

動的遮蔽物を考慮した BLE による屋内位置推定手法の提案

星 尚志^{1,a)} 石塚 宏紀^{1,b)} 小林 亜令^{1,c)} 南川 敦宣^{1,d)}

受付日 2018年4月11日, 採録日 2018年10月2日

概要: 近年, 屋内測位技術に関する研究開発が進み, 市場への導入も徐々に実施されてきている. ショッピングモールなどの店舗内における屋内測位では, Wi-Fi や BLE などの送信ビーコンを設備内に複数設置して, ユーザのスマートフォンなどを想定した受信機で受信した各無線電波送信機の電波受信信号強度から位置を同定する手法が主に用いられている. しかしながら, Wi-Fi や BLE の通信帯域は, 2.4 GHz 帯であり, 電波の反射, 遮蔽, 回折の影響が大きく, 特に水分を多く含む人物による遮蔽の影響は大きい. そのため, 店舗の天井や柱などの高所に送信ビーコンを設置できない場合, 頻繁に起こる人々の往来による不定期な電波遮蔽によって測位精度が著しく低下してしまう. そこで本論では, カメラによる人物検知技術を利用して, 時刻ごとに動的遮蔽物の位置を取得し, 屋内測位による位置推定時において, 動的遮蔽物による影響が小さい送信ビーコンを選択して位置を推定する手法を提案する. 提案手法の評価において, 我々は, 実店舗における人物の動線データを利用した提案手法のシミュレータを実装した. 結果として, 本シミュレーション環境において提案手法が優位であり, 同環境下において平均測位誤差が, 1.09 m から 0.51 m へ 0.58 m 改善されることが明らかになった. また実環境実験においても提案手法における平均測位誤差が 3.11 m から 2.14 m へ 0.70 m 改善され, 本手法の優位性を示した.

キーワード: 屋内測位, BLE, 最尤推定

An Indoor Location Estimation Using BLE Beacons Considering Movable Obstructions

HISASHI HOSHI^{1,a)} HIROKI ISHIZUKA^{1,b)} AREI KOBAYASHI^{1,c)} ATSUNORI MINAMIKAWA^{1,d)}

Received: April 11, 2018, Accepted: October 2, 2018

Abstract: Recently, research of indoor location estimation has been attracting attention for tracking behaviors of customers in a store. In the case of the store, indoor location estimation adopts absolute location estimation techniques using RSSI of Wi-Fi or BLE signals from beacons installed in the store. As the RSSI has been influenced by the signal reflection, the diffraction, the shelter and others, an estimated values can cause errors during the process of converting the RSSI values into distances. Therefore, an accuracy of location estimation deteriorated by irregular shielding of wireless signals when pedestrians pass through in the store. In this paper, we propose dynamical and optimal beacon selection method to minimize affections of wireless signal shielding by the static and movable obstructions. As the result of a simulation, we found that the average of the location estimation errors using our proposed method is reduced by 0.5 m against a method only considering static obstructions and our method keeps a constant error regardless of the number of selected BLE beacons. In addition, the average positioning error in the proposed method improved by 0.7 m even in the real environment experiment, and we showed the superiority of this method.

Keywords: indoor location estimation, BLE, maximum likelihood estimation

¹ 株式会社 KDDI 総合研究所
KDDI Research, Inc., Fujimino, Saitama 356–8502, Japan

a) hi-hoshi@kddi-research.jp

b) hk-ishizuka@kddi-research.jp

c) ar-kobayashi@kddi-research.jp

d) at-minamikawa@kddi-research.jp

1. はじめに

近年, 屋内位置推定に関する研究がさかんに行われている. また, スマートフォンなどの携帯端末に搭載されたセンサ群や, Wi-Fi, BLE (Bluetooth Low Energy) のよう

な無線信号を用いた屋内位置推定は、実用化に向けた開発 [1], [2] が進められている。屋内位置推定の利活用は、駅構内でのナビゲーションや商業施設での位置情報を連動したクーポン配布など個人向けサービスに利用されている [3]。一方で、小売店店舗内の来店者および店員の行動を可視化し、分析することで、サービス品質や来店者満足度の向上を目指すような法人向けサービスへの活用も期待されている [4]。

屋外において位置を計測できるシステムとして GPS (Global Positioning System) が存在するが、GPS は複数衛星から受信した電波を計算することで位置を求めるため、ショッピングモールや地下のように GPS 衛星からの電波が遮蔽される環境では大きく測位精度が劣化するという問題点がある。

また近年スマートフォン利用者が増加しており、スマートフォンに内蔵された慣性センサを用いて位置を推定する PDR (Pedestrian Dead Reckoning) と呼ばれる手法も研究されてきた [5]。PDR は単体で位置推定可能であることから、屋内での利用に期待がされているが、相対位置推定であるため、実際の人物位置からの誤差が累積してしまうという問題点がある。そのため、ある一定のタイミングで絶対位置推定などによる推定位置補正技術が必須となる。

絶対位置推定の手法として、天井や壁に設置したカメラを用いた手法や、無線信号を用いた手法が存在する。カメラを用いた手法では、映像の背景差分や機械学習などにより人物を識別・追跡する研究が行われている [6], [7], [8]。最近では、距離情報も同時に取得できる RGB-D カメラを用いた研究 [9] も進められているが、手前にある物体が背後にある物体を隠して見えなくなるオクルージョン問題や、人物の位置を推定する際に複数人物が存在する環境下ではどの推定人物がどの個体か同定できないという問題点が存在する。

無線信号を用いた手法は、配置位置が既知な無線信号受信機が存在する環境で、ユーザが無線信号受信機を持ち歩くことで、受信した際の電波強度を用いてユーザの位置を推定する技術である。無線信号を用いるため、無線電波送信機と受信機の間には障害物が存在する場合には電波の反射、遮蔽、干渉などの影響を受け、位置推定精度が劣化するという問題点がある。特に代表的な無線信号を用いた手法の例である Wi-Fi や BLE を用いた研究は、これらの電波が 2.4 GHz 帯の通信帯域を用いているため、電波の反射、遮蔽の影響を受けやすく、水分を多く含む人物による受信電波強度の劣化も著しい。人物のような動的遮蔽物を考慮した手法はまだまだ提案されておらず、オフィスや小売店のような動的遮蔽物として人物が多数往来する環境下において、無線電波を用いる手法は、測位精度の著しい劣化を招く恐れがある。そこで、本研究では、無線電波を用いる手法を対象とし、動的遮蔽物としての人物往来による測位精

