

ビタビアルゴリズムを用いた3次元位置検出

A Location Estimation Method Based on Viterbi Algorithm

郡 武治*, 伊代田 徹**, 太田 哲也**, 草ヶ谷 瞬**, 大石 直紀**

Takeharu KOHRI, Tohru IYODA, Tetsuya OHTA, Shun KUSAGAYA and Naoki OOISHI

Abstract:

We have developed a novel location estimation method that is based on the Viterbi algorithm. Using this method enables us to estimate the most likely location at several 10 nsec by using past location transition and signal detection. In addition, the system implementing this method can be composed of a single LSI.

Since the Viterbi algorithm has two functions, signal detection from noisy received signal and finding a maximum likelihood sequence path, this method can be applied to location estimation. The level of the received signal is proportional to the distance between the move terminal and the fixed node. The trellis of Viterbi decoder encoder is similar to the track of moving terminal.

We demonstrated the proposed location estimation method on the Viterbi algorithm by the field test using 8x8x8 array 3D model.

1. はじめに

人や物を認識するユビキタスコンピューティングはしだいに広がりつつある。なかでも、位置検出は中核の技術として、これまで、さまざまな位置検出法が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

筆者は、ビタビアルゴリズムにおける最尤推定法とその回路構成に着目し、位置検出に適合させることを考えた⁽⁷⁾。

ビタビアルゴリズムは、これまで衛星通信、移動通信などにおける誤り訂正として用いられてきた。符号化信号の状態遷移に着目し、雑音により曖昧になった受信信号の中から尤らしいデータを検出する方法である。

提案方法は、ビタビ復号で扱う情報を位置情報に置き換え、同一アルゴリズムによるハードウェアで最尤位置推定を行うものである。このことにより、これまでのビタビ復号回路と同様に、1つのLSIで高速に位置の推定ができ、数10MHzに一回最尤位置推定することも可能である見通しを得ている。

提案するビタビアルゴリズムを用いた位置検出について、これまで、2次元のモデルについて、計算機シミュレーションにより、効果のあることを示し、その回路規模を明らかにした⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

本報告は、3次元のモデルにおいても、同様にビタビアルゴリズムを用いた位置検出が可能であることを示し、さらにフィールド試験を実施することにより、その効果を実証するものである。

今回、フィールド試験を実施するに当たり、当初容易

に結果が得られるものと考えていたが、実際には、2つの問題があり、解決する必要があった。

① フィールド試験において、単純に3か所以上の受信レベルから換算した距離だけで位置を決定する従来の方法では、時々、大きく外れる位置を算出してしまうことがあった。

これは、アンテナ指向特性があるために、同じ受信レベルの値をとる位置が複数あり、このため、S/Nに関わらず実際の位置とは異なる位置に誤って判定してしまう場合のあることが分かった。

これを解決するためには、全方向に均一な(4πステラジアンに均等)電波伝搬を実現する必要がある。しかし、4πステラジアンに均等に感度のあるアンテナを実現することは原理的に不可能である。

そこで、x y zの3軸に直交するダイポールアンテナを設け、4πステラジアンに均等な電波伝搬を実現する方法を考えた。

さらに、フィールド試験において、提案するビタビアルゴリズムを用いた位置検出では、隣接格子をたどる状態遷移になることから、大きく外れる位置を算出することがなく、非常に有効であることがわかった。

② 3次元における最適な位置決め単位

3次元位置推定するための、最適セル構造を考え、面心立方格子構造(略称 FCC(face-centered cubic lattice))が最も適していることを示した。

本論文では、最初にビタビアルゴリズムを用いた3次元検出の原理を述べる。次に3次元における最適な位置決

2009年3月16日受理

*理工学部 電気電子工学科

**理工学部 電気電子工学科卒業生

め単位として最適格子配列を述べる。最後に $8 \times 8 \times 8$ の 3次元モデルを用いたフィールド試験により、検証した結果を示す。

2. ビタビアルゴリズムを用いた3次元位置検出の原理

図1は提案するビタビアルゴリズムを用いた3次元位置検出モデルを示したものである。

本モデルは、3次元を移動する端末と設置位置が固定した3つ以上の固定ノードから構成される。

各固定ノードは、移動する移動端末からの信号の電力が伝送距離に比例することから、移動端末までの距離を推定することができる。移動端末の位置推定は、固定ノードにおいて検出した距離情報を用いてビタビアルゴリズムにより最尤推定される。固定ノードは3以上あれば、3次元位置を推定することができる。

