2009－MBL－48 (10)
2009／1／30

無線LANを用いた位置推定システムにおける推定結果補正手法

兼清裕平[†] 田頭茂明[††]
中西恒夫[††] 福田晃[††]

無線LANを用いた位置推定システムにおける課題のひとつとして，受信信号強度の変動が原因となり推定精度が低下することがあげられる．この変動に対処することは，正確で信頼のある位置推定システムの実現には必要不可欠である．本稿では，ユーザが協調して，誤った推定結果を補正する手法を提案する．提案手法の主な目的は，過去にユーザが補正した情報を蓄積し，他のユーザにその補正情報を提供することである．これにより，ユーザ自身の現在位置が正しいかの判断を支援でき，さらに，過去の補正情報をもとにユーザは効率的に補正をおこなえる．また，提案手法の有効性を示すために実証実験を行った．この実験結果から，位置推定において過去の補正情報を提示することの有効性を明らかにした．

Positional Error Correction for Wireless LAN-based Positioning System

Yuhei Kanekiyo,[†] Shigeaki Tagashira,[††] Tsuneo Nakanishi[††]
and Akira Fukuda[††]

A critical problem with wireless LAN-based positioning systems is degradation in the estimation accuracy due to variations in the strength of the received signal that originate in the nature of the underlying wireless channel. Coping with these complex variations is essential to realizing an accurate and reliable positioning system. Here we propose a collaborative mechanism for correcting positional estimation errors. The main objective is to assist users to manually correct for estimation errors by providing access to a shared body of accumulated information on corrections made by other users. In particular, the mechanism is designed to enable any group of users to collaboratively build upon this body of information. Finally, we evaluate the potential effectiveness of the proposed mechanism through experiments. The results demonstrate that the proposed mechanism can provide corrections for estimation errors in a realistic environment.

1. はじめに

WPS (Wireless LAN-based positioning system) は，観測されるAP (Access Point) の識別子とそれらAPからの受信信号強度 (RSSI:Received signal strength indicators) を用いて，端末の位置を推定する．このため，異なる位置では，異なるAP，または同じAPから異なるRSSIが観測されることが，逆に，同一の位置では，同じAPから同一のRSSIが観測されることが望ましい．しかしながら，観測されるRSSIは**変動**することが知られており，期待したようにRSSIが観測されることは稀である．このことが，WPSの推定精度の低下の主な原因となっている．

一般に，実環境で観測されるRSSIは様々な要因による影響を受けて変動することが報告されている．例えば，実環境におけるRSSIの変動の要因として，建物の有無およびその構造，端末の種類の違いなど時間的変化が少ない静的な要因，および湿度，気温といった天候の違い，人の動き，位置推定を行う端末の周りに存在する他の端末が発する電波といった時間的に変化する動的な要因が挙げられる．既存研究の多くは，これらの要因の中からいくつか対象を絞り，WPSの推定アルゴリズムを改良することで，RSSIの変動の要因に対して個別に対応する手法を提案している．しかしながら，実環境ではRSSIの変動の要因は複合して影響し，これらの既存研究の成果を単に複合するこ

† 九州大学大学院システム情報科学府
Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University
†† 九州大学大学院システム情報科学研究院
Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

とだけで対処することは困難である．

本稿では，ユーザが協調して，WPS の推定結果を補正する手法を提案する．本手法の目的は，WPS の推定精度を向上させることではなく，WPS の誤推定をなくすことは困難と考え，推定精度低下による WPS のユーザビリティ低下を防ぐことである．すなわち，商品売買を目的とした Web サイトで広く使われているリコメンデーション機能を推定結果の補正に取り入れることで，誤推定に対するユーザビリティを向上させる．具体的には，まず，ユーザに WPS の推定位置を補正する仕組みを提供し，過去の補正情報を蓄積する．そして，他のユーザが位置推定を行った際に，WPS の推定位置とそれに対して過去の補正情報の中から最も適した補正位置をユーザに提供する．こうすることで，ユーザ自身の現在位置が正しいかの判断を支援でき，さらに，過去の補正情報をもとにユーザは効率的に補正をおこなえる．本手法では，ユーザの状況に最も適した補正情報を提供するために，誤推定ランク (EER: Estimation Error Rank) を導入する．EER は，提案システムに蓄えられた補正位置が，推定位置とどのくらい類似しているのかを表すものである．また，提案手法の有効性を示すために福岡市天神の新天町で実証実験を行った．この実験結果から，位置推定において過去の補正情報を提示すること，および EER による過去の補正結果の順位付けすること，の有効性を明らかにした．

