

# Wi-Fiビーコンと歩行者自律航法を使用する 屋内歩行者測位技術

沢田 健介<sup>1,a)</sup> 花田 雄一<sup>1</sup> 森 信一郎<sup>1</sup>

**概要:** 本稿では新しい発想の Wi-Fi ビーコンを使用する屋内歩行者測位技術を提案し、その性能を実験で検証した結果を示す。提案方式では高利特アンテナを使用して 5GHz 帯の Wi-Fi 電波を狭い範囲に集中させることで高精度なスポット測位用の Wi-Fi ビーコンを実現する。そして、そのような Wi-Fi ビーコンを一定の密度で設置することで Wi-Fi を利用可能なスマート端末を持つ歩行者に離散的な位置情報を提供し、更に、端末に内蔵されたセンサを使用した歩行者自律航法によってビーコンが無い地点において連続的に現在位置を推定する。提案方式の Wi-Fi ビーコンをオフィス環境に 12~15m 間隔で設置して歩行者の歩行軌跡を推定した結果、平均 1.8m の測位精度が得られることが評価実験によりわかった。また、Wi-Fi ビーコンの設置条件についても明らかにした。

**キーワード:** Wi-Fi ビーコン, 歩行者自律航法 (PDR), 屋内歩行者測位

## Indoor Pedestrian Positioning Technique using Wi-Fi beacon and PDR

SAWADA KENSUKE<sup>1,a)</sup> HANADA YUICHI<sup>1</sup> MORI SHINICHIRO<sup>1</sup>

**Abstract:** In this paper, a new Wi-Fi beaconing method by using a high gain beam antenna is proposed. The proposed method can provide a high accurate beaconing means which has good resistant characteristics for jamming by another wireless stations or noises. The high gain beam antenna can shape a narrow hot spot of RSSI by 5GHz Wi-Fi radio wave so that the user terminals can detect the hot spot. The positioning performance of the proposed method is shown by the experimental result. And also the availability of tracking a pedestrian's trajectory by the system consist of the proposed method and the PDR is shown.

**Keywords:** Wi-Fi beacon, Pedestrian Dead Reckoning(PDR), Indoor pedestrian navigation

### 1. まえがき

近年、スマート端末の普及に伴い、位置情報サービスの需要が増大している。位置情報サービスとは、例えば、歩行者ナビゲーション [1]、コンシェルジュサービス [2]、端末位置検索サービス [3] などである。いずれのサービスも、何等かの手段でユーザが保持しているスマート端末の位置情報を取得し、得られた位置情報を基にユーザに提供される。

位置情報の検出手段として、屋外環境では GPS に代表される衛星測位方式 [4] が広く使われている。しかし、屋内環境では衛星測位方式のような汎用的な方式が現状では未確立である。その理由として、従来検討されてきた屋内用の位置情報の取得技術は表 1 に示すように、測位の精度と連続性をバランス良く両立する方式が無かったことが考えられる。

代表的な従来の屋内測位方式を表 1 に示す。表 1 に示した技術のうち、Wi-Fi フィンガプリントと UWB TOA は比較的高精度で連続的な従来方式である。しかしこれらの両方式には、導入時に測位対象エリアで精密な電界強度測定などの事前学習が必要で、更に、導入後にも電波伝搬

<sup>1</sup> 株式会社富士通研究所  
Fujitsu Laboratories LTD., Kawasaki, Kanagawa 211-8588,  
Japan

<sup>a)</sup> sawaken@jp.fujitsu.com

表 1 従来の屋内測位方式

Table 1 Existing indoor locating/positioning methods

方式	精度	位置情報
NFC[5]	高	離散的
画像マーカ [6]	高	離散的
可視光ビーコン [7]	高	離散的
Wi-Fi ビーコン [8]	中	離散的
IMES[9], [10]	中	離散的
音波ビーコン [11]	中	離散的
Bluetooth ビーコン [12]	低	離散的
Wi-Fi フィンガプリント [13], [14]	中	連続的
UWB TOA[15]	中	連続的
Wi-Fi 在圏検知 [16]	中	連続的

環境の変更に伴うメンテナンスを要するなど、運用面でのハードルが高いといった問題があった [17]. この問題を回避できる方式、即ち、導入とメンテナンスが容易で、精度と連続性が得られる方式として、ビーコン技術と端末内蔵センサを使用する歩行者自律航法 (PDR) 技術を組み合わせる方式がある. ビーコン技術の中でも Wi-Fi や Bluetooth の電波を使用したスポット測位技術は、既に多くのスマート端末に無線インターフェースが搭載されているため、導入が容易であると考えられる. しかしながら、Wi-Fi や Bluetooth など 2.4GHz 帯の電波を使用する従来のスポット測位方式には、位置情報の精度が低く、他の無線局の電波や雑音の影響を受けやすいといった問題があった.

そこで本稿では、従来よりも高精度で他の無線局の電波や雑音の影響を受けにくい 5GHz 帯の Wi-Fi 電波を使用し、更に、メンテナンスなど導入・運用面を簡素化することを可能とした Wi-Fi スポット測位方式を提案する. そして提案方式の基本性能と設置条件を検証実験結果により示す. 更に提案方式の有用性を示すために、提案方式と歩行者自律航法技術を組み合わせた屋内測位方式の測位性能を実験で確認した結果を示す.

## 2. 従来方式

Wi-Fi スポット測位方式を利用した従来方式の代表例として、Evennouらによる Wi-Fi 測位と PDR 方式を組み合わせたハイブリッド方式がある [18]. 従来方式の構成を図 1 に示す [18]. 図 1 に示したようなハイブリッド屋内測位方式では、Wi-Fi 測位などのスポット測位手段によって離散的な絶対位置を取得する. そして、スポット測位手段で取得した絶対位置情報を基準として歩行者自律航法 (PDR) 手段によって相対位置を算出することで連続的な絶対位置情報を取得する. 歩行者自律航法手段は、端末に内蔵された加速度センサとジャイロセンサの情報から端末の姿勢と移動速度を算出し、端末の相対的な移動軌跡を算出する能力を有している.

