

カメラでの方角計測による位置推定の精度向上

Improvement in Localization Accuracy by Optical Direction Measurement with Cameras

川濱 悠¹ 勝間 亮¹
Yu Kawahama Ryo Katsuma

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。ノードの絶対座標の取得には GPS 受信機を利用することが多いが、様々な要因で GPS 受信機が取得する位置情報には絶えずノイズが混入する。そこで本稿では、360 度カメラによる全方位映像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。複数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。

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。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。その中でも、カメラを搭載し映像を扱う WMSN (Wireless Multimedia Sensor Networks) は、自然環境での動物の監視など、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、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、活躍が期待されている。

WSN では、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情報は、どの位置にあるノードで得ら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動作するためにも、全てのノードの位置を把握することが必要である。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、必ずしも容易に全てのノードの設置座標を特定出来るわけではない。

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ので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出来れば、手軽に WSN を導入出来るという点で望ましい。そのため、本稿では GPS (Global Positioning System) を用いたノードの自律的な位置推定手法に焦点を当てる。

WMSN において GPS 受信機を用いたノードの位置推定精度を高めるため、カメラ映像を併用したノードの位置推定手法を提案する。各ノードは、映像を収集するための 360 度カメラ、撮影用の LED ライト、データ収集のための無線通信機、GPS 受信機を搭載する。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。

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 種類に大別出来る。

レンジフリー方式は、ノード間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、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集団の重心を自己位置とする [4]。DV-HOP 法は、アンカノードからのホップ数をカウントし、ホップ数を距離とみな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、ノードの位置がだまかに把握出来れば良いアプリケーションに適している。

¹ 大阪府立大学, Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka
599-8531, Japan

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。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の測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障害物が存在すると精度が大きく悪化する。到来時刻 (TOA: Time of Arrival) を用いる手法は、電波の到来時刻の差より自己位置を推測する。広く普及している GPS は、人工衛星からの電波の受信時刻を用いることで、各ノードの絶対位置を計算出来る。RSSI を用いる方法は、通信用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、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、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ある。

本稿では、GPS および RSSI による位置推定方式に着目し、次章で詳細に述べる。

3. ノード位置推定のための既存手法

3.1 GPS による測位の原理

様々な機器に組み込まれ位置情報を取得する GPS は、地球の周囲を周回する GPS 衛星と GPS 受信機からなるシステムである。受信機は衛星が発信する航法信号を受信し計算を行うことで、自己位置を推定する。

3次元空間上での受信機の位置を求める場合、未知数は x, y, z の3つである。GPS 受信機が測位を行うとき、式 (1) に従い、GPS 衛星との間の距離を計算する。

$$D = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} \\ = c \cdot (T_i - t) \quad (1)$$

D : i 番目の衛星と受信機間の距離

X_i, Y_i, Z_i : i 番目の衛星の3次元座標

x, y, z : 受信機の3次元座標 (未知数)

T_i : i 番目の衛星が航法信号を発信した時刻

t : 受信機が航法信号を受信した時刻

c : 光速

ある衛星が発信する航法信号について、信号が発信されてから受信機が補足するまでの所要時間に電波の速度 (光速) を掛けると、衛星から受信機までの距離が算出出来る。このようにして位置が既知の衛星からの距離をひと

つだけ計測すると、受信機の存在範囲は、衛星を中心とする球の表面上に絞り込まれる。2台の衛星との距離を計測すると円状に、3台との距離を計測すれば2点に、受信機の存在範囲を絞ることが出来る。2点に絞り込める場合、受信機が地球の表面上に存在するという前提条件を用いると、座標を1点に特定することが出来る。

この距離の計算を正確に行うため、発信時刻と受信時刻の情報は非常に高精度である必要がある。GPS 衛星には原子時計が積まれており、発信時刻の情報は十分に高精度である。一方で、受信機は高精度な時計を搭載しないので、受信時刻の精度は不十分である場合が多い。従って、受信時刻 t も未知数とし、これも同時に推定する。 x, y, z, t の4つの未知数を同時に推定するため、位置推定には少なくとも4つの衛星の信号を受信することが必要になる。さらに多くの衛星の航法信号を受信出来る場合は、位置推定の精度を向上することが可能である。GPS では24台以上の衛星が地球の周囲を周回しており、多くの場合、6台以上の衛星を補足可能である。