本稿の構成は以下の通りである．第 2 章では，既存の WPS の位置推定手法が RSSI の変動にどのように対処し，推定精度を向上させているか紹介する．第 3 章では，提案手法について述べ．第 4 章では，実証実験を通して提案手法を評価した結果を報告する．最後に第 5 章においてまとめと今後の課題を述べる．

2. 関連研究

本章では，既存の WPS の位置推定手法が RSSI の変動にどのように対応しているのかを紹介する．

まず，WPS の位置推定プロセスを簡単に説明する．WPS の位置推定手法は，複数あるが，本稿では，他手法と比べ，推定精度が比較的高いシーン解析法と呼ばれる手法に着目する．シーン解析法の位置推定プロセスは，学習フェーズと推定フェーズの 2 つに分けられる．学習フェーズでは，位置推定の対象となる全ての位置で，観測できる AP およびその AP からの RSSI を収集し，それらを学習データとしてデータベースに蓄える．推定フェーズでは，端末が観測した AP およびその AP からの RSSI と，データベースに蓄えられている学習データを比較して位置推定を行う．

既存研究では，様々な要因で生じる RSSI の変動による推定精度低下を防ぐため，様々な推定アルゴリズムが提案されてきた[1]．その中でも確率的手法を適用した推定アルゴリズムが注目されている．ベイズ推定を適用した手法もそのひとつである．まず，推定対象となる各位置に対して観測できる AP からの RSSI の確率分布を構築する．その後，WPS は推定対象となる各位置において，ユーザから送られた AP および RSSI が観測され得る確率を，確率分布を利用して計算し，最も確率の高い位置を結果として出力する．こうすることで，実環境における RSSI の多少のばらつきに対処できる．文献 2) では，推定に用いる AP を選択した上で，確率的手法を用いた位置推定をおこなうことで，精度を向上させている．

実環境における RSSI の変動の動的な要因のうち，特に人の動きや人混みに着目し，この要因による WPS の推定精度低下を解決する研究が行われている[3]．人そのものが電波を反射し，減衰させるので，RSSI を用いる WPS の推定精度は低下してしまう．そこで，文献 3) では，博物館内の展示物に人が集まることを例にとり，周囲の端末から精度のよい推定結果を選択する協調的な仕組みを提案している．また，文献 5) では，夏季および冬季の長期的な休校など社会的な要因で観測される AP 数の増減が報告されている．電波は空気によって伝搬されるので，屋外であれば，天候 (湿度，気温，気圧) の影響を受けることも考えられる．文献 5) は，実際に都市域で，WPS の精度を評価しているが，その結論として，WPS を運用する環境に合わせた推定アルゴリズムを適用すべきだと主張している．

WPS の推定精度を向上させるために，多くの学習データを収集する必要がある．シーン解析法ではないが，ユーザの集合知を利用することで学習データを収集する手法が提案されているので紹介する．Place Lab[4] および Place Engine[6] は，学習データとして GPS で取得した AP の緯度経度情報をデータベースに保存する．AP の緯度経度情報と RSSI から三角測量を用いて位置を推定する．Place Lab[4] では，WPS の管理者だけではなく，ユーザがデータベースに学習データを登録できる．こうすることで，WPS を運用する管理者の人的コストを削減し，位置推定に必要なデータを収集できる．加えて，Place Engine[6] では，推定フェーズにおいて，位置が不明な AP が見つかれば，その AP の位置を推定し，新たにデータベースに登録する．また，位置推定の際にユーザから送られ

た最新の RSSI をもとに，データベースに蓄えられた AP の位置情報を適宜，更新することで学習データ収集におけるコストを削減している．

WPS の推定精度の向上は，ユーザビリティの向上につながる重要な研究課題であるが，精度を向上させる方法以外で，ユーザビリティを向上させる研究も行われている[7]．従来の WPS の多くは，推定位置としてある座標点を出力していた．しかし，誤差が含まれる場合，その出力は，ユーザにとって有益な情報ではない．そこで，誤差を予測し，推定誤差を含む推定範囲を結果として出力する．こうすることで，ユーザは WPS によって示された範囲にいると認識し，周囲のランドマークと比較しながら，現在位置を確定できる．文献 7) では，範囲を位置推定結果として出力することで，ユーザビリティが向上したことを実験で示している．