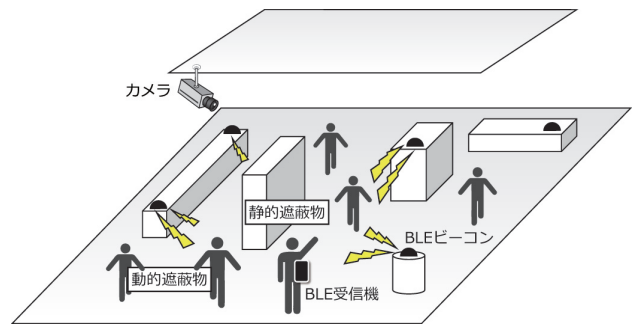


図 1 システム構成図
Fig. 1 System configuration.

度低下の課題を解決する手法を提案する。また、本研究における無線信号媒体として、BLE を採用する。BLE は、近年、デバイスの小型化や価格の安定化が進み、施設内への導入コストが低く、スマートフォンでも標準的に対応が進んでいるため無線信号を用いた屋内位置推定にて利用する媒体として注目されている [11]。

以上より本研究では、無線信号、特に BLE を用いた屋内位置推定を対象とした研究課題として、測位環境に電波を吸収する動的な遮蔽物である人物の往来を考慮した位置推定手法を提案する。本研究におけるシステム構成図を図 1 に示す。本システムでは静的遮蔽物と無線電波送信機である BLE ビーコンが複数設置されているフロアにおいて、動的遮蔽物である人物によって BLE ビーコンからの電波が遮蔽される環境を想定しており、BLE 受信機を所持している人物の位置を推定するシステムである。本システムにおいて、商品棚や受付カウンタへの客の案内や、店員の客に対する接客行動の識別を実施する際に別の店員が至近距離に存在する際に誤認識を防ぐことを考慮し、1m 未満の位置推定誤差を目標とする。また図 1 に示すように天井に設置したカメラでフロア映像を撮影する。フロア上には動的遮蔽物が複数存在するためカメラ単体による推定人物の同定は難易度が高い。しかし、複数の動的遮蔽物の位置は取得可能である。測位時において取得した動的遮蔽物の座標を遮蔽物位置としてフロア情報を更新し、事前設置した複数の BLE ビーコンの中から測位に最適な BLE ビーコンを選択して利用する。動的遮蔽物数が存在する環境において、BLE 受信機を所持する人物の位置推定誤差をシミュレーションにより比較した結果、提案手法は既存手法と比較して 1.09 m から 0.51 m へ 0.58 m の精度改善が見られた。また小売店の店員と客による行動の違いによる位置推定精度を比較したところ、本手法は客動線に対して優位であることを示した。さらに本手法を実環境で計測したデータに適用し、3.11 m から 2.41 m へ 0.7 m の改善が可能であることを示した。

2. 関連研究

屋内における位置推定は、慣性センサを用いる手法、カ

メラを用いる手法、無線信号を用いる手法などが存在する。本章では位置推定誤差が累積せず、遮蔽物によるオクルージョンが発生しない無線信号を用いる絶対位置推定に焦点を当てて整理し、本論における研究課題と貢献について述べる。

2.1 Wi-Fi を用いた屋内位置推定に関する研究

Duc ら [12] は Wi-Fi を用いた位置推定手法として、Triangulation という手法を利用している。Triangulation は端末と Wi-Fi アクセスポイント間の距離と RSSI の減衰関係から距離を近似する式を定義し、Wi-Fi アクセスポイントからの推定距離と Wi-Fi アクセスポイントとの相対的な位置関係をもとに測位を行う。3 か所以上の Wi-Fi アクセスポイントから端末までの推定距離を算出し、それぞれの距離の和が最小になるように最小二乗法によって位置を推定する。

また Bahl ら [13] は Wi-Fi からの電波について、Scene Analysis (Fingerprint) と呼ばれる手法を用いて位置を推定している。Fingerprint は測位空間の緯度経度情報と基地局からの電波情報を結び付けた電波環境マップを事前に収集しておき、位置推定時に実際に観測した電波情報とパターンマッチングを行うことで絶対位置を推定する方式である。

2.2 BLE を用いた屋内位置推定に関する研究

山口ら [14] は BLE ビーコンからの電波を用い、Fingerprint 方式で位置推定を行っている。その際に BLE ビーコンの個数による測位精度を評価している。

また Urano ら [15] は BLE ビーコンを人物の首から下げ、BLE 電波受信機であるスキャナがフロア内に多数設置してある環境での位置推定手法を提案している。位置推定には各スキャナで受信した受信電波強度を用いて最尤推定により決定している。最尤推定とは無線電波送信機からの受信電波がガウス分布に従うと仮定したときに、 n 番目の受信機からの距離 R_n を条件とする RSSI 値 P_n の確率密度関数 $f(P_n|R_n)$ を算出して、 $f(P|R) = f(P_1|R_1)f(P_2|R_2)\cdots f(P_n|R_n)$ が最大となる座標を推定位置とする手法である。これらの研究は、遮蔽物による影響や、動的遮蔽物が存在する環境下における位置測位手法については言及されていない。

2.3 遮蔽物を考慮した BLE 測位に関する研究

岡ら [10] は、無線信号の送受信機間に静的遮蔽物がある場合において、直接波が届く場合に比べて受信信号強度が弱くなることでノード間の距離が実際よりも長く推定され、位置推定精度に悪影響を及ぼすという問題に対して、固定された遮蔽物のあるノード間の場合には異なる電波減衰モデルを用いることで精度向上を図る手法を考案している。既存研究では静的な遮蔽物を前提とした測位時に利用する

