

スマートフォン位置特定フレームワークに関する一検討

大村 恒介[†] 間邊 哲也[†]

[†] 埼玉大学 大学院理工学研究科 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

E-mail: †{k_omura,manabe}@mnb.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし 本稿では、あらゆる場所での正確かつ高精度な位置特定 (シームレスな位置特定) を市販のスマートフォンで実現するために、スマートフォンで利用可能な位置特定サブシステムを適切に組み合わせる「スマートフォン位置特定フレームワーク」について検討を行っている。まず、現在のスマートフォンで利用可能な位置特定サブシステムの一般的な精度や組み合わせを、位置情報の種類の観点で整理している。また、位置特定精度について、4段階の定義を新たに行っている。そして、LBS(Location-Based Services) についての既存の研究から位置特定に関する LBS の要求として、位置情報の種類、確度および精度、計算コスト、追跡の有無の4つの観点で整理を行っている。これらの LBS の要求の組み合わせを元に、LBS のカテゴリ分けを行い、現時点での位置特定サブシステムの組み合わせの例を示している。これらを通じて、スマートフォン位置特定フレームワークに基づくシームレスな位置特定環境の実現に向けた知見を得ている。

キーワード スマートフォン, フレームワーク, 位置特定サブシステム

A Study on Smartphone Positioning Framework

Kosuke OMURA[†] and Tetsuya MANABE[†]

[†] Saitama University 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570 Japan

E-mail: †{k_omura,manabe}@mnb.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract This paper considers a smartphone positioning framework for seamless positioning to provide high quality service of location-based services (LBS). First, the general precision and combinations of positioning sub-systems at the present time are organized in terms of the type of location information. In addition, four new levels of definition are made for positioning precision. Then, based on the existing research on LBS, the requirements of LBS for positioning are arranged as follows: the type of location information, the required precision and accuracy, the calculation cost, and the presence or absence of tracking. Based on the combination of these LBS requirements, the categorization of LBS is performed, and examples of the combination of positioning sub-systems at the present time are shown. Consequently, the knowledge for realizing seamless positioning environments based on the smartphone positioning framework are obtained.

Key words Smartphone, Framework, Positioning sub-system

1. ま え が き

スマートフォンの普及に伴って、歩行者ナビゲーション [1] や地図 [2], チェックイン [3], 近接マーケティング [4] など位置に基づいたサービス (Location-Based Services; LBS) が普及し、需要も高まっている。LBS の市場は拡大しており、2019年には屋内だけで4.4億ドルに達するという予想もあり [5], 今後も拡大を続けていくと考えられる。このLBSのサービスの質の向上には、位置特定の質の向上、つまり、あらゆる場所での正確かつ高精度な位置特定 (以下、シームレスな位置特定) の

実現が求められる。

シームレスな位置特定を実現するためのアプローチとして2種類が考えられる。第一のアプローチは単一の位置特定システムで実現するアプローチであるが、現時点で市販品として利用可能なシステムは存在していない。第二のアプローチは複数の位置特定サブシステムを組み合わせるアプローチである。この第二のアプローチに対して筆者らは文献 [6] において、スマートフォンで用いられている既存の位置特定サブシステムの原理やスマートフォンの構造の観点から位置特定サブプラットフォームの設計法を提案している。具体的には、スマートフォンの基

本 API(Application Programming Interface) から得られる位置情報、および、筆者らが構築した無線 LAN(Wireless LAN; WLAN) を用いた位置特定システムから得られる位置情報のそれぞれについて、種々の環境・条件において位置特定性能評価を行っている。その結果、スマートフォンにおける位置特定の誤差要因は、以下に挙げる 3 階層で考えることが重要であることを述べている。

- 下位レイヤ：GNSS(Global Navigation Satellite Systems) や WLAN, Cellular などの位置特定サブシステムに依るもの。
- 中位レイヤ：Android や iOS などのプラットフォームから提供される機能に依るもの。
- 上位レイヤ：プラットフォーム上のアプリケーションの動作アルゴリズムに依るもの。

