

WMSNにおけるRSSIとカメラを併用した位置推定手法

川濱 悠¹ 勝間 亮¹

概要：カメラを搭載したセンサノードを多数配置して形成する無線マルチメディアセンサネットワーク (WMSN: Wireless Multimedia Sensor Networks) が、広範囲にわたる視覚データ収集の方法として期待されている。センサネットワークにおいてノードの位置情報は重要であるが、従来の電波受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) を用いた位置推定手法は、RSSI 値の変動により精度が低下する問題があった。本稿では、WMSN において、カメラ映像と RSSI を併用した高精度な位置推定手法を提案する。360 度カメラを搭載するセンサノードが、LED ライトを搭載するアンカノードの光信号をカメラで検出し、アンカノードの方角を計測するとともに、その距離を RSSI により計測する。2 つ以上のアンカノードの方角を計測することで、幾何学的計算により自ノードの存在位置を精密に推定する。実験の結果、障害物がない条件で、RSSI のみで位置推定した場合の平均誤差は 1.07m、提案手法の場合は 0.29m であり、提案手法では推定誤差を約 73%改善することが出来た。

1. はじめに

近年、多数のセンサノードを無線通信により相互接続する無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Networks) を用いた広範囲にわたるデータ収集が期待されている。WSN の応用例としては、温度、降水量、照度などの環境データの収集システムから、地滑り検知 [2]、人物追跡 [3] などの高度なモニタリングシステムまで、多岐にわたるアプリケーションが想定される。その中でも、カメラを搭載したノードを用いて映像を扱う WMSN (Wireless Multimedia Sensor Networks) では、自然環境における動物の監視などの対象オブジェクトの発見や追跡を行うアプリケーションにおいて、より具体的かつ視覚的なデータを収集することが可能となり、害獣検知などでの活躍が期待されている。

WSN では、センサノードから収集されたデータをシンクノードと呼ばれる 1 つのノードに集約する。例えば動物監視などのオブジェクト追跡のアプリケーションの場合、集約したデータを解析して得られたオブジェクト情報は、どの位置にあるノードからセンシングされたものかを示すための位置情報が必要である。また、ノード同士が効果的に協調して動作するためにも、全ノードが自身の設置されている位置を把握することが必要不可欠である。このような理由により、WSN を構成する全てのノードは設置座標が判明していなければならないが、必ずしも容易に WSN

の全てのノードの設置座標を特定できるわけではない。

WSN のノードを設置する際、事前に決めておいた位置に計画的に設置する方法と、空中から散布する等、極端な偏りが生じない程度にまばらに設置する方法の 2 通りがある。前者の場合は、ノード 1 つ 1 つに対して位置を緻密に計測しつつ設置するため時間と労力がかかる。その代わり、全てのノードの位置が最初から判明しているため、位置情報を後から推定する必要がない。一方で後者の場合、設置コストは抑えられるものの設置直後の状態ではノードの位置が不明である。よって WSN を稼働させる前にノードの位置を推定する必要がある。ノードの位置を自律的に推定することができれば、手軽に WSN を導入できるという点で望ましい。そのため、本稿ではノードの自律的な位置推定手法に焦点を当てる。ノードの位置推定問題は WSN で一般的な問題であり、種々の先行研究が存在する。中でも電波強度情報 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) に基づいてノード間距離を推測する位置推定技術は、コスト面や消費電力面で WSN に導入しやすいメリットがあるが、RSSI 値の変動などにより誤差が生じてしまう問題がある。

本稿では、WMSN において RSSI を用いたノードの位置推定の誤差を軽減するために、各ノードに安価な LED ライトを追加搭載し、映像と RSSI を併用したノードの位置推定手法を提案する。提案手法では、あらかじめ位置が判明しているアンカノードがパルス発光し、位置推定を行うノードがカメラでパルスを撮影することで、アンカノードの方角を光学的に計測する。複数のアンカノードのパル

¹ 大阪府立大学
Osaka Prefecture University

スを撮影することにより余弦定理を用いて自己位置を絞り込む。実機実験により、障害物の無い環境において、RSSIのみで位置推定した場合の平均誤差は1.07m、カメラを併用した場合は0.29mであり、提案手法では推定誤差を約73%改善することが出来た。

2. 関連研究

WSNにおいて、各ノードの位置を自律的に推定する種々の手法が考案されている。これらの手法は、レンジフリー方式とレンジベース方式の2種類に大別できる。

レンジフリー方式は、ノード同士が互いの距離を測定することなく位置を推定する方式である。低コストかつ低消費電力という利点があるが、レンジベース方式と比較し推定精度が悪い。Centroid法は、自ノードと直接通信可能なアンカノードの集団の重心を自己位置とする手法である[4]。DV-HOP法は、アンカノードから自ノードまでのホップ数をカウントし、ホップ数をアンカノードとの距離として自己位置を推定する[5]。いずれの手法も計算量、通信量ともに少なく抑えることが出来、ノードの位置がうまく把握できれば良いアプリケーションに適している。