図 1 に示すハイブリッド屋内測位方式で使用されている

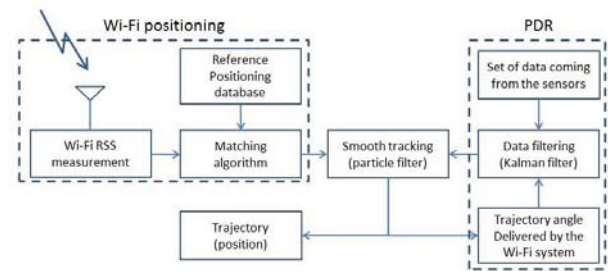


図 1 従来の Wi-Fi 測位と PDR のハイブリッド屋内測位方式  
Fig. 1 Previous hybrid indoor positioning method consist of Wi-Fi and PDR

Wi-Fi スポット測位方式は、一般的な Wi-Fi アクセスポイントが送出する電波を端末で受信する方式だったため、測位精度は高くなく、また、他の無線局の電波や雑音の影響を受けやすいといった問題があった. 図 1 で示した方式の測位精度が悪かった理由は、Wi-Fi 電波が到達する範囲が広く、RSSI の変化も緩やかだったことによる. 従来方式では RSSI を観測することでスポットを検出しているため、測位精度を向上させるためには RSSI が一定以上となるスポットの大きさを小さくする必要があった. スポットの大きさを小さくするためには送信出力を小さくするしかないが、送信出力を小さくすると他の無線局や雑音の影響を受けやすくなってしまいう問題点があった.

従って、より高い測位精度と他の無線局の電波や雑音の影響を受けない Wi-Fi スポット測位手段があれば、従来方式の問題を改善することができることになる.

## 3. 提案方式

### 3.1 原理

前章で述べた従来方式の問題を改善するために、図 2 に示す装置構成と表 2 に示す諸元の Wi-Fi スポット測位方式を提案する.

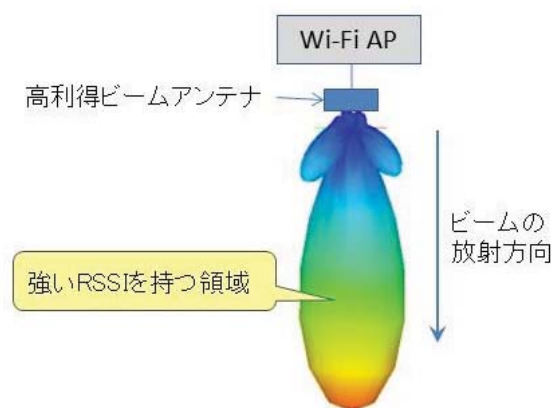


図 2 提案方式の装置構成  
Fig. 2 Configuration of the proposed method

表 2 提案方式の諸元

Table 2 Specification of the proposed method

項目	値
Wi-Fi 仕様	IEEE 802.11a/n(5GHz 帯)
アンテナ形式	平面 4 素子パッチアレイ
アンテナ利得	14.5dBi
ビーム方向	鉛直下向き
偏波	右旋円偏波
送信電力	+8.5dBm/20MHz(EIRP 規定値)
ビーコン周期	100ms

提案方式の動作原理を図 3 に示す。図 2 に示すように、提案方式では天井など端末が移動する面よりも高い位置にビームが鉛直下方向に向くようにアンテナを設置し、アンテナ直下に電界強度が強くなるホットスポットを生成する。アンテナ直下に生成されたホットスポットは図 3 のようになる。

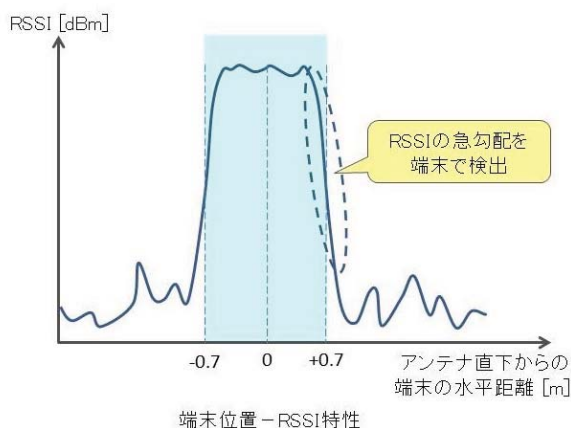


図 3 提案方式の動作原理

Fig. 3 Working principle of the proposed method

図 3 に示したグラフの横軸はアンテナ直下からの水平距離であり、縦軸は端末で観測される RSSI の例である。提案方式のアンテナによれば、アンテナ直下に図 3 に示すような電波の RSSI が急峻に変化する面が生成される。この面を端末に内蔵された Wi-Fi モジュールで検出することでスポット内に入ったイベントを検出する。

提案方式は、測位対象の空間上に非常に強い RSSI のスポットを生成することから、高 S/N 比を実現することが出来る。そのため、他局から到来する信号や雑音の影響を受けにくくすることができると思われる。

### 3.2 提案方式の基本性能

本節では、提案方式の基本性能として、測位精度と動作条件を調査した結果を示す。

#### 3.2.1 測位精度

はじめに、図 4 に示す実験系により提案方式の測位精度

を評価した。

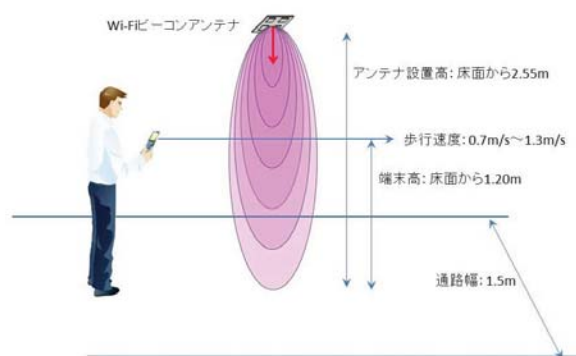


図 4 提案方式の測位精度の評価実験系  
Fig. 4 Test system of the accuracy

本評価実験では、図 4 に示すように、実験者が端末を床面から 1.2m の高さに保つように保持し、一定の速度でアンテナの直下を歩行した。端末には、RSSI の急峻な変化を捉えた際、すなわち、端末がスポット内部に進入したことを検出した際に端末の位置を自動記録する専用アプリを端末にインストールしておいた。そして端末の位置を端末内蔵カメラによって床面に貼られた座標軸を読み取ることで記録した。

