

M-049

## トンネル施工現場における無線LANを用いた高精度位置推定のための観測データ補正手法

### A Correction Scheme for Observation Data in WLAN Positioning Systems at Tunnel Construction Site

三輪 直樹<sup>†</sup> 田頭 茂明<sup>†</sup>  
Naoki Miwa Shigeaki Tagashira  
松田 浩朗<sup>‡</sup>  
Hiroaki Matsuda

荒川 豊<sup>†</sup> 福田 晃<sup>†</sup>  
Yutaka Arakawa Akira Fukuda  
筒井 隆規<sup>‡</sup>  
Takanori Tsutsui

#### 1. まえがき

現在、建設施工に情報通信技術を活用して高い生産性と施工品質を実現する情報化施工が注目を集めている[1]。情報化施工を実現する具体的なシステムとしては、図1が示すような工程管理、安全管理、入退室管理などがある。これらを実現する上で重要な要素技術として、作業員や建設重機の位置情報を取得する位置推定技術をあげることができる。作業員の位置情報が分かれば工程管理の手間が省け、また重機の位置情報が把握できれば事故回避にもつながる。情報化施工の現場において、位置情報を取得する方法として、GPS(人工衛星による位置推定)とトータルステーション(光学測量機器による位置推定)があるが、GPSはその利用環境が衛星信号の受信可能な屋外に限定されるためトンネル工事やシールド工事等の建設現場では利用できない。また、トータルステーションは位置推定の対象一つに対し、送受信機器が一台必要であり、コストや利便性の点に問題がある。現状では、一般的な建設工事からトンネル工事に至るまで様々な施工現場で位置情報を取得する有効な手段が確立されていない。本研究では、GPSが使えない場所でも利用できる位置推定技術として、無線LANによる位置推定に注目し、トンネル施工現場に適用することを試みる。特に、推定精度がシステムの信頼性に大きく影響を与える安全管理システムの実現を目標として掲げており、位置推定の誤差が1m以内となる無線LAN位置推定技術の確立を目指す。

無線LAN位置推定技術には、多辺測量法、近接性、シーン解析法などの受信信号強度(RSSI: Received Signal Strength Indicator)を基にした手法がある[2][3][4][5]。多辺測量法では3つ以上のアクセスポイントと受信機器との距離をRSSIから求め、それぞれのアクセスポイントを中心とする3つの円の交点から受信機器の位置を求める。近接性を用いる手法では、あらかじめそれぞれのアクセスポイントがカバーする範囲を決めておき、受信機器がその範囲内かどうかをRSSIから決定し位置を推定する。シーン解析法は学習フェーズと推定フェーズの2つのフェーズから構成され、学習フェーズで推定対象となるすべての位置において、周囲のRSSIの状況をあらかじめ学習する。推定フェーズには推定したい位置で周囲のRSSIの状況を観測し、学習していたRSSIと比較して最も類似す

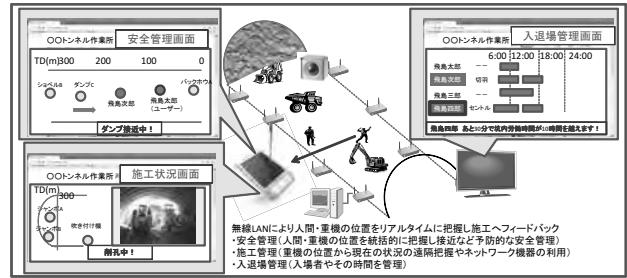


図1: 情報化施工のイメージ

る位置を推定位置とする。

無線LAN位置推定技術において、周囲の環境の変化によるRSSIの揺らぎが、位置推定の精度に影響を与えることが知られている。トンネル施工現場は、作業員の移動や気温の変化などの影響で、RSSIが時間によって大きく変化する。また、一般的なオフィスと比べてトンネル施工現場は見通しがよく、周囲の構造が単純であることが特徴的であり、RSSIの変化は全体で似たような傾向があることが事前実験により分かった。短時間でのRSSIの変化の影響は、観測時間を長くして平均化することで、ある程度軽減することができるが、平均値自体が変わるような変化は、補正しなければ排除できない。そこで、本研究では計測時刻の差によって生じるRSSIの変化を補正し、精度を改善する手法を提案する。提案手法では、シーン解析法と多辺測量法に対して補正を適用した。また、実際のトンネル環境において補正を適用した位置推定を行い、実験によって効果を評価した。その結果、提案手法により、シーン解析法では平均誤差が28%改善し、正答率も5.4%向上することが確認できた。多辺測量では平均誤差が50%改善した。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、既存技術としての関連研究について述べる。第3章では、トンネル内における受信信号強度の変化の傾向を調査するために行った検証実験について述べる。第4章で提案手法として、データ補正の概要及びシーン解析法と多辺測量法に適用する場合について述べ、第5章で実験により評価を行い、最後の第6章でまとめる。

