

受信信号強度を利用した猿の位置推定

生産システム工学専攻

西岡 壮大

Estimation of Monkey Position Using Received Signal Strength Indication

Soudai NISHIOKA

Advanced Course of Production System Engineering, National Institute of Technology, Toba College

Abstract

Monkeys cannot afraid of human being may act threatening to humans. As a countermeasure for them, it is said that sending them away thoroughly by human is effective countermeasure. However we have to go on patrol to prevent the damage because we do not know when and where they will come to the human habitations. Therefore, we consider the probabilistic method to estimate monkey position by using data of the radio wave from the transmitter that is attached the monkey. We calculate the probability by using Bayes' theorem for the position estimation. We set prior probability on 5 ways, and experimented to evaluate precision of each way.

Keywords: Position Estimation, Received Signal Strength Indication (RSSI), Bayes' Theorem, RSSI Map, Probability Map

1. はじめに

近年では全国各地の集落で猿が出没し、農作物を荒らす、住民に危害を加えるなどの事例が報告されている。猿の特徴として、高い学習能力を持っていることが挙げられる。このため、出没した猿を放置しておく、猿が人間は恐れる存在ではないと覚え、人間が近づいても動じなくなり、人家に侵入して食糧を荒らしたり、住民を威嚇し、危害を加えたりする可能性がある。特に小学生などの児童が、このような猿に好奇心から近づいてしまうことは危険である。以上のことから、出没した猿に対しては何らかの対策を実施する必要がある。

猿への対策としては、人が集団になって行う追い払いが最も効果的であるという報告がある[1]。つまり、猿にとって人里は住み心地が悪い、ここへ来ると痛い目を見ろといったことを覚えこませることが重要である。しかし、猿がいつ、どこから現れるのかを事前に知ることはできない。そのため、被害を防ぐには定期的にパトロールを行う必要があり、住民にかかる負担が大きいという問題点がある。そこで我々は、実際に猿の出没が確認されている三重県鳥羽市において、児童を中心とした住民への猿による被害を防ぐための猿の追い払いを効率的に実施することができるように、発信器・受信ユニットを利用した猿の位置推定を行うことにした。発信器が発する電波を受信ユニットで受信し、電波強度などの情報をデータベースに保存し、その情報を基にして位置推定を行う。本稿ではベイズの定理を用いた確率的な手法を採用し、さらに猿の移動距離も考慮に入れて位置推定を行った。そして、人間が発信器を持って地域内を歩いたデータを対象に評価実験を行い、どの程度正確な位置推定ができるかを調べた。なお、人間が発信器を持って歩く際には GPS による正解位置も記録できるようにしてある。

このような電波から得られる情報を利用した位置推定の研究はいくつか行われており[2][3][4]、これらも参考に実験を進めた。

2. システムの構成

2.1. システム概要

位置推定を行うために構築したシステムの概要図を図 1 に示す。本システムは猿情報を管理するためのデータベースを中心に、猿へ装着する発信器と、発信器からの電波を受信してデータベースへ送信する受信ユニットから構成される。

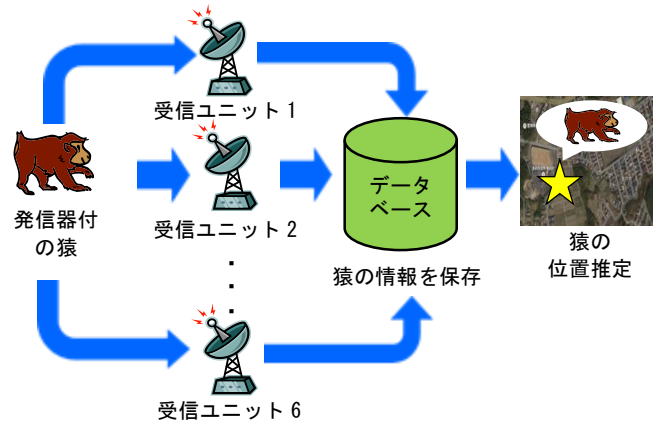


図 1 システム概要図

本システムを実現するためには、あらかじめ猿の群れの中の数頭に発信器を装着しておく必要がある。発信器付の猿が受信ユニットを設置した地域に出没した場合に、受信ユニットが発信器からの電波を受信する。各受信ユニットでは受信信号強度および個体（発信器）識別番号が受信され、受信ユニットで受信した情報と受信機識別番号をモバイル通信回線を介してデータベースへ送信する。データベースでは送信されてきた情報に日付・時刻を付加して保存する。こうして保存された情報を利用し、猿の位置推定を行う。受信ユニットは三重県鳥羽市の池の浦地域内に 6 基設置した（図 2）。今回は実際に猿に発信器を装着することが難しかったため、予備実験として人間が発信器を持っ