しかしながら、現在のスマートフォンでは、文献 [6] で取り上げられている位置特定サブシステム (GNSS, WLAN, Cellular) 以外にも様々なものが利用可能になっている。その具体例として、Bluetooth (BT), Bluetooth Low Energy (BLE), カメラ (Marker base), 加速度などを用いた慣性計測装置 (Inertial Measurement Unit; IMU) などが挙げられる。本稿では、シームレスな位置特定を実現するための第二のアプローチとして、スマートフォンで利用可能な位置特定サブシステムを適切に組み合わせるための「スマートフォン位置特定フレームワーク」について検討を行う。

本稿は文献 [7] の内容に対して、提案したフレームワークに基づくスマートフォン位置特定サブシステムの組み合わせ例の詳細と、そこから得られる知見について加筆したものであり、以下のように構成される。2. において、LBS と位置特定サブシステムに関するタクソノミーや分析を行っている従来研究について整理を行う。3. において、スマートフォン位置特定フレームワークを提案する。4. において、提案したフレームワークに基づくスマートフォン位置特定サブシステムの組み合わせ例について示す。

2. LBS と位置特定サブシステムのタクソノミー/分析に関する従来研究

LBS は今日、店舗などのスポットに近づいた際に広告などをユーザに提示する近接マーケティング、目的地までの経路検索とナビゲーション、ユーザの付近のスポットなどの検索、ユーザの足取りを記録するライフログ、天気、ニュース、ゲームなどのサービスとして広く普及している。今後も需要が拡大していくと考えられている。その拡大先として、文献 [5] では、人は 80~90% の時間を屋内で過ごすことなどから屋内での需要が高まると述べられている。また、同文献 [5] において、LBS の提供者へのアンケートを行った結果、2m 以下の精度での位置特定の需要が非常に大きいことが示されており、特に近接マーケティングでは、98% のサービス提供者が 2m 以下の精度を要求している。

文献 [8]~[11] では、LBS の分類と、その分類を基にした具体的な LBS の分析が行われている。これらの分類/分析から位

置特定と関連がある項目を抜き出すと次のものが挙げられる。

- 位置情報の取得方法がプッシュ (push) かプル (pull) か。
- 情報の処理の場所がデバイス (ユーザ端末) 上かサーバ上か。
- 過去の位置情報の利用を利用するか。
- 利用環境が屋内か屋外か。
- 位置情報の種類。
- 位置情報の応答に緊急性があるか。

文献 [12] では屋内位置特定のシステムパフォーマンスと導入基準が示されており、次のものが挙げられている。

- Security and privacy：ユーザ端末内で位置特定を行うか否か。使い勝手とセキュリティのどちらを優先するか。
- Cost：インフラ設備やユーザ端末の構築・メンテナンスのための金銭的成本。
- Performance：位置特定の精度と確度。
- Robustness and fault tolerance：システムが満足に動作できない場合における動作継続性。
- Complexity：環境構築やメンテナンスの複雑さ。
- User preference：無線、小型、軽量、低消費電力、計算力があり、迅速で正確でリアルタイムの測位サービスを提供できるなどのユーザが快適性。
- Commercial availability：市販品での利用可能性。

文献 [13] では、WLAN や BLE による位置特定で用いられる位置指紋手法について分類を行っている。その分類項目の 1 つとして、位置情報の種類に関する分類を行っており、空間的な位置情報を出力する“Spatial”と、点で位置情報を出力する“Descriptive”を定義している。

文献 [14] では、ライフログの種類と必要な位置特定精度の分類を行っており、以下に挙げる 3 段階の精度レベルを定義し、各精度レベル別の位置取得手法も示されている。

- 高精度：ピンポイントで位置特定 (半径 10m 以内まで)。【GPS, ネットワーク情報 (無線 LAN)】。
- 中精度：ある狭いエリアでの特定 (半径 500m 内程度)。【ネットワーク情報 (無線 LAN), ネットワーク情報 (携帯電話基地局)】。
- 低精度：ある広いエリアでの位置特定 (半径 1~3km 内程度)。【ネットワーク情報 (携帯電話基地局)】。