#### 2. 関連研究

本章では、信号強度の雑音の影響を低減することで位置推定精度を向上する研究を紹介する。

<sup>†</sup>九州大学大学院システム情報科学府/研究院

<sup>‡</sup>飛鳥建設株式会社

Horus[6]では、あるAPから時間的に連続して観測したRSSIに高い相関があることに注目し、自己相関モデルを用いてRSSIの平均値の分布をモデリングすることで、マルチパスを始めとして様々な要因でおこる雑音の影響の抑制を行う。さらに、雑音を含むRSSIの補正を行うことでも精度を向上させている。次に、APからのRSSIを特徴空間に射影することで位置推定精度を向上するとともに計算量を削減したものととして文献[7]がある。この研究では、離散コサイン変換、独立成分分析、主成分分析によって、APからの信号強度を軸間が無相関な特徴空間に射影することで、AP間の相互相関を減少させ精度を向上させている。この中でも主成分分析を用いた射影を行う方法で最も良い精度が得られている。SVD[8]では学習データに対して特異値分解を行い、特異値が小さく雑音である可能性の高い成分を除去することで高精度な推定を行う。

文献[5]では、推定時にリファレンスポイントで観測したRSSIを用いて、学習フェーズで構築したデータベースを更新する手法を提案している。本文献の手法では、以下の手順でデータベースを更新している。

#### 1. データベース構築(学習フェーズ)

それぞれの候補地点で、端末が観測するRSSIと、複数のリファレンスポイントで観測するRSSIとの関係を表す関数を構築する。

#### 2. データベース更新(推定フェーズ)

推定時のリファレンスポイントでのRSSIからモデル木を辿って、その時に適用すべき関数を選択する。選択した関数にリファレンスポイントのRSSIを与えて、各候補地点で観測されると思われるRSSIを計算する。

以上の手順で得られたデータベースに対し、推定データと各候補地点のデータとの距離を求め、決定的手法によって推定位置を求める。

本論文では、トンネル施工現場のような見通しが良く、RSSIの変化が複雑でない場合において、簡単で効果的なRSSIの補正手法を提案する。

### 3. 事前実験

本研究では、トンネル施工現場に対して無線LANを用いた位置推定を適用するために、トンネル施工現場の電波の特徴を調査する事前実験を行った。トンネルは一般的なオフィスや商業施設などの屋内と異なり、同じ形状が連続する単純な構造をしている。また、見通しも良いことから、電波の時間変化には何らかの傾向があると考えられる。そこで、事前実験としてトンネル施工現場とオフィスにおいてRSSIを計測し、その変化を比較、検討した。

#### 3.1. 実験環境

計測した時刻の違いがRSSIに与える影響を検証するため、RSSIの計測を、時間を空けて2回行い、その結果を比較する。トンネル施工現場での実験は東九州自動車道新津トンネル工事で、トンネル坑内の坑口より500mの地点で計測を行った。また、トンネル

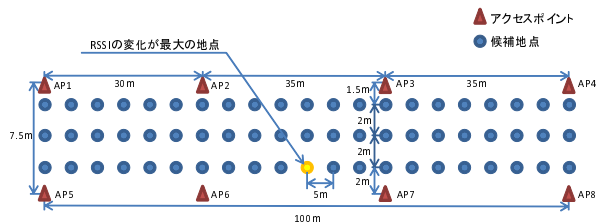


図2: 実験環境(トンネル施工現場)

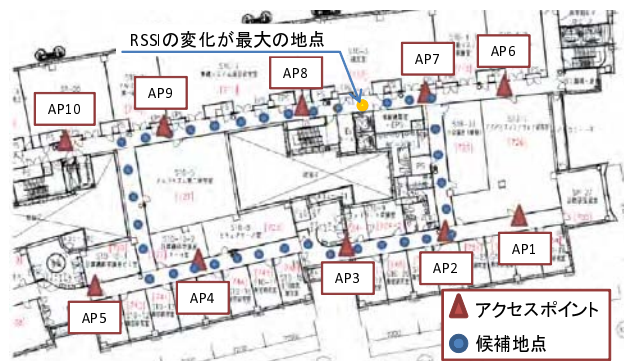


図3: 実験環境(オフィス)

施工現場と比較を行うために、一般的なオフィスでも同様の計測を行う。オフィスの実験は九州大学伊都キャンパスウエスト2号館7階で行った。図2、図3に実験環境を示す。また、トンネル施工現場の実験状況を図4に示す。トンネル内は見通しがよく、端末とアクセスポイント間を遮るような遮蔽物は置かれていない。測定用端末にはiPod touch、アクセスポイント(AP1~AP10)にはPicoCELA Inc. PCWL-0100を使用した。各候補地点で端末からアクセスポイントを介して2秒間の通信を5回行い、その通信で利用したDATAフレームの受信信号強度をアクセスポイントで計測する。この計測を、1~4時間程度の間隔を空けて2回行った。

