

情報化施工のための仮設型無線ネットワーク基盤の研究開発

田 頭 茂 明 関西大学 総合情報学部 准教授

1 はじめに

建設生産プロセスのうち実際に工事を行う建設施工は、様々な社会活動の基盤となる社会資本を提供するための生産技術として重要な役割を担っている。21世紀に入り建設施工を取り巻く情勢は大きく変化し、生産効率の向上、熟練技術者・技能者の不足、品質確認の重要性の高まり、施工現場の安全確保等、様々な課題が浮き彫りになっている。これらの課題を解決する一つの方法として、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。

情報化施工を実現する具体的なシステムとしては、施工管理、安全管理、入退室管理などがある。特に、トンネル建設工事は、他工事に比べ輻輳作業や施工サイクルが多く、情報化施工を利用した効率的な施工管理は有効である。これらの情報化施工を実現する上で重要な要素技術として、情報通信を可能にする無線ネットワークの構築技術に加えて、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を把握できれば事故回避にもつながる。建設現場において、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）が利用されている。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閉空間である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建設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が使えない閉空間でも利用できる位置推定技術として、無線電波による位置推定に注目する。具体的には、建設現場で重要となる仮設性に着目し、無線メッシュネットワーク技術を基にして、通信インフラと測位インフラを同時に提供する仮設型無線ネットワーク基盤を確立する。この目的のもとで本研究では、建設土木分野のための情報化デバイスとして、カラーコーンにIT機能を組み込んだITカラーコーンを開発した。ITカラーコーンには、無線メッシュネットワークの基地局機能に加えて、電光掲示板とパトライトが装備される。これにより、ITカラーコーンを設置することで、閉空間での通信インフラを提供できるだけでなく、測位インフラの提供により危険領域への進入、重機の接近等の検知が可能となり、周辺の作業員に電光掲示板とパトライトにより通知できる。また本研究では、ITカラーコーンを設置するだけで、一時的な測位環境を容易に構築できることを研究の目標と設定し、アドホック測位向け高精度測位技術を開発した。

無線測位技術には、シーン解析法、近接性を用いた手法、多辺測量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。シーン解析法は精度が高いが事前学習が必要であり、近接性を用いた手法は簡潔で導入が用意であるが精度が低いという欠点がある。本研究では、測位環境の構築を簡単にするため、事前の学習が不要で、近接性を用いた手法より高精度な測位が可能である多辺測量法に着目する。多辺測量法では、RSSIから距離を求める際に電波伝搬損失モデルを用いる。測位結果がモデル式のパラメータに大きく依存するため、測位エリアの電波の減衰係数を適切にモデル式に反映する必要がある。トンネル建設現場における事前実験の結果から、受信電波の減衰係数はITカラーコーンごとに異なっており、その時刻、場所の特徴を反映していることが分かった。従来手法では、事前学習により測位エリア全体で一つのモデル式を求めて測位を行うために、全体のモデル式のパラメータとITカラーコーンごとの電波の減衰係数が大きく異なる場合、測位精度を低下させる問題がある。特に、トンネル建設工事などの建設現場においては、温度・湿度の変化、粉塵の発生等により電波伝搬が時々刻々と変化するため、この問題が測位精度を低下させる主な原因になり得る。したがって、電波伝搬をリアルタイムに観測し、測位方式を建設現場の環境に自律的に適応させる技術が必要である。

本研究では、複数のITカラーコーンが協調し、現在の電波伝搬状況を自律的に推定することで、測位精度を改善する手法を提案する。具体的には、アドホック測位の際に問題となる測位誤差をシステム側から軽減するために、ITカラーコーン間で送受信されるビーコン信号のRSSIを分析することで、ITカラーコーンご

とのモデル式の適切なパラメータの導出手法を提案する。また、実環境における実験により提案手法の有効性を評価した。結果から、従来手法と比べて提案手法では測位誤差を平均で 30% 改善できることを確認した。

2 IT カラーコーン：建設土木分野における情報化デバイス

図 1 に、IT カラーコーンを用いた情報化施工のイメージ図を示す。図 1 では、数ある建設現場の中でも最も劣悪な環境であるトンネル施工現場のための情報化施工を図示している。トンネル施工現場における情報化施工では、小型の無線タグを人や重機に設置し、複数の IT カラーコーンをトンネル坑内に設置することを想定する。提案システムは、無線タグが発した電波を IT カラーコーンが受信し、その受信した RSSI 情報を、IT カラーコーン同士で確立した無線メッシュネットワークを介して、サーバに集める。集められた RSSI 情報から無線タグの位置を推定し、安全管理、施工管理、入退場管理などの情報化施工アプリケーションで利用する。以下、各アプリケーションについて説明する。