て受信ユニットを設置した地域内を歩き回ることによってデータを収集した。

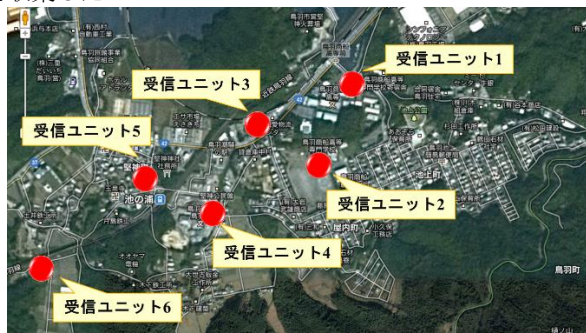


図 2 受信ユニットの設置場所

2.2. 猿に装着する発信器

発信器は、サーキットデザイン社製の動物検知通報送信機 LT-01[5]を利用する。この発信器は 5 秒毎に識別情報の発信を行う。送信周波数は 142.98MHz を利用しており、通信距離が最大 1km 程度である。発信器識別番号がユニークとなっているため、個体識別が可能である。防水構造となっており、重量は約 135g である。電池寿命は約 2.5 年で、電池寿命にあわせてベルト部分が切れるようになっている。

2.3. 受信ユニット

受信ユニット（図 3）は発信器からの電波を受信するための受信機、受信した情報を仮想的なシリアル通信としてデータベースへ送信するための XPort、ネットワークを利用するためのルータ、データ通信端末で構成する。なお、ネットワーク接続にはモバイル通信回線を利用している。

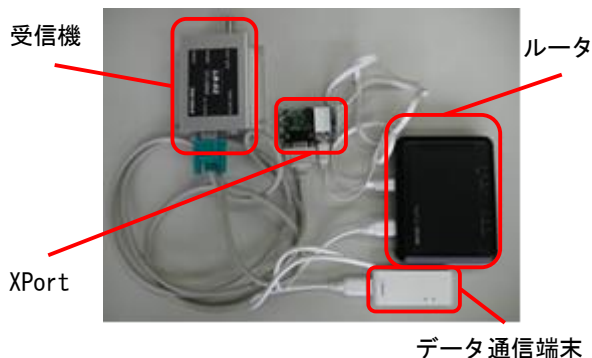


図 3 受信ユニット

受信機にはサーキットデザイン社製の動物検知通報用機器組込型受信機 LR-02[6]を利用した。受信機は発信器からの情報を受信し、受信機識別番号、動物種別番号、発信器識別番号、受信信号強度（Received Signal Strength Indication：以下 RSSI）の値をシリアル出力する。また、受信機が出力するデータをデータベースへ保存するため、LANTRONIX 社製の組込用超小型デバイスサーバー XPort を使用する。XPort を用いることで、受信機が出力ポートをネットワーク越しに仮想シリアルポートとして扱うことが可能になる。

3. 受信強度地図と確率地図による位置推定

3.1. 位置推定の流れ

本稿では、図 4 に示す流れで位置推定を行う。次節より、それぞれの処理の詳細を述べる。

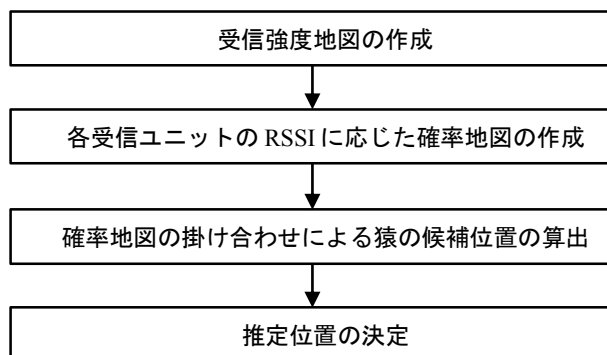


図 4 位置推定の流れ

3.2. 受信強度地図の作成

本手法では位置推定を行うために、発信器の場所に応じてそれぞれの受信ユニットで受信される RSSI の分布図を作成しておく。この分布図を「受信強度地図」と呼ぶことにする。受信強度地図は 6 受信ユニット分作成する。