レンジベース方式は、ノード同士、もしくはノードと人工衛星ないしWiFiスポットとの距離や角度をもとに自己位置を推定する方式である。搭載機器や消費電力、コストが比較的大きくなるが、より精密な位置推定が可能である。レーザー光や超音波を用いてノード間距離を測定し、ノード位置の位置推定を行う手法が存在する[6][7]。これらの方式はノード間距離を大きくとることが出来ないが、位置推定の精度が良い。電波の到来角度(AOA: Angle of Arrival)を利用する位置推定手法は、電波の到来方向に基づき三角測量を行う[8][9]。少ないアンカノードで各ノードの位置推定が可能だが電波の到達経路上に障害物が存在すると精度が大きく悪化する欠点を持つ。到来時刻(TOA: Time of Arrival)を用いる手法は、複数のアンカノードから受信した電波の到来時刻の差より自己位置を推測する。人工衛星やWiFi基地局の電波を用いれば、各ノードの絶対位置を直接的に計算することが出来るという利点がある。欠点としては、周囲環境の電波伝搬特性の変動による誤差の発生、電波の届かない地下で利用できないことが挙げられる。RSSI値からノード間距離を求める方法は、通信用の無線電波の受信強度を利用してノード間距離を計測する手法である。WSNで用いるセンサノードは無線通信機能を持っていることが前提であるため、ノードに追加機器を搭載することなく位置推定を行うことが可能で、他のレンジベース方式との比較で推定精度は劣るものの、コスト面と消費電力面の両面でWSNに適しているといえる。本稿ではこのRSSIによる位置推定方式に着目し、次章で詳細に述べる。

3. RSSIによるノード位置推定手法

3.1 RSSIによる位置推定の原理

WSNのノードにはデータを送受信するための無線通信機器が搭載されている。多くの場合、この無線通信機器はRSSI値を出力する機能を有する。RSSIとは、送信側ノードから送出された電波が、受信側ノードで受信された際にどの程度の電力の大きさになっているかを1mWを基準として対数で表すものである。RSSIの単位はdBmであり、ほとんどの場合において受信電力は1mWを下回るのでRSSIは負の値となる。RSSIによる位置推定は、他のレンジベース方式のようにノード間距離計測のための専用機器をノードに搭載することなく、レンジフリー方式と比較して高精度な位置推定を行うことが出来ることが利点である。

3.1.1 ノード間距離計測による位置推定

無線機器のアンテナから電波が全方位に均等に放出される場合、距離 D [m]だけ離れた位置での電波の電力密度は、 D を半径とする球の表面積に反比例することが知られている。よって電波の送信電力が P [mW]のとき、距離 D [m]における電波強度 P_D [mW/m²]は式(1)で表せる。

$$P_D = \frac{P}{4\pi D^2} \quad (1)$$

RSSIは1mWを基準とする対数で受信電力 P_D の大きさを表す。式(1)をRSSI形式にすると式(2)となる。

$$\begin{aligned} RSSI &= 10 \log_{10} \left(\frac{P}{4\pi D^2} \right) \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{P}{4\pi} \right) - 20 \log_{10}(D) \end{aligned} \quad (2)$$

送信機からの距離1[m]でのRSSIの値を $RSSI_0$ とすると、式(2)で $D=1$ とすると $RSSI_0 = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{4\pi} \right)$ となることに注意すると、式(2)から式(3)が得られる。

$$\begin{aligned} RSSI &= RSSI_0 - 20 \log_{10}(D) \\ &= RSSI_0 - 20 \log_{10}(D) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)が示す通り、あるノードから送出された電波は距離に伴い減衰するため、RSSI値は距離と負の相関関係がある。従って、RSSI値を計測することにより距離を概算することが可能である。式(3)の右辺に存在する20という定数は理論値であり、実際には場所により異なる値となることが知られているため、これをRSSI減衰定数 N とおき、式(3)を変形すると以下の式(4)が得られる。

$$D = 10^{-\frac{RSSI - RSSI_0}{N}} \quad (4)$$

D : 距離 (m)

$RSSI$: 計測したRSSI値 (dBm)

$RSSI_0$: 距離1mの地点でのRSSI値 (dBm)

N : RSSI減衰定数 (理想的には20)

RSSI より距離情報を算出する際は式 (4) に従って計算を行う。なお, RSSI 減衰定数 N は場所ごとに適した値を用いる必要がある。

3つ以上のアンカノードの電波が受信可能である場合, それぞれの RSSI に基づき距離を計算することで自己位置を推定することが可能である。3つのアンカノード a_1, a_2, a_3 の電波を受信し, それぞれの RSSI の値より求めた距離を r_1, r_2, r_3 とするとき, 推定座標 s は, s から各アンカノードまでの距離と RSSI により求めた距離 r_1, r_2, r_3 との誤差の2乗和が最小となるように決定する。図1は, 3つのアンカノード a_1, a_2, a_3 の電波の RSSI を求めて位置推定を行う場合の概念図である。しかし, RSSI 値はノイズの影響を受けて変動しやすいため, 距離 r_1, r_2, r_3 に誤差が出やすく, 推定座標 s にも誤差が生じる。そこで, 位置推定を行いたいノードから見た各アンカノードの方角を利用し, 位置推定誤差を低減する手法を4章で提案する。

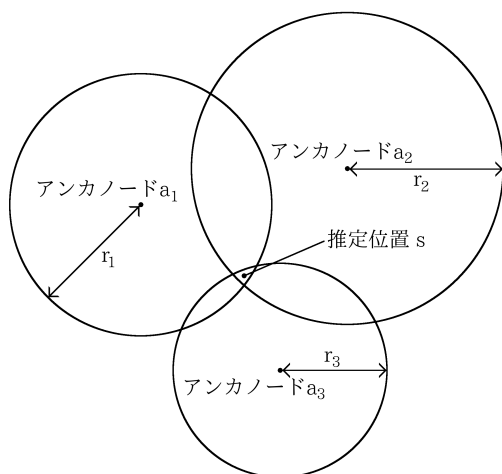


図1 RSSI による位置推定の概念図

4. RSSI とカメラを併用した位置推定手法

本稿では, WMSN に適した位置推定手法として, RSSI とカメラで取得する映像情報を併用する位置推定手法を提案する。RSSI を計測することでノード間距離を推定する従来手法に加え, カメラでアンカノードの方角を計測して得られる角度情報を利用することで位置推定の精度向上を図る。AOA による位置推定は電波の到来角の計測を行うために高指向性アンテナもしくはアレイアンテナを必要とするため, ノード製造費用が増大しやすい。それに対し, 提案手法では可視光を利用し安価に角度情報の取得を行う。WMSN を構成するノードはカメラを搭載していることが前提であるため, ノードに安価なライトを追加搭載するだけで光学的な角度計測を行うことが出来る。また, 電