- 安全管理：人・重機の位置を統括的に把握しておき、各々の接近など予防的な安全管理を実現する。
- 施工管理：作業員や重機の位置から現在の施工状況を遠隔で把握し、施工サイクルの効率化を実現する。
- 入退場管理：入場者やその入場時間を管理する。災害時における坑内の作業員の把握や労働環境の管理を実現する。

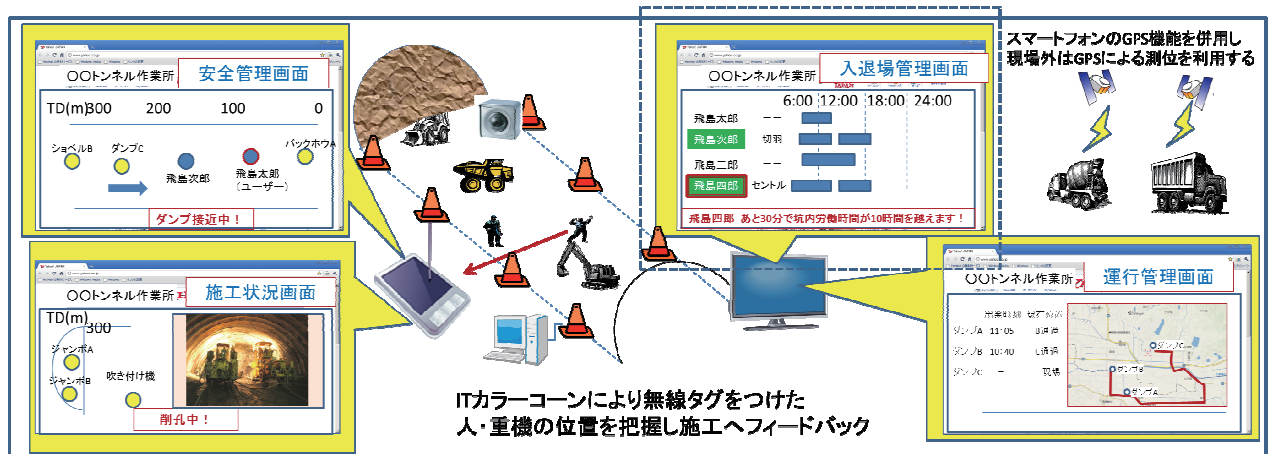


図 1：IT カラーコーンを用いた情報化施工（トンネル施工）のイメージ図

作成した IT カラーコーンの写真を図 2 に示す。IT カラーコーンには、無線メッシュネットワークの基地局機能を搭載している。したがって、IT カラーコーン同士が無線リンクを確立し、マルチホップ通信を実現できるため、IT カラーコーンが配置された空間において、通信インフラを提供可能である。また、IT カラーコーンには無線タグが発する電波を観測し、その RSSI を収集する機能を搭載する。さらに、IT カラーコーンには電光掲示板、警告灯を取り付けることができ、IT カラーコーンに搭載された Linux 計算機により、これらを制御できる。電光掲示板や警告灯の利用例として、危険領域の四隅に IT カラーコーンを設置し、作業員や重機がその領域内に侵入した場合に、電光掲示板や警告灯を用いて注意を促すことが可能である。

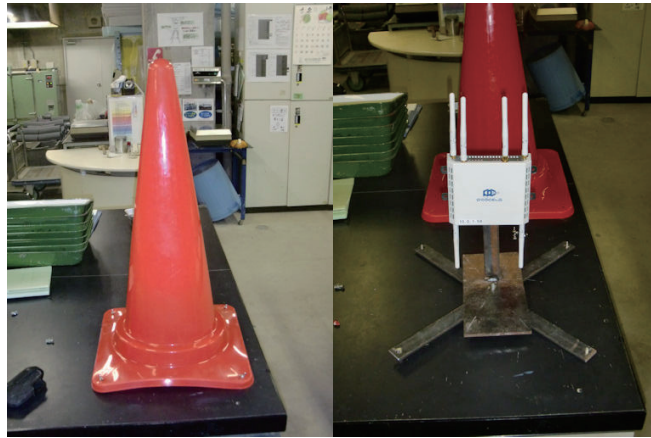


図 2：IT カラーコーンの写真

IT カラーコーンは、通信インフラを提供しつつ、無線タグをつけた作業員や重機の位置を把握するが、その際の課題を以下に示す。

- 建設施工では、工事区間の移動とともにネットワークを再構築する必要がある。このために、高い信頼性を備えつつ、動的な構成変化に対応できなければならない。また、施工期間だけに利用されるネットワークであり、施工終了後はこのネットワークを撤去しなければならない。したがって、その構築にかかえる費用や手間を抑える必要がある。このように、高い信頼性を備えつつ、建設施工特有の仮設性に優れた無線ネットワーク測位技術が必要である。
- 建設現場は、トンネル建設工事のように粉塵の発生や高温多湿のような測位環境として劣悪な場合が多い。このために IT カラーコーンが環境情報を計測し、測位方式を現場環境に自律的に適応させる技術が必要である。