受信強度地図を作成するには、各地点における RSSI のデータが必要になる。RSSI は、原則として発信器と受信ユニットとの距離が近いほど大きくなるが、場所によっては建造物等の障害物によって、発信器と受信ユニットの距離が近いにも関わらず大きく減衰してしまうなどの値の変動が発生する場合がある。そこで、受信ユニットを設置した地域内で発信器と GPS を持ち歩き、各地点の緯度・経度と、その地点において各受信ユニットで観測される RSSI をデータベースに記録した。各地点の RSSI は実測値であるため、障害物の影響にも対応したものとなっている。

データの記録は、2012 年 7 月 12 日から 2014 年 2 月 24 日の間に行った。この間にデータベースに記録された各受信ユニットにおける RSSI のデータ数を表 1 に示す。ここでのデータ数は、各受信ユニットが発信器からの信号を受信した回数を表す。

表 1 受信ユニット別の RSSI データ数

受信ユニット	データ数
1	9104
2	13415
3	2954
4	4615
5	811
6	2548

受信強度地図では、対象地域を 10m 四方のメッシュで区切り、各メッシュの東西方向を x 軸、南北方向を y 軸とした 2 次元座標で表現する（図 5）。



図 5 対象地域をメッシュで分割した概念図

次に、記録した RSSI のデータを、緯度・経度のデータから対応するメッシュに振り分け、各メッシュで観測された RSSI の平均値と、標準偏差を計算する。こうして求めた平均値の分布図が、受信強度地図となる。平均値と標準偏差は次節で述べる確率地図の作成の際に用いる。

図 6 は受信ユニット 1 の受信強度地図で、図 7 は受信ユニット 1 付近の拡大図である。図 6 中の赤丸は受信ユニット 1 を示している。色が赤に近いほど RSSI の平均値が高く、青に近いほど低いことを表している。受信ユニット付近では RSSI の平均値が高い位置があることを確認できる。

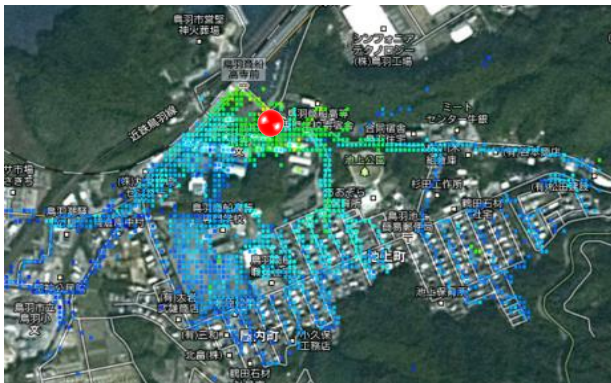


図 6 受信ユニット 1 の受信強度地図



図 7 受信ユニット 1 付近の拡大図

3.3. RSSI による確率地図の作成

RSSI による確率地図を作成する際には、データベースに入力される各受信ユニットの RSSI データに応じて、定期的に各メッシュの猿のいる確率（存在確率）を表す分布図を作成する。この分布図を「確率地図」と呼ぶ。確率地図は 1 回の RSSI 入力に対して、各受信ユニット別に作成する。例として、表 2 に示す RSSI が入力されたとする。ここで RSSI が 0 となっている受信ユニットは、発信器からの信号を受信しなかったことを表している。