本評価実験の結果を図 5~ 図 8 に示す。図 5 は提案方式の基礎性能調査実験結果、すなわち、端末位置と RSSI 特性を示している。

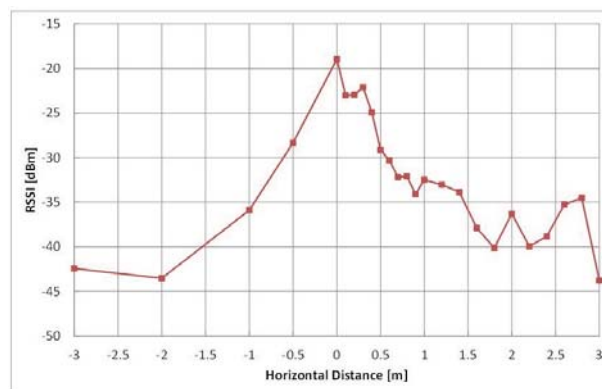


図 5 提案方式の基礎性能調査実験結果 (位置 - RSSI 特性)  
Fig. 5 Characteristics of position v.s. RSSI

図 5 の横軸はアンテナ直下を基準とした端末のアンテナからの水平距離を、縦軸は端末で観測された RSSI をそれぞれ示している。図 5 から、アンテナ直下でのみ RSSI が急峻に上昇している様子がわかる。更に、RSSI が急峻に上昇する領域の RSSI はほぼ全ての局で -30dBm 以上と高く、他局からの妨害や雑音の影響を受けにくいレベルであることがわかる。

図 6 の X 軸上のプロットの位置は端末が RSSI の急峻な

変位を捉えた地点を示している。図6の縦軸 X は被験者の進行方向と並行な軸で、提案方式がスポットを検出した位置を示している。図6の横軸 Y は被験者の進行方向と直行する軸で、アンテナ直下から進行方向に対して横方向の変位である。すなわち、Y が負の領域はアンテナ直下から左側に平行移動したコースを意味し、同様に Y が正の領域はアンテナ直下から右側に平行移動したコースを意味する。評価実験では全てのコースについて 100 回歩行し、更に、異なる 2 地点で測定した。プロットの色の違いは測定した 2 地点の違いを意味する。

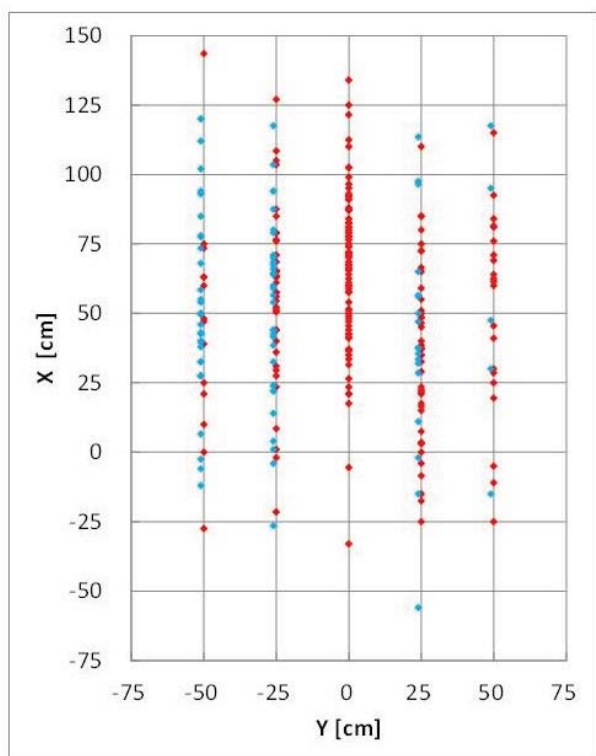


図6 提案方式の基礎性能調査実験結果 (スポット検出位置)  
 Fig. 6 Detected points of the Wi-Fi spot

実験に使用した端末の Wi-Fi モジュールが RSSI をサンプリングする周期は約 200ms なので、毎秒 0.7m/s~1.3m/s で歩行した今回の実験では、平均して 100ms の検出遅延、すなわち、空間上で 10cm の RSSI の検出遅延が見込まれる。更にソフトウェアの処理遅延が加わったことでスポットを検出する位置がアンテナの直下から離れた地点となっていると考えられる。

図7の横軸 Y は、図6と同様にアンテナ直下からの進行方向に対する横方向の変位である。図7の横軸は、図6のスポット検出位置を測位誤差とした場合の、測位誤差の平均値  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  をまとめたものである。図7から、提案方式の平均測位誤差は約 50cm、測位誤差の標準偏差は約 30cm であることがわかる。

図8は、本評価実験を実施した地点で約 10 分間測定した

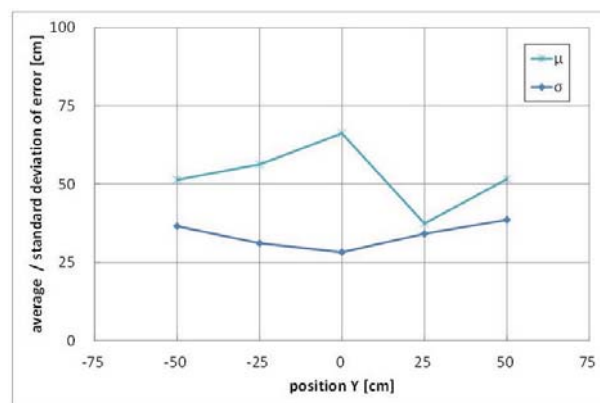


図7 提案方式のスポット検出精度  
 Fig. 7 Accuracy of the spot detection

他の Wi-Fi 局の RSSI である。多くの局が観測されているが、殆ど全ての局の RSSI が -40dBm 以下であり、提案方式の希望局のアンテナ直下における RSSI に対して 10dB 以上低い。この結果は、提案方式が常に 10dB 以上の S/N 比を確保できる環境で動作できる可能性が高く、他の Wi-Fi 局や妨害の影響を受けにくい性質を持つことを示していると考えられる。

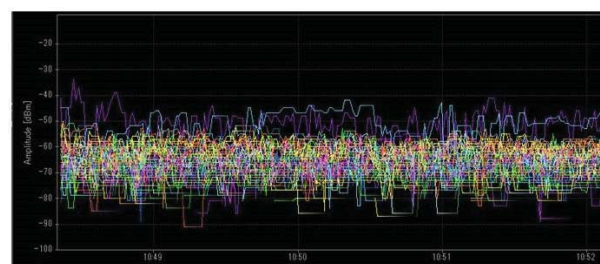


図8 周辺の Wi-Fi 局の RSSI  
 Fig. 8 RSSI of the surrounding Wi-Fi stations

### 3.2.2 設置条件

本節では、提案方式の Wi-Fi ビーコンの設置条件について述べる。提案方式は 5GHz 帯の Wi-Fi 電波を使用して端末の位置を推定しているため、本方式を使い前節で示した測位精度実現するためには電波伝搬環境面での設置条件が存在すると推測された。一例としてオフィス環境の同一地点の天井と床面に提案方式を適用した場合の位置-RSSI 特性を図9に示す。