#### 3.2. 実験結果

まず、トンネルとオフィスでそれぞれどの程度電波伝搬損失のモデル式に従うのかを調べる。トンネル施



図4: トンネル施工現場の実験状況

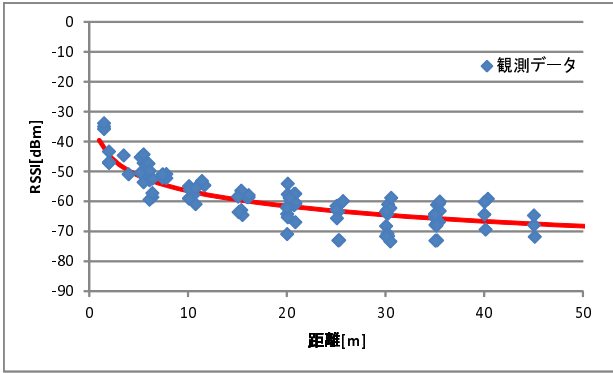


図 5: トンネルの RSSI 分布 (1 回目)

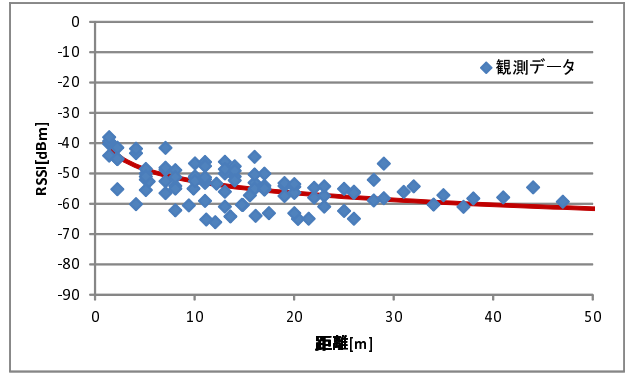


図 7: オフィスの RSSI 分布 (1 回目)

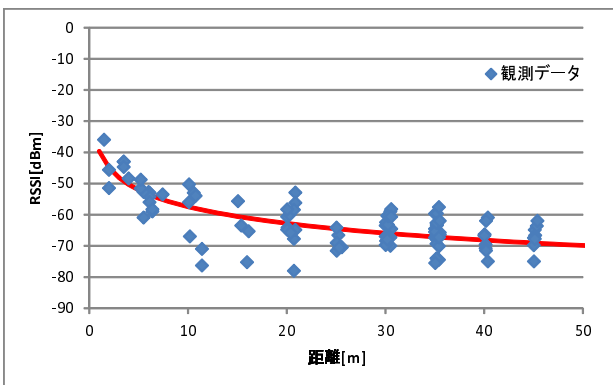


図 6: トンネルの RSSI 分布 (2 回目)

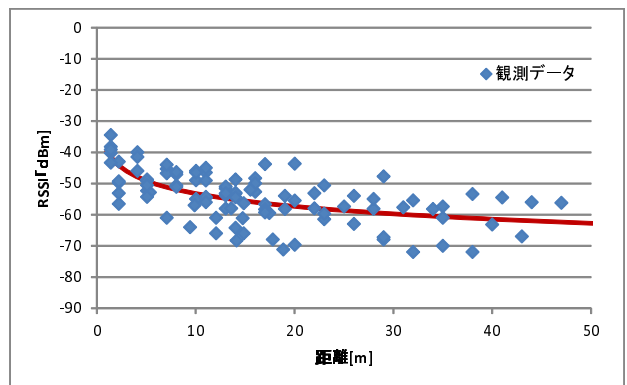


図 8: オフィスの RSSI 分布 (2 回目)

工現場，オフィスそれぞれ2回の計測のRSSIの分布を図5，図6，図7，図8に示す．図中の点は各計測結果の中から100個の観測データを無作為に取り出したものを表す．それぞれの分布から減衰係数を計算し，電波伝搬損失のモデル式を求めると図中の実線ようになる．このモデル式と観測データの誤差の二乗平均を計算すると，表1の値が得られる．1回目，2回目の計測ともにトンネルの方が誤差の二乗平均が小さいことから，トンネルの方がよりモデル式に従っていると考えられる．

次に，RSSIの変化量の大きさをトンネルとオフィスで比較する．1つのアクセスポイントに対する1回目の計測の平均値と，2回目の計測の平均値との差の絶対値をRSSIの変化量として，そのRSSIの変化量の最大，最小，平均値を表2に示す．全ての値がトンネルの方が大きく，全体的にRSSIの変化量が大きいことが分かる．特に，最大の場所では13[dBm]以上変化しており，精度を低下させる原因と考えられる．