3 既存の無線測位技術

無線通信を用いた測位技術には近接性を用いた手法、シーン解析法[1][2][3][4]、多辺測量法[1]などがある。近接性を用いる手法では、あらかじめそれぞれの基地局 (AP) 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る位置を推定位置とする。多辺測量法では 3 つ以上の AP と受信機器との距離を RSSI から求め、それぞれの AP 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。

RSSI から距離を求める際には電波伝搬減衰モデルを用いるが、フェージングやシャドウイングの影響で場所や時刻によって変動が大きいため、適切なモデル化が必要である。一般的な方法として、ITU-R の伝搬損失モデルを用いる方法がある。ここで RSSI とは、送信機器から発信された電波信号が受信機器に届いたときに観測される信号強度のことである。電波は送信機器から受信機器に届く間に減衰していくため、送信機器と受信機器と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(1)によって表される[9]。

$$L_{total} = 20 \log_{10} f + N \log_{10} d + L_f(n) - 28 \quad (1)$$

ここで、 L_{total} は屋内における伝搬損失 [dB]、 f は送信周波数 [MHz]、 N は距離による信号減衰係数 (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を表す。このモデル式を用いると、送信電力と RSSI は式(2)のような関係となる。

$$RSSI = P_t - L_{total} \quad (2)$$

ここで、 $RSSI$ は受信信号強度[dBm]、 P_t は送信電力[dBm]、 L_{total} は伝搬損失[dB]を表す。式(2)に $RSSI$ を代入することで送信機器と受信機器の距離を求めることができる。また、 $RSSI$ はそれ自体を周囲の状況を表す指標としても利用できる。

一方で、電波伝搬減衰のモデル化に関する研究も盛んに進められている[5][6]。文献[5]では対数尤度関数が最大になるように減衰係数を定め、そのときの測位位置を求める手法を提案している。文献[6]では、位置が既知であるアンカー同士の距離と $RSSI$ から伝搬の減衰係数や壁の減衰を計算し、モデルのパラメータのキャリブレーションを行うことで精度を高めている。

測位手法の別の分類として、端末側での測位とインフラ側による測位の二通りがある。端末側での測位では、周囲の AP から発信される電波を端末で受信した $RSSI$ を用いて、端末側で位置計算を行うのに対して、インフラ側による測位では端末が発信した電波を周囲の AP で受信した $RSSI$ を用いて、インフラ側で位置計算を行う。インフラ側による測位は、受動的測位 (passive localization) と呼ばれ、端末側で位置計算を行わないために省電力性に優れ、複数対象の測位や、暗黙的に測位できるため継続的な測位による動線解析に適している。受動的測位に関連する研究として、文献[7][8]がある。StarDust[7]では、光を反射する光学装置を利用し測位を行っている。文献[8]では、測位のために端末を利用せず、周囲の AP で観測される $RSSI$ の変化から対象の位置を求めている。本研究では、インフラ側による測位で利用可能な他の AP の情報を用いて、多辺測量法の電波伝搬減衰モデルを最適化する手法を提案する。

4 予備実験

4-1 予備実験 1

予備実験として、トンネル施工現場における提案ネットワークの測位実験を実施した。図 3はその実験の様子を表している。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電波強度を計測し、その変化を比較、検討した。トンネル施工現場での実験は東九州自動車道 新津トンネル工事現場で行い、トンネル坑内の坑口より 500m の地点で計測を行った。また、オフィスの実験は九州大学伊都キャンパス ウェスト 2 号館 7 階で行った

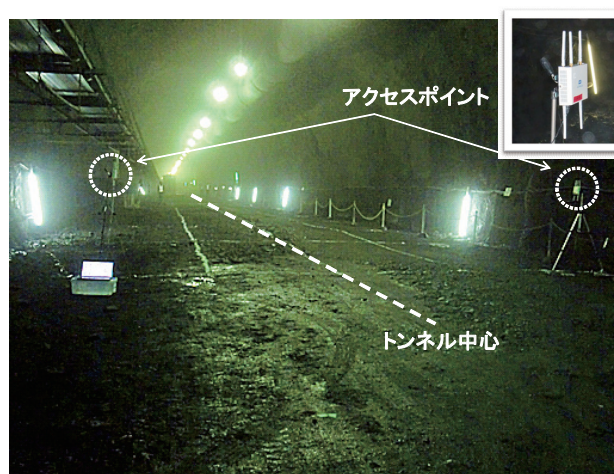


図 3：トンネル施工現場における測位実験の写真

(1) 電波減衰モデルと観測データとの誤差

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た。トンネルとオフィスそれぞれの $RSSI$ 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、モデル式と観測データの誤差の二乗平均を計算した結果を、表 1に示す。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ことがわかった。