表 2 RSSI の入力例

ユニット	1	2	3	4	5	6
RSSI	300	200	0	400	0	250

この場合、「受信ユニット 1 で RSSI=300 であった時の確率地図」、「受信ユニット 2 で RSSI=200 であった時の確率地図」、……というように 6 受信ユニット分の確率地図を作成する。確率地図の作成にあたって、まず (1) 式によって存在確率 $P_r(a|b)$ を全メッシュに対して計算する。(1) 式はベイズの定理[7]と呼ばれる確率計算式である。ただし、信号を受信しなかった受信ユニットについては、(1) 式による確率計算は行わず、存在確率を非常に小さな定数とした。

$$P_r(a|b) = \frac{P(a)P_r(b|a)}{P_r(b)} \quad (1)$$

$P(a)$: 猿がメッシュ a にいる確率

$P_r(b)$: 受信ユニット r で RSSI = b になる確率

$P_r(b|a)$: 猿が a にいる時に受信ユニット r で

RSSI = b になる確率

$P_r(a|b)$: 求める存在確率

表 2 の入力例の場合、受信ユニット 1 の確率地図の作成において、あるメッシュ a における存在確率は (2) 式によって計算する。(2) 式で求めた存在確率は、「受信ユニット 1 で RSSI=300 であった時に、猿がメッシュ a にいる確率」を表す。このような計算を全メッシュに行うことで、受信ユニット 1 で RSSI=300 であった場合の、各メッシュにおける存在確率を求める。

$$P_1(a|300) = \frac{P(a)P_1(300|a)}{P_1(300)} \quad (2)$$

図 8 は、受信ユニット 1 で観測された RSSI が 300 であった時に作成される確率地図である。確率地図では色が赤に近いほど存在確率が高く、青に近いほど低いことを表している。図 9 は図 8 の中で一部分を拡大した図であるが、確率が高い（色が赤に近い）メッシュがあることが確認できる。他の受信ユニットについても、同様にして確率地図を作成する。

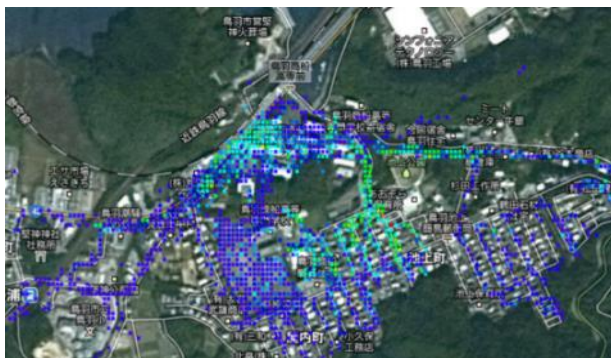


図 8 受信ユニット 1 で RSSI=300 の時の確率地図



図 9 高確率の部分の拡大図

ここから、(1)式による存在確率計算の詳細について述べる。まず $P(a)$ については、場所による猿の出現率の差についての客観的なデータが存在しない。そこで、本稿では以下に示す 5 通りの方法で $P(a)$ を定義した。

(手法 A)

(3)式のように全メッシュ均一と定義する。

$$P(a) = \frac{1}{\text{メッシュ総数}} \quad (3)$$

(手法 B)

メッシュ a が、受信強度地図を作成する際に歩いたことのあるメッシュであれば(4)式、歩いたことのないメッシュであれば(5)式のように定義する。

$$P(a) = \frac{1}{\text{歩いたことのあるメッシュ数}} \quad (4)$$

$$P(a) = 0 \quad (5)$$

(手法 C)

メッシュ a が、受信強度地図を作成する際に歩いたことのあるメッシュであれば(6)式、歩いたことのないメッシュであれば(7)式のように定義する。

$$P(a) = \frac{1}{2} \times \frac{1}{\text{歩いたことのあるメッシュ数}} \quad (6)$$

$$P(a) = \frac{1}{2} \times \frac{1}{\text{歩いたことのないメッシュ数}} \quad (7)$$

(手法 D)

メッシュ a が、受信強度地図を作成する際に歩いたことのあるメッシュであれば(8)式、歩いたことのないメッシュであれば(5)式のように定義する。

$$P(a) = \frac{\text{メッシュ } a \text{ におけるデータ数}}{\text{RSSI の総データ数}} \quad (8)$$

(手法 E)

メッシュ a が、受信強度地図を作成する際に歩いたことのあるメッシュであれば(9)式、歩いたことのないメッシュであれば(7)式のように定義する。

$$P(a) = \frac{1}{2} \times \frac{\text{メッシュ } a \text{ におけるデータ数}}{\text{RSSI の総データ数}} \quad (9)$$

次に、 $P_r(b)$ は(10)式で求める。ただし、RSSI 値である b は、5 の倍数になるように正規化する。

$$P_r(b) = \frac{r \text{ で RSSI}=b \text{ となったデータ数}}{r \text{ における RSSI の総データ数}} \quad (10)$$