最後に，RSSIの変化量が大きな地点の変化の様子をトンネルとオフィスで比較し，両者の違いを検討する．図9，図10に，トンネル施工現場とオフィス，それぞれの変化が最大の候補地点のRSSIの観測結果を示す．これらの地点の位置は図2，図3中に示される通りである．また，アクセスポイントの番号は図2，図3中の

アクセスポイントの番号と対応している．観測データが存在しないアクセスポイントについては，RSSIが非常に弱く，観測されなかったためと考える．図9から，トンネルにおけるRSSIの変化量の合計が大きい場所では，各アクセスポイントでのRSSIは，多少の差はあるが同じような絶対値の量で変化していることがわかる．図2において，左下から中央下に位置する地点と右端付近は変化量が大きかった．左下から中央下の地点は負の方向(弱まる方向)に変化し，右端付近は正の方向(強まる方向)に変化していたが，それらの地点でのRSSIの変化は，共通して図9と同様の特徴が見られた．一方，図10を見ると，AP6，AP7ではRSSIが強まる方向に変化しているが，AP8では弱まる方向に変化している．このことから，トンネルではオフィスよりもRSSIの変化に傾向があると考えられる．つまり，トンネルでは時刻差による影響はRSSIの絶対値の変

表 1: 観測データとモデル式の誤差の二乗平均

	1 回目	2 回目
トンネル [dBm]	17.5	30.8
オフィス [dBm]	25.6	38.8



表 2: 変化量の最大, 最小, 平均値

	最大値	最小値	平均値
トンネル [dBm]	13.4	1.88	4.30
オフィス [dBm]	9.48	1.19	3.68

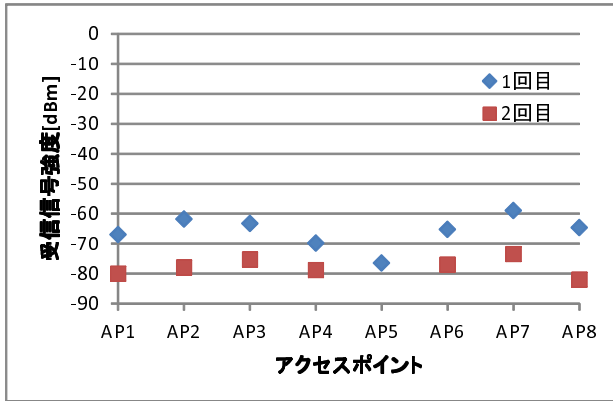


図 9: RSSI の変化 (トンネル)

化(オフセットの変化)として現れ, 端末とアクセスポイントとの距離に依存する強度関係は時刻が変わっても変化しないと考えられる. RSSI の変化量が小さい場所では時刻差による影響が小さいため, 位置推定精度は高いと思われる. そのため, 図 9 に見られるような RSSI の絶対値の変化が位置推定の精度を低下させる原因の一つになっていると考えられる.

今回, トンネルにおける位置推定には, 無線 LAN での RSSI 方式を用いたシーン解析法と多辺測量法の二通りの手法を考える. シーン解析法と多辺測量法では, RSSI の変化は次のような影響を及ぼす. シーン解析法では, 学習フェーズと推定フェーズで観測される受信信号強度に差が生じるため, 再現性が低くなり精度が悪くなる. また, 多辺測量法では RSSI から距離を求める電波伝搬損失モデルとの差が生じるために, それ

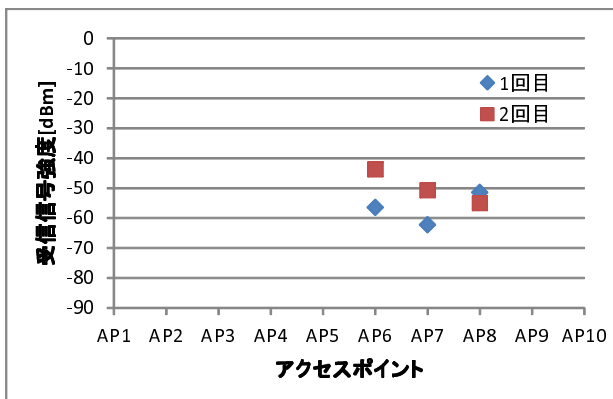


図 10: RSSI の変化 (オフィス)

だけ精度が悪くなる.

#### 4. 提案手法

本章では, 事前実験の結果を踏まえたデータ補正の手法を提案する. まず提案手法の概要を述べ, 次にシーン解析法に適用する場合と, 多辺測量法に適用する場合について説明する.

##### 4.1. 概要

ここでは, シーン解析法の観測データに適用するため, トンネルでの計測時刻の差による RSSI の変化を補正する手法と, 多辺測量法に適用するため, 電波伝搬損失モデルとの差を補正する手法を提案する.