3. 提案手法

本章では，ユーザが協調して WPS の誤推定を補正する仕組みを提案する．本手法の目的は，WPS の推定精度を向上させることではなく，WPS の誤推定をなくすことは困難と考え，推定精度低下による WPS のユーザビリティ低下を防ぐことである．

3.1 アプローチ

提案手法は，過去にユーザが誤推定を補正した情報を蓄積し，他のユーザにその補正情報を提供する．このことは，あるユーザが補正した情報は，同じ状況で同じ位置への誤推定結果を得た他のユーザにおいても有益な情報であることが前提である．従って，提案手法の有効性は，**誤推定の局所性**が存在することに強く依存している．本稿において，誤推定の局所性とは，ある状況である位置の位置推定において，頻繁に同一の位置へ誤推定する現象のことを指す．つまり，補正情報の再利用は，この誤推定の局所性が存在しない場合には，意味がないと思われる．誤推定の局所性の存在については，第 4 章の実証実験により示す．

提案手法では以下のことに着目して設計している．

- 提案手法において，多くの推定状況における補正情報を集めることは，様々な要因による RSSI の変動に対処するために重要である．提案手法では，ユーザ強調によりこの補正情報を収集できるように設計することで，この収集のためのコストを削減している．
- 提案手法は，RSSI の変動の要因に対応する仕組みを，既存研究と比較して，より上位の層で実現している．すなわち，様々な要因を異なる層で対応することは，層を跨る相互作用やパラメータ化が必要となり実装が複雑になる．提案手法では，様々な要因をより上位の層で対処することにより，複合した要因に対して，より簡単に対処できる．
- 提案手法では，ユーザに過去の補正情報を効果的に提示するために，EER を導入している．EER は，データベースに蓄えられている過去の補正位置と，WPS により推定された位置との類似度を表している．EER により順位付けされた補正情報により，推定時のユーザの状況に類似した補正情報を的確に提示する．

以下，提案手法の詳細部分について説明する．

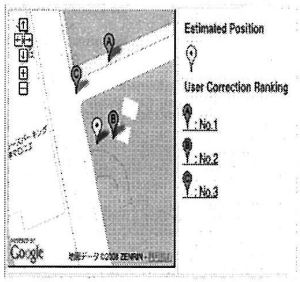


図 1 提案システムのユーザインターフェース
Fig. 1 User Interface of Proposed System

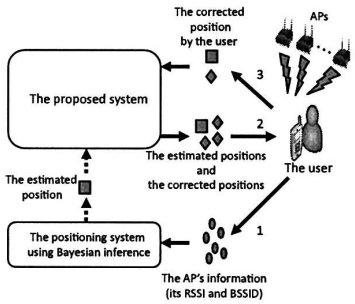


図 2 位置補正の手順
Fig. 2 Flow of Correcting Estimated Positions

3.2 位置補正の手順

本手法における位置補正の流れを下記に示す．**図 1** は，提案システムのユーザインターフェースを表し，**図 2** は，位置補正の流れを表す．図 2 中の番号が下記の番号に対応する．

(1) ユーザは位置を推定するために，WPS に端末で観測された AP の識別子と RSSI を送る．WPS はユーザから送られた AP の情報をもとに位置推定をおこない，推定位置を提案システムに渡す．

(2) 提案システムは，まず，WPS から受け取った推

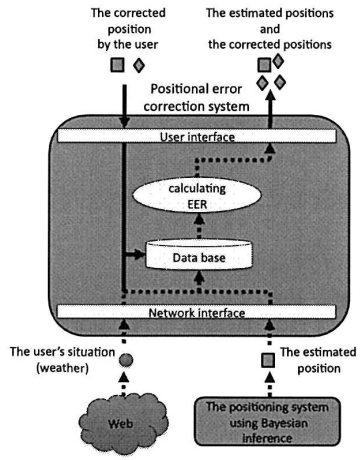


図 3 提案システムの構成
Fig. 3 Design of Error Correction System

定位置に対する補正位置をシステム内で検索する．そして，現在の状況に適した補正位置を選択，順位付けを行い，ユーザに提供する．ユーザに適した補正位置を選択，順位付けする方法については第 3.3 節で述べる．