たとえば、受信ユニット 1 で RSSI=297 であった場合、この時の $P_r(b)$ は $b=300$ に正規化し、(11)式によって計算する。このような処理を行っているのは、発信器が同じ場所にとどまっても、受信される RSSI は多少変動することがあり、この変動を考慮したためである。

$$P_1(300) = \frac{\text{RSSI} = 300 \text{ となったデータ数}}{\text{受信ユニット 1 での総データ数}} \quad (11)$$

最後に、 $P_r(b|a)$ は、RSSI の確率密度関数が正規分布に従っていると仮定して計算する。正規分布における確率密度関数 $f(t)$ は(12)式で表される。この $f(t)$ を(13)式の通りに積分し、 $P_r(b|a)$ を求める。

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ar}} \exp \left[-\frac{(t - \mu_{ar})^2}{2\sigma_{ar}^2} \right] \quad (12)$$

t : 受信ユニット r で観測された RSSI

μ_{ar} : メッシュ a において受信ユニット r で観測された RSSI の平均値

σ_{ar} : メッシュ a において受信ユニット r で観測された RSSI の標準偏差

$$P_r(b|a) = \int_{b-5}^{b+5} f(t) dt \quad (13)$$

ここで積分範囲を $b-5 \sim b+5$ としているのは、 $P_r(b)$ の計算と同様に、同じ場所においても RSSI が変動する可能性を考慮したためである。たとえば、受信ユニット 1 で RSSI = 300 であった時、 $P_r(b|a)$ は(14)式によって計算する。

$$P_1(300|a) = \int_{295}^{305} f(t) dt \quad (14)$$

以上のようにして、(1)式（ベイズの定理）を利用した存在確率 $P_r(a|b)$ の計算を行っている。

3.4. 猿の候補位置の算出

6 受信ユニット分の確率地図を作成した後は、それらを掛け合わせることによって、猿がいる可能性がある位置を絞り込む。具体的には、各メッシュで求めた 6 受信ユニット分の存在確率の積をとる。すなわち、あるメッシュ a における最終的な存在確率 P_a は(15)式によって求める。

$$P_a = \prod_{r=1}^6 P_r(b|a) \quad (15)$$

たとえば、あるメッシュ a において計算された存在確率が表 3 のようになったとする。

表 3 存在確率の例

ユニット	1	2	3	4	5	6
存在確率	0.3	0.4	0.2	0.01	0.01	0.01

この場合、メッシュ a における最終的な存在確率 P_a は(16)式のようになる。

$$P_a = 0.3 \times 0.4 \times 0.2 \times 0.01 \times 0.01 \times 0.01 = 2.4 \times 10^{-8} \quad (16)$$

図 10 は、表 2 (3.3 節) に示した RSSI が入力された時に、6 受信ユニット分の掛け合わせて得られる確率地図 (P_a の分布図) である。図 8 の確率地図と比較すると、猿がいる可能性がある位置 (色がついている位置) が絞り込まれていることがわかる。

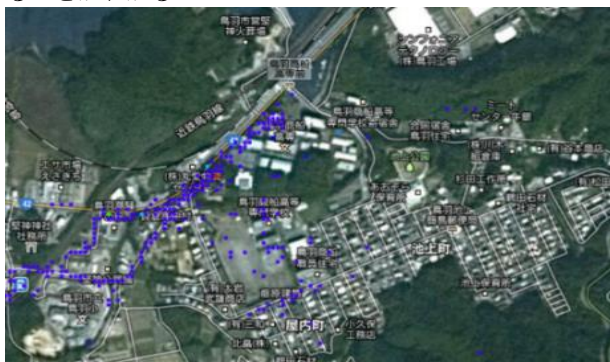


図 10 掛け合わせ後の確率地図

3.5. 推定位置の決定

確率地図の掛け合わせを行った後、(15)式で求めた存在確率が特に大きい 30 メッシュを推定位置の候補とし、その中から 1 メッシュを選んで推定位置とする。選定するにあたって、候補である 30 メッシュに対して(17)式による計算を行い、前の推定位置からの移動距離を考慮した評価値 E を求める。そして、 E が最大になったメッシュを推定位置を選ぶ。

$$E = 0.01 \log_{10} P + \log_{10} \frac{1}{D} \quad (17)$$

E : 評価値, P : 存在確率

D : ひとつ前の推定位置からの直線距離

(17)式で求まる評価値 E は存在確率が高く、移動距離が小さいほど大きくなる。移動距離が小さいほど E が大きくなるようにしたのは、発信器は 5 秒毎に信号を発信しており、その間に猿が移動できる距離は数十 m に限られるためである。(17)式による計算はひとつ前の推定位置が決まっ