シーン解析法のように学習と推定で異なる時刻に計測を行う場合には, 事前実験で検証したように, それぞれのアクセスポイントで観測される RSSI が, 送信機器と受信機器との距離差による強度の違いの関係を保ちつつ絶対値が同じ量だけ変化する. そこで, それぞれのアクセスポイントが観測した RSSI に対して同じ値を加減算することで, 強度差の関係を保ちつつ, 時刻差の影響だけを排除できると考える.

一方, 多辺測量法において, 事前実験の結果から, 電波伝搬損失モデルを時刻差による影響分だけシフトすることで解決できると考えられる. このシフト幅は, 現在の観測データをシフト後の電波伝搬損失モデルで最も近似できるように決定される.

##### 4.2. シーン解析法への適用

シーン解析法では, 学習データと推定データの類似度を比較して位置を推定する. 類似度としては, 多次元空間上での距離の近さや, ベイズ推定によって得られる確率の高さなどが挙げられ, 前者を用いる手法を決定的手法, 後者を用いる手法を確率的手法と呼ぶ. 今回は決定的手法を用いる. ここでは, 提案手法を適用したシーン解析法の全体の流れと, 各段階の詳細について説明する.

##### 4.2.1. 全体の流れ

補正を適用したシーン解析法の全体の流れは次のようになる.

##### 1. 学習データ観測

全ての候補地点からの RSSI を観測し, 学習データとする.

##### 2. 推定データ観測

推定したい地点からの RSSI を観測し, 推定データを集める.

##### 3. 推定データ補正

候補地点の学習データと推定データから補正値を求める. 求めた補正値で推定データを補正する.

##### 4. 推定

補正後の推定データを用いて学習データと比較し, 位置を推定する.

#### 4.2.2. 学習データ観測

学習データ観測では、事前学習を行う。候補地点で端末から電波を発信し、周囲のアクセスポイントで受信する。そのときのRSSIと受信回数を記録し、各アクセスポイントに対してRSSIの平均値を求める。全ての候補地点について、そこからの電波が受信可能なアクセスポイントの各平均値を求め、これらを学習データとする。

#### 4.2.3. 推定データ観測

推定データ観測では推定地点における観測データを収集する。ただし、推定地点は学習データを観測した候補地点の中から1点を選択するものとする。学習データ観測と同様、端末から電波を発信し、周囲のアクセスポイントで受信する。RSSIと受信回数から、各アクセスポイントのRSSIの平均値を求め、これを推定データとする。

#### 4.2.4. 推定データ補正

推定データの各アクセスポイントのRSSIの平均値に対して、補正值を足すことで推定データを補正する。候補地点*i*に対する補正值は式(1)によって求める。

$$C_i = \left( \sum_{j=0}^m (S_{ij} - E_j) \right) / m, \quad (1)$$

ここで、 $C_i$ は候補地点*i*の補正值[dBm]、 $S_{ij}$ は候補地点*i*の学習データのアクセスポイント*j*の平均値[dBm]、 $E_j$ は推定データのアクセスポイント*j*の平均値[dBm]、 $m$ は推定データ中のアクセスポイント数を表す。

候補地点の学習データの平均値から推定データの平均値を引くことで、そのアクセスポイントでのRSSIの変化量が求まる。これを受信可能な全アクセスポイントで平均することで、全体の変化の傾向を表す補正值を得ることができる。

#### 4.2.5. 推定

学習データと推定データを比較して、位置の推定を行う。学習データの一つの候補地点に関するデータと推定データは、次元数が受信可能なアクセスポイント数に等しいRSSI空間上の座標と考えることができる。そしてRSSI空間での距離が短いほど類似度が高いといえる。そこで、推定データと全ての候補地点の学習データのRSSI空間上での座標間の距離を求め、最小の距離の座標に対応する候補地点を推定位置とする。

#### 4.3. 多辺測量法への適用

ここではまず、電波伝搬損失モデルについて述べ、モデルから取り得るRSSIの範囲を求めて補正する手法を、多辺測量法に適用した場合の流れと詳細について説明する。その後、位置推定エリア外を推定した場合の補正についても述べる。

##### 4.3.1. 電波伝搬損失モデル

まず多辺測量法に必要なRSSIと距離の関係について述べる。送信機器と受信機器の距離が離れるに従いRSSIは弱くなっていく。この特性を利用し、RSSIから機器間の距離を計算することができる。ITU-Rの勧告によると、屋内における電波の伝搬損失モデルは式(2)によって表される[9]。

$$RSSI = P_t - 20 \log_{10} f - N \log_{10} d - L_f(n) + 28 \quad (2)$$

ここで、 $P_t$ は送信電力[dBm]、 $f$ は送信周波数[MHz]、 $N$ は距離による信号減衰率(自由空間では20)、 $d$ は送受信機器間の距離[m]、 $L_f$ は障害壁による信号減衰量[dB]、 $n$ は送受信機器間の障害壁数となる。