文献 [15] では、位置特定と各無線規格の到達距離の関係を示し、無線規格の種類によって取得できる位置特定精度が異なることを示している。

本稿では、これらの知見を踏まえ、スマートフォンで利用可能な位置特定サブシステムを適切に組み合わせることでシームレスな位置特定を実現する「スマートフォン位置特定フレームワーク」について検討を行う。

3. スマートフォン位置特定フレームワーク

位置特定システムの導入は図 1 のように、1) 導入システムの決定、2) 位置特定環境の構築と更新、3) 位置特定に関する LBS からの要求に分けることができる。

屋内位置特定のシステムパフォーマンスと導入基準 [12] によ

表 1 既存のスマートフォン位置特定サブシステムの利用可能性

位置特定サブシステム	市販品での利用可能性	インフラの金銭的な導入コスト	ユーザの金銭的な導入コスト	位置特定環境の構築/更新の複雑さ
GNSS	可能	なし (既存の衛星)	なし	なし (既存の衛星)
Cellular	可能	なし (既存の基地局)	なし	なし (既存の基地局)
WLAN	可能	なし (既存の AP 利用) / あり (必要に応じて AP 設置)	なし	あり (構築/更新時のデータ収集)
BLE	可能	あり (ビーコン設置)	なし	あり (構築/更新時のデータ収集)
Marker base	可能	あり (マーカ設置)	なし	あり (構築時のマーカ設置)

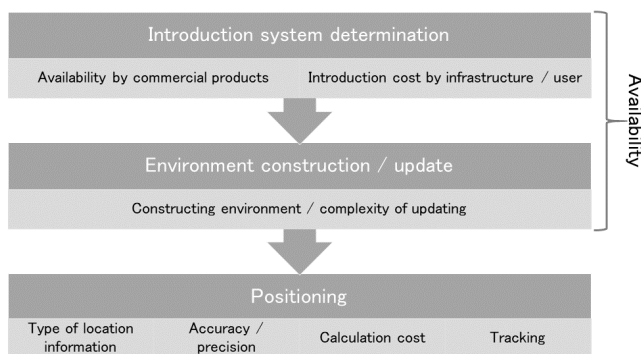


図 1 位置特定システム導入のフロー.

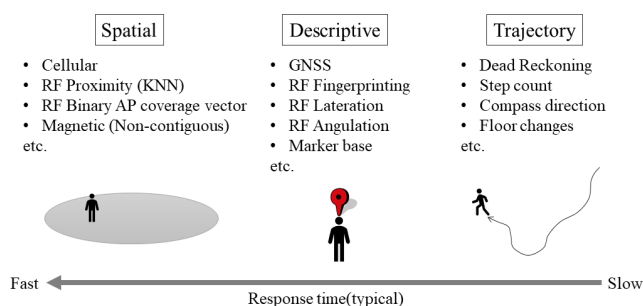


図 2 3 種類の位置情報.

り、まず、1) 導入システムの決定、2) 位置特定環境の構築と更新をまとめた「利用可能性」に関する指標として、a) 市販品での利用可能性、b) インフラの金銭的なシステム導入コスト、c) ユーザの金銭的なシステム導入コスト、d) 位置特定環境の構築や更新の複雑さの 4 項目を取り上げた。表 1 に既存のスマートフォン位置特定サブシステムを「利用可能性」の観点でまとめたものを示す。

3) 位置特定に関する LBS からの要求として、i) 位置情報の種類、ii) 確度および精度、iii) 計算コスト、iv) 追跡の有無の 4 項目を取り上げた。i) 位置情報の種類は、図 2 に示すように、位置指紋手法による位置特定についての分類 [13] における 2 種類に “Trajectory” を加えた 3 種類とした。この図 2 は、位置情報の種類と、その位置特定システムの代表例を示している。“Spatial” では、ある一定の範囲を持った空間的な位置情報ではある一定の範囲を持った空間的な位置情報を出力する。“Descriptive” では、ある特定の点として位置情報を出力する。“Trajectory” では、端末の相対的な軌跡の情報を出力する。ii) 位置特定の精度とは、LBS が位置特定システムに要求する位