なお、受信機の位置推定のためには衛星の位置が既知である必要があるが、GPS 衛星は静止衛星ではないので、地球から見たときの位置が常に変動している。そのため、各衛星の軌道情報を航法信号の中に含めることで、GPS 受信機が各衛星の位置を把握出来るようになっている。

GPS で測位を行う際に誤差が発生する主な要因を以下に列挙する。

- 衛星に搭載される原子時計の時刻のずれ
- 衛星軌道情報と実際の衛星軌道との差異
- 航法信号が電離層を通過する際の遅延
- 水蒸気による航法信号の遅延
- 航法信号受信時のマルチパスによる干渉
- 地形や障害物による衛星補足数の減少、および受信機から見たときの補足可能衛星の方角の偏り

上に挙げた6つの要因のうち、下2つの要因は受信機の設置環境に因るものであり、複数の受信機があれば受信機毎に異なる誤差となって表れる。一方で、上4つの要因に関しては広範囲に存在する受信機全てに等しく影響を与えるため、全ての受信機に同様の誤差を与える。ディファレンシャル GPS と呼ばれる計測方法で測位を行う場合は、計測したい地点だけでなく座標が既知の基準点にも GPS 受信機を設置し、GPS の測位結果は基準点の測位結果との差分をとって基準点からの相対的な座標とする。ディファレンシャル GPS では、複数の受信機全てに等しく影響する誤差要因はキャンセルされる。

3.2 RSSI による位置推定の原理

WSN のノードにはデータを収集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 出力機能を有する。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 を下回るため RSSI は負の値となる。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 は距離と負の相関関係がある。式 (2) を用いると、RSSI から距離を概算出来ることが知られている。

$$D = 10^{-\frac{RSSI - RSSI_0}{N}} \quad (2)$$

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 減衰定数 N は環境により異なる値を示す定数である。従って、事前計測等を行い、場所ごとに適した値を用いる必要がある。

アンカノードからの距離を 3 つ以上計測出来れば、三点測位により自ノードの位置を特定出来るのは前項に記した GPS と同一である。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。3 つのアンカノード a_1, a_2, a_3 の電

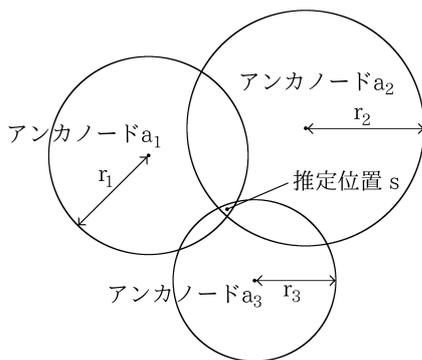


図 1: RSSI による位置推定の概念図

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。

ノードに搭載される無線機器の RSSI は、外来電波の干渉やマルチパスによる影響を大きく受けて容易に変動するため、RSSI による位置推定は誤差を生じ易い。

4. カメラを併用した位置推定手法

本稿では、ノード位置推定精度の向上をねらって、GPS による測位の他に、カメラで取得する映像情報および RSSI を併用する位置推定手法を提案する。GPS による測位に加え、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。また、GPS による測位およびカメラによる測位の両方が出来なかった場合に備え、RSSI を計測することでノード間距離を推定する従来手法も補助的に用いる。

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
- GPS 受信機、360 カメラ、および LED 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 節で述べる方法で推定する。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

提案手法では、以下の3種類の方法を用いて自ノード位置を推定する。

- 360度カメラを用いた周囲アンカノードの方角計測
- GPS受信機での座標情報の取得
- RSSIによる周囲アンカノードとの距離測定

光は電波と比較し直進性が強いので、精密な角度計測を行えるという利点がある。一方で、障害物等の存在により位置推定出来ない場合が想定される。GPSは衛星軌道にも依存するが、4個以上の衛星を補足した場合に位置推定が可能となる。RSSIによる位置推定は3つ以上のアンカノードの電波を受信している場合、常に自ノード位置の推定が可能であるが、精度は最も悪い。

本節では、これら3つの位置推定手法を統合して利用する手法を述べる。位置推定は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

このフェーズでは、光学計測のみを用いて位置推定を行う。各アンカノードは一意に割り振られた番号を持ち、LEDをノード番号に対応した固有のパターンで点滅させる。位置推定ノードは周囲の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