波と比較し光は直進性が強いので精密な角度計測を行えるという利点も存在する。

4.1 想定環境

本稿で提案する位置推定手法は, 次の条件を満たす WMSN を対象と想定する。

- 屋外に展開する WMSN であること
- 設置後はノードの移動が発生しない WMSN であること
- LED および 360°カメラを搭載するノードで構成される WMSN であること
- 位置推定を行う必要のあるノード (以降位置推定ノードと表記) および初期状態で位置情報が既知であるアンカノードの2種類のノードで構成される WMSN であること
- アンカノードを3つ以上含む WMSN であること
- 各ノードは一意に割り振られた固有 ID を有すること

4.2 問題設定

ある位置推定ノード s が位置推定を行う上で用いる情報は次のとおりである。

- s と直接通信可能な位置に存在する各アンカノード (a_1, a_2, \dots, a_i) の設置座標
- 事前に計測された距離 $1m$ における RSSI 値
- s により計測される, 各アンカノードの方角情報
- RSSI 減衰定数
- s により計測される, 各アンカノードより到来する電波の RSSI 値

このうち, 各アンカノードの設置座標および距離 $1m$ における RSSI 値は初期状態で既知とする。各アンカノードの方角情報はカメラにより取得し, RSSI 減衰定数は得られた情報から4.3節で述べる提案手法により推定する。各アンカノード電波の RSSI 値は, 通信電波を用いて取得する。本問題で最終的に求めるものは以下の通りである。

- 位置推定ノード s の2次元座標情報 (x_s, y_s)

4.3 提案手法

本節では, 4.1 節と 4.2 節で説明した問題を解決する手法を述べる。提案手法の位置推定動作は3つのフェーズからなり, これらを「カメラによる位置推定フェーズ」「減衰定数推定フェーズ」「複合位置推定フェーズ」と呼ぶ。

4.3.1 カメラによる位置推定フェーズ

カメラによる位置推定フェーズでは, 光学的計測によりノードの位置推定を実行する。光学的計測を行うために全アンカノードがパルス発光を行う。各アンカノードは一意に割り振られたノード番号を持ち, 搭載ライトをノード番号に対応した固有の点滅パターンで発光させる。位置推定ノードは, 周囲に存在するアンカノードのパルス発光をカ

メラで検出することで、そのアンカノード番号および自ノードから見た場合の水平角を計測する。図2は、アンカノード a_1 および a_2 のパルス発光をとらえた場合の水平角 d_1, d_2 の計測方法である。位置推定ノード s が搭載カメラ

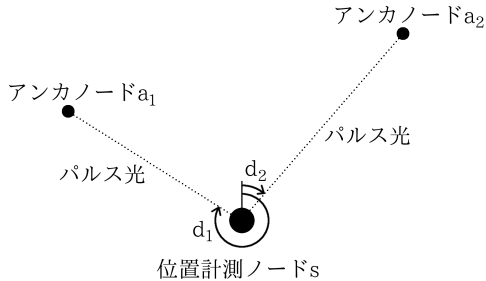


図2 光学的な角度計測 (真上からの俯瞰図)

を用いて2つのアンカノード a_1 および a_2 のパルスを検出できた場合、計測した水平角の差より挟角 $\angle a_1 s a_2$ を求める。挟角 $\angle a_1 s a_2$ は、アンカノード a_1 と a_2 の水平角 d_1, d_2 を用いて式(5)で与えられる。

$$\angle a_1 s a_2 = \min(|d_1 - d_2|, 2\pi - |d_1 - d_2|) \quad (5)$$

ここで、 a_1, a_2 の2次元座標 $(x_{a_1}, y_{a_1}), (x_{a_2}, y_{a_2})$ を用いると、式(6)の

$$\begin{aligned} & (x_{a_1} - x_{a_2})^2 + (y_{a_1} - y_{a_2})^2 \\ &= (x_{a_1} - x_s)^2 + (y_{a_1} - y_s)^2 + (x_{a_2} - x_s)^2 + (y_{a_2} - y_s)^2 \\ & - 2\sqrt{(x_{a_1} - x_s)^2 + (y_{a_1} - y_s)^2} \cdot \\ & \quad \sqrt{(x_{a_2} - x_s)^2 + (y_{a_2} - y_s)^2} \cos \angle a_1 s a_2 \end{aligned} \quad (6)$$

余弦定理が成り立つので、この式を満たす (x_s, y_s) が推測される s の存在範囲となる。2つのアンカノード a_1, a_2 と自ノード s より形成される三角形について計算を行うと、円周角の定理に従い、図3のような a_1, a_2 を両端とする円弧状の範囲に s の存在範囲を絞り込むことが出来る。

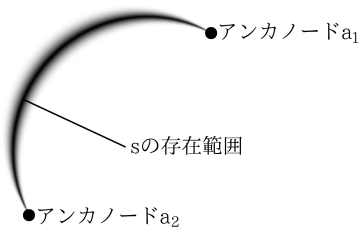


図3 角度情報より絞り込まれる存在範囲

3つ以上のアンカノードを検出することが可能な場合は、全ての三角形について計算を実行し、各三角形から得られる存在範囲との誤差を最小とするような座標 (x_s, y_s) を、