BLE ビーコンの最適配置について考慮しているが、実環境において最も測位精度に影響を及ぼす可能性が高い動的な遮蔽物である人物を考慮していない。

2.4 研究課題と本論の貢献

本研究ではカメラと BLE ビーコンを利用する。カメラ単体では、顔が映るように大量に設置しないと個別識別が難しいコスト面の問題と、プライバシーの問題が存在する。また BLE 単体では動的遮蔽物の位置が不明であり、電波のゆらぎもあるためカメラほど正確に位置推定ができないという問題点がある。既存の無線信号を用いる手法では、遮蔽物への対策として、フロアの天井や柱上部などの電波遮蔽の影響が少ない箇所へ無線電波送信機を設置していたが、BLE ビーコンを天井に設置する場合は、安全面、建築基準法（建築基準法施行令第 39 条）の考慮のために、ネットやボルトなどによる固定が必要であるため設置コストが高く、また手の届かない場所への電池交換などのメンテナンスコストが高い。カメラはセキュリティの観点から監視カメラを設置している店舗が多く存在し、棚や机などによるオクルージョンを避けるために天井に設置されることが多いことに着目し、既存の数台のカメラを利用した動的遮蔽物の認識と、運用者の手が届く範囲で落下する危険性の少ない箇所に配置した BLE ビーコンを用いての個別識別を実施することで測位精度の低下を抑制可能な手法を提案する。本論の貢献は、以下 3 点である。

- 運用者の手の届く範囲に設置された無線電波送信機による動的遮蔽物による精度低下を考慮した測位手法の提案
- 実店舗における動的遮蔽物移動動線を用いた提案手法のシミュレーションによる評価検証
- 実店舗への無線電波送信機設置および、現場における提案手法の有効性評価

3. 事前検証

Bluetooth の通信帯域は 2.4GHz 帯を用いているため、岡ら [10] が述べているように、BLE ビーコンと BLE 電波受信機の間には机や壁などが存在する場合に電波の反射、遮蔽、回折の影響を受ける。特に水分による電波の吸収が発生することから、水分を多く含む人物による遮蔽の影響は多大である。すなわち小売店やショッピングモールなどの屋内位置推定の利用が想定される場面では人物が多数存在することが考えられるため、人物による電波の遮蔽は位置推定精度に多大な影響を与えられと考えられる。そこで我々は人物がどの程度電波を遮蔽するかに関して事前検証を行った。実験場所は電波無響室で電波の反射が発生しない環境に BLE ビーコンを設置し、BLE 電波受信機を腰の前後に装着することで、自身の体が BLE ビーコンからの電波を遮蔽する環境を再現した。実験は BLE ビー

表 1 電波無響室での測定結果

Table 1 Measurement results in wireless signal anechoic chamber.

送受信機間距離	人物遮蔽	平均受信電波強度 [dBm]	分散
0.5 m	なし	-67.6	3.2
0.5 m	あり	-91.6	6.1
5.0 m	なし	-92.6	2.8
5.0 m	あり	受信不可	-

コンから 0.5m および 5.0m 離れた地点で 1 分間静止し、体の向きと BLE ビーコンの個体を入れ替えることで複数回実施した。BLE ビーコンは芳和システムデザイン製の BLEAD®Version 2, BLE 電波受信機は BLE ビーコンからの電波を受信可能な専用のデバイスを作成した。BLE ビーコンから 1.0m の距離で計測される受信電波強度である TxPower は -78 dBm とした。また BLE 電波受信機の受信頻度は 1Hz である。

上記手順により計測した BLE 受信電波強度の集計結果を表 1 に示す。集計は静止時のみのデータを用いた。BLE ビーコンから 0.5m の地点で計測した際に、BLE 送受信機間に存在する人物の存在によって電波受信強度が 24.0dB 劣化したことから、同じ送受信機間距離でも人物の存在によって大きく受信電波強度が劣化することが分かる。この電波受信強度の劣化は約 4.5m の距離誤差に相当する。また 5.0m の地点で人物によって遮蔽される場合、電波を受信することができなかった。本事前検証により、人物遮蔽の存在によって約 4.5m の距離誤差が発生することから、人物による電波の遮蔽は位置推定に大きな影響を与えることが示された。

4. 電波伝搬モデル

3 章で検証した結果、BLE 電波受信強度は BLE ビーコンからの電波が遮蔽されることにより大きく劣化する。そこで本章では遮蔽物を考慮した電波伝搬モデルを定義する。

受信電波強度は主に距離によって減衰するため一般的な電波伝搬モデルは式 (1) で表すことができる。

$$rssi(r) = p_0 - 10d \log_{10} r \text{ [dBm]} \quad (1)$$

ここで r は BLE ビーコンからの距離、 p_0 は BLE ビーコンから 1m の距離で計測される受信電波強度、 d は電波の減衰を表す定数である。また受信電波強度は距離だけでなく遮蔽物の影響によっても減衰する。本研究では遮蔽物の数に比例して受信電波強度が減衰するものとした。この減衰が r_{loss} [m] の電波伝搬による減衰と等価であるとした場合、電波伝搬モデルは式 (2) で表すことができる。

$$rssi(r) = p_0 - 10d \log_{10}(r + n_o r_{loss}) \text{ [dBm]} \quad (2)$$

ここで n_o は BLE 送受信機間に存在する静的・動的遮蔽物の数である。さらに、測距のために電波受信強度 $rssi$ から

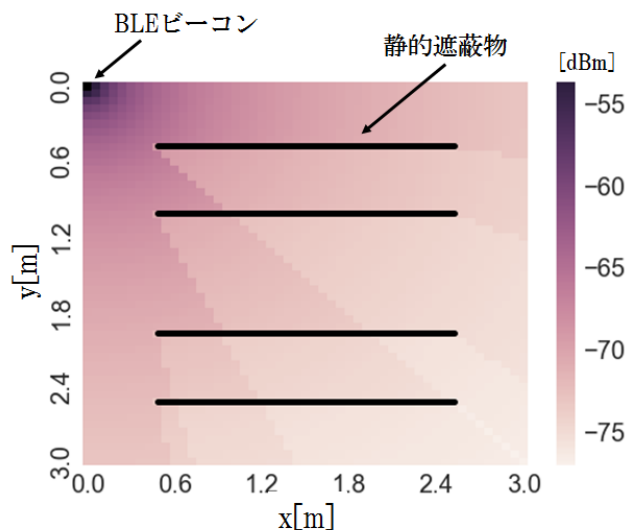


図 2 静的遮蔽物の影響による電波伝播の可視化

Fig. 2 Visualization of wireless signal propagation by influence of static obstructions.