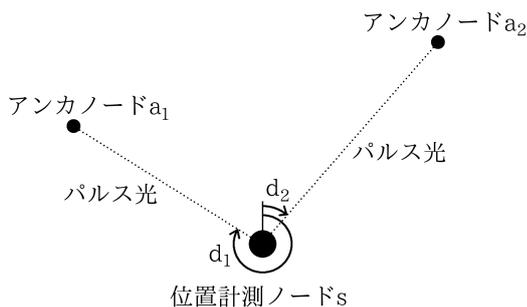


図2: 光学的な角度計測 (真上からの俯瞰図)

カメラを用いて2つのアンカノード a_1, a_2 のパルスを検出した場合、計測した水平角の差をとり挟角 $\angle a_1sa_2$ を求める。 $\angle a_1sa_2$ 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(3)で与えられる。

$$\angle a_1sa_2 = \min(|d_1 - d_2|, 2\pi - |d_1 - d_2|) \quad (3)$$

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(4)の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。

$$\begin{aligned} & (x_{a_1} - x_{a_2})^2 + (y_{a_1} - y_{a_2})^2 \\ &= (x_{a_1} - x_s)^2 + (y_{a_1} - y_s)^2 + (x_{a_2} - x_s)^2 + (y_{a_2} - y_s)^2 \\ & \quad - 2\sqrt{(x_{a_1} - x_s)^2 + (y_{a_1} - y_s)^2} \cdot \\ & \quad \sqrt{(x_{a_2} - x_s)^2 + (y_{a_2} - y_s)^2} \cos \angle a_1sa_2 \end{aligned} \quad (4)$$

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。

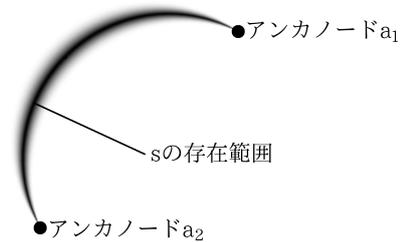


図3: 角度情報より絞り込まれる存在範囲

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し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。

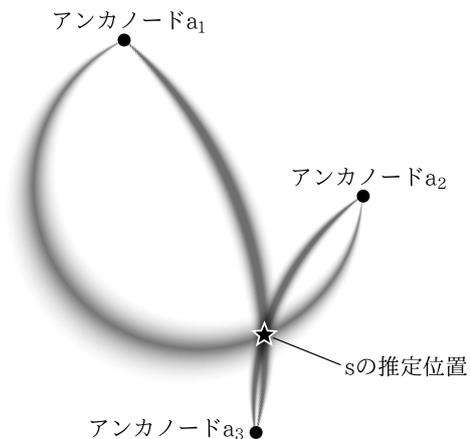


図4: 3つの角度情報より求められる推定位置

4.3.2 減衰定数推定フェーズ

このフェーズは、RSSI の計測と RSSI 減衰定数の推定を行うフェーズである。3.2 節で述べたように、RSSI を用いて位置推定を行う際はその場所固有の RSSI 減衰係数が必要となる。ここで、カメラによる角度計測で得られた位置情報を用いて RSSI 減衰定数の推定を行う。

全ての位置計測ノードで、各アンカノードの電波の RSSI を記録する。カメラによる位置推定フェーズで推定位置を 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 を求める。また、アンカノード a_1 の電波の RSSI を計測し、式 (2) 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。通信可能な全てのアンカノードに対してこの操作を行い、平均値を用いて RSSI 減衰定数を推定する。

4.3.3 複合位置推定フェーズ

このフェーズでは、カメラによる位置推定フェーズで推定位置が特定出来なかったノードの位置を決定する。カメラによる角度計測で推定位置が特定出来たノードは、その位置をそのまま最終的な座標として採用する。カメラで 2 つ以上のアンカノードを検出出来なかった位置推定ノードのうち、GPS 衛星を 4 つ以上補足したものは GPS の測位結果を最終的な推定座標とする。GPS による測位が出来なかったノードは RSSI による位置推定を行い、これを最終的な推定座標とする。この際、前項で述べた方法で推定した RSSI 減衰定数を用いる。カメラでちょうど 2 つのアンカノードが検出出来たノードは、まず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 (4) より存在範囲を計算する。絞り込まれた存在範囲の中で、GPS もしくは RSSI 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して採用する (図 5)。