表 1: 電波減衰モデルと観測データとの誤差

	1 回目 [dBm]	2 回目 [dBm]
トンネルでの計測	17.5	30.8
オフィスでの計測	25.6	38.8

(2) RSSI の変化量

次に、RSSI の変化量の大きさをトンネルとオフィスで比較した。1 つの AP 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、通信品質や測位精度を低下させる原因になると考えられる。

表 2: RSSI の変化量

	最大値 [dBm]	最小値 [dBm]	平均値 [dBm]
トンネルでの計測	13.4	1.9	4.3
オフィスでの計測	9.5	1.2	3.7

(3) 受信信号強度の分布

最後に、トンネルにおける RSSI の変化量が大きな地点の変化の様子を検討した。結果を図 4 に示す。結果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 AP 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った。

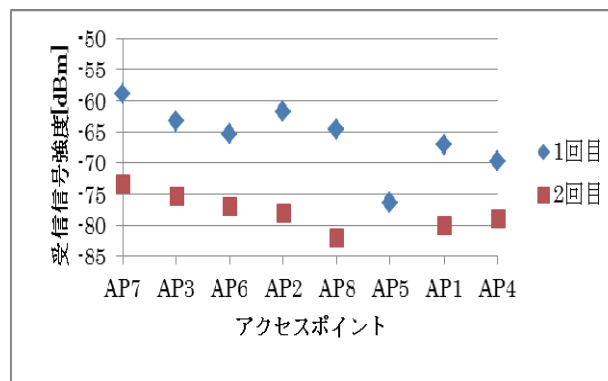


図 4: 受信信号強度の変化

以上から、トンネルではオフィスよりも RSSI の変化にある一定の傾向があると考えられる。つまり、トンネルでは時間による影響は RSSI の絶対値の変化 (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。この RSSI の絶対値の変化は、通信品質や位置推定の精度を低下させる原因の一つになると考える。

4-2 予備実験 2

多辺測量法では、RSSI から距離を求める際に電波伝搬損失モデルを用いるため、測位結果がモデル式のパラメータに大きく依存する。精度が低い原因は、AP の位置の違いなどから生まれるパラメータの違いをモデル式に適切に反映できていないことと考える。そこで、実際に AP に対する電波伝搬損失のモデルが場所や時刻によってどのように異なるか予備実験によって検証した。

(1) アクセスポイントの違いの影響調査

AP の位置の違いが、モデル式のパラメータに与える影響を検証する。まず、複数の AP を設置し、1 つの AP に対して周囲の AP からビーコン信号を送信する。その AP からモデル式のパラメータを求める作業を、全ての AP に対して行い比較した。実験は九州大学ウエスト 2 号館 2 階ロビーで行った。図 5 に実験環境を示す。ロビーは見通しが良く、AP 間を遮るような遮蔽物は置かれていない。AP (AP1~AP8) には PicoCELA Inc

PCWL-0100 を使用し、1 秒間隔のビーコン信号の観測を 10 秒間行った。本調査ではモデル式のパラメータの内、傾きを表す電波の減衰係数を対象とする。

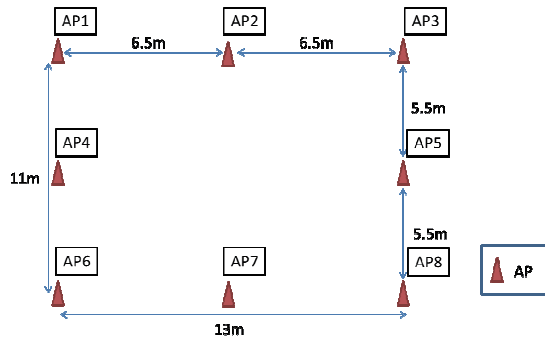
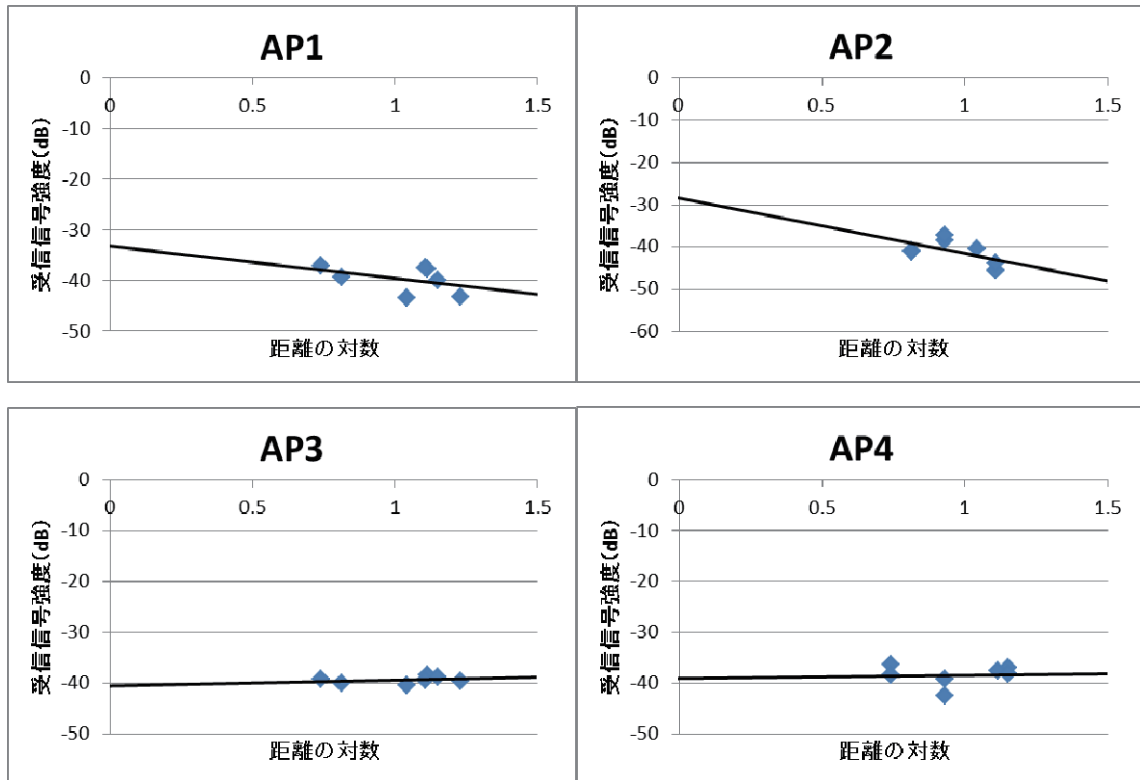