ていることが前提となっているため、猿の初期位置 (ひとつ前の推定位置データが存在しない場合) は存在確率が最大になったメッシュを推定位置としている。なお、(17)式において、 $\log_{10} P$ の係数を 0.01 としているのは、2 つの項のオーダーが同じになるようにするためである。

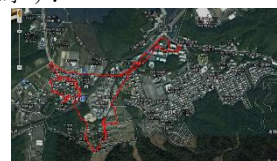
4. 評価実験

4.1. 評価方法

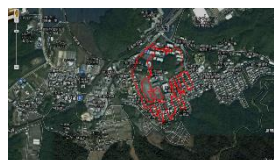
位置推定の精度を確認するための評価実験を行った。今回は人間が発信器と GPS を持って、地域内 (主に鳥羽商船～池の浦駅と、鳥羽商船～池上町・屋内町内) を歩いて得られた RSSI データ 14 セット (合計 5927 データ) を対象とした。歩行経路の例を図 11 に示す。



(a) 経路 1



(b) 経路 2



(c) 経路 3



(d) 経路 4

図 11 歩行経路の例

実験では手法 A～E の 5 手法 (3.3 節) で位置推定を行った。そして各データに対して、(18)式によって推定位置と GPS で取得した位置との直線距離を誤差として求め (図 12)、データセットごとの平均誤差を算出することで精度を評価した。(18)式で誤差を求める際に 10 を掛けているのは、メッシュ 1 つの大きさが、実際の距離において 10m に相当するためである。

$$\text{err} = 10 \sqrt{(x_{\text{est}} - x_{\text{cor}})^2 + (y_{\text{est}} - y_{\text{cor}})^2} \text{ [m]} \quad (18)$$

err : 誤差

$x_{\text{est}}, y_{\text{est}}$: 推定位置にあたるメッシュ

$x_{\text{cor}}, y_{\text{cor}}$: 正解位置にあたるメッシュ

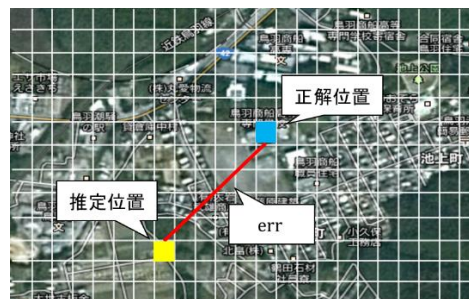


図 12 評価実験の概念図

4.2. 実験結果と考察

各データセットにおける平均誤差を表 4 にまとめた。なお、表中の A～E は 3.3 節で述べた手法 A～E に相当する。

表 4 評価実験の結果

データ セット	平均誤差[m]				
	A	B	C	D	E
1	55.4	47.9	47.9	121.4	121.4
2	167.8	162.0	162.0	315.7	315.7
3	59.5	62.3	62.2	66.0	66.0
4	193.0	192.7	192.7	311.3	311.3
5	93.7	101.4	101.4	306.6	306.6
6	101.7	91.9	91.9	225.9	225.9
7	116.7	78.0	78.0	181.5	181.5
8	144.8	146.5	146.5	135.9	135.9
9	212.0	212.9	212.9	317.5	317.5
10	88.2	88.4	88.4	77.7	77.7
11	146.2	148.0	148.0	142.1	142.1
12	80.5	79.9	79.9	186.6	186.6
13	107.6	72.2	72.2	106.1	106.1
14	136.8	134.4	134.4	120.0	120.0
平均	121.7	115.6	115.6	186.7	186.7