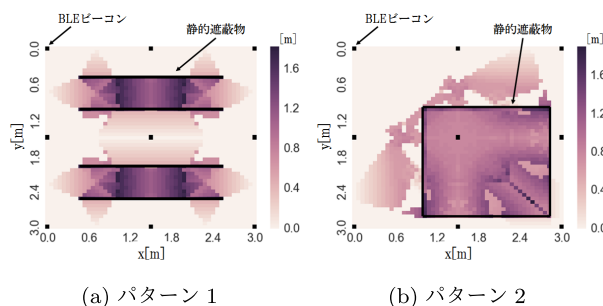


図 3 BLE ビーコンを等間隔に配置した際の誤差分布

Fig. 3 Distribution of estimation errors when BLE beacons are equally installed.

距離 r への変換方法は、式 (2) を変形した以下の式 (3) で表すことができる。

$$r = 10^{\frac{p_0 - rssi}{10d}} - n_o r_{loss} \text{ [m]} \quad (3)$$

本モデルで静的遮蔽物が存在する場合の電波減衰を可視化したものを図 2 に示す。図 2 は左上に設置された BLE ビーコンからの電波が、距離と遮蔽物によってどのくらい減衰するかを式 (2) に従い計算したものである。パラメータは $p_0 = -65$ [dBm], $d = 1.133$, $r_{loss} = 0.628$ とした。遮蔽物の有無によって電波減衰の度合いが異なることが分かる。また本モデルで静的遮蔽物が存在する環境で BLE ビーコンを等間隔に設置した場合の位置推定誤差をシミュレーションした。図 3 は 2 パターンの静的遮蔽物配置で、三点測位による位置推定誤差をシミュレーションした結果である。三点測位による推定は、最小二乗法を用いた。図 3 より遮蔽物に囲まれ BLE ビーコンからの電波が遮蔽される位置では位置推定誤差が増加していることが分かる。

5. 提案手法

本研究では、動的遮蔽物として人物が店舗内を往来する環境において、店舗内に複数設置された BLE ビーコンの中から、動的遮蔽物の影響が少なく測位精度の劣化要因にならない BLE ビーコンを逐次的に選択して位置推定を行う手法を提案する。これにより、処理能力や電池消費量、記憶容量などのためにすべての BLE ビーコンからの受信電波強度を保存できない場合に備え、送信機 (BLE ビーコン) もしくは受信機 (受信デバイス) を制御することで少ない情報量での位置推定が可能となる。位置推定対象の人物以外も含めた不特定多数の動的遮蔽物の位置推定において、本手法では、カメラによる人物追跡システム [6] を利用する。カメラによる人物特定は、技術的に課題が残るが、対象を特定することなく、単に動的遮蔽物の位置のみを検出することは容易である。本手法は、位置推定を行うごとにフロア内の不特定多数の動的遮蔽物の位置が把握できるため、位置推定において動的遮蔽物の影響が少ない BLE ビーコンを選択可能となる。本手法は BLE ビーコンをフロアに配置する事前配置フェーズと、BLE ビーコンを選択して位置を推定する位置推定フェーズに分かれている。各フェーズの詳細は次節に示す。

5.1 事前配置フェーズ

まず前処理として、静的遮蔽物を含むフロア情報から文献 [10] を基にした手法により n 個の BLE ビーコンを事前配置する。ここで静的遮蔽物とは机や椅子のような短時間で移動しない物体のことを指し、 n 個の BLE ビーコンの配置は 1 つずつ決定される。また BLE ビーコンの配置可能な候補箇所は歩行の妨げにならない壁沿いおよび静的遮蔽物上などの所定の場所とし、この BLE ビーコン配置候補点の集合を $A_{all} \subset S$ とする。ここで S は位置推定範囲の座標の集合とする。位置推定範囲はフロアを 0.5m ごとのグリッド状に区切った際の各格子点の座標である。ある BLE ビーコンの配置パターン $A \subset A_{all}$ に対して、観測者の位置を $u \in S$ としたとき、観測者と BLE ビーコン間の電波シミュレーションにより、推定位置が $e \in S$ となる確率 $P(A, u, e)$ を最尤推定によって算出する。その後、各観測者の位置 u に対して、位置推定の誤差の期待値 $E(A, u)$ を次の式 (4) で定義する。

$$E(A, u) = \sum_{e \in R} \|u - e\| P(A, u, e) \quad (4)$$

また BLE ビーコン配置に関するコスト関数 $C(A)$ を位置推定範囲全体での $E(A, u)$ の総和 $C(A)$ として式 (5) で定義する。

$$C(A) = \sum_{u \in S} E(A, u) \quad (5)$$

このコスト関数の値によって、BLE ビーコンの配置を 1

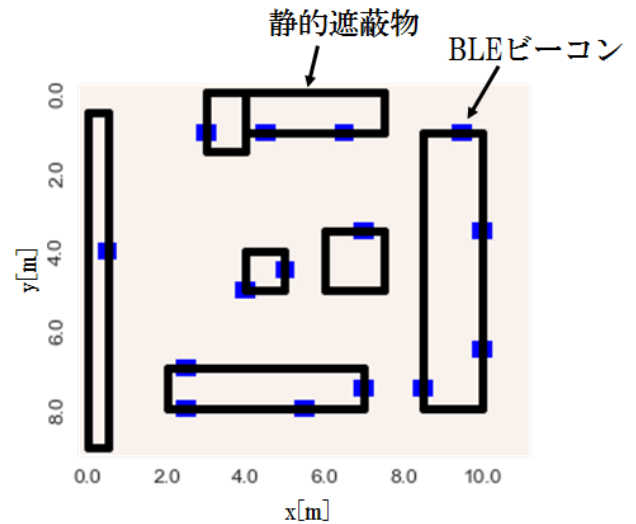


図 4 フloor図と最適 BLE ビーコン配置

Fig. 4 Floor plan and optimal BLE beacon arrangement.