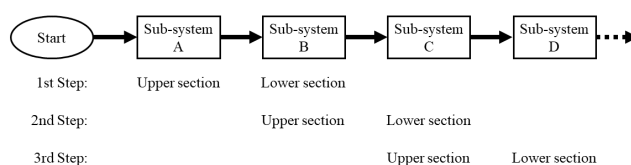


図 3 スマートフォン位置特定サブシステムの組み合わせ方法.

置情報の精度である。文献 [16]~[35] に基づき、i) で定義した 3 種類の位置情報、既存のスマートフォンで利用可能な位置特定サブシステムの位置特定精度の観点で整理したものを表 2 に示す。なお、表 2 内の数値は一般的な精度であり、特に GNSS などでは環境などの要因により数値以上の極めて大きな誤差になる場合もある。LBS が要求する位置特定精度について、文献 [14] では、高精度 (半径 10m 以内まで)、中精度 (半径 500m 内程度)、低精度 (半径 1-3km 内程度) の 3 段階の精度レベルとしているが、本稿では今日需要が高まっている 2m 以下のレベル [5] を加えることで位置特定精度のレベルを表 3 のように定義した。iii) 計算コストは、位置特定結果の計算のコストであり、計算に要する時間と捉えることもできる。ただし、今日ではスマートフォンの性能が向上しており、応答速度に大きな差は発生しないため、特に緊急性が高い場合を除いて考慮しないこととした。例えば、ユーザ端末内で完結しない位置特定サブシステムは緊急性のある LBS には不向きであると言える。iv) 追跡の有無は、過去の位置情報を LBS が要求し、ユーザの軌跡情報を必要としているかどうかである。

以上を踏まえて、位置特定性能の観点での位置特定サブシステムの組み合わせについて表 4 にまとめた。上流 (Upper section)、下流 (Lower section) の順序で位置特定サブシステムを組み合わせることができ、下流の位置特定サブシステムを再び上流に当てはめるような多段階も可能である (図 3)。最初に、位置情報の種類の入出力関係から有効でないものを除外している (表注釈 a)。例えば、Descriptive な位置特定の出力を Spatial な位置特定の入力に用いることは通常ない。次に、出力電力の大きさの関係から有効ではないものを除外している (表注釈 b)。例えば、ビーコンからの出力電力の小さい BLE の Descriptive な位置特定が可能な環境において、アクセスポイントからの出力電力の大きい WLAN の Spatial な位置特定を使用するメリットは小さい。表注釈 c の並列型は、位置情報の種類が Descriptive なもの同士の場合に、重み付け平均などを行うものを示している。次に、位置特定サブシステムの組み合

表 2 既存の位置特定サブシステムの一般的な精度

	屋外のみ		屋外/屋内			
	GNSS	Cellular	WLAN	BLE	Marker base	IMU
Spatial	-100m	20-500m	-50m	-30m	—	—
Descriptive	1-5m	—	3-10m	2-5m	0m	—
Trajectory	—	—	—	—	—	利用可能

表 3 LBS が要求する位置特定精度のレベル

精度レベル	精度	取得目的
超高	半径 2m 以内	近接マーケティングなど, 多くのアプリケーション
高	半径 10m 以内	ナビゲーション, 経路探索, ライフログ
中	半径 200m 以内	関心領域の検索
低	半径 1-3km 以内	市区町村単位の位置特定, 天気予報, ローカルニュース