表4より、平均誤差が最も小さくなったのは手法B・Cという結果になった。(1)式(3.3節)において、実際に歩いたことのある場所で $P(a)$ が高くなるように設定することは有効な手段であるといえる。しかし、手法D・Eでは逆に手法Aと比較して平均誤差が大きくなっていた。この原因として、特定の箇所で $P(a)$ の値が著しく大きくなっており、確率計算に大きく影響を及ぼしていることが考えられる。データセット5～7について、GPSの経路と手法A・Dで求めた推定経路をそれぞれ図13～図15に示す。図中の赤の線はGPSの経路、黄の線は推定経路を表している。



図 13 データセット5における経路の比較

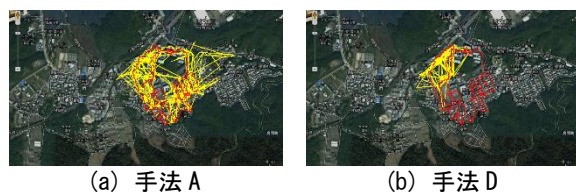


図 14 データセット6における経路の比較

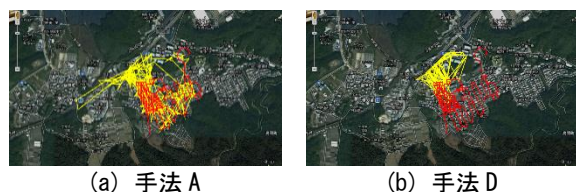


図 15 データセット7における経路の比較

これらの図より、手法Aでは大まかにではあるが、推定経路がGPSの経路に沿っている。しかし手法Dで

は推定経路が地図の右上(鳥羽商船付近)からあまり動いていないことがわかる。これより、手法D・Eにおいては鳥羽商船付近で $P(a)$ の値が著しく大きくなっており、また、(17)式による評価値の計算(存在確率が大きく、ひとつ前の推定位置からの距離が小さいほど評価値が大きくなる)を行っていることもあいまって、この付近が推定位置に選ばれ続けていると考えられる。

すべてのデータセットにおいて手法D・Eで平均誤差が最も大きくなったわけではなく、逆に手法D・Eで最も平均誤差が小さくなったデータセットもみられた。その例として、データセット14でのGPSの経路と手法A・Dで求めた推定経路を図16に示す。このデータセットのような経路の場合は、手法D・Eで精度が高くなると考えられる。



図 16 データセット14における経路の比較

5. まとめ

本稿では、RSSIを利用した確率的な手法による位置推定の評価実験を行った。その結果、平均誤差は最小で115.6mと、「猿が住宅街に現れた」というような大まかな範囲での位置推定が実現できたことがわかった。本位置推定手法は、猿の追い払いに活用する際に、搜索範囲を大幅に絞込むことが可能となるといえる。現状では5秒に1回受信されるRSSIデータすべてに対して位置推定を行っているが、今後は実用面を意識し、1分に1回程度の頻度で、より正確な位置推定の実現を目指したい。

参考文献

- [1] 山端直人, “集落ぐるみのサル追い払いによる農作物被害軽減効果,” 農村計画学会誌, 28 巻論文特集号, pp.273-278, Feb.2010.
- [2] 桑原雅明, 西尾信彦, “無線電波測位手法における障害物を考慮した電波マップの構築,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM2008) シンポジウム, pp.738-745, July 2008.
- [3] 藤原謙太郎, 寺西裕一, 秋山豊和, 春本要, 竹内享, 西尾章治郎, “無線電波強度分布に基づくユーザ存在範囲推定手法について,” 情報処理学会研究報告, vol.2009-DPS-141, no.24, pp.1-6, Nov. 2009.
- [4] 加治充, 原隆浩, 西尾章治郎, “無線LANによる位置推定のためのオンライン生成可能な電波環境地図とその特性,” 情報処理学会論文誌, vol.50, no.1, pp.51-63, Jan.2009.
- [5] サーキットデザイン, “サル用発信器 LT-01 製品情報 - サーキットデザイン”, <http://www.tracking21.jp/products/lt-01/>, 参照 Jan. 22, 2015.
- [6] サーキットデザイン, “動物検知通報用組込型受信機 LR-02 製品情報 - サーキットデザイン”, <http://www.tracking21.jp/products/lr-02/>, 参照 Jan. 22, 2015.
- [7] 松原望, 図解入門 よくわかる最新ベイズ統計の基本と仕組み, 秀和システム, 2010