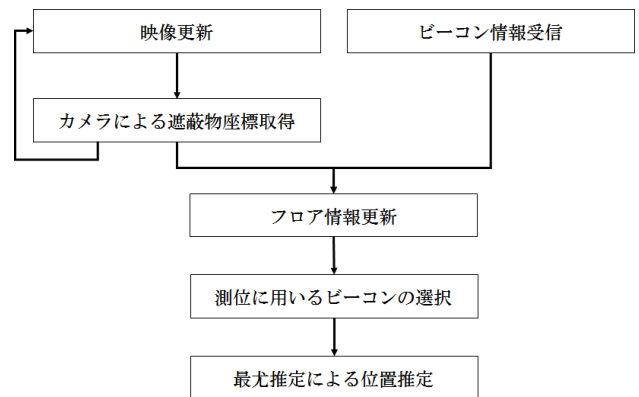


図 5 位置推定フェーズの処理概要図

Fig. 5 Figure of processing summary of the location estimate phase.

つずつ評価する。BLE ビーコン配置を $A_i (\subset A_{all})$, $i + 1$ 番目に配置する BLE ビーコン配置を a_{i+1} とし、下記式 (6) を満たすように a_{i+1} を決定していき、最適配置 $A_{opt} (\subset A_{all})$ を決定する。

$$a_{i+1} = \arg \min_{a \in A_{all}} C(A_i \cup \{a\}) \quad (6)$$

ただし $A_0 = \phi$ である。以上により決定した A_{opt} の座標に BLE ビーコンを配置する。例として図 4 にフロア配置図と BLE ビーコン数 $n = 15$ とした際の最適 BLE ビーコン配置を示す。

5.2 位置推定フェーズ

位置推定フェーズの処理概要図を図 5 に示す。位置推定時においては、人物追跡 [6] により、人物を含む任意の動的遮蔽物が存在する座標を特定し、その座標を遮蔽物座標としてフロア情報を更新する。その後、動的遮蔽物による影響を受けている BLE ビーコンを除外するために、 n 個の BLE ビーコン A_{opt} からフロア全体において位置推定部で

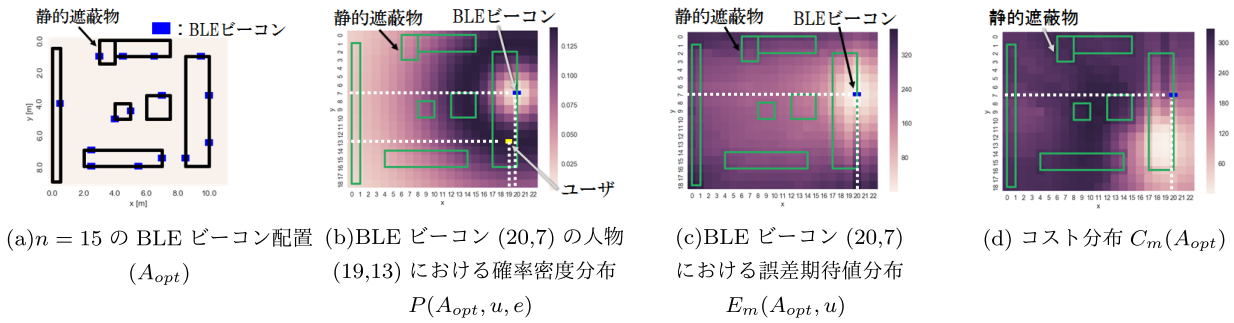


図 6 位置推定フェーズにおける処理イメージ

Fig. 6 Process diagram of position estimation phase.

最適な位置測位が可能な BLE ビーコン m 個を選択する。選択には式 (7), (8), (9) に示すように、事前配置と同様の手順で BLE ビーコンを 1 つずつ選択していく。

$$E_m(A_{opt}, u) = \sum_{e \in S_m} \|u - e\| P(A_{opt}, u, e) \quad (7)$$

$$C_m(A_{opt}) = \sum_{u \in S_m} E_m(A_{opt}, u) \quad (8)$$

$$a_{i+1} = \arg \min_{a \in A_{opt}} C_m(A_i \cup \{a\}) \quad (9)$$

すなわち選択候補点は既設されている n 個の BLE ビーコン座標の集合 A_{opt} となり、その座標を入力として m 個の最適 BLE ビーコンを選択する。選択した m 個の BLE ビーコンにより最尤推定結果を用いて位置推定を行う。

例として、アルゴリズムの計算例を図 6 に示す。BLE ビーコンが 15 個配置されている状況で、座標 (20, 7) に設置されている BLE ビーコンからの電波を座標 (19, 13) に存在する人物が受信した際の存在確率密度 $P(A_{opt}, u, e)$ を計算すると図 6(b) のような分布となる。これを、人物が存在する座標すべてに実施し、式 (7) によって算出した際の座標 (20, 7) に設置された BLE ビーコンにおける誤差期待値 $E_m(A_{opt}, u)$ を可視化すると図 6(c) のような分布となる。最後に式 (8) によってコスト関数 $C_m(A_{opt})$ を算出すると、図 6(d) のような分布となる。コスト関数分布 $C_m(A_{opt})$ から、最も小さい値をとる座標に設置してある BLE ビーコンを選択する。ここでは座標 (20, 13) に設置された BLE ビーコンが 1 番目に選択される。

6. シミュレーションによる評価

本章では、動的遮蔽物として複数の人物が往来する環境下をシミュレーションで再現し、提案手法と既存手法における測位精度の評価を実施する。シミュレーションでは、BLE 送受信機間の動的遮蔽物数による評価と測位時に利用候補とする BLE ビーコン数による評価を行い、動的遮蔽物が多数存在する環境での提案手法の有効性を確かめた。また店員と客について、それぞれの動線の違いによって提案手法の推定精度に影響があるか評価を実施した。