図9からわかるように、同一地点で測定した場合であっても Wi-Fi ビーコンを天井と床に設置した場合では端末で観測される RSSI 特性が大きく異なっていることがわかる。この現象が発生した原因は、オフィスの床面に設置されている什器類がビームアンテナにより放射された電波のサイドローブ成分を反射し、メインローブ成分と合成されるマルチパス伝搬路を形成したことと推測される。即ち、天井面の近くには電波を反射する物体が存在しないことからサイドローブが遠方に伝搬し、マルチパス伝搬路を形成

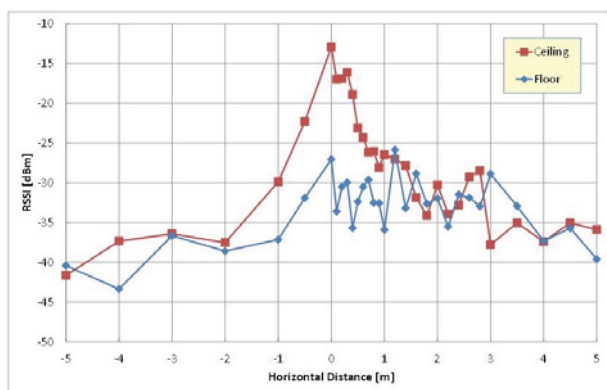


図 9 天井面と床面に Wi-Fi ビーコンアンテナを設置した場合の RSSI

Fig. 9 RSSI by the Wi-Fi beacon on the ceiling/floor

しなかったということである。この現象から、図 10 に示すように、提案方式の Wi-Fi ビーコンの周辺に電波を反射する物体が存在するためには一定の条件が存在すると予想した。

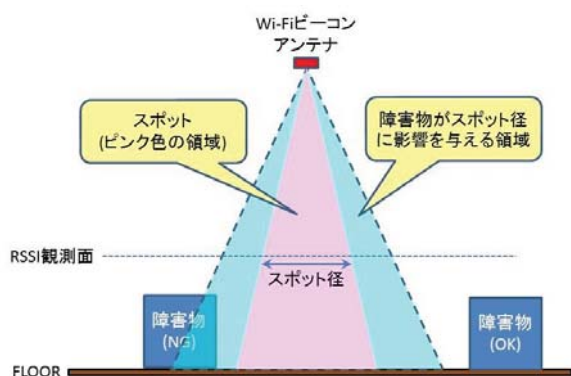


図 10 スポット検出性能に影響を与える領域

Fig. 10 Critical zone for the spot detection performance

そこで、前節で示した測位精度を得るために必要なアンテナの設置条件を調査した。調査は、アンテナが電波を放射する空間内における以下の要素についてレイトレースシミュレーションにより実施した。

- 空間高 : アンテナの設置位置と下方の障害物(床面・床上の物体)間の鉛直距離
- 壁面 : アンテナの設置位置と側方の障害物(壁面)間の水平距離
- 床上の物体 : アンテナの設置位置と側方の障害物(床上の物体)間の水平距離
- アンテナ取付角 : アンテナのメインローブの方向と鉛直線が成す角

図 11 にアンテナ設置地点と床面との間の空間高とスポット径の関係を調査した結果を示す。

図 11 で、スポット径は Wi-Fi ビーコンにより観測面(床面から 1.2m の高さの面)で観測される RSSI の急勾配の直

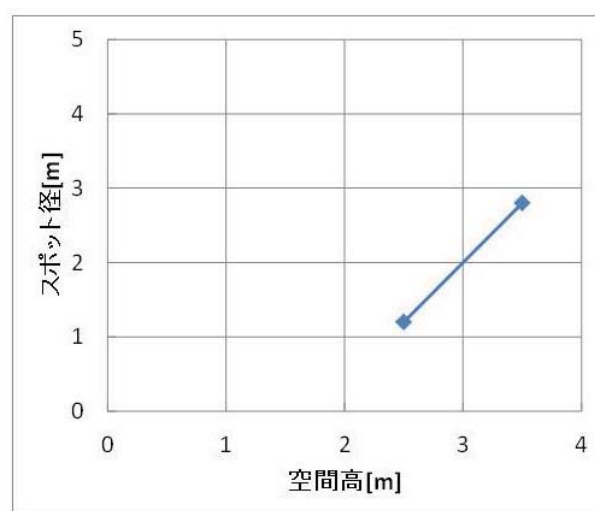


図 11 空間高とスポット径の関係

Fig. 11 Relationship between the vertical space and the spot size

径である。シミュレーションは空間高 10m まで実施したが、空間高が 3.5m を超えた場合にはスポットが生成できなかった。この現象は天井高が高くなることにより電波のエネルギーが広がり RSSI の急勾配を形成できなくなったことによって発生したと考えられる。この結果から、提案方式は空間高 3.5m 以下の空間に設置することを設置条件とする。

図 12 にアンテナ設置地点から壁面までの水平距離とスポット径の関係を示す。

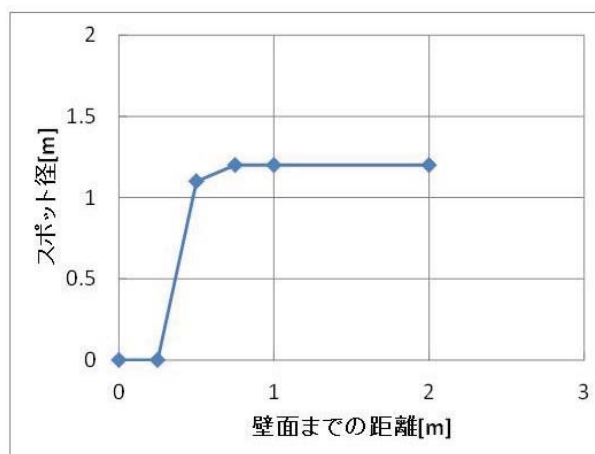


図 12 壁面までの距離とスポット径の関係

Fig. 12 Relationship between the horizontal space and the spot size

図 12 に示すように、壁面までの距離が 1m 以内になるとスポット径が小さくなり始める。また、このシミュレーションを実施した際の天井高は 2.5m だった。以上から、アンテナの設置地点から壁面までの水平距離が空間高に 0.4 を乗じた距離よりも短くなった場合にスポット径が壁面の影響を受けていると考えられる。