最小2乗法を用いて求める。図4は、ちょうど3つのアンカノードの水平角を計測出来た場合の s の推定位置である。このフェーズで3つ以上のアンカノードを検出できた位置推定ノードは、推定位置を1ヶ所に決定することが出来る。

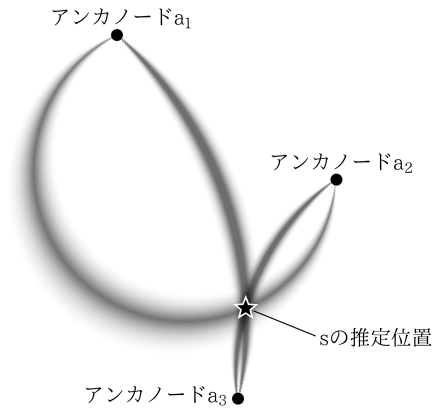


図4 3つの角度情報より求められる推定位置

4.3.2 減衰定数推定フェーズ

減衰定数推定フェーズは、RSSIの計測とRSSI減衰定数の推定を行うフェーズである。全ての位置計測ノードにおいて、各アンカノードが発する電波のRSSIを計測し、記録する。取得したRSSIデータを用いて位置推定を行う際、その場所に適したRSSI減衰係数が必要となる。ここで、カメラによる位置推定フェーズで得られた位置情報を用いてRSSI減衰定数の推定を行う。カメラによる位置推定フェーズにて3つ以上のアンカノードのパルスを検出し、推定位置を1ヶ所に決定した位置推定ノードは、精密な座標が判明していると仮定し準アンカノードとする。いま位置推定ノード s が準アンカノードであるとき、カメラで推定した s の座標とアンカノード a_1 の座標を用いて、2者間の推定距離 d_c を算出する。また、アンカノード a_1 の電波のRSSIを計測し、式(4)を用いて算出される距離が d_c となるRSSI減衰定数を求める。直接通信可能なアンカノードすべてに対してこの操作を繰り返し、平均値を用いてRSSI減衰定数の推定値を決定する。

4.3.3 複合位置推定フェーズ

最終的に、複合位置推定フェーズにて全ての位置推定ノードの推定座標を決定する。カメラによる位置推定フェーズにおいて3つ以上のアンカノードが検出できたノードは、角度情報による位置推定結果をそのまま最終的な座標として採用する。複数のアンカノードの発光を検出することが出来なかった位置推定ノードは、推定したRSSI減衰定数を用いて従来手法による位置推定を行い、最終的な推定座標とする。2つのアンカノードが検出できたノードは、まずカメラで取得した角度情報より存在範囲を円弧状に絞り

込む。アンカノード a_1, a_2 の水平角のみが検出された場合、水平角の差より挟角 $\angle a_1sa_2$ を求め、式 (6) より存在範囲を計算するが、範囲を持たせるために挟角 $\angle a_1sa_2$ は10%の誤差を許容するように計算を行う。絞り込まれた存在範囲の中で、RSSI データを用いて従来手法により計算される推定位置から最もユークリッド距離が短い点を最終的な推定座標とすることで、RSSI とカメラを併用した位置推定を行う (図 5)。

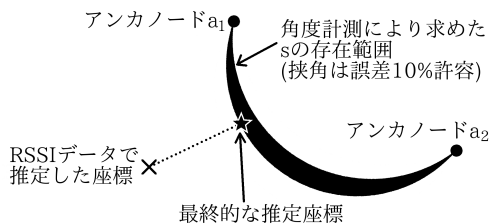


図 5 RSSI とカメラを併用した位置推定

5. 精度検証実験

提案手法を用いた位置推定の精度を評価するために実験を行った。位置が既知であるアンカノードと位置推定ノードからなる小規模な WMSN を模擬的に構築し、RSSI の計測およびカメラによる角度計測を行った。本実験では、RSSI のみを用いる従来の位置推定手法 (以下、従来手法という) と提案手法での位置推定を同じ条件で行い、両者の推定誤差を比較することで提案手法の推定精度を評価した。

5.1 WMSN の設定

実験で構築した WMSN のパラメータは表 1 のとおりである。また、WMSN で用いたアンカノード、位置計測ノードの仕様を表 2 および表 3 に示す。使用した機器は WiFi 通信機能と LTE 通信機能を有するが、余分な電波放出を低減するため実験時は停止した。位置計測ノードは機材の数を確保できなかったため 1 機のみ製作し、1 地点での計測が完了し次第、次の地点での計測を行う、といった手順で 5 ヶ所の計測地点でのデータ取得を行った。なお、本実験

表 1 WMSN のパラメータ

アンカノード数	4
位置推定ノード数	5
位置推定ノード-アンカノード間距離	2.5m ~ 8.6m
フィールドサイズ	6m × 8m

では廉価に入手可能な部品のみを用いてノードを製作することを重視し、市販のおたまの柄を取り除いたものと Web カメラを使用し、360 度カメラの代用とした。図 6 は位置計測ノードで使用した Web カメラの模式図である。ノー

表 2 アンカノード (4 ヶ所) : a_1, a_2, a_3, a_4

ビーコン信号送信部	
使用機器	HTC Nexus 9
無線通信規格	Bluetooth 4.1 Class1
ビーコン信号プロトコル	iBeacon
ビーコン信号送信頻度	10Hz
ビーコン信号送信アプリ	Locate Beacon v2.6.1
距離 1m 地点での RSSI 値	-62.4 (実測値)
パルス発光部	
光源	白色 LED 1 灯
消費電力 (点灯時)	265mW (実測)
点滅間隔	約 3Hz
照射角 (水平角)	360°