表 4 位置特定性能の観点での位置特定サブシステムの組み合わせ

	Upper section	GNSS	Cellular	WLAN spatial	BLE/BT spatial	WLAN descriptive		BLE/BT descriptive	Marker base
						RSS-based	Time-based		
Lower section									
GNSS		N/A	○ [11]	× ^a	× ^a	× ^c	× ^c	× ^c	×
Cellular		× ^a	N/A	× ^b	× ^b	× ^a [30]	× ^a	× ^a	× ^a
WLAN spatial		× ^a	△	N/A	○ [29]	× ^a	× ^a	× ^a	× ^a
BLE/BT spatial		× ^a	△	△	N/A	× ^a	× ^a	× ^a	× ^a
WLAN descriptive	RSS-based	× ^{ac}	× ^b	○ [22]	○ [23], [24], [44]	N/A	○ ^c [45]	○ ^c [28]	× ^a
	Time-based	× ^{ac}	× ^b	○	○	— ^c	N/A	○ ^c	× ^a
BLE/BT descriptive		× ^{ac}	× ^b	△	○ [44], [45]	— ^c	— ^c	N/A	× ^a
Marker base		× ^a	△	○	△	× ^a	× ^a	× ^a	N/A
Trajectory		○ [33]	× ^a	× ^a	× ^a	○ [25], [26]	○	○	× ^a

○ : メリットがある.

△ : メリットが限定的.

× : メリットが小さい.

^a : 位置情報の種類の入出力の関係から除外されるもの.^b : 出力電力の大きさの関係から除外されるもの.^c : 並列型.

わせを行っている既存研究 [36]~[43] において有効性が示されており, これらの組み合わせによるメリットがあるものには丸(○)と文献番号を示した. 根拠となる文献がない場合においても, 他の位置特定サブシステムの組み合わせなどからメリットがあると考えられるものについては丸(○)を付した. 表中の三角(△)については, 組み合わせることは可能であるが, 組み合わせによるメリットが限定的なものを表している. 例えば, Cellular と WLAN または BLE/BT の Spatial な位置特定の組み合わせでは, 空間を徐々に絞り込むことが可能だが, WLAN または BLE/BT が使用できる環境では最初に Cellular を使用する必要がない. また, Cellular または BLE/BT はマーカベー

ス と組み合わせるには空間が広すぎるまたは狭すぎると考えられる.

4. 提案したフレームワークに基づくスマートフォン位置特定サブシステムの組み合わせ例

本節では, 3. で提案したスマートフォン位置特定フレームワークに基づいて, スマートフォン位置特定サブシステムの組み合わせ例を示す. LBS のカテゴリを考慮したスマートフォン位置特定サブシステムの組み合わせ例を表 5 に示す. GNSS が安定して利用できるオープンスカイな環境では WLAN など他の位置特定サブシステムが利用できる可能性が低いことから,

表5 スマートフォンにおけるLBSの位置特定に関する要求と適切な位置特定サブシステムの例

Category	Marketing	Detail navigation	Footfall / Billing	Navigation / Emergency	Search	Local information
位置情報の種類	Spatial	Descriptive	Spatial	Descriptive	Spatial	Spatial
精度	超高	超高	高	高	中	低
追跡の必要性	なし	あり	なし	あり	なし	なし
応答速度	中 / 高	中 / 高	高	中 / 高	中	中
LBS の例	近接マーケティング	詳細ナビゲーション, マッピング	ライフログ, 商品やサービスの購入	経路探索, ナビゲーション, 緊急派遣	付近の検索	天気予報, ローカルニュース
適切な位置特定サブシステム (GNSS 以外)	BLE	1) Spatial output +BLE+Trajectory 2) Marker base	1) WLAN 2) BLE	1) Spatial output +BLE+Trajectory 2) Marker base	1) WLAN 2) Cellular+WLAN	1) Cellular 2) WLAN

ここでは除外している。これらの結果から、以下の知見が得られる。

- BLE は、スマートフォンを対象としたLBSで広く利用可能である。
- 高い位置特定性能が要求される環境では、BLEが適している (例えば [46], [47])。
- BLE(descriptive) は Spatial な出力 (例えば, WLAN, BT, BLE) や Trajectory との組み合わせに適している。
- WLAN は BLE の次に利用しやすい。