図 5：実験環境

図 6は、各 AP で他の AP から受信したビーコン信号の RSSI と距離の対数の関係を示している。距離の対数を取るのは、RSSI と線形な値とするためである。図の番号と AP の番号は対応しており、図中の直線は観測データを線形近似したものである。また、表 3に近似直線の傾きを示す。結果から、AP ごとに傾きは大きく異なっていることがわかる。



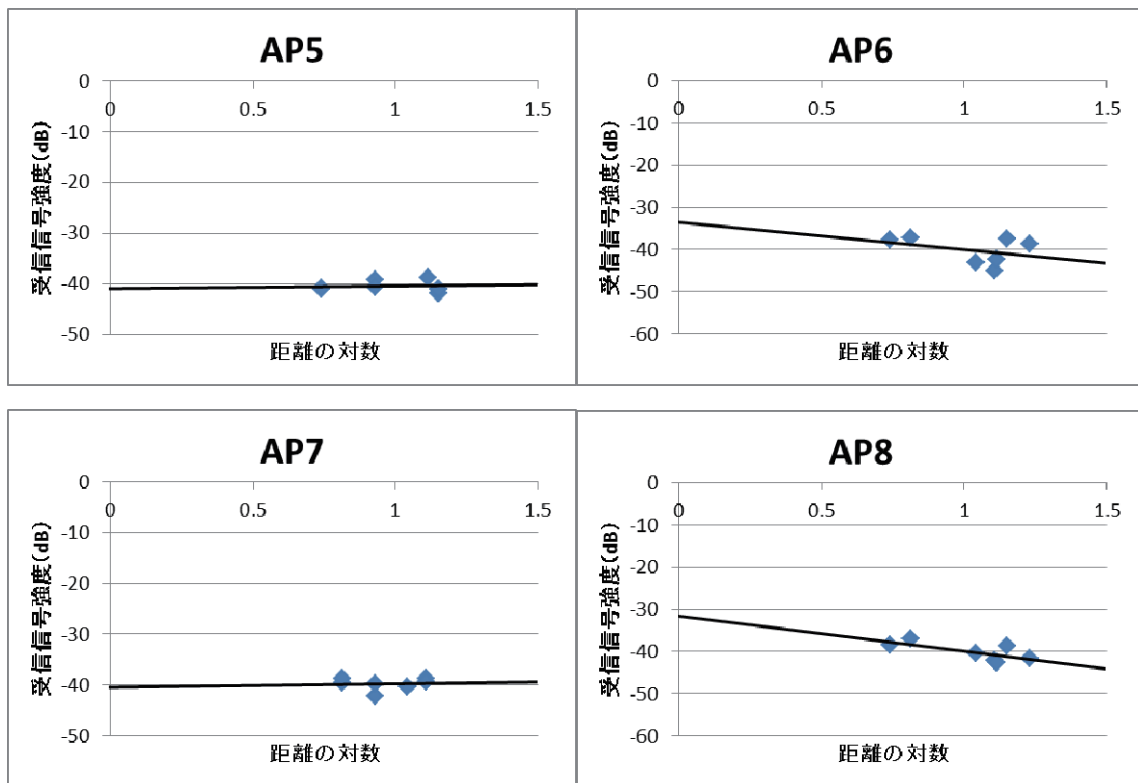


図 6：近似直線の傾きの違い

表 3：近似曲線の傾き

	AP1	AP2	AP3	AP4	AP5	AP6	AP7	AP8
傾き	-6.3	-13.2	1.2	0.6	0.5	-6.5	0.7	-8.4

(2) 時刻の違いの影響調査

同一の AP について、時刻の違いがモデル式のパラメータに与える影響を検証するため、一つの AP に対する観測を複数回行った。環境は前述の実験と同様で、1 秒間隔のビーコン信号の 10 秒間の観測を 6 回行った。各観測の間隔は 2 分程度である。

図 7 に各 AP で受信した電波の減衰係数の推移を示す。図 7 から、同一の AP ではモデル式の傾きを表すパラメータは時刻により多少変化するものの、短時間では大きな変化は見られないことが分かる。

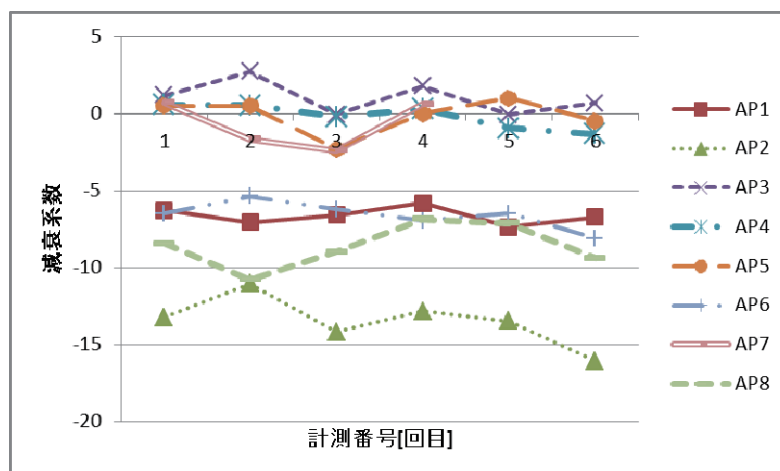


図 7：電波の減衰係数の推移

以上の結果から電波伝搬損失のモデル式の傾きを表すパラメータは、AP ごとに異なっていることが分かった。なかには傾きが正になり、距離が近いアクセスポイントよりも遠い AP の方が RSSI が強いことを示すデータも見られた。しかし、二つ目の実験で、短時間では傾きが大きくは変化していないことから、傾きが正である場合でも、その AP が受信する電波の伝播損失の特徴を適切に反映しているものとする。また、大きな変化ではなくても、時刻によっては傾きが変化することも確かめられた。これは、AP を設置した空間で、人の移動があったためと考える。実際の測位環境ではより多くの人や物の移動が想定されるので、時刻による傾きの変動もより大きくなると予想する。