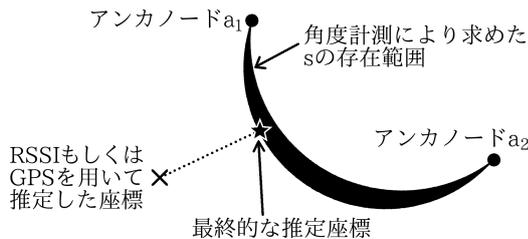


図 5: GPS もしくは RSSI とカメラを併用した位置推定

5. 精度検証実験

提案手法を評価するために実機実験を行った。アンカノード 4 台と位置推定ノード 5 台からなる小規模な WMSN を模擬的に構築し、位置推定を行った。精度の比較を行うため、GPS 受信機のみを用いた場合および RSSI のみを用いた場合の推定結果も併せて記述する。

5.1 WMSN の設定

WMSN で用いたアンカノードの仕様を表 1 に、位置計測ノードの仕様を表 2 に示す。ノードの配置座標は図 6 の通りである。

表 1: アンカノード (4ヶ所): a_1, a_2, a_3, a_4

ビーコン発信部	
使用機器	HTC Nexus 9
無線通信規格	Bluetooth 4.1 Class1
ビーコンプロトコル	iBeacon
ビーコン発信頻度	10Hz
ビーコン発信アプリ	Beacon Simulator v1.4.1
RSSI 値 (距離 1m 地点)	-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 2: 位置推定ノード (5ヶ所): s_1, s_2, s_3, s_4, s_5

ビーコン受信部	
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	Beacon Simulator v1.4.1
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°
GPS 受信部	
GPS 情報取得アプリ	GPS Status & Toolbox v7.6

なお、本実験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 カメラを組み合わせ、360 度カメラの代替とした。図 7 は位置計測ノードで使用した Web カメラの模式図である。

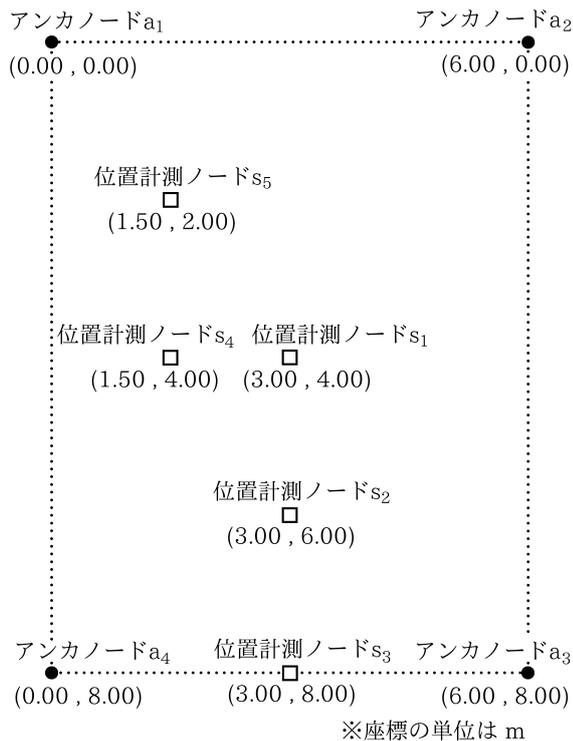


図 6: フィールドの設定

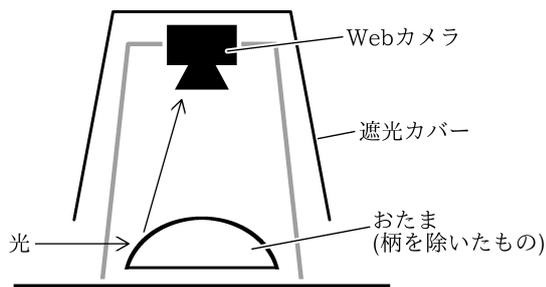


図 7: 実験で用いた Web カメラの模式図

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り、フィールドの周囲 10m 以内に障害物が存在しない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。位置推定ノードは $s_1 \sim s_5$ の地点に設置し、GPS による測位、ビーコン信号の RSSI 計測、および Web カメラの映像録画を行った。RSSI 計測時は各 10 回計測を行い、10 個のデータの第 1 五分位数から第 4 五分位数までの平均値をとった。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出来、なおかつアンカノード番号をパルスより識別出来た点のみをプロットした。この際、映像の真上を 0 度として水平角を計測した。