5. むすび

本稿では、シームレスな位置特定を実現するための第二のアプローチとして、スマートフォンで利用可能な既存の位置特定サブシステムを適切に組み合わせるための「スマートフォン位置特定フレームワーク」について検討を行った。まず、現在のスマートフォンで利用可能な位置特定サブシステムの一般的な精度や組み合わせを、位置特定サブシステムを位置情報の種類の観点で整理した。また、位置特定精度について、4段階の定義を新たに行った。そして、LBSについての既存の研究から位置特定に関するLBSの要求として、位置情報の種類、精度および精度、計算コスト、追跡の有無の4つの観点で整理を行った。これらのLBSの要求の組み合わせを元に、LBSのカテゴリ分けを行い、現時点での位置特定サブシステムの組み合わせの例を示した。以上より、スマートフォン位置特定フレームワークに基づくシームレスな位置特定の実現に向けた知見を得ることができた。

今後の課題として、本稿で検討した、スマートフォン位置特定フレームワークの有効性の検証、他の位置特定サブシステムのフレームワークへの追加、他の位置特定サブシステムの組み合わせの検討などが挙げられる。

文 献

[1] M. Arikawa, S. Konomi, K. Ohnishi, "NAVITIME: Supporting pedestrian navigation in the real world," IEEE Pervasive Comput., vol.6, no.3, pp.21-29, July-Sept. 2007.
 [2] Google Inc., "Mobile Google Maps." <https://www.google.co.jp/mobile/maps/> (Available: 2019.06.10).
 [3] Foursquare Labs, Inc., "Foursquare." <https://foursquare.com/> (Available: 2019.06.10).
 [4] A. Cockrill, M.M. Goode, A. White, "The Bluetooth

Enigma: Practicalities Impair Potential—Awareness is High. Can Usage Be Higher?," J. Advertising Research, vol.51, no.1, pp.298-312, Mar. 2011.
 [5] IndoorAtlas, "The Rise of Indoor Positioning," A 2016 Global Research Report On The Indoor Positioning Market, Sept. 2016.
 [6] T. Manabe, T. Hasegawa, "A Design Methodology for Positioning Sub-Platform on Smartphone Based LBS," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E99-A, no.1, pp.297-309, Jan. 2016.
 [7] 大村恒介, "スマートフォン位置特定フレームワークに関する研究," 埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程学位論文, Feb. 2019.
 [8] E. Beinat, E. Dias, "Location services and accuracy, An analysis for field work applications, Workpaper GIPSY project," Institute for Environmental Studies, Amsterdam, 2003.
 [9] F.M. Dahunsi, B. Dwolatzky, "Statistical analysis of the accuracy of location measurements provided for LBS in South Africa," Proc. IEEE Africon 2011, Livingston, Zambia, pp.1-5, Sept. 2011.
 [10] K. Gratsias, E. Frentzos, V. Delis, Y. Theodoridis, "Towards a taxonomy of location based services," Proc. 5th Int'l Workshop Web & Wireless Geographical Information Syst., Lausanne, Switzerland, pp.19-30, Dec. 2005.
 [11] J. Schiller, A. Voisard, "Location-based services," Elsevier, 2004.
 [12] Y. Gu, A. Lo, I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," IEEE Commun. Surv. & Tut., vol.11, no.1, pp.13-32, Mar. 2009.
 [13] M.B. Kjærgaard, "A Taxonomy for Radio Location Fingerprinting," Proc. 3rd Int'l Symposium on Location- and Context-Awareness, Oberpfaffenhofen, Germany, pp.139-156, Sept. 2007.
 [14] 植田浩光, 力宗幸男, "ライフログ記録に必要な位置情報精度の検討," 信学技報, LOIS2011-32, pp.25-32, Nov. 2011.
 [15] M.B. Kjærgaard, "Location-based services on mobile phones: minimizing power consumption," IEEE Pervasive Comput., vol.11, no.1, pp.67-73, Jan. 2012.
 [16] R. Faragher, R. Harle, "Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons," IEEE J. on selected areas in Commun., vol.33, no.11, pp.2418-2428, Nov. 2015.
 [17] R. Faragher, R. Harle, "An analysis of the accuracy of Bluetooth low energy for indoor positioning applications," Proc. 27th Int'l Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Tampa, FL, USA, pp.201-210, Sept. 2014.
 [18] M. Youssef, A. Agrawala, "The Horus WLAN Location Determination System," Proc. 3rd Int'l Conf. Mobile Syst., Applications, & Services, Seattle, WA, USA, pp.205-218,