図 13 にアンテナの取付角とスポット径の関係を示す。図 13 の横軸はアンテナ直下からの水平距離を示している。図 13 に示すように、アンテナのメインローブを鉛直軸に対して傾けていくと、スポットが生成される地点がアンテナの直下地点から遠ざかると同時にスポット径が大きくなっていることがわかる。この結果によるとアンテナの取付角が 10[deg] を超えるとスポット径の変化が大きくなることから、アンテナ取付角は 10[deg] 以下が妥当と考えられる。

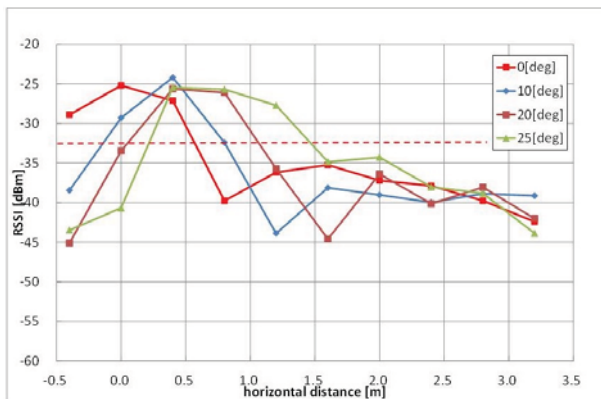


図 13 アンテナ取付角とスポット径の関係

Fig. 13 Relationship between the tilt angle of the Wi-Fi antenna and the spot size

以上から、Wi-Fi ビーコンのアンテナは、図 14 に示す条件を満足することで測位性能を下げずに動作することがわかった。

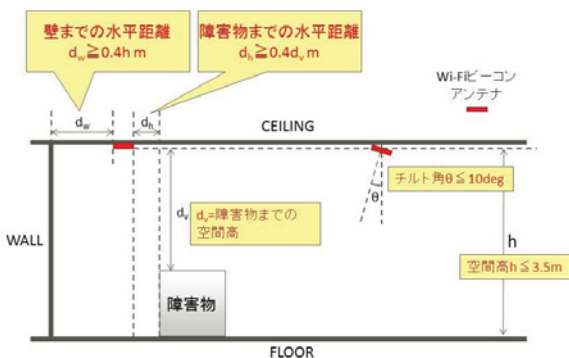


図 14 Wi-Fi ビーコンアンテナの設置条件

Fig. 14 Requirements of the Wi-Fi beacon installation

### 3.3 期待される効果

前節で示した結果により、提案方式は、従来よりも高精度で、他の Wi-Fi 局や妨害に対して強い性質を持つ Wi-Fi スポット測位の実現が期待される。そして、このスポット測位方式を PDR 方式と組み合わせて使用することによって、従来は困難だった高い精度と妨害に強い性質を両立する連続屋内測位技術の実現が期待される。

## 4. 評価実験

提案方式の有用性を評価するために評価実験を実施した。評価実験は実際のオフィス環境に提案方式の Wi-Fi ビーコンを設置し、スマート端末を使用して Wi-Fi ビーコンを検出するとともに PDR によって端末の軌跡を推定することで行った。

### 4.1 実験系

提案方式の評価実験系を図 15 に、実験諸元を表 3 にそれぞれ示す。評価実験で試験者が歩行したルートを図 16～図 18 に示す。図 15 に示すように、Wi-Fi ビーコンは、1 箇所につき 1m 間隔で 2 基あるいは 3 基を直線あるいは正三角形に並べて配置して、歩行中であってもビーコンの電波をロストしないようにしてある。そして、ビーコンは歩行したルート上で約 12m～15m 間隔で一度出現するように配置してある。

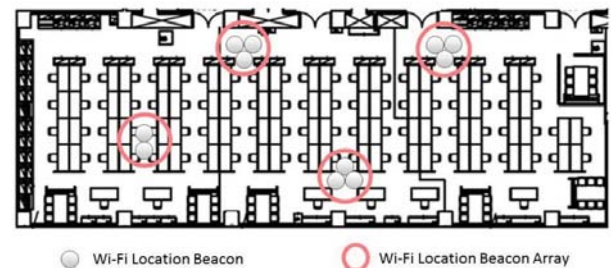


図 15 提案方式の評価実験系

Fig. 15 Test environment for the evaluation of the proposed method

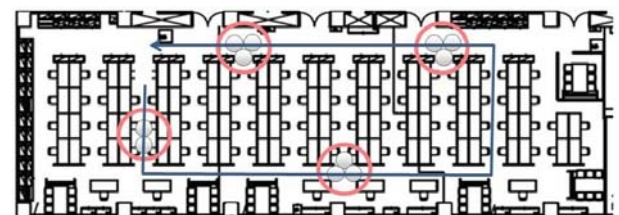


図 16 提案方式の評価ルート (ルート A)

Fig. 16 Test route A

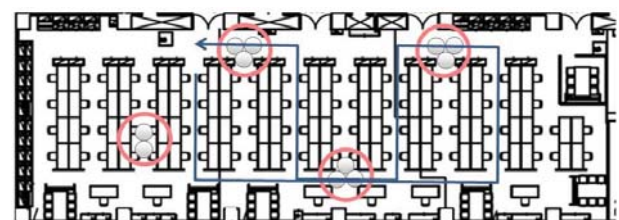


図 17 提案方式の評価ルート (ルート B)

Fig. 17 Test route B

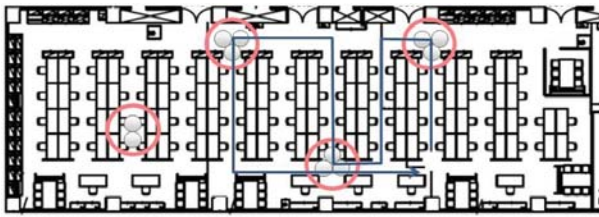


図 18 提案方式の評価ルート (ルート C)

Fig. 18 Test route C

表 3 実験諸元

Table 3 Test condition

項目	値
Wi-Fi AP	JRL-710AL3
端末	Nexus 7
物理チャンネル	W52
ビーコン設置間隔	通路上に 12~15m 間隔に配置
環境	オフィス (通路幅 1.5m, 天井高 2.55m)
被験者	20 代男性
端末保持方法	手に持って画面を見ながら
ルート	3 通り

使用した PDR の諸元を表 4 に示す. PDR では, 3 軸加速度センサで端末の姿勢を推定し, 3 軸ジャイロセンサで端末の旋回角度を推定している [19]. 移動距離は文献 [20] の歩調を使用して推定した速度を時間積分して算出している.