6.1 シミュレーション環境

本シミュレーションはフロア内に人物が複数存在する状況を想定し、その中の 1 つの動線について 1 [s] 間隔で測位を行う。フロアマップは実際の小売店のもを利用し、動線は実際に人物が歩行したものをを用いており、カメラ映像から手動でラベル付けすることで真の位置が既知である。BLE 電波には平均 0、分散 σ^2 の真数スケールの白色ガウスノイズが付加されるものとする。ここで、 σ^2 は任意の BLE ビーコンからの電波を静止中の 6 台の BLE 受信機で計測する事前実験により、その際の受信電波強度の分散を平均した値である $\sigma^2 = 0.20581$ とした。電波伝搬モデルは式 (3) と式 (2) を利用した。 n_o には動的遮蔽物も含まれるものとする。評価は受信電波強度の強いものから順に選択する既存手法 [10] と比較するものとした。電波伝搬モデルにおけるパラメータは、 $p_0 = -65$ [dBm], $d = 1.133$, $r_{loss} = 0.628$ とした。本シミュレーションでは 2017 年に実店舗で録画した 26 人の対象人物動線について評価を実施した。

6.2 BLE ビーコン数による評価

事前に配置された BLE ビーコンから位置推定時に動的遮蔽物を考慮して選択される最適 BLE ビーコン数 m による位置推定誤差を評価した。BLE ビーコンからの電波は距離によって減衰するが、約 3m 以上離れると受信強度の分散が大きくなり、正確に受信できなくなる [16]。そこで、今回は約 150m² のフロアで BLE ビーコンが半径 1.5m 以内に存在するために、 $150/1.5^2\pi > 21$ より事前配置した BLE ビーコン数を $n = 22$ とした。 m を 1 個から 22 個まで増加させ、時刻ごと、人物ごとに位置推定誤差を平均した結果を図 7 に、BLE ビーコンごとの遮蔽回数を BLE ビーコン数で正規化したものを図 8 に示す。図 7 より既存・提案手法ともに BLE ビーコンの数が増加するにともない誤差が低くなる傾向が見られたが、BLE ビーコン数にかかわらず提案手法の方が誤差を抑制できていることが分かる。これは、図 8 の BLE ビーコン 5 個以上に示すように、提案手法は遮蔽の少ない優れた BLE ビーコンを選

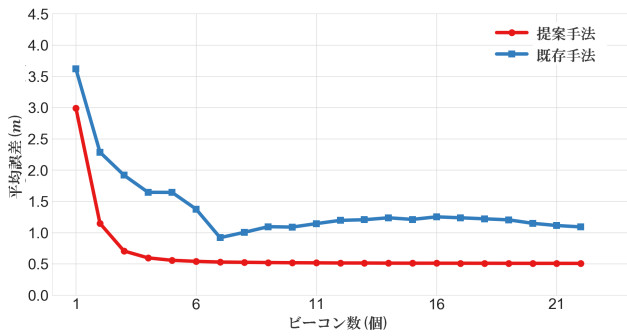


図 7 BLE ビーコン数による平均位置推定誤差の比較

Fig. 7 Comparison of average location estimation error by number of BLE beacons.

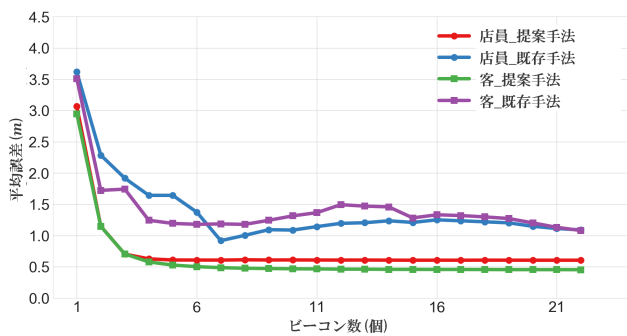


図 8 BLE ビーコン数による動的遮蔽物数の比較

Fig. 8 Comparison of number of occurrences for each number of BLE beacons.

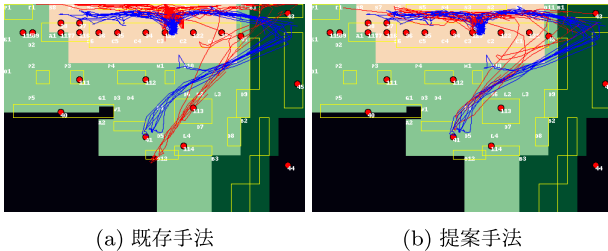


図 9 7 個の BLE ビーコンを用いた場合の位置推定結果比較 (青: 真値, 赤: 推定値)

Fig. 9 Comparison of location estimation results using seven BLE beacons (blue: true trajectory, red: estimated trajectory).

択していることに起因すると考えられる。また提案手法は BLE ビーコン数 6 個以上では誤差が一定となった。提案手法は、全体で 0.73 m, BLE ビーコンをすべて使用して位置推定を行った場合で 0.58 m の精度改善が見られた。例として既存手法と提案手法の誤差の差が最も小さい $m = 7$ とした際の位置推定結果を図 9 に示す。既存手法はつねにずれた座標に位置が推定されているが、提案手法は既存手法と比較して正確に推定できていることが分かる。これは遮蔽物が多数存在する環境において、ほとんどの BLE ビーコンからの電波が遮蔽されることが原因であり、提案手法は遮蔽の少ない BLE ビーコンを選択できたためである。

表 2 遮蔽回数ごとの位置推定回数出現数

Table 2 Number of location estimated occurrences par shielding frequency.

	平均 [回]	分散
提案手法	5.19	5.1
既存手法	5.38	5.5

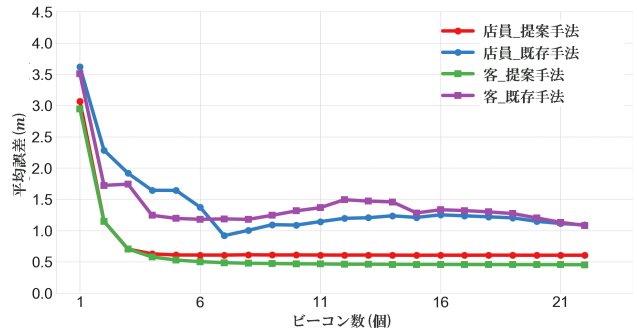


図 10 平均位置推定誤差における店員と客の比較

Fig. 10 Comparison of staff and customer in average location estimation error.