$P_t$ 、 $f$ 、 $L_f$ 、 $n$ は既知であり、アクセスポイントの位置も分かっているので、端末の位置が決まれば各アクセスポイントでのRSSIと距離を用いて最小二乗法によって $N$ を求めることができる。

##### 4.3.2. 全体の流れ

補正を適用した多辺測量法の全体の流れは次のようになる。

###### 1. 推定データ観測

推定したい地点からのRSSIを観測し、推定データを集める。

###### 2. モデルによる補正

最も強いRSSIから、端末がいる領域を推定する。端末がいる領域でRSSIが取りうる範囲を求める。求めた範囲に従い、推定データの補正をする。

###### 3. 位置推定

連立方程式を立て、解を得ることで位置を推定する。

###### 4. 結果判定と補正

結果が位置推定エリア内か判定する。位置推定エリア外の場合、全てのRSSIに対して補正をかける。その後、再び位置推定段階へ戻り、以降結果が位置推定エリア内となるまで繰り返す。

##### 4.3.3. 推定データ観測

推定したい地点で端末から電波を発信し、周囲のアクセスポイントでそれを観測する。RSSIと受信回数から各アクセスポイントでのRSSIの平均値を計算し、推定データとする。

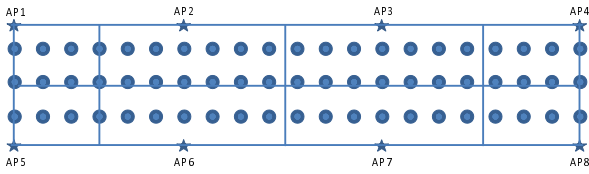


図 11: 領域分割

#### 4.3.4. モデルによる補正

RSSI が電波伝搬損失モデルに従う場合、端末とアクセスポイントの距離が短いほど RSSI は強くなる。つまり、RSSI が強いアクセスポイントの近くに端末が存在する可能性が高いと言える。今回は、RSSI が最も強いアクセスポイントを求め、他のアクセスポイントよりそのアクセスポイントに近くなる場所を端末がいる領域と推定する。アクセスポイントが 8 個なので、位置推定エリアは図 11 のような 8 つの領域に分けられる。

求めた領域内での信号減衰率  $N$  の値を求め、その時の電波伝搬損失モデルから各アクセスポイントで観測される RSSI の範囲を求める。最大、最小を求めるため、端末がいる領域の左上、右上、左下、右下の 4 点で最小二乗法により  $N$  を求め、RSSI の計算を行う。

各アクセスポイントでの RSSI の上限、下限が求めたので、観測データがその条件を満たすように補正を行う。範囲内であればそのままの値で、下限より弱いなら下限、上限より強いなら上限の値にする。

#### 4.3.5. 位置推定

座標と距離の関係式を解くことで位置を求める。RSSI と距離の関係式は式 (2) で表されるので、観測した RSSI を代入することで、端末とアクセスポイントの距離の理論値を求めることができる。複数のアクセスポイントでの観測によって連立方程式を立て、それを解くことで位置を推定することが可能である。トンネル施工现场では 2 次元空間での位置推定を行う。未知数は推定位置の座標を表す  $x$  と  $y$  の 2 つのため、2 つ以上のアクセスポイントでの観測により 2 式以上から成る連立方程式を解けば良い。連立方程式は次のようになる。

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $d_1$  はアクセスポイント 1 と端末の距離 [m]、 $d_2$  はアクセスポイント 2 と端末の距離 [m]、 $(x_1, y_1)$  はアクセスポイント 1 の座標、 $(x_2, y_2)$  はアクセスポイント 2 の座標、 $(x, y)$  は端末の位置 (未知数) を表す。

この連立方程式は非線形で容易に解くことができないため、ニュートン法を用いて漸近的に位置を求める。

#### 4.3.6. 結果判定と補正

推定結果が位置推定エリア内かどうか判定し、エリア内ならその位置を推定位置とする。エリア外の場合はモデル式による補正が妥当ではなかったと考えられる。また事前実験から、トンネルでは観測データ全体が同じような値で変化すると分かったので、真のモデル式に対して観測データ全体が同じような値で変化したと考える。

ここで、式 (2) から、距離が離れているほど、RSSI の変化に対して距離が大きく変化することが分かる。つまり、時刻差により RSSI が変化すると、推定したい地点から離れたアクセスポイントほど推定距離が大きく変化する。

RSSI の変化は強まる方向と弱まる方向の 2 通り存在する。強まる場合はそれぞれのアクセスポイントとの推定距離が近くなり、位置推定エリアの中心よりに推定するが、推定距離の変化は小さいため誤差も小さいと考え、今回は考慮しない。弱まる場合はアクセスポイントとの推定距離が長くなり、位置推定エリア外を推定地点とする場合がある。つまり、真のモデル式に対して観測データ全体が弱まる方向に変化したと考え、逆方向の強める方向に補正をかける。変化量を計算する比較対象がないため、小さい補正值から始め、エリア内に収まるまで大きくしていく。