表 4 PDR の諸元

Table 4 Specification of the PDR

項目	値
加速度センサ	3 軸
ジャイロセンサ	3 軸
サンプリング速度	20ms
姿勢推定法	興梠らの方式 [19]
移動速度推定法	歩調利用 [20]

本評価実験では, 端末が Wi-Fi ビーコンを検出した場合, 強制的に推定位置の座標をビーコンの設置場所にし, 各ビーコン間の軌跡を PDR で推定する. マップマッチングや軌跡補完のためのフィルタは使用していない.

## 4.2 実験結果

評価実験により推定した軌跡を図 19~図 21 に, 測位精度 (正解軌跡と推定軌跡の平均誤差) を表 5 にそれぞれ示す.

表 5 に示したように, ある実際のオフィス環境に 12m~15m 間隔で提案方式による Wi-Fi ビーコンを設置して, ビーコン間の軌跡を PDR によって推定した際の軌跡推定誤差は平均で約 1.8m となった. また, Wi-Fi ビーコンの検出成功確率は約 98%であり, 他の Wi-Fi 局や雑音などの影響を受けにくい方式であることもわかった. 以上



図 19 提案方式の評価実験結果 (コース A)

Fig. 19 Trajectory tracking performance (route A)

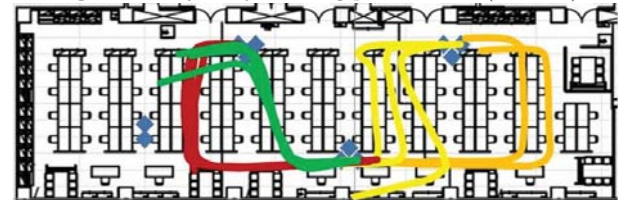


図 20 提案方式の評価実験結果 (コース B)

Fig. 20 Trajectory tracking performance (route B)

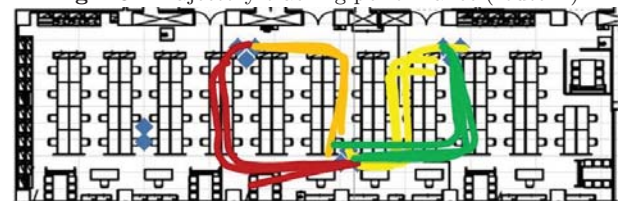


図 21 提案方式の評価実験結果 (コース C)

Fig. 21 Trajectory tracking performance (route C)

表 5 軌跡推定誤差

Table 5 Characteristics of the trajectory tracking error

項目	誤差
平均	1.8m
最小	0.2m
最大	5.5m

の結果により, 提案方式によれば, 実際のオフィス環境において, 従来よりも高精度で, 他の無線局の電波や雑音の影響を受けにくい Wi-Fi スポット測位方式を実現することができたと考えられる.

## 5. 考察

本章では, 提案方式の周波数利用効率, および, 提案方式と PDR とを組み合わせた方式における PDR の性能とスポット測位性能のバランスの, 二つの面から提案方式について考察する.

### 5.1 周波数利用効率

はじめに提案方式の周波数利用効率について考察する. 前章で示した評価実験では図 15 に示すように, 一か所の Wi-Fi ビーコンアレイにつき 2~3 基もの Wi-Fi ビーコンを設置していた. しかし, この手法では図 22 に示すように, 1 基の Wi-Fi ビーコンごとに 1ch の物理チャンネルを割り当てる必要があるため周波数利用効率が悪い. 図 22 に示したのは Wi-Fi ビーコンアレイのチャンネル割当の例で

ある。

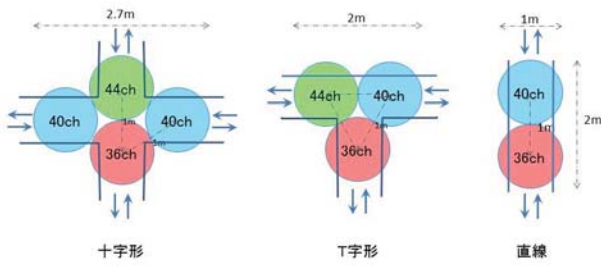


図 22 複数のチャンネルを使用する Wi-Fi ビーコンアレイ  
 Fig. 22 Channel assign of the Wi-Fi beacon arrays

そこで、一か所の Wi-Fi ビーコンアレイにつき 1ch の物理チャンネルしか使用しない構成を考える。1 基の Wi-Fi ビーコンの出力を複数のアンテナに分配することで図 22 と同様の大きさのスポットを生成できる可能性がある。

レイトレーシング法のシミュレーションによって、この手法の実現性を確認した。シミュレーションエリアを図 23 に示す。シミュレーションでは図 23 の中央に送信アンテナアレイを配置し、床面から 1.2m の高さの観測面における RSSI を計算した。

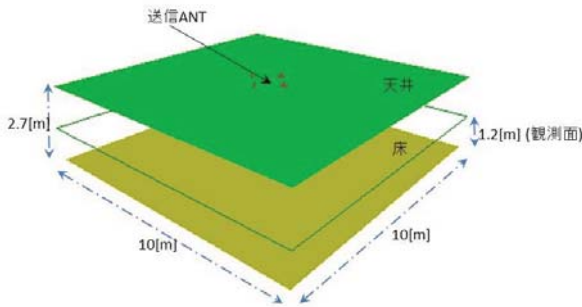


図 23 シミュレーションエリア  
 Fig. 23

アンテナ配置は図 24 に示す 3 通りについて実施した。

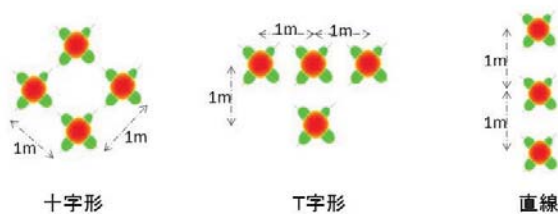


図 24 アンテナ配置  
 Fig. 24 Antenna layout of each antenna array

シミュレーション結果を図 25～図 27 に示す。図 25、図 26、図 27 は、それぞれ、アンテナを直線、T 字形、十字形に配置した場合の結果である。各結果における、プロッ

トの色の違いはアンテナ素子の位置を  $\pm\lambda$  の範囲でランダムに微動させた場合の結果である。アンテナ素子の位置を微動させた理由は、同一の電波を複数のアンテナに分配していることから、干渉による干渉縞の影響を調べるためである。