表 3 位置推定ノード (5 ヶ所) : s_1, s_2, s_3, s_4, s_5

ビーコン信号受信部	
使用機器	SONY XperiaZ2 SO-03F
無線通信規格	Bluetooth 4.0 Class1
RSSI 計測周期	1Hz (1 秒間の計測値の平均)
RSSI 計測アプリ	Locate Beacon v2.6.1
パルス検出部	
撮影機器	Logicool HD Webcam C525
光学装置	半球状ミラー
記録解像度	1280 x 720 ピクセル
検出角 (水平角)	360°

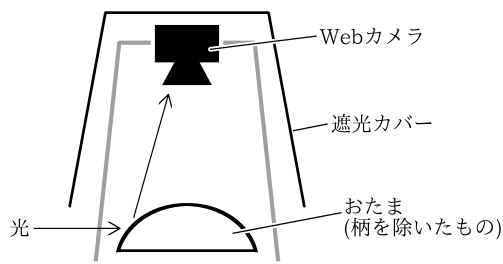


図 6 実験で用いた Web カメラの模式図

ドの配置座標は図 7 の通りである。障害物に対する頑健性の評価のため、 a_4 の RSSI 計測と水平角計測において、地点 a_4 に障害物が存在する場合と障害物が存在しない場合の 2 通りの環境で計測を行った。障害物はアルミニウムを表面に貼り付けた幅 220mm 高さ 310mm の木製の薄板であり、 a_4 を遮るように直近に設置した。なお、 a_4 以外のアンカノードが発する電波の RSSI 値において、この障害物の有無による有意な差は見られなかった。

5.2 実験手順

前節で示した WMSN を、屋外に展開・設置した。実験場所の選定にあたっては、フィールドの周囲 10m 以内に障害物が存在しない開けた平地であることを条件とした。 $a_1 \sim a_4$ の 4 ヶ所に設置したアンカノードは、いずれもタブレットの上面がフィールドの中央を向くように設置方向を

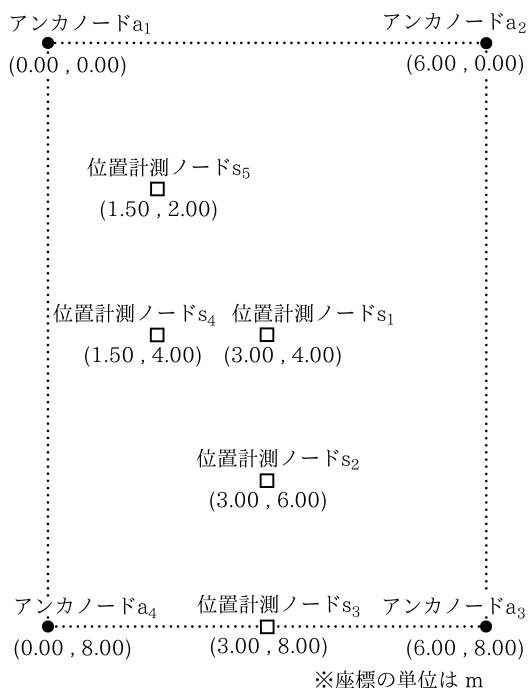


図 7 フィールドの設定

統一し、設置後は常時ビーコン信号の送信とパルス発光を行った。安価なカメラは可視光通信を行うには応答性が不十分であることが多いため、ライトの明滅周期は300ms程度に設定した。位置推定ノードは $s_1 \sim s_5$ にて各アンカノードのビーコン信号のRSSIの値ならびにWebカメラの映像を取得した。位置推定ノードは受信電波のRSSI計測において指向性を持つことが予備実験により判明したため、RSSIの計測の際は、計測する電波を送信するアンカノードの方向を向くように設置し、10回分のRSSIデータを計測した。計測した10個のデータは第1五分位数から第4五分位数までの平均値をとり、RSSIの計測値とした。位置推定ノードが撮影した映像では、アンカノードの発光を確認でき、なおかつアンカノード番号をパルスより識別できた点のみをプロットし、図8のように映像の真上を0度としたときの角度を計測した。得られたデータをもとに、従来手法と提案手法を用いてそれぞれ位置推定を行った。RSSIデータより距離を計算する際、距離1mでのRSSI値は予備実験より求めた値である-62.4を用いた。なお、このフィールドにおける減衰定数を推定するため、RSSI減衰定数を変化させて従来手法による位置推定を繰り返し、5ヶ所の推定誤差の2乗和が最小となる減衰定数を用いることとした。提案手法に関しては4.3節に記載した方法で推定したRSSI減衰定数を用いて計算を行った。

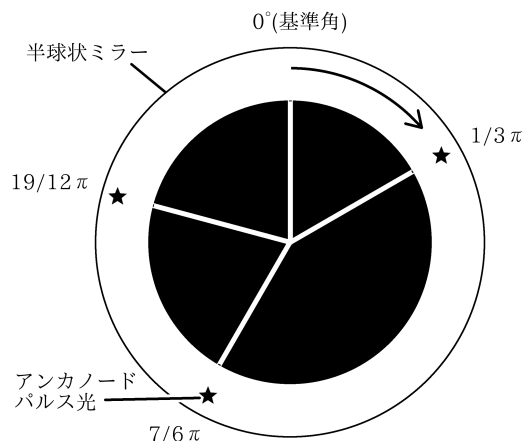


図 8 撮影映像における水平角計測の例

5.3 実験結果

5.3.1 障害物がない環境での結果

表4は、本実験において5ヶ所の地点 $s_1 \sim s_5$ で計測されたRSSIの値である。取得したRSSIデータを用いて、従

表 4 RSSI計測値

	a_1	a_2	a_3	a_4
s_1	-73.7	-89.5	-76.0	-77.0
s_2	-76.5	-83.7	-75.7	-81.0
s_3	-88.5	-84.8	-74.3	-72.0
s_4	-75.2	-77.5	-73.5	-73.0
s_5	-71.2	-77.0	-88.0	-78.2