6.3 BLE 送受信機間の動的遮蔽物数による評価

複数人物の動線について、BLE 送受信機間の動的遮蔽物数による位置推定誤差を評価した。位置推定に用いる BLE ビーコン数 m を 1 個から 22 個まで増加させた場合の遮蔽回数ごとの位置推定回数出現数を表 2 に示す。これより、提案手法は既存手法と比較して、遮蔽の少ない BLE ビーコンを選択することができており、位置推定精度に寄与すると考えられる。

6.4 属性による評価

本手法を、小売店の店員および客動線に分けて適用した結果を図 10 に示す。店員と客を比較すると、客の位置推定誤差は店員のものより小さく、この手法は客にとってより有利であると考えられる。本結果の原因として、店員はレジなどの作業のためにカウンタ領域に長時間滞在することが多く、BLE ビーコンからの電波が複数密集した店員に遮蔽されやすいためであると考えられる。一方で客はフロアを自由に動くため、フロア・カウンタの様々な位置に設置された多数の BLE ビーコンを選択候補にすることができ、遮蔽の少ない BLE ビーコンを選択できると考えられる。

7. 実環境実験

本章ではカメラが天井に設置された屋内環境において、実際に人物が BLE 受信機を所持した際に計測したデータを用い、位置推定誤差の評価を実施した。

7.1 実験環境

本実験環境の簡易図を図 11 に示す。図は天井に全方位

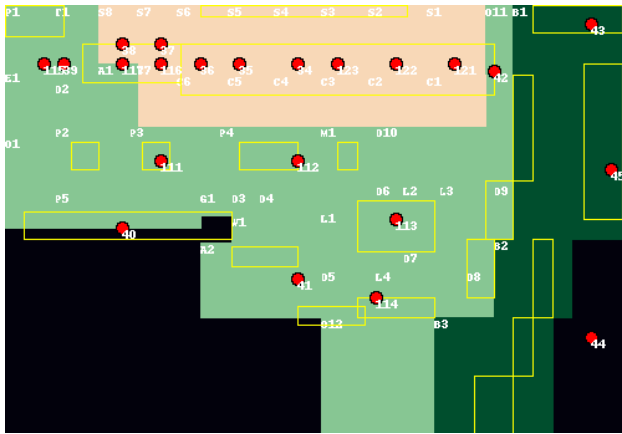


図 11 実験環境簡易図 (緑:フロア, 白:カウンタ, 濃緑:バックヤード)

Fig. 11 Experiment environmental simple figure (green: floor, white: counter, deep green: backyard).

表 3 電波受信強度におけるシミュレーション実測値の誤差

Table 3 Error between simulation and real environment.

店員 ID	平均距離誤差 (m)
1	12.19
2	4.09
3	2.58
4	4.53
5	8.46
6	0.86
平均	5.45
中央値	2.61

カメラが複数設置されたある小売店について表したものであり、黄色の線で囲まれた領域が静的遮蔽物、赤丸が BLE ビーコン (BLEAD®Version 2) である。BLE ビーコンはレジなどの接客カウンタと壁、商品棚などの静的遮蔽物に合計 22 個設置した。BLE 受信機は小売店の店員の腰に装着して通常どおり業務を実施してもらった。BLE 受信機は、仕様上 BLE ビーコンからの電波を同時刻に最大 5 個までしか記録できないため、測位に用いる BLE ビーコン数は 5 個とした。また計測対象時間は 30 分間であり、対象時間帯に存在していた店員は 6 人である。

7.2 シミュレーションと実環境の比較

シミュレーションでは受信電波強度は実測値を距離から計算することでシミュレートしていた。本手法では反射や高さ情報などを考慮していないため、実環境では BLE 電波受信強度に誤差が含まれることが考えられる。そこで本節では、シミュレータの信頼性 (誤差) を確認するため、各 BLE ビーコンにおけるシミュレーションで作成した BLE 受信電波強度と実際に計測した BLE 受信電波強度の誤差を比較した。比較は受信電波強度を距離に変換したうえでを行った。比較結果を表 3 に示す。表より実測の BLE 受信データは、シミュレーションと比較して、平均で 5.5m, 中

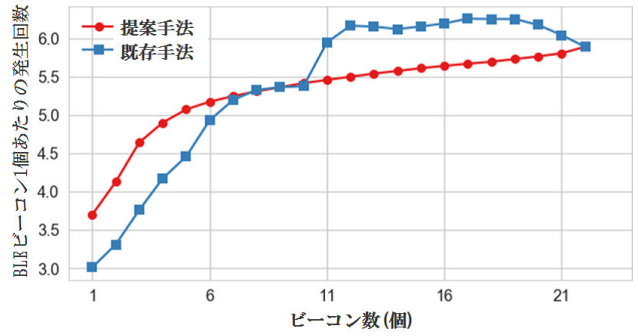


図 12 BLE ビーコン数による動的遮蔽物数の比較 (実店舗)

Fig. 12 Comparison of the number of occurrences for each number of BLE beacons (real environment).

表 4 実環境下での BLE を用いた位置推定結果比較

Table 4 Comparison of location estimation results using BLE under real environment.

店員 ID	提案手法 (m)	既存手法 (m)
1	4.12	5.96
2	1.30	1.73
3	2.42	2.93
4	3.08	3.50
5	2.03	2.63
6	0.63	0.55
平均	2.41	3.11
中央値	1.56	2.10

央値で 2.6m の誤差が含まれており、実環境への適用の際に位置推定誤差が増加することが考えられる。また実環境で取得したデータについて、BLE ビーコン数による動的遮蔽物数の比較を実施した結果を図 12 に示す。図より、実環境においても、BLE ビーコンが多い際に提案手法は遮蔽の少ない優位な BLE ビーコンを選択していることが示された。シミュレーションにおける評価と同様の傾向が得られたことから、本シミュレーションの有用性・信頼性があると考えられる。

7.3 評価結果

店員ごとの位置推定結果を表 4 に示す。既存手法と比較して提案手法は誤差が小さいが、シミュレーションと比較して誤差が大きくなっている。これは、電波伝搬に関して、高さや反射などを考慮していないことに影響があると考えられる。店員 6 人の平均位置推定誤差について、既存手法では 3.11m, 提案手法では 2.41m となり、実環境でも提案手法の方が有効であることが示された。