June 2005.

- [19] Recommendation ITU-R P.1238-9, "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz," June 2017.
- [20] T. Roos, P. Myllymäki, H. Tirri, P. Misikangas, J. Sievänen, "A probabilistic approach to WLAN user location estimation," *Int'l J. of Wireless Information Networks*, vol.9, no.3, pp.155–164, July 2002.
- [21] S. Ito, N. Kawaguchi, "Bayesian based location estimation system using wireless LAN," *Proc. 3rd IEEE Int'l Conf. Pervasive Comput. & Commun. Workshops*, Kauai Island, HI, USA, pp.273–278, Mar. 2005.
- [22] A. Kushki, K.N. Plataniotis, A.N. Venetsanopoulos, "Kernel-Based Positioning in Wireless Local Area Networks," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol.6, no.6, pp.689–705, June 2007.
- [23] A. LaMarca, Y. Chawathe, S. Consolvo, J. Hightower, I. Smith, J. Scott, T. Sohn, J. Howard, J. Hughes, F. Potter, J. Tabert, P. Powledge, G. Borriello, B. Schilit, "Place lab: Device positioning using radio beacons in the wild," *Proc. 3rd Int'l Conf. Pervasive Comput.*, Munich, Germany, pp.116–133, May 2005.
- [24] S.H. Jung, B.C. Moon, D. Han, "Performance evaluation of radio map construction methods for Wi-Fi positioning systems," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol.18, no.4, pp.880–889, Aug. 2017.
- [25] V. Honkavirta, T. Perala, S. Ali-Loytty, R. Piché, "A comparative survey of WLAN location fingerprinting methods," *Proc. IEEE 6th Workshop Positioning, Navigation & Commun.*, Hannover, Germany, pp.243–251, Mar. 2009.
- [26] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *IEEE Trans. Syst., Man, & Cybernetics, Part C (Applications & Reviews)*, vol.37, no.6, pp.1067–1080, Nov. 2007.
- [27] M. Brunato, R. Battiti, "Statistical learning theory for location fingerprinting in wireless LANs," *Computer Networks*, vol.47, no.6, pp.825–845, Apr. 2005.
- [28] M.A. Youssef, A. Agrawala, A.U. Shankar, "WLAN location determination via clustering and probability distributions," *Proc. 1st IEEE Int'l Conf. Pervasive Comput. & Commun.*, Fort Worth, TX, USA, pp.143–150, Mar. 2003.
- [29] T. Pany, J. Winkel, B. Riedl, H. Niedermeier, B. Eissfeller, T. Würz, D. Jiménez-Baños, "Experimental results from an ultra-tightly coupled GPS/Galileo/WiFi/ZigBee/MEMS-IMU indoor navigation test system featuring coherent integration times of several seconds," *Proc. IEEE 5th ESA Workshop Satellite Navigation Technologies & European Workshop on GNSS Signals & Signal Processing*, Noordwijk, Netherlands, pp.1–8, Dec. 2010.
- [30] J. Krumm, K. Hinckley, "The nearest wireless proximity server," *Proc. 6th Int'l Conf. Ubiquitous Comput.*, Nottingham, England, pp.283–300, Sept. 2004.
- [31] P. Davidson, R. Piché, "A Survey of Selected Indoor Positioning Methods for Smartphones," *IEEE Commun. Surv. & Tut.*, vol.19, no.2, pp.1347–1370, Dec. 2017.