来手法で推定を行った際の座標を図9および表5に示す。5.2節に記載した方法で推定誤差が最小となるRSSI減衰定数を求めると23.76という値が得られた。以降、従来手法における位置推定はこの値を用いることとする。5ヶ所

表 5 従来手法により推定したノード位置

	推定座標 [m]	実際の座標 [m]	推定誤差 [m]
s_1	(1.92, 4.35)	(3.00, 4.00)	1.135
s_2	(3.03, 4.32)	(3.00, 6.00)	1.680
s_3	(2.64, 8.52)	(3.00, 8.00)	0.632
s_4	(2.61, 4.98)	(1.50, 4.00)	1.481
s_5	(1.35, 2.04)	(1.50, 2.00)	0.155
平均誤差			1.017

の推定誤差の平均値をとると1.017[m]であった。

次に、提案手法の実験について述べる。表6は、本実験において5ヶ所の地点 $s_1 \sim s_5$ で計測されたアンカノードの水平角である。計測不能と記述した箇所は、カメラでパルスを検知できなかったアンカノードである。多くの計測地点にてアンカノード a_1 の水平角が検出できなかったのは、 a_1 のライトが太陽光を反射したため、カメラで撮影した際にパルス発光ではなく常時点灯しているように認識さ

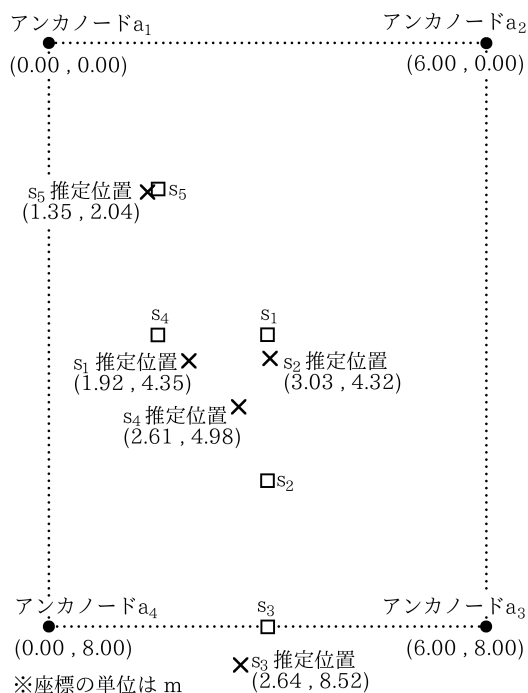


図 9 従来手法による推定位置

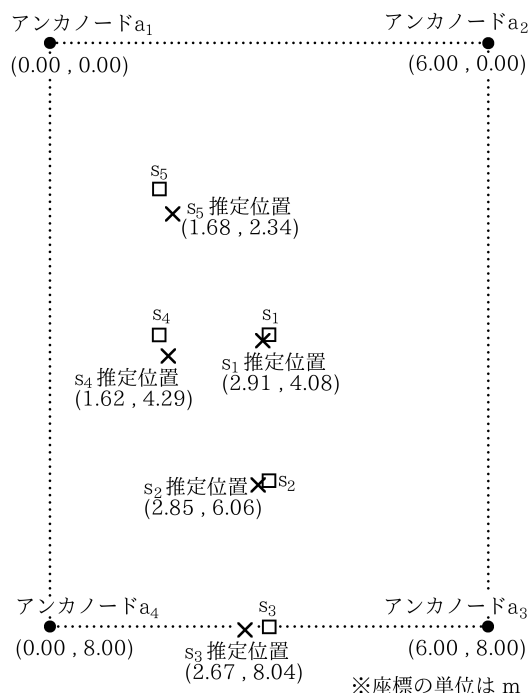


図 10 提案手法による推定位置

表 6 水平角計測値

	a_1	a_2	a_3	a_4
s_1	計測不能	152.5°	259.0°	336.0°
s_2	計測不能	77.0°	171.5°	287.5°
s_3	計測不能	計測不能	90.5°	271.5°
s_4	計測不能	38.0°	123.0°	197.5°
s_5	289.0°	26.5°	106.0°	162.0°

れたからである。取得したデータを用いてカメラによる位置推定フェーズを実行して推定位置が決定したものを表 7 に記す。 s_3 はアンカノードの水平角が 2 つしか検出できなかったため位置推定は行っていない。位置推定ノード s_1 ,

表 7 カメラによる位置推定フェーズでの推定位置

	推定座標 [m]	実際の座標 [m]	推定誤差 [m]
s_1	(2.91, 4.08)	(3.00, 4.00)	0.120
s_2	(2.85, 6.06)	(3.00, 6.00)	0.162
s_3	未推定	(3.00, 8.00)	—
s_4	(1.62, 4.29)	(1.50, 4.00)	0.314
s_5	(1.68, 2.34)	(1.50, 2.00)	0.385

s_2, s_4, s_5 の推定座標を用いて RSSI 減衰定数を推測すると 23.72 となり、カメラでの推定誤差が小さいことから従来手法で用いた RSSI 減衰定数 23.76 とほぼ同じ値を示した。この RSSI 減衰定数を用いて s_3 の位置を RSSI を併用して推定し、表 7 と合わせた最終的な位置推定結果を図 10 および表 8 に示す。提案手法における 5 ケ所の推定誤差の平均値をとると 0.263[m] であった。従来手法との比較にお