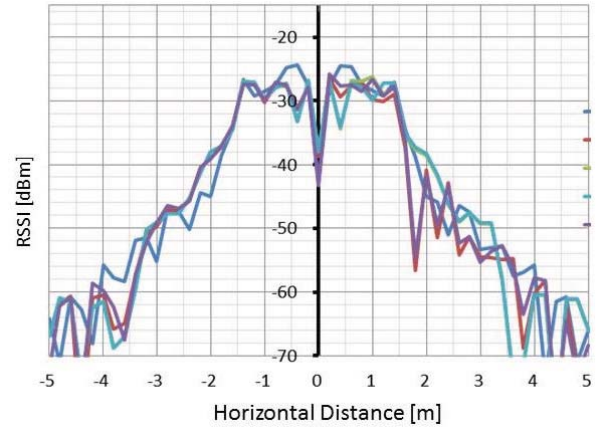


図 25 シミュレーション結果 (直線配置)  
 Fig. 25

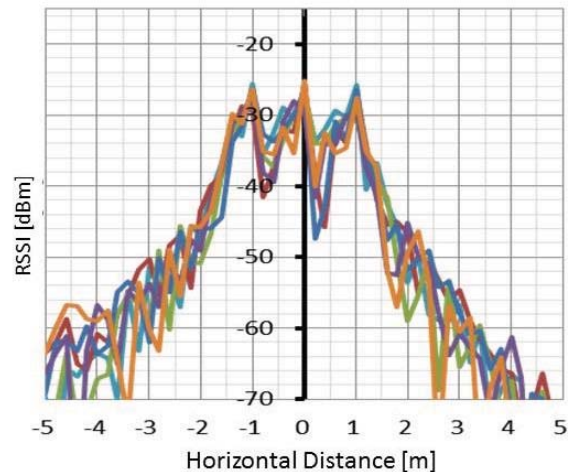


図 26 シミュレーション結果 (T 字形配置)  
 Fig. 26

図 25～図 27 から、いずれの配置においても、スポットが生成できていることがわかる。更に、アンテナ素子を微動させることで RSSI が微動するが、スポット形状を変化させるほどの影響は存在していないことがわかる。従って、この手法は前述の問題を解決する上で有効と考えられる。

## 5.2 PDR の性能とスポット測位性能のトレードオフ

第 4 章で示した提案方式の測位性能は、Wi-Fi ビーコンの位置推定性能と PDR の軌跡推定性能の両方の性能によって決定されると考えられる。Wi-Fi ビーコンの位置推定性能と PDR の軌跡推定性能の間には相補性がある。す



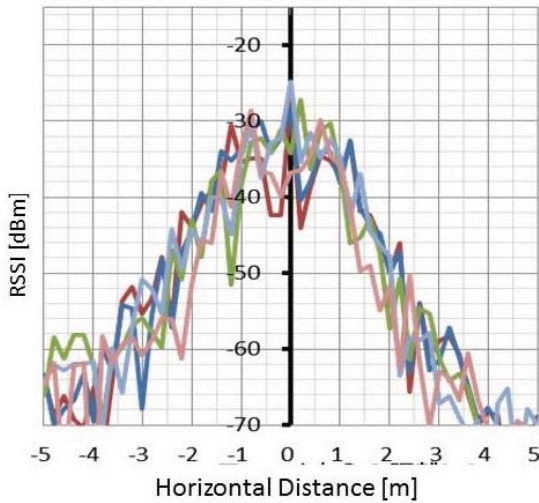


図 27 シミュレーション結果 (十字形配置)  
 Fig. 27

なわち、Wi-Fi ビーコンは、その設置間隔を狭くすることで絶対位置情報を取得する頻度を向上させることができるが、一方で設置間隔を狭くし過ぎると、測位精度円の大きさの影響があらわれてくると考えられる。この様子を図 28 に示す。図 28 で、ビーコンの検出誤差円の大きさに対して、ビーコンの設置間隔が短すぎると、実際の歩行ルートに対して推定方位が持つ誤差  $\epsilon_1$  が大きくなる。

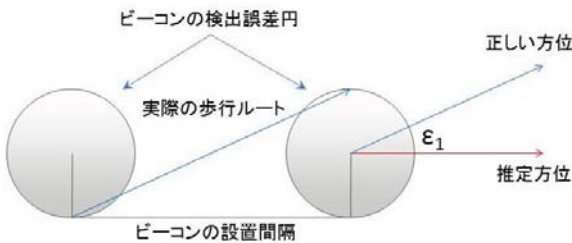


図 28 Wi-Fi ビーコンの検出誤差に起因する方位推定誤差  
 Fig. 28 Direction estimation error by the Wi-Fi beaconing performance

更に、ジャイロセンサの特性により、PDR も誤差を持つ。ジャイロセンサの特性に依存する PDR の誤差を、図 29 と図 30 に示す。図 29 は、ジャイロセンサのオフセット特性に起因する方位の推定誤差の発生メカニズムを示している。ジャイロセンサは一定のオフセット電圧を持ち、それをゼロにすることは困難である。そのため、図 29 に示すように実際には直進していても推定ルートが曲がってしまい、推定方位が誤差を持つ現象が発生する。図 30 は、ジャイロセンサの感度特性に起因する旋回角の推定誤差の発生メカニズムを示している。ジャイロセンサの出力は、旋回角速度に対して出力される電圧変位として表現される。この角速度に対する電圧変位が感度特性となるが、この感度は温度特性や駆動電源の電圧特性を持つため、やはり誤差

をゼロにすることは困難である。そのため、図 30 に示すように実際の旋回角とは異なった旋回角を検出してしまい、推定方位が誤差  $\epsilon_2$  を持つ現象が発生する。

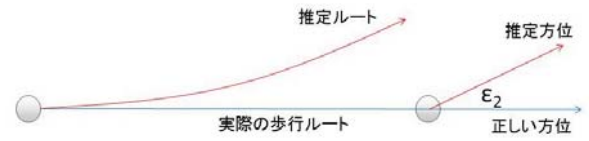


図 29 ジャイロセンサのオフセット特性に起因する方位推定誤差  
 Fig. 29 Direction estimation error by the gyroscope's offset

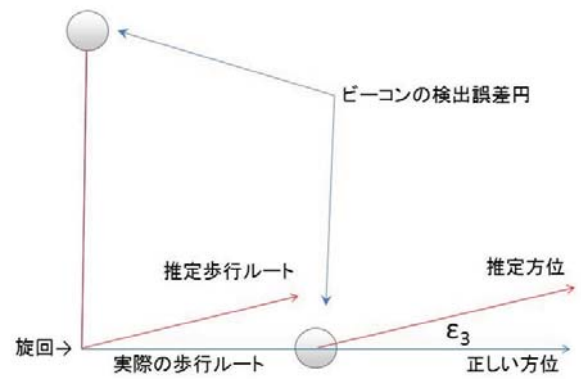


図 30 ジャイロセンサの感度特性に起因する方位推定誤差  
 Fig. 30 Direction estimation error by the gyroscope's sensitivity