今回の実験の結果から、位置によるモデル式のパラメータの違い、および時刻変化は、従来手法による測位精度に対して次のような影響を及ぼすと考える。

- 位置によるパラメータの違い：従来手法では、測位エリア全体を 1 つのモデル式でモデル化するため、全体と大きく異なるパラメータを持つ AP では距離が実際とは異なる値になる。そのような異常値を計算に使用することで精度が低下する。
- パラメータの時刻変化：従来手法では、事前学習時に求めたパラメータを用いて計算を行うため、事前学習時と測定時に環境が異なると精度が低下する。

5 提案方式

本章では、事前実験の結果を踏まえ、多辺測量法の精度を改善するため AP ごとの適切なパラメータの導出手法を提案する。まず概要を述べ、次に全体の流れと各詳細について説明する。

5-1 概要

ここでは、提案手法の概要について述べる。事前実験で検証したように、AP ごとに受信する電波の減衰係数が異なるため、モデル式の適切なパラメータの値も異なる。そこで、AP ごとに測位時の電波の減衰係数を求めることができれば、位置による減衰係数の違い、および減衰係数の時刻変化を軽減し、多辺測量法の測位精度を向上できると考える。提案手法では、周囲に設置されている位置が既知の複数の AP を利用し、相互にビーコン信号を送受信することで、現在の電波の減衰率を導出する。

5-2 全体の流れ

提案手法による多辺測量法の全体の流れは次のようになる。

1. アドホック無線測位システムの構築
測位の対象となるエリア内に複数の AP（すなわち、IT カラーコーン）を設置することで、アドホック無線測位システムを構築する。設置した AP の位置をサーバに登録し、AP 間の距離を事前に得られるようにする。
2. データ観測
各 AP で、位置推定のために必要なデータを観測する。ここで必要なデータとは、自分以外の周囲の AP からのビーコンの RSSI 情報と、推定したい地点で端末から発信された電波の RSSI である。
3. パラメータ導出
周囲の AP からの RSSI と、その AP との距離の対数を用いて、最小二乗法によって電波の減衰係数を求める。
4. 位置推定
連立方程式を立て解を得ることで、対象端末の位置を推定する。