表 8 提案手法により推定したノード位置

	推定座標 [m]	実際の座標 [m]	推定誤差 [m]
s_1	(2.91, 4.08)	(3.00, 4.00)	0.120
s_2	(2.85, 6.06)	(3.00, 6.00)	0.162
s_3	(2.67, 8.04)	(3.00, 8.00)	0.332
s_4	(1.62, 4.29)	(1.50, 4.00)	0.314
s_5	(1.68, 2.34)	(1.50, 2.00)	0.385
平均誤差			0.263

いて、平均誤差を 74% 低減出来たことを示している。 s_5 においては、従来手法による推定結果の方が提案手法による推定結果よりも良い値を示している。提案手法では、ノードに搭載している 360 度カメラは完全に水平であると仮定して位置推定を行っているため、360 度カメラを固定する際に傾けて取り付けてしまった場合に誤差が大きくなっている。これに対し、RSSI を用いた従来手法による位置推定は、推定精度が不安定なものの良好な値を示す場合もあるので、 s_5 での推定精度は従来手法のほうが優れている結果が得られたと考えられる。

5.3.2 障害物が存在する環境下での結果

アンカノード a_4 の直近に障害物が存在する環境下で、5 ケ所の地点 $s_1 \sim s_5$ にて計測された RSSI の値を表 9 に示す。取得した RSSI データを用いて、従来手法で推定を行った際の座標を図 11 および表 10 に示す。なお、RSSI 減衰定数は 5.3.1 項で計算した値である 23.76 を使用した。5 ケ所の推定誤差の平均値をとると 3.033[m] であった。ノード間距離が 2.5~8.6[m] であることに留意すると、位

表 9 障害物存在下での RSSI 計測値

	a_1	a_2	a_3	a_4 (障害物あり)
s_1	-73.7	-89.5	-76.0	-89.3
s_2	-76.5	-83.7	-75.7	-89.8
s_3	-88.5	-84.8	-74.3	-82.8
s_4	-75.2	-77.5	-73.5	-82.0
s_5	-71.2	-77.0	-88.0	-79.3

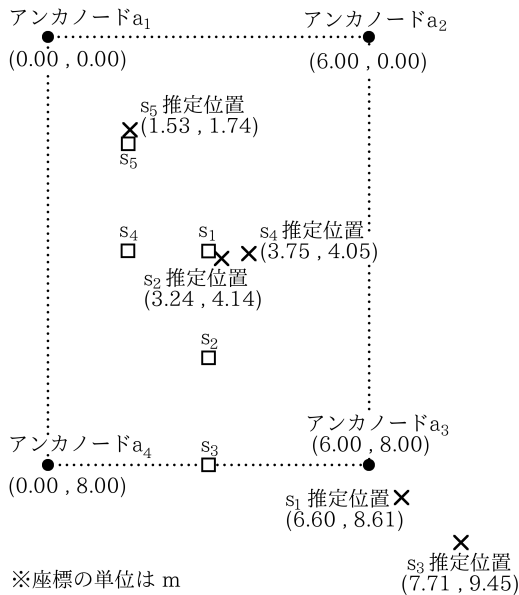


図 11 障害物存在下での従来手法による推定位置

表 10 障害物存在下で従来手法により推定したノード位置

	推定座標 [m]	実際の座標 [m]	推定誤差 [m]
s_1	(6.60, 8.61)	(3.00, 4.00)	5.849
s_2	(3.24, 4.14)	(3.00, 6.00)	1.875
s_3	(7.71, 9.45)	(3.00, 8.00)	4.928
s_4	(3.75, 4.05)	(1.50, 4.00)	2.251
s_5	(1.53, 1.74)	(1.50, 2.00)	0.262
	平均誤差		3.033

位置推定に占める誤差の割合が非常に大きくなっていることがわかる。

一方、提案手法での実験結果を述べる。表 11 は、アンカノード a_4 の直近に障害物が存在する環境下で、5ヶ所の地点 $s_1 \sim s_5$ で計測されたアンカノードの水平角である。 a_4 のパルスは障害物のため、いずれの計測地点においても観測されていない。取得したデータを用いてカメラによる位

表 11 障害物存在下での水平角計測値

	a_1	a_2	a_3	a_4 (障害物あり)
s_1	計測不能	152.5°	259.0°	計測不能
s_2	計測不能	77.0°	171.5°	計測不能
s_3	計測不能	計測不能	90.5°	計測不能
s_4	計測不能	38.0°	123.0°	計測不能
s_5	289.0°	26.5°	106.0°	計測不能

位置推定フェーズを実行して推定位置が決定したものを表 12 に記す。アンカノードのパルスを3つ以上検出できたのは s_5 のみであったため、 s_5 のみ位置推定を行った。 s_5 の推

表 12 障害物存在下でのカメラによる位置推定フェーズの推定位置

	推定座標 [m]	実際の座標 [m]	推定誤差 [m]
s_1	未推定	(3.00, 4.00)	—
s_2	未推定	(3.00, 6.00)	—
s_3	未推定	(3.00, 8.00)	—
s_4	未推定	(1.50, 4.00)	—
s_5	(1.62, 2.25)	(1.50, 2.00)	0.277

定座標を用いて RSSI 減衰定数を推測すると 27.13 となり、5.3.1 項で計算した RSSI 減衰定数の 23.76 とは大幅に異なる値を示した。カメラによって s_5 の座標は高精度に推定されていたが、RSSI 減衰定数を推測するためのノードが1つしか存在しなければ、RSSI の計測誤差による影響が大きくなるため RSSI 減衰定数を正確に推測することが困難であると考えられる。この RSSI 減衰定数を用いて s_5 以外の位置推定ノードの位置を推定した結果を図 12 および表 13 に示す。提案手法における5ヶ所の推定誤差の平均値をとると 3.404[m] であった。従来手法による推定結果