(3) WPS の推定位置，提案システムの補正位置を受け取ったユーザは，その情報と周りのランドマークを比較しながら，現在位置を認識する．もし，推定位置もしくは補正位置に誤りがあれば，補正を行う．この補正情報は，システム内のデータベースに保存される．

3.3 EER

本節では，EER について説明する．過去の補正情報を蓄える際，その補正が行われた状況 (時間，気温，湿度など) も同時に蓄積しており，EER の大きい順に (より状況が近い) 補正情報をユーザに提供する．本手法では，WPS の推定位置に対する過去の補正が，位置推定をおこなう現在のユーザの状況に近いほど，かつ，その補正回数が多いほど，EER が大きいと定義する．

EER を具体的に定義する．e を WPS による推定結果の位置，c をユーザによる補正位置，S を時間，気温，湿度などで表される RSSI が変動する要因の集合として，e と c との間の $EER(e,c)$ を以下の式で定義する．

$$EER(e,c) = \prod_{i \in S} \{w_i f_i(e,c)\} \times fq(e,c)$$

w_i は，RSSI が変動する要因に対する重みを表す．

図 4 実験環境の外観
Fig. 4 Overview of Experimental Environment

表 1 位置推定時の状況一覧 (一部)
Table 1 List of a Part of Situations

Situation No.	Date	Time	Ta. (℃)	Humidity (%)
1	2008/11/19	11 a.m. – 12 p.m.	6	66
2	2008/11/24	2 p.m. – 3 p.m.	12	88
3	2008/11/24	7 p.m. – 8 p.m.	13	82
4	2008/11/25	2 p.m. – 3 p.m.	15	51
5	2008/11/26	1 a.m. – 2 a.m.	8	87
6	2008/11/27	11 a.m. – 12 p.m.	14	55

RSSI の変動が大きい要因ほど，重みを大きくする．$f_q(e,c)$ は，推定位置 e に対して位置 c と補正された回数を表す．$f_i(e,c)$ は，RSSI が変動する要因 i に関する e と c 間の類似度を表し，以下の式で表される．

$$f_i(e,c) = \exp\left\{-\left(\frac{v_i(e) - v_i(c)}{w_i'}\right)^2\right\}$$

ここで，$v_i(e)$，$v_i(c)$ はそれぞれ e における要因 i に関する補正時の値，および推定時の値を表す．$v_i(e) - v_i(c)$ は，補正時 (過去) の値と推定時 (現在) の値の差，すなわち，どれだけ状況が違うのかを表現している．w_i' は，要因の単位の違いを吸収するパラメータである．

以上の定義式に加え，ある回数以上の同一ユーザからの補正は，EER 値に影響を及ぼさないようにする．こうすることで，悪意のあるユーザが間違った補正を何回も行った場合の EER 値への悪影響を抑える．提案システムの構成と提案システム内における EER に関するデータの流れを**図 3** に示す．

4. 実証実験

本章では，提案手法の有効性を実証実験を通して評価する．特に，3.1 節で述べた誤推定の局所性の存在を実験を通して示し，また，3.3 節で述べた EER による順位付けの有効性を確認する．

4.1 実験環境と準備

今回は，福岡市中央区天神の新天町商店街 (**図 4**) を実環境のモデルケースとして実証実験をおこなった．新天町商店街は，無料で利用できる AP が多数設置し

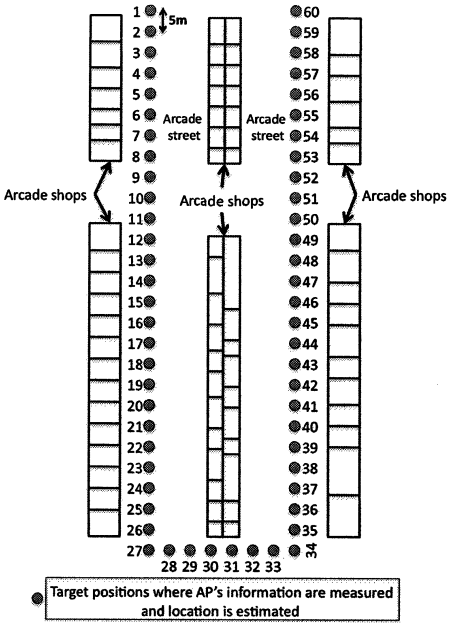


図 5 実験環境の全体図
Fig. 5 Overall View of Experimental Environment.