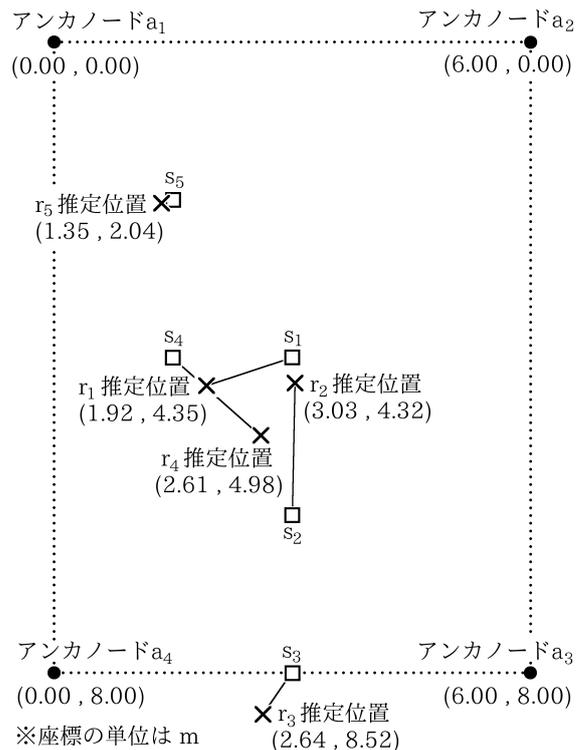


図 8: RSSI のみを利用した推定位置

表 3: RSSI のみを用いて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)	1.14
s_2	(3.03, 4.32)	(3.00, 6.00)	1.68
s_3	(2.64, 8.52)	(3.00, 8.00)	0.63
s_4	(2.61, 4.98)	(1.50, 4.00)	1.48
s_5	(1.35, 2.04)	(1.50, 2.00)	0.16
平均誤差			1.02

収集したデータをもとに、RSSI のみを用いた位置推定、GPS 単独での位置推定、提案手法による位置推定をそれぞれ行った。

5.3 実験結果

5.3.1 RSSI のみを用いた位置推定

取得した RSSI データのみを用いて推定を行った際の座標を図 8 および表 3 に示す。位置推定ノード $s_1 \sim s_5$ の推定位置を $r_1 \sim r_5$ として図示した。5ヶ所の推定誤差の平均値をとると 1.02[m] であった。位置推定を行うにあたり、このフィールドにおける RSSI 減衰定数を求めた。RSSI 減衰定数を変化させて位置推定の計算を繰り返し行い、5ヶ所の推定誤差の 2 乗和が最小となる RSSI 減衰定数を算出し、23.76 という値を得た。理論値の 20 よりやや大きな値となっているが、地面での減衰分などを加味すると妥当な値といえる。