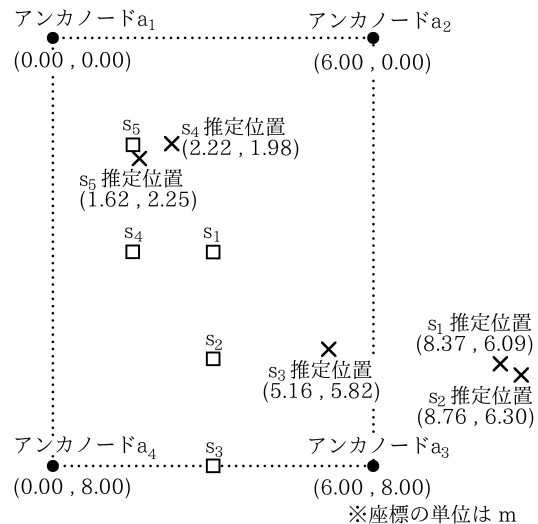


図 12 障害物存在下での提案手法による推定位置

表 13 障害物存在下での提案手法により推定したノード位置

	推定座標 [m]	実際の座標 [m]	推定誤差 [m]
s_1	(8.37, 6.09)	(3.00, 4.00)	5.762
s_2	(8.76, 6.30)	(3.00, 6.00)	5.768
s_3	(5.16, 5.82)	(3.00, 8.00)	3.069
s_4	(2.22, 1.98)	(1.50, 4.00)	2.144
s_5	(1.62, 2.25)	(1.50, 2.00)	0.277
	平均誤差		3.404

と同様に、ノード間距離位置推定に占める誤差の割合が非常に大きくなっている。従来手法との比較では、平均誤差は12%増加する結果となった。従来手法では正しいRSSI減衰定数を与えて推定を行ったが、提案手法では複数のアンカノードの水平角が検出できなかったためRSSI減衰定数を正しく推定できなかったことが大きく影響していると考えられる。

5.3.3 実験結果の評価

障害物が存在しない環境においては、提案手法は従来手法との比較で平均誤差を74%低減する結果が得られ、現地でのRSSI減衰定数の事前計測を必要とせず高精度な位置推定が可能であったことがわかる。電波と異なり強い直進性を持つ可視光線を用いた光学的角度計測を行うことが、位置推定における精度向上に有用であるといえる。一方で、可視光線は強い直進性を持つがゆえに障害物に遮られると光学的角度計測が不可能となるので、本実験において、障害物が存在すれば極端に精度が悪化する脆弱性も確認された。また、屋外では直射日光にさらされることは不可避なので、環境光ノイズにより計測不能となる場合があることも考慮しなければならない。

6. まとめ

本稿では、ノードに360度カメラを搭載するWMSNにおいて、ノードにライトを追加搭載することでRSSIによる位置推定の精度を向上させる手法を提案した。また、安価な機材のみを用いて実際に模擬WMSNを構築し、評価実験を行った。その結果、提案手法は障害物がない環境下において平均誤差が約0.3mであり、従来手法と比較して約73%誤差を低減できた。RSSI減衰定数を事前計測しなくとも高精度な位置推定が可能であるといえる。一方で、提案手法は障害物や環境光ノイズに対して脆弱性が存在することを確認した。今後は、より大規模なWMSNにおいて、全てのノードが複数のアンカノードとの見通しが立っているとは限らない場合にも適用できるような、山林などの自然環境で良い精度を出せるシステム構築を目指したい。

参考文献

- [1] 勝間亮, 柴田直樹, 山本眞也: “カメラモニタリング向けセンサノードの発光による障害物の位置推定手法の検討”, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ2015論文集, pp. 244-245, (2015).
- [2] 岩井将行, 今井大樹, 西谷哲, 小林正典, 戸辺義人, 瀬崎薫: “iPicket: 無線センサ杭を用いた地滑り計測”, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告2010-MBL-52(1), pp. 1-7, (2010).
- [3] Markus Wlchli, Piotr Skoczylas, Michael Meer, and Torsten Braun: “Distributed Event Localization and Tracking with Wireless Sensors,” *Proc. of the 5th International Conference on Wired/Wireless Internet Communica-*

- tions (WWIC 2007)*, pp. 247-258, (2007).
- [4] Jan Blumenthal, Ralf Grossmann, Frank Gollatowski, and Dirk Timmermann: “Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks,” *Proc. of the 2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP 2007)*, pp. 1-6, (2007).
- [5] Hongyang Chen, Kaoru Sezaki, Ping Deng, and Hing Cheung So: “An Improved DV-Hop Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks,” *Proc. of the 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2008)*, pp. 1557-1561, (2008).
- [6] Andreas Savvides, Chih-Chieh Han, and Mani B. Strivastava: “Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors,” *Proc. of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '01)*, pp. 166-179, (2001).
- [7] Andy Ward, Alan Jones, and Andy Hopper: “A New Location Technique for the Active Office,” *Journal of IEEE Personal Communications*(4, 5), pp. 42-47, (1997).
- [8] 辻宏之: “アレーアンテナを用いた屋内外の無線局位置推定の実験的検証”, 電子情報通信学会論文誌B, 通信J90-B(9), pp. 784-796, (2007).
- [9] Rong Peng, and Mihail L. Sichitiu: “Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks,” *Proc. of the 3rd Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON2006)*, pp. 374-382, (2006).