上記のステップ 4 の位置推定の詳細について次節で説明する。

5-3 位置推定

AP ごとに電波伝搬損失モデル式を用いた方程式を立て、連立方程式を解くことで位置を求める。2次元空間での位置推定では、通常未知数は推定位置の座標を表す x と y の 2 つであるが、今回は電波の発信元が AP と端末で異なることに起因する RSSI の差を埋めるため、以下の式のように α も変数とする。よって、3

つ以上の AP での観測により三つ以上から成る連立方程式を解けば良い。まず推定座標 (x, y) と n 番目の AP の座標 (x_n, y_n) との距離の関係を式 (3) で表す。

$$r_n = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2} \quad (3)$$

また、連立方程式は式 (4) のようになる。

$$\begin{aligned} rssi_1 &= N_1 \log_{10} r_1 + C - 20 \log_{10} f + 28 \\ rssi_2 &= N_2 \log_{10} r_2 + C - 20 \log_{10} f + 28 \\ rssi_3 &= N_3 \log_{10} r_3 + C - 20 \log_{10} f + 28 \\ &\vdots \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $rssi_n$ は、 n 番目の AP での RSSI 値 [dBm]、 N_n は n 番目の AP での電波減衰係数、 C は AP と端末の RSSI [dBm] 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。

6 性能評価

前節で述べた提案手法の有効性を実環境による実験で評価した。次節以降で、その評価方法、実験結果、および実験の考察について述べる。

6-1 評価方法

多辺測量法に、従来手法による事前学習時に求めたパラメータを用いた場合と、提案手法によって導出したパラメータを用いた場合について評価を行う。また、傾きが正になっている AP の測位精度への影響を調べるため、傾きが -2 以上である AP を除外した場合についても評価を行った。本実験における評価尺度には以下を用いる。

- 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

6-2 評価環境

評価を行う環境は、図 8 のような屋内空間である。図中の測位地点で端末から電波を発信し、測位結果と実際の位置を比較した。AP は、事前実験と同様の機器を使用し、測位対象の端末には Android Nexus S を用いた。パラメータ導出用のビーコンは 1 秒間隔で各 AP から発信し、位置推定用の信号は 0.1 秒間隔で端末から発信する。

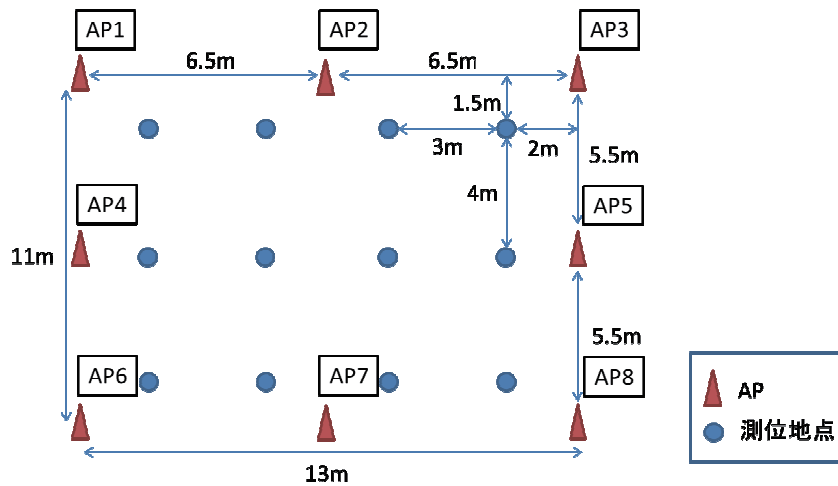


図 8 : 評価環境 (AP と測位地点)

6-3 結果

5 回の計測の結果を表 4、図 9 に示す。表 4 を見ると、提案手法によって平均誤差は 3.2 メートル、30% 減少していることが分かる。しかし、AP を傾きによって選別すると誤差が増大している。図 9 は、従来手法と提案手法、AP を選別した場合の累積誤差率を表す。全体的に誤差が減少していることが分かる。平均誤差、累積誤差率の結果から、提案手法により全体的に誤差が軽減され、30% の改善が確認できた。また、電波伝搬損失モデル式の傾きが正である AP を計算から除外すると精度が低下することが確認された。通常、離れた AP からの信号ほど RSS が弱くなる傾向にあるため、傾きが正となるのは直感的には不自然に思われるが、傾きが正であるということも AP の特徴として測位に有効な情報であるため、利用することで精度が向上すると考える。これは、事前実験で傾きの値が時刻によって大きくは変化しないことも一致しており、提案手法により AP ごとに適切なパラメータを導出できていることを示している。ただし、環境の変化の大きさに従って傾きの時刻変化も大きくなると考えられる。提案手法では、その時点での周囲の状況から傾きを導出するため、そのような環境の変化にも十分対応できると考える。