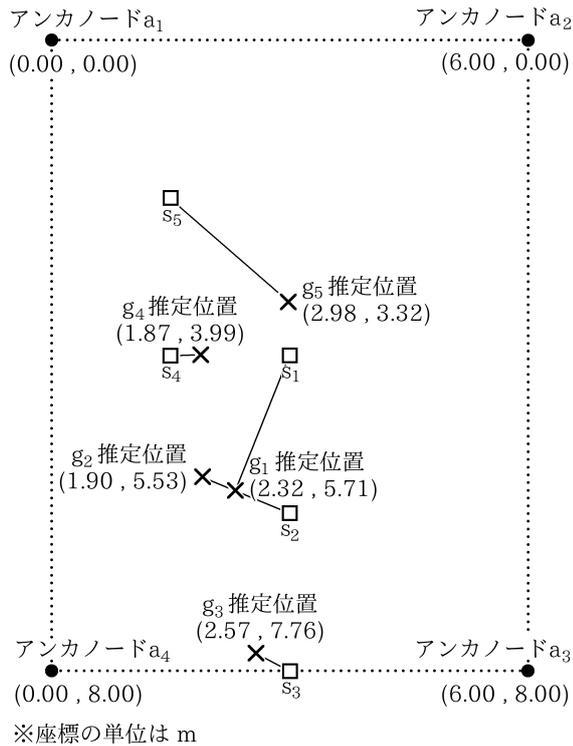


図 9: GPS 測位による推定位置

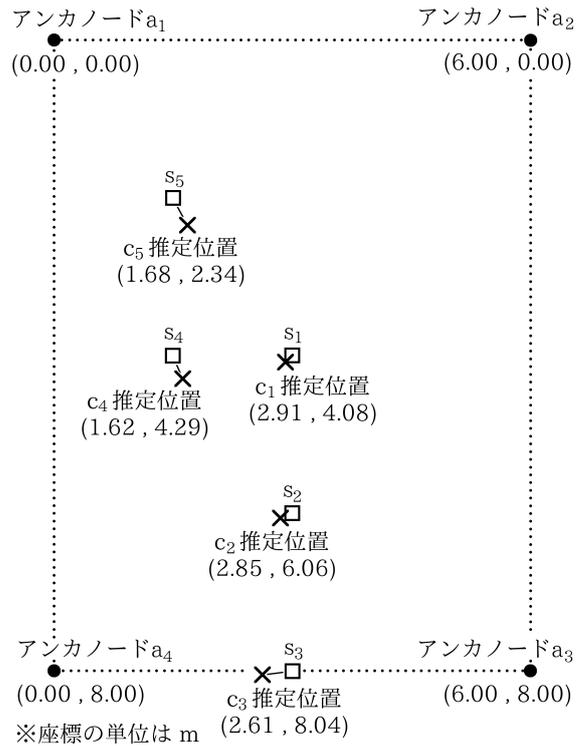


図 10: 提案手法による推定位置

表 4: GPS 測位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	(2.32, 5.71)	(3.00, 4.00)	1.84
s_2	(1.90, 5.53)	(3.00, 6.00)	1.20
s_3	(2.57, 7.76)	(3.00, 8.00)	0.65
s_4	(1.87, 3.99)	(1.50, 4.00)	0.37
s_5	(2.98, 3.32)	(1.50, 2.00)	1.98
平均誤差			1.04

表 6: 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)	0.12
s_2	(2.85, 6.06)	(3.00, 6.00)	0.16
s_3	(2.61, 8.04)	(3.00, 8.00)	0.59
s_4	(1.62, 4.29)	(1.50, 4.00)	0.31
s_5	(1.68, 2.34)	(1.50, 2.00)	0.39
平均誤差			0.31

5.3.2 GPS 受信機のみを用いた位置推定

GPS 受信機で測位した座標を図 9 および表 4 に示す。推定位置を $g_1 \sim g_5$ として示す。5ヶ所の推定誤差の平均値をとると 1.04[m] であった。

5.3.3 提案手法での位置推定

次に、提案手法での位置推定結果について述べる。

表 5: 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°

表 5 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。多くの計測地点にてアンカノード a_1 の水平角が検出出来なかったのは、 a_1 のライトが太陽光を反射したため、常時点灯しているように認識されたからである。位置推定ノード s_1, s_2, s_4, s_5 では 3 つ以上のパルスを検出出来たため、カメラのみを用いて位置推定を行い、そのまま最終的な位置推定結果とした。また、推定座標を用いて RSSI 減衰定数を計算した。推定した RSSI 減衰定数は 23.72 であり、5.3.1 節で求めた RSSI 減衰定数 23.76 とほぼ同じ値を示した。位置推定ノード s_3 では GPS 測位が出来たので、RSSI による位置推定は行わず、GPS 測位による座標の情報とカメラで取得した角度情報をもとに位置推定を行った。その最終的な位置推定結果を図 10 および表 6 に示す。推定位置を $c_1 \sim c_5$ として示す。提案手法における 5ヶ所の推定誤差の平均値をとると 0.31[m] であった。

5.3.4 実験結果の評価

本実験では、障害物が存在しない開けた場所に模擬 WMSN を展開して精度検証を行った。提案手法は誤差を大きく低減する結果が得られ、GPS 受信機のみを使用する場合と比較し、平均誤差を 70% 低減出来た。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、位置推定において有用であるといえる。一方で、直射日光等の環境光ノイズにより計測不能となる場合がある脆弱性も確認された。

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、ノードの撮影用ライトを点滅させることで光学的な角度計測を行い、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で平均誤差が約 0.3m であり、GPS による測位と比較しても高い精度でノード位置を推定することが出来た。

今回の評価実験における GPS 測位は簡易的なものであり、設置後は移動しない WMSN を想定するならば、長時間かけて GPS 測位を行うことで精度が向上する。また、アンカノードを用いてディファレンシャル GPS で測位を行うことでも GPS 測位の精度は改善可能である。今後はそのような GPS 測位を行う実験を行い、カメラを用いた角度計測による位置推定の有用性を検討したい。

参考文献

- [1] 勝間亮, 柴田直樹, 山本真也: “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 Communications (WWIC 2007)*, pp. 247–258, (2007).
- [4] Jan Blumenthal, Ralf Grossmann, Frank Gotatowski, 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).