てあり，誰でも無線 LAN を利用できる．また，平日でも，多くの人々が行き来する場所である．

まず，WPS としてシーン解析法を利用し，その推定アルゴリズムとして第 2 章で説明したベイズ推定を適用したものを採用した．このシステムは Java で実装されており．クライアントサーバモデルが採用されている．クライアントの端末が，任意の位置で観測される AP とその RSSI をサーバに送る．サーバは，送られた情報をもとに端末の位置を推定し，結果を返す．実験では，サーバを Linux 上に実装した．また，クライアントの端末として，KOHJINSHA 製ネットブック SC3 を使用した．端末の OS は，Microsoft 社製 Windows Vista SP1，無線 LAN アダプタは，内蔵の VIA Technologies USB Wireless LAN Adapter を使用した．

第 2 章で述べたが，シーン解析法を用いた WPS は，学習データを構築しなければならない．そこで，まず，推定対象の位置を新天町商店街内の 60 地点 (**図 5**) とした．隣接地点の間隔は 5m である． 各地点で観測できる AP とその AP からの RSSI を 200 回測定し，そのうちの 80 回分を各地点の学習データとした．また，位置推定時では，各地点で 5 回 AP 情報を観測し，これを 1 回の位置推定のための推定データとした．位置推定は各地点で 20 回おこなった．状況別の推定結果

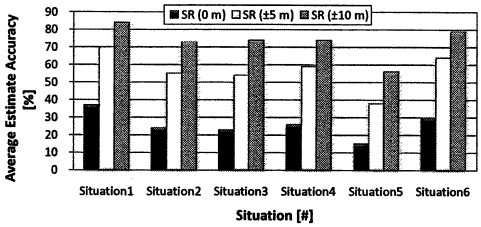


図 6 推定精度
Fig. 6 Successful Ratio for Each Situation

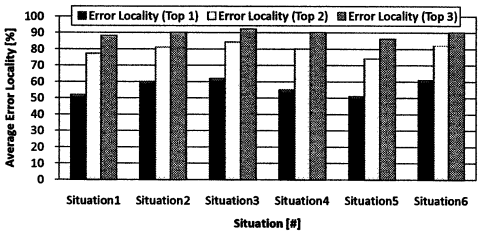


図 7 誤推定の局所性
Fig. 7 Error Locality for Each Situation

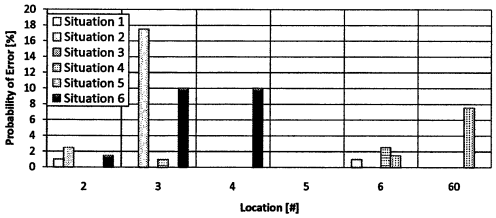
を得るため，日時を変えて実験を行った．**表 1** に実験をおこなった状況の一部を示す．この他にも，21 回，日時を変えて実験をおこなったので，計 27 回つまり 27 種類の状況で実験をおこなったことになる．

4.2 実験結果

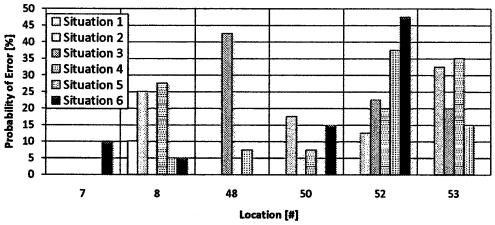
4.2.1 推定精度の違いと誤推定の局所性

3.1 節で述べた誤推定の局所性の存在について示す．**図 6** は，誤差 0m，誤差 ±5m，誤差 ±10m 以内の正答率を表 1 の状況別に表している．図中の “SR(x[m])” は，誤差 $\pm x[m]$ 以内の正答率を表す．今回の実験では，表 1 の状況における平均推定精度は，誤差 0m では，26%，誤差 ±5m では，57%，誤差 ±10m では，73% であった．状況別で見ると，状況 1 における推定精度が最も高く，状況 5 における推定精度が最も低い．状況 1 は，WPS の学習データを収集した状況と同じ状況である．このため実環境における RSSI が変動する要因の影響が少ないために推定精度が最も高いと言える．推定精度が最も低い状況 5 は真夜中におこなったものである．すなわち，周辺に人がいない状況である．このケースでは，周辺の人の影響が学習時とは異なるために推定精度が低下したと考えられる．

