS の今後の課題を明らかにした。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 19H04222, 20K21781 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] 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).

[2] Komine, T. and Nakagawa, M.: Fundamental analysis for visible light communication system using LED lights, *IEEE Trans. Consumer Electronics*, Vol.50, No.1, pp.100–107 (2004).

[3] Armstrong, J., Sekercioglu, A. and Neild, A.: Visible light positioning: A roadmap for international standardization, *IEEE Communication Magazine*, Vol.51, No.12, pp.68–73 (2013).

[4] Wilkins, A., Veitch, J. and Lehman, B.: LED Lighting Flicker and Potential Health Concerns: IEEE Standard PARI1789 Update, *Proc. 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, GA, pp.171–181 (2010).

[5] Afzalan, M. and Jazizadeh, F.: Indoor Positioning Based on Visible Light Communication: A Performance-based Survey of Real-world Prototypes, *ACM Comput. Surv.*, Vol.52, No.2, Art.35 (2019).

[6] Zhuang, Y. et al.: A Survey of Positioning Systems Using Visible LED Lights, *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol.20, No.3, pp.1963–1988 (2018).

[7] 橋爪宏達, 杉本雅則：汎用動画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).

[8] Liang, C., Chang, L. and Chen, H.H.: Analysis and compensation of rolling shutter effect, *IEEE Trans. Image Processing*, Vol.17, No.8, pp.1323–1330 (2008).

[9] Shimada, S., Hashizume, H. and Sugimoto, M.: Indoor Positioning Using Reflected Light and a Video Camera, *Proc. IPIN 2018*, Nantes, France, pp.24–27 (2018).

[10] Kuo, Y.-S., Pannuto, P., Hsiao, K.-J. and Dutta, P.: Luxapose: Indoor positioning with mobile phones and visible light, *Proc. MobiCom 2014*, Maui, HI, pp.447–458, ACM (2014).

[11] Jung, S.-Y., Hann, S. and Park, C.-S.: Tdoa-based optical wireless indoor localization using led ceiling lamps, *IEEE Trans. Consumer Electronics*, Vol.57, No.4, pp.1592–1597 (2011).

[12] Li, L., Hu, P., Peng, C., Shen, G. and Zhao, F.: Epsilon: A visible light based positioning system, *Proc. NSDI 2014*, Seattle, WA, pp.331–343 (2014).

[13] Wang, Z., Yang, Z., Hung, Q., Yang, L. and Zhang, Q.: ALS-P: Light Weight Visible Light Positioning via Ambient Light Sensor, *Proc. IEEE INFOCOM 2019*, Paris, France, pp.1306–1314 (2019).

[14] Yang, L., Wang, Z., Wang, W. and Zhang, Q.: NALoc: Nonlinear Ambient-Light-Sensor-based Localization System, *Proc. ACM IMWUT*, Vol.2, No.4, Article 199 (2018).

[15] 松田裕貴, 新井スマイル, 荒川 豊, 安本慶一：スマートフォン搭載照度センサの個体差に対応した夜道における街灯照度推定値校正手法の提案，情報処理学会論文誌, Vol.57, No.2, pp.520–531 (2016).

[16] 村上洋平, 大槻知明：スマートフォンを用いたデッドレコニングにおける照度センサを利用した推定位置補正，信学技報, Vol.113, No.399, ASN2013-121, pp.17–22 (2014).

[17] 桑島 奨, 三木光範, 山口浩平, 東 陽平, 間 博人：スマートフォンを照度センサとして用いる知的照明システム，情報処理学会論文誌, Vol.57, No.8, pp.1775–1786 (2016).

[18] 山下太輔, 間 博人, 山本泰士, 太田雄亮, 三木光範：モバイル端末のアプリケーション利用時における内蔵照度

センサを用いたハンドジェスチャ認識手法の提案，情報処理学会論文誌, Vol.59, No.2, pp.715–722 (2018).

[19] Android Developers: Sensors Overview, available from http://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_overview.html (accessed 2019-08).

[20] Levenberg, K.: A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol.2, pp.4164–4168 (1944).

[21] Marquardt, D.W.: 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 (1963).

[22] Schreier, R. and Temes, C.C. (著), 安田 彰, 和保孝夫 (監訳)： $\Delta\Sigma$ アナログ/デジタル変換器入門，丸善出版 (2007).

[23] Zhou, B., Liu, A. and Lau, V.: Visible Light-Based User Position, Orientation and Channel Estimation Using Self-Adaptive Location-Domain Grid Sampling, *IEEE Trans. Wireless Communications*, Vol.19, No.7, pp.5025–5039 (2020).



佐藤 拓斗 (学生会員)

2019年山形大学工学部情報科学科卒業。現在、北海道大学大学院情報科学 院情報理工学コース修士課程在学中。可視光位置認識に関する研究に従事。



嶋田 祥太

2016年北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科卒業。現在、同大学大学院情報科学研究科情報理工学専攻博士課程在学中。可視光位置認識，可視光通信に関する研究に従事。



村上 弘晃 (学生会員)

2016年北海道大学工学部情報エレクトロニクス学科卒業。現在、同大学大学院情報科学研究科情報理工学専攻博士課程在学中。屋内音響測位システムに関する研究に従事。



渡邊 拓貴 (正会員)

2012年神戸大学工学部電気電子工学科卒業。2017年同大学大学院工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年より北海道大学助教となり，現在に至る。



橋爪 宏達 (正会員)

1984年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年より東京大学助手(文献情報センター)。1986年学術情報センター助教授。1986年から1990年までペンシルバニア大学客員助教授。1990年文部省学術調査官(併任)。1998年学術情報センター教授。2000年国立情報学研究所教授。2002年より総合研究大学院大学教授を併任。



杉本 雅則 (正会員)

1990年東京大学工学部航空学科卒業。1995年同大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。同年より学術情報センター(現、国立情報学研究所)助手。1999年東京大学助教授。2012年より北海道大学教授となり、現在に至る。