#### 5. 評価

前章で述べた提案手法について、実際のトンネルで評価実験を行う。

##### 5.1. 評価方法

位置推定手法として RSSI によるシーン解析法と多辺測量法を用い、それぞれ補正なしの場合と提案手法による補正を適用した場合について評価する。シーン解析法は決定的手法を用いて行うが、その時の距離はユークリッド距離を用いる。シーン解析法と多辺測量法の共通の評価尺度として以下を用いる。

- 平均誤差  
実際の位置と推定位置の誤差の平均値
- 累積誤差率  
推定誤差が基準となる誤差以下になる割合

シーン解析法については、さらに次の評価尺度を用いる。

- 正答率  
実際の位置と推定位置が一致する割合
- 距離減少率  
補正なしの場合と補正ありの場合の、RSSI 空間上での距離の比



表 3: シーン解析法の正答率, 平均誤差

	補正なし	補正あり
正答率 [%]	40.5	45.9
平均誤差 [m]	8.2	5.9

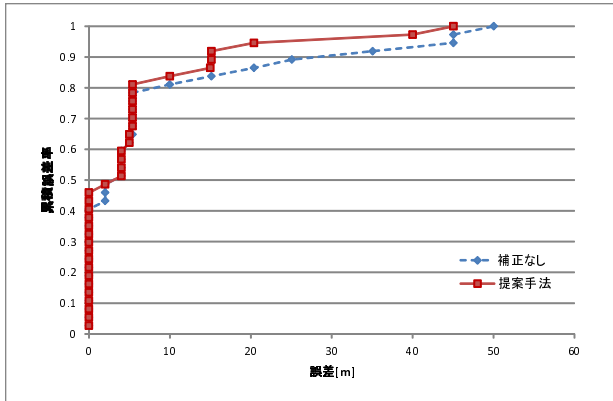


図 12: シーン解析法の累積誤差率

## 5.2. 環境

評価は検証実験と同じトンネルで行った。多辺測量法における位置推定エリアは四隅のアクセスポイント 1, 4, 8, 5 がなす長方形の内側とする。アクセスポイント, 端末は検証実験と同じ機器を使用した。

シーン解析法の学習フェーズ, 推定フェーズともに, それぞれの候補地点で 5 秒の観測を 5 セット行い, それぞれ観測できた RSSI の平均値を学習データ, 推定データとした。多辺測量法の推定データは, シーン解析法で使用したものと同一データを用いた。

## 5.3. 結果

### 5.3.1. シーン解析法

正答率, 平均誤差を表 3, 累積誤差率を図 12, 距離減少率を表 4 に示す。補正により, 正答率は 5.4%, 平均誤差は 2.3 メートル改善していることが分かる。累積誤差率を見ると, 誤差が 10 メートル以下の結果ではあまり差が見られないが, 15 メートル以上の場合は, 補正によって誤差が減少していると言える。表 4 から, 実際の位置の学習データとの距離は 31.2%, それ以外の位置の学習データとの距離は 10.2%減少していることが分かる。

表 4: 距離減少率の比較

	実際の位置	異なる位置
補正なしの距離 [m]	40.5	45.9
補正ありの距離 [m]	8.2	5.9
距離減少率 [%]	31.2	10.2

表 5: 多辺測量法の平均誤差

	平均誤差 [m]
補正なし	11.2
モデル補正	9.58
シフト補正	6.08
組み合わせ	5.61

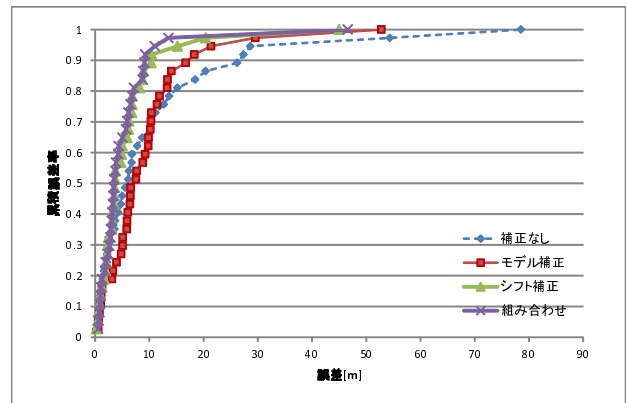


図 13: 多辺測量法の累積誤差率

### 5.3.2. 多辺測量法

平均誤差を表 5, 累積誤差率を図 13 に示す。平均誤差はモデルによる補正により 14% 減少し, 全体を強める補正によって 46%, 組み合わせることによって 50%の改善が見られた。累積誤差率は, モデルによる補正の場合, 誤差が 10 メートル以下の場合には補正なしより悪いが, それ以上の誤差は小さくなっている。また, 範囲内に収める補正では全体的に誤差が小さくなり, 2 つの補正を組み合わせるとより誤差が小さく抑えられている。