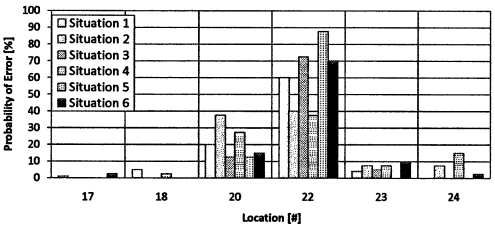
また，**図 7** は，誤推定の局所性を状況別に表している．図は，誤推定全体の中で同一の位置に間違える割合（局所率）を表しており，“Error Locality (Top k)” は，局所率の高いものから k 番目までを累積したものである．位置推定をおこなった状況ごとに 60 地



(a) location 1



(b) location 11



(c) location 21

図 8 誤推定の局所性の違い
Fig. 8 Difference of Error locality among Positions

点の平均を算出した．図 7 が示すとおり，推定精度のように状況ごとに変化せず，同じ位置に間違えることが多い．また，Top 3 までの累積は，どの状況においても誤推定の約 90%を占める．このことから，状況によらず誤推定の局所性の存在を確認でき，加えて，ある位置された推定において，補正回数が多い順から 3 つ補正位置をユーザに提供すれば，約 90%の誤推定に対処できると言える．

さらに局所性を詳しくみるために，**図 8** に地点 1，11，21 における状況別の誤推定を示す．この表より，状況が違うならば，誤推定の傾向も異なることがわかる．例えば，地点 11 の状況 3 における位置推定は，地点 48 と誤推定する確率が最も高いが，同地点の状況 6 における位置推定では，地点 52 と間違える可能性が最も高い．図 8 では，地点 1，11，21 のデータのみを提示したが，他の地点でも同様の傾向が見られた．

4.2.2 EER で用いるパラメータの有効性

本節では，3.3 節で述べた EER の有効性を示す．

表 2 グループ化した環境的な要因の一覧
Table 2 List of Groups for Environmetal Factors

Group No.	Parameters
0	–
1	time
2	humidity and temperature
3	time, humidity, and temperature

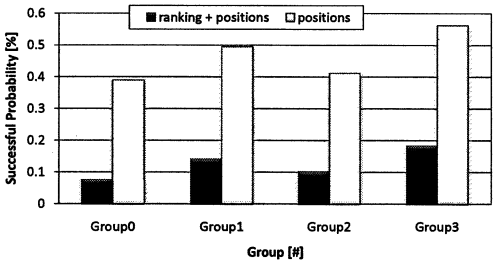
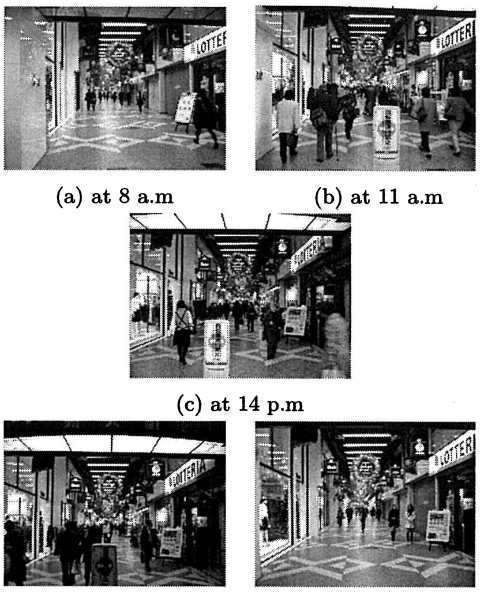


図 9 EER による順付けの有効性
Fig. 9 Effectiveness of EER Ranking



(a) at 8 a.m (b) at 11 a.m

(c) at 14 p.m

(d) at 17 p.m (e) at 20 p.m

図 10 実験環境における時間ごとの人通りの違い
Fig. 10 Crowds in Experimental Environment

4.2.1 節から誤推定の局所率が高い 3 番目までの累積が全体の 90%を占めることが分かった．この結果から，データベース内にある補正位置を EER により順位付けし，EER の高いものからユーザに提示する 3 個の補正位置を決定する．

実験の手順について説明する．実験では，23 種類

の状況でおこなった全ての推定結果に対して，全て正しい補正がおこなわれたと仮定する．この補正データをシステムのデータベースに蓄積する．次に，位置推定により得られた位置に対して，データベース内の補正位置をEERで順位付けする．EERで順位付けされた上位3位までの補正地点と，推定結果の位置に対する上位3位までの誤推定地点が一致するかを算出する．本実験では，EERで考慮するRSSIの変動の要因として時間，気温，湿度を用いた．すなわち，3.3節で説明した集合Sの要素として時間，気温，湿度を用いた．具体的には，これらの要因を**表2**に示すグループを分け．グループに該当する要因を用いてEERを算出した．表中のGroup0は全状況であり，time, temperature, humidityはそれぞれ時間，気温，湿度を表す．