- [32] V. Zeimpekis, G.M. Giaglis, G. Lekakos, "A taxonomy of indoor and outdoor positioning techniques for mobile location services," *ACM SIGecom Exchanges*, vol.3, no.4, pp.19–27, Winter 2002.
- [33] P. Spachos, L. Papapanagiotou, K.N. Plataniotis, "Microlocation for Smart Buildings in the Era of the Internet of Things: A Survey of Technologies, Techniques, and Approaches," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol.35, no.5, pp.140–152, Sept. 2018.
- [34] A. Yassin, Y. Nasser, M. Awad, A. Al-Dubai, R. Liu, C. Yuen, R. Raulefs, E. Aboutanios, "Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications," *IEEE Commun. Surv. & Tut.*, vol.19, no.2, pp.1327–1346, Nov. 2016.
- [35] S. He, S.H.G. Chan, "Wi-Fi Fingerprint-Based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons," *IEEE Commun. Surv. & Tut.*, vol.18, no.1, pp.466–490, Aug. 2015.
- [36] 田村侑介, 永長知孝, "Bluetooth を用いた無線 LAN ポジショニングシステムの性能改善に関する検討," *信学技報, ITS2010-71*, pp.23–28, Mar. 2011.
- [37] D. Macii, A. Colombo, P. Pivato, D. Fontanelli, "A Data Fusion Technique for Wireless Ranging Performance Improvement," *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, vol.62, no.1, pp.27–37, Aug. 2012.
- [38] 東誉之, 永長知孝, "無線 LAN と Bluetooth を用いた屋内ポジショニングシステムの性能評価," *信学技報, ITS2013-21*, pp.25–30, Nov. 2013.
- [39] L.H. Chen, E.H.K. Wu, M.H. Jin, G.H. Chen, "Intelligent Fusion of Wi-Fi and Inertial Sensor-Based Positioning Systems for Indoor Pedestrian Navigation," *IEEE Sensors J.*, vol.14, no.11, pp.4034–4042, June 2014.
- [40] B. Molina, E. Olivares, C.E. Palau, M. Esteve, "A Multimodal Fingerprint-Based Indoor Positioning System for Airports," *IEEE Access*, vol.6, pp.10092–10106, June 2018.
- [41] D. Dardari, P. Closas, P.M. Djuric, "Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol.64, no.4, pp.1263–1278, Feb. 2015.
- [42] M. Cooper, J. Biehl, G. Filby, S. Kratz, "LoCo: boosting for indoor location classification combining Wi-Fi and BLE," *Personal & Ubiquitous Comput.*, vol.20, no.1, pp.83–96, Feb. 2016.
- [43] S. Aparicio, J. Pérez, A.M. Bernardos, J.R. Casar, "A fusion method based on bluetooth and WLAN technologies for indoor location," *Proc. 2008 IEEE Int'l Conf. Multisensor Fusion & Integration for Intell. Syst.*, Seoul, South Korea, pp.487–491, Oct. 2008.
- [44] 大村恒介, 間邊哲也, "Positioning Performance Evaluation of BLE Positioning System," *信学技報, ITS2017-85*, pp.23–28, Mar. 2018.
- [45] 大村恒介, 間邊哲也, "A Study on Cost Reduction of Database Construction of BLE Positioning System," *信学技報, ITS2018-22*, pp.63–68, Dec. 2018.
- [46] 及川幸広, 小嶋文, 間邊哲也, "自転車と公共交通の一体的経路案内による公共交通の利用意向向上に関する研究," *第 38 回交通工学研究発表会論文集*, pp.451–456, Aug. 2018.
- [47] T. Manabe, A. Kojima, "Developing Systems Based on the Pedestrian Navigation Concept Reference Model: A Case Study," *Proc. 21st IEEE Int'l Conf. Intell. Transp. Syst.*, Maui, HI, USA, pp.2665–2670, Nov. 2018.