Wi-Fi ビーコンの設置間隔と PDR のそれぞれに起因する誤差を試算した結果を図 31 に示す。図 31 では、Wi-Fi ビーコンの設置間隔に対して、Wi-Fi ビーコンの設置間隔に起因する誤差と PDR によって発生する誤差の総和をプロットしてある。プロットの色の違いは、それぞれ Wi-Fi ビーコンの測位誤差円の大きさと、旋回回数を示している。

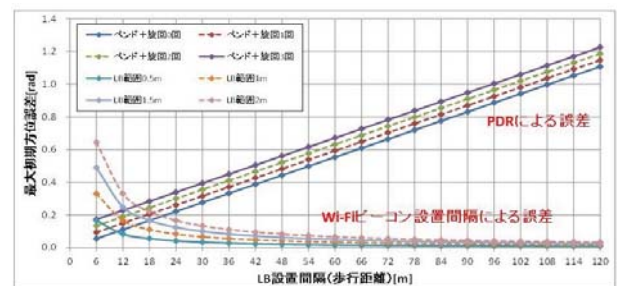


図 31 Wi-Fi ビーコンの設置間隔と PDR 誤差の関係  
 Fig. 31 Trade off of the Errors

図 31 からわかるように、Wi-Fi ビーコンの測位誤差円の大きさと、旋回回数に依らず、概ね Wi-Fi ビーコンの設置間隔が 15m 程度のときに最良の結果が得られていることがわかる。従って、第 4 章に示した実験系の Wi-Fi ビーコンの間隔は妥当な数値であったと考えられる。

## 6. まとめ

本稿では、従来よりも高精度で他の無線局の電波や雑音の影響を受けにくい Wi-Fi スポット測位方式を提案した。提案方式は高利特アンテナを使用して他局の電波と比較して RSSI が強く小さなスポットを作り出すことで、高い精度と高い耐妨害特性を両立している。

提案した Wi-Fi ビーコンは単独で約 0.5m の精度を得ることができ、更に PDR と組み合わせることで平均精度 1.8m の連続的な屋内測位を実現することが出来た。また、Wi-Fi ビーコンを設置する上で必要な設置条件についても明らかにすることが出来た。

## 参考文献

- [1] 間邊哲也, 長谷川孝明, “歩行者ナビゲーションコンセプトトリファレンスモデルの提案,” 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J95-A, No.3, pp.283-302, 2012.
- [2] 小林哲郎, 一藤裕, 曾根原登, “ライフログ提供における心理的抵抗とインセンティブの構造—スマートフォン利用者を対象とした被験者実験—,” 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J95-D, No.4, pp.834-845, 2012.
- [3] 渡辺恭人, 竹内奏吾, 栗栖俊治, 寺岡文男, 村井純, “プライバシー保護を考慮した地理位置情報システムの実装と評価,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J86-B, No.8, pp.1434-1444, 2003.
- [4] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger and E Wasle, GNSS - Global Navigation Satellite Systems, Springer Vienna, ISBN:978-3-211-73012-6, 2008.
- [5] ISO/IEC, International Standard ISO/IEC 18092:2004, Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – Near Field Communication – Interface and Protocol (NFCIP-1), 2004.
- [6] K. Kobayashi, Y. Ban and K. Uehara, 3D Personal Position Acquisition Method for Wearable AR System Using Independent Position Tracking Unit and 2D Visual Markers, IEICE Tech. Rep., PRMU, Vol.104, No.572, pp.25-30, 2005.
- [7] 中川正雄, “ユビキタス可視光通信,” 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J88-B, No.2, pp.351-359, 2005.
- [8] Ekahau LB1 ロケーションビーコン, <http://www.ibsjapan.co.jp/products/LB1.html>
- [9] N. Kohtake, S. Morimoto, S. Kogure, and D. Manandhar, Indoor and Outdoor Seamless Positioning using Indoor Messaging System and GPS, Proc. IPIN2011, 2011.
- [10] Troyk P.R., DeMichele G.A., Kerns D.A., Weir R.F., IMES: An Implantable Myoelectric Sensor, Proc. EMBS2007, pp.1730-1733, 2007.
- [11] Byoung-hoon Kim, Jong-Suk Choi, “Active beacon system with the fast processing architecture for indoor localization,” Proc. EFTA2007, 2007.
- [12] Chawathe, S.S., “Low-latency indoor localization using bluetooth beacons,” Proc. ITSC2009, 2009.
- [13] P. Bahl and V. Padmanabhan, RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system, Proc. INFOCOM2000, pp.775-784, 2000.
- [14] P. Prasithsangaree, P. Krishnamurthy, and P. K. Chrysanthis, On Indoor Position Location With Wireless Lans, Proc. PIMRC2002, pp.720-724, 2001.
- [15] 渡辺富士雄, 稲村浩, “屋内位置情報サービスを実現する UWB を用いた測距・測位技術,” NTT DOCOMO テクニカルジャーナル, Vol.17, No.1, pp40-46, 2009.
- [16] Shinji Hotta, Yoshiro Hada, and Yoshinori Yaginuma, “A Robust Room-level Localization Method Based on Transition Probability for Indoor Environments,” Proc. IPIN2012, 2012.
- [17] Han Zou, Hao Jiang, Xiaoxuan Lu, Lihua Xie, “An online sequential extreme learning machine approach to WiFi based indoor positioning,” Proc. IEEE World Forum on IoT2014, 2014.
- [18] F. Evennou and F. Marx, Advanced Integration of WiFi and Inertial Navigation Systems for Indoor Mobile Positioning, EURASIP Journal on Applied Signal Processing, Vol.2006, No.1, page.164, 2006.
- [19] M. Kourogi and T. Kurata, Personal Positioning based on Walking Locomotion Analysis with Self-Contained Sensors and a Wearable Camera, Proc. ISMAR2003, pp.103-112, 2003.
- [20] 山崎昌廣, 佐藤陽彦, “ヒトの歩行一步幅, 歩調, 速度およびエネルギー代謝の観点から—,” 人類学雑誌, Vol.98, no.4, pp.385-401, 1990.