8. 終わりに

本研究では屋内における絶対位置推定について、BLE を用いた位置推定に着目し、特に動的遮蔽物である人物の往来を考慮した位置推定手法を提案した。シミュレーションにより BLE 送受信機間の動的遮蔽物数による評価と測位

時に利用候補とする BLE ビーコン数による評価を行い、提案手法では動的遮蔽物が多数存在する環境において既存手法よりも優位性があることを示し、実環境での実験でも提案手法の有効性を示した。本方式により、今までに考慮されなかった人物を含む動的遮蔽物が多数存在する環境での位置推定を実施することが可能であり、商品棚への細かいナビゲーションや、厳密な滞在座標の取得が可能であると考えられる。今後は3次元空間上での動的遮蔽物を考慮した評価や、位置推定精度の改善を検討する予定である。

参考文献

[1] セブン銀行：京急線に設置の ATM でビーコンを活用した実証実験を開始，入手先 (<http://www.sevenbank.co.jp/corp/news/2017/pdf/2017030101.pdf>) (参照 2017-04-19).

[2] LINE：【LINE / キリン BV】「LINE」を活用した新たな自動販売機サービス「Tappiness (タピネス)」を17年春より展開！，入手先 (<https://linecorp.com/ja/pr/news/ja/2017/1637>) (参照 2017-04-19).

[3] Kawaguchi, N., Hiroi, K., Shionozaki, A., Asukai, M., Nasu, T., Hashimoto, Y., Nakamura, T., Gotou, T. and Ando, S.: Wi-Fi Human Behavior Analysis and BLE Tag Localization: A Case Study at an Underground Shopping Mall, *MOBIQUITOUS 2016-13th Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services*, pp.151-159 (Nov. 2016).

[4] RetailNext, RETAILNEXT のしくみ，入手先 (<https://retailnext.net/ja/how-it-works-jp/>) (参照 2017-04-19).

[5] 上坂大輔, 村松茂樹, 岩本健嗣, 横山浩之：手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案, *情報処理学会論文誌*, Vol.52, No.2, pp.558-570 (2011).

[6] 小林達也, 加藤晴久, 菅野 勝：単眼全方位カメラを用いた遮蔽に頑健な人物動線追跡手法の提案, *信学技報*, Vol.116, No.411, PRMU2016-146, pp.321-326 (2017).

[7] Nagai, Y., Makibuchi, N., Kamisaka, D., Xu, J. and Sakazawa, S.: 3D Person Tracking In World Coordinates and Attribute Estimation with PDR, *Proc. 23rd ACM International Conference on Multimedia*, pp.1139-1142 (Oct. 2015).

[8] 小阪勇氣, 平山高嗣, 岩井儀雄, 谷内田正彦：全方位画像を用いた歩行軌跡による確率的人物行動認識システム, *情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)*, Vol.2005-CVIM-149, No.23, pp.163-170 (May 2005).

[9] 木原 渉, 河畑 凌, 大西正輝, 興梠正克, 蔵田武志：屋内環境における人の位置計測に向けた RGB-D カメラに映る PDR 利用者の同定, *情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)*, Vol.2016-CVIM-200, pp.1-6 (Jan. 2016).

[10] 岡 海人, 五十嵐正樹, 内山英昭, 島田敬士, 長原 一, 谷口倫一郎：無線位置推定における遮蔽物を考慮したアンカーノード配置, *マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2015) シンポジウム*, pp.799-802 (July 2015).

[11] 石塚宏紀, 上坂大輔, 黒川茂莉, 渡邊孝文, 村松茂樹, 小野智弘：BLE シグナルと PDR によるハイブリッド屋内測位手法の基礎検討—Open Beacon Field Trial 参加における実験結果の共有, *情報処理学会研究報告モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL)*, Vol.2014-MBL-71, No.21, pp.1-6 (May 2014).

[12] Duc, T.X., 宮崎和哉, 西尾信彦：無線 LAN 位置マーカ方

式測位への状況適用型測位手法, *マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2012) シンポジウム*, Vol.2012, pp.1017-1026 (July 2012).

[13] Bahl, P. and Padmanabhan, V.N.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2000*, Vol.2, pp.1017-1026, IEEE (2012).

[14] 山口修平, 荒井大輔, 大岸智彦：BLE タグを用いた屋内位置測位における設置タグ数の影響評価, *信学技報*, Vol.114, No.478, IN2014-146, pp.151-156 (2015).

[15] Urano, K., Hiroi, K., Hiroi, K. and Kawaguchi, N.: A Location Estimation Method using BLE Tags Distributed Among Participants of a Large-Scale Exhibition, *MOBIQUITOUS 2016-13th Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services*, pp.124-129 (Nov. 2016).

[16] Apple: Getting Started with iBeacon Version 1.0, available from (<https://developer.apple.com/ibeacon/Getting-Started-with-iBeacon.pdf>) (June 2014).



星 尚志 (正会員)

1990年栃木県生まれ。2013年宇都宮大学工学部情報工学科卒業。2015年同大学大学院修士課程修了。同年 KDDI 株式会社入社。2016年株式会社 KDDI 研究所データマイニング応用グループへ出向し、屋内測位、アクセスログ分析等のデータマイニング技術の研究開発に従事。



石塚 宏紀 (正会員)

2012年東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻博士課程修了。同年 KDDI 株式会社入社。2013年株式会社 KDDI 総合研究所データマイニング応用グループへ出向し、通信ログや位置情報のデータマイニング技術、行動分析の応用技術等の研究開発に従事。博士 (情報理工学)。



小林 亜令 (正会員)

1973年鹿児島生まれ。1998年北海道大学大学院工学研究科修士課程修了。同年KDD株式会社(現、KDDI株式会社)入社。現在、株式会社KDDI総合研究所統合分析プラットフォームグループリーダー。これまでXML, SVG, ITS, 通信放送融合技術, センサデータマイニング等の研究開発に従事。2003年FIT2003船井記念ベストペーパー賞受賞, 2008年ARIB電波功績賞受賞。



南川 敦宣

2005年京都大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修士課程修了。同年KDDI株式会社入社。現在、株式会社KDDI総合研究所データマイニング応用グループグループリーダー。行動認識, パーソナリティ推定, 位置情報解析等の研究開発に従事。