### 5.4. まとめ

補正により, シーン解析法では平均誤差が 28%, 正答率は 5.4%改善した。多辺測量法では平均誤差はモデル補正により 14%, シフト補正により 46%, 組み合わせると 50%減ることを確認した。以上から, 提案手法により精度が改善することが確認できた。累積誤差率の結果から, シーン解析法, 多辺測量法ともに, 補正は誤差が大きな場所で効果が大きいと考える。また, シーン解析法での誤差減少率の結果から, 補正の影響は実際の位置のデータに強く出ていることが分かり, 提案手法が有効に働いていると言える。しかし, 正答率はそこまで良くなっておらず, これは実際の位置とは異なる位置のデータが, RSSI 空間上でより近くにあるためと考える。多辺測量法においてモデル補正が部分的に悪くなるのは, 領域を分割している境界に近い位置など, RSSI が最も強いアクセスポイントと次に強いもので, 強弱関係が入れ替わりやすい場所を推定する場合が考えられる。領域を誤推定した場合, 誤推定した領域に入るように補正してしまうため, 誤差が大きくなる。

## 6. おわりに

本稿では、情報化施工の現状や、施工現場に適した位置推定手法について述べ、トンネルでの位置推定として有効と思われる無線 LAN を用いた位置推定において、計測時刻差によって RSSI が変化するという問題について説明した。これを解決するために、RSSI は端末とアクセスポイント間の距離差による大小関係を維持したまま絶対値が変化すること、トンネルでは RSSI の変化自体は大きいが見通しが良いため電波伝搬損失モデルに良く従うことに注目し、簡単で効果的な推定データを補正する手法を提案した。提案手法により、シーン解析法においては正答率を 5.4% 向上、平均誤差を 28% 減少させ、多辺測量法においても平均誤差を最大で 50% 減らすことができた。

今後の課題としては以下を考える。

- 局所的な変化に対する補正の考案

シーン解析法では、補正を適用しても結果が改善しない地点がいくつかあった。これは全体的な RSSI の変化以外に原因があるためと考える。今回の補正では全体的な変化の傾向から補正値を求めているが、局所的な変化にも対応するような補正方法を考える必要がある。

- 位置推定エリアの領域分割

今回は最も RSSI が強いアクセスポイントを利用し、エリアをアクセスポイントの数に分割して各アクセスポイントからの距離が最小になる場所を、そのアクセスポイントの領域としたが、2 番目に強いアクセスポイントを利用すれば領域を更に細かく分割できる。他にも領域の分割の方法はいくつか考えられ、また、領域の境界付近は精度が落ちやすいという問題などもあるため、適切な領域の分割方法を考える必要がある。

- 最大誤差の改善

補正を適用することで、平均誤差を改善することができたが、誤差の最大値は 40 メートル以上と、あまり改善できていない。特に安全管理に位置情報を用いる場合、最大誤差が重要になるため、誤差が大きい地点の原因を調査し、最大誤差を改善する必要がある。

## 謝辞

本研究の一部は、電気通信普及財団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。また、現場実験にご協力いただいた関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 情報化施工推進会議, “情報化施工推進戦略,” 2008.
- [2] P. Bahl and V.N.Padmanabhan, “RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System,” *Proc. of the IEEE Int’l Conf. on Computer Communitacions (INFOCOM 2000)*, Vol. 2, pp. 775–784, 2000.
- [3] 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, pp. 95-104, 2006.
- [4] 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 ハイブリッド位置推定手法とその応用,” *電気学会論文誌*, Vol. 126, No. 10, pp. 1212–1220, 2006.
- [5] J. Yin, Q. Yang, and L. M. Ni, “Learning Adaptive Temporal Radio Maps for Signal-Strength-Based Location Estimation,” *IEEE Trans. on Mobile Computing*, Vol. 7, No. 7, pp. 869–883, 2008.
- [6] M.Youssef and A.Agrawala, “The Horus WLAN Location Determination System,” *3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, pp.205–218, 2005
- [7] S.H. Fang, T.N. Lin, and P.C. Lin, “Location Fingerprinting in a Decorrelated Space,” *IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering*, Vol.20, pp. 685–691, 2008.
- [8] S.H. Fang and T.N. Lin, “Robust wireless LAN location fingerprinting by SVD-based noise reduction,” *Proc. ISCCSP 2008*, pp. 295–298, 2008.
- [9] Rec. ITU-R P.1238-1, “Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Indoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 900 MHz to 100 GHz,” *ITU-R Recommendations*, 1999.