結果を**図9**に示す．図9中の"ranking+positions"は，上位3つの補正地点とその順位が一致する確率であり，"positions"は，順位は一致しないが，上位3つの補正地点が一致する確率である．図9から，EERに時間を考慮することが非常に有効であると言える．Group1はGroup0に比べ，一致率が約10%ほど上昇した．この理由は，人の動きや混雑度は，時間に大きく依存するからだと考えられる(図9)．また，温度と湿度によるグルーピングはあまり，効果がないが，時間，温度，湿度でグルーピングすると，Group0に比べ，一致率が約20%近く上昇した．時間に比べ，湿度，温度によるグループの一致率が低いのは，実験を11月中旬から12月中旬にかけておこなったことで，状況別で時間，湿度の変化が少なかったからだと考えられる．以上のことから，EERを決定する際に，時間，温度，湿度を用いることは有効であると言える．

5. おわりに

本稿では，ユーザの協調によるWPSの推定結果補正手法を提案し，実証実験により提案手法の有効性を評価した．実環境では，ユーザが観測する状況によってRSSIが変動するために，WPSの推定精度は低下する．本手法は，ユーザにWPSの推定位置を補正してもらい，過去にユーザが補正した情報を状況別に蓄積する．そして，WPSで位置推定をおこなうユーザの状況に適した補正情報を提供する．これにより，ユーザ自身の現在位置の正しい判断を支援し，さらに，過去の補正情報をもとに効率的に補正をおこう仕組みをユーザに提供できる．本手法では，ユーザの状況に適した補正位置を決定するために，EERを導入した．EERは，提案システムに蓄えられた補正位置が，推定位置とどのくらい類似しているのかを表すものである．

今後は，EERによって補正位置を順位付けし，ユーザに提供することで，ユーザに適した補正位置が与えられるか評価する．また，RSSIを観測する端末によってRSSIの観測値は大きく変化するので，ユーザの端末を考慮したEERを提案し，評価する予定である．

謝　辞

本研究の一部は，科学技術研究費および次世代研究スーパースター養成プログラム（九州大学総長裁量経費）による助成を受けている．

参考文献

1) M.B.Kjaergaard, "A Taxonomy for Radio Location Fingerprinting," *Proc. the 3rd International Symposium on Location and Context-Awareness (LoCA 2007)*, pp. 139–156, 2007.
2) 伊藤 誠悟, 河口 信夫, "アクセスポイントの選択を考慮したベイズ推定による無線LANハイブリット位置推定手法とその応用," 電学論C, Vol. 126, No.10, pp. 1212–1220, 2006.
3) Li-wei Chan, Ji-rung Chiang, Yi-chao Chen, Chia-nan Ke, Jane Hsu and Hao-hua Chu, "Collaborative Localization : Enhancing WiFi-Based Position Estimation with Neighborhood Links in Clusters," *Proc. the 4th International Conference on Pervasive Computing (PERVASIVE 2006)*
4) A. LaMarca, Y. Chawathe, S. Consolvo, J. Hightower, I.Smith, J.Scott, T. Shon, J. Howard, J. Hughes, F. Potter, J. Tabert, P. Powledge, G. Borriello, and B. Schilit, "Place Lab : Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild," *Proc. the 3rd International Conference on Pervasive Computing (PERVASIVE 2005)*, pp. 116–133, 2005.
5) Yu-Chung Cheng, Y. Chawathe, A. LaMarca, "Accuracy Characterization for Metropolitan-scale Wi-Fi Localization," *Proc. the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications and Services, (MobiSys 2005)*, pp. 233–245, 2005.
6) 暦本純一, 塩野崎敦, 末吉隆彦, 味八木崇, "PlaceEngine : 実世界集合知に基づくWiFi位置情報基盤," インターネットコンファレンス2006.
7) D. Dearman, A. Varshavsky, E. de Lara, and K. N. Truong, "An Exploration of Location Error Estimation," *Proc. the 9th International Conference on Ubiquitous Computing (Ubicomp 2007)*, pp. 181–198, 2007.