表 4 : 平均誤差の比較

	従来手法 [m]	提案手法 [m]	AP 選別 [m]
1 回目	11.2	5.9	7.0
2 回目	10.0	8.2	9.6
3 回目	10.7	7.7	9.1
4 回目	10.1	7.2	7.7
5 回目	9.9	7.4	9.3
平均	10.4	7.2	8.5

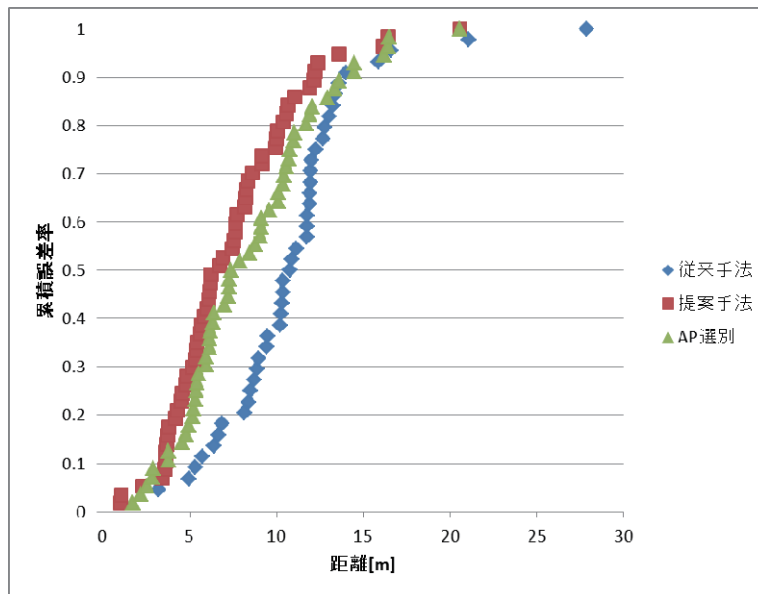


図 9 : 累積誤差率

7 おわりに

本論文では、情報化施工の現場において簡単に利用可能なアドホック測位システムを実現するため、事前学習が不要である多辺測量法に着目し、精度を向上する手法を提案した。事前実験により、AP の位置の違いや環境の変化によるパラメータの違いを検証し、位置によってパラメータが異なること、短時間での時刻変化はそれほど大きくないが、周囲の環境が大きく変化すればそれに従い変化も大きくなると予想されることを確認した。場所や時刻によるパラメータの違いに起因する測位精度の低下を解決するため、アドホック無線測位システムでは、周囲の AP からのビーコンの受信信号強度を利用することで、AP ごとの特徴を抽出できることに注目し、リアルタイムに電波伝搬損失モデル式のパラメータを導出する手法を提案した。提案手法により、平均誤差を 30%改善させることができた。

【参考文献】

- [1] P. Bahl and V.N.Padmanabhan, "RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System," Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM 2000), Vol. 2, pp. 775-784, 2000.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] J. Yin, Q. Yang, and L. M. Ni, "Learning Adaptive Temporal Radio Maps for Signal-Strength-Based Location Estimation," IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 7, No. 7, pp. 869-883, 2008.
- [5] I. Yamada, T. Ohtsuki, T. Hisanaga, and L. Zheng, "An Indoor Position Estimation Method by Maximum Likelihood Algorithm Using Received Signal Strength," SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 1, No. 3, pp. 251-256, 2011.
- [6] P. Barsocchi, S. Lenzi, S. Chessa and G. Giunta, "A Novel Approach to Indoor RSSI Localization by Automatic Calibration of the Wireless Propagation Model," Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009., pp. 1-5, 2009.
- [7] R. Stoleru, P. Vicaire, T. He and J. A. Stankovic, "StarDust: A Flexible Architecture for Passive Localization in Wireless Sensor Networks," Proceedings of the International Conference on Embedded networked sensor systems (SenSys 2006), pp. 57-70, 2006.

- [8] M. Youssef, M. Mah, and A. Agrawala, "Challenges: Device free passive localization for wireless environments," Proc. of the ACM Int'l Conf. on Mobile computing and networking (Mobicom 2007), pp. 222-229, 2007.
- [9] Rec. ITU-R P.1238-1, "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," ITU-R Recommendations, 1999.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
情報化施工のためのアドホック無線測位システムにおける高精度測位手法	電子情報通信学会	2012年5月
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	第10回情報科学技術フォーラム (FIT2011)	2011年9月
トンネル施工現場における無線 LAN 位置推定のための精度改善手法の提案	電子情報通信学会	2011年6月