ビタビアルゴリズムは物体の過去の状態遷移の持つ尤もらしさを示す尤度と距離情報である雑音を含む受信信号を用いて、位置の最尤判定を行うものである。

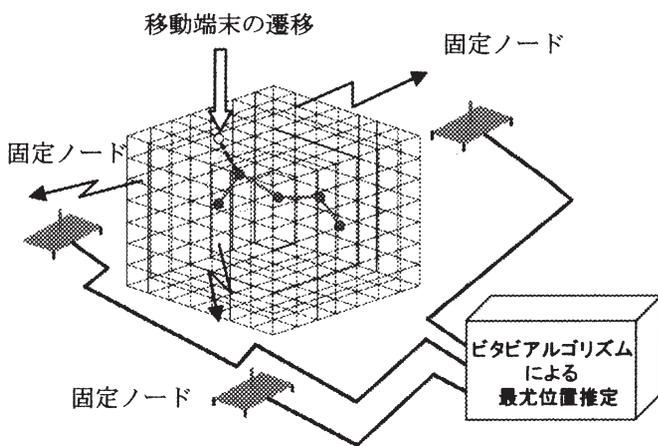


図1 提案する位置検出モデル

2.1 動作原理

図2は具体的な動作原理を示したもので、(a)は均一配置した格子点と移動端末までの距離の関係を示し、(b)は各格子点において行われる、最適パス選択の動作を示している(ビタビアルゴリズム)。本動作原理は2次元モデルにより説明する。3次元は面が立体となるが2次元と全く同じアルゴリズムである。

次のように動作する。

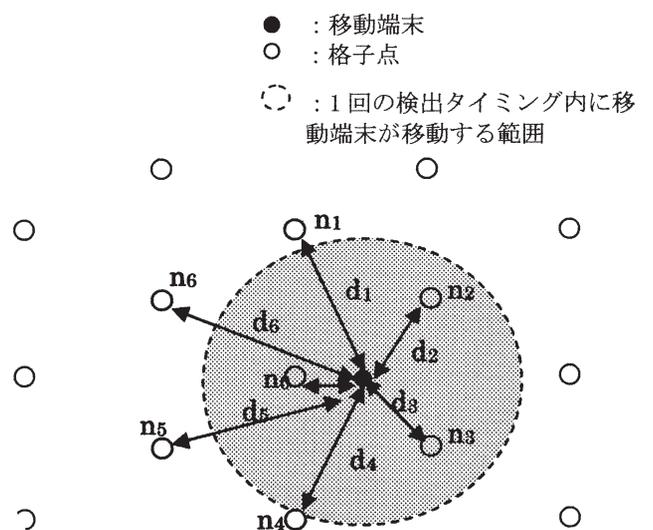
- ① 移動端末から送信された信号は、3以上の固定ノードで受信され、受信レベルから移動端末からの距離 d_0, d_1, \dots, d_n が測定される。
- ② 送信された信号は、 t_d 間隔で受信され続ける。
- ③ 移動端末は最大移動距離が設定され、次の送信までの間に動ける最大範囲は、格子点1区間の距離を超えない。本例では、格子点 n_0 近傍にいる移動端末は次の

送信タイミングでは $n_0, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$ の近傍にはいるはずである。

- ④ 集計局では検出距離情報 d_0, d_1, \dots, d_n と過去の位置履歴から、ビタビアルゴリズムにより、移動端末位置を最尤位置検出する。

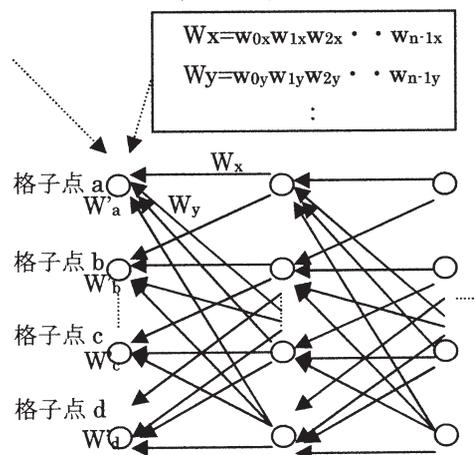
提案方法では、過去の位置履歴から、移動端末位置を最尤位置検出する方法として、ビタビアルゴリズムを用いている。

図3は回路構成を示したもので、状態毎に、メトリック演算をする ACS 回路と過去のパスを残しておくパスメモリから構成され、各状態において、生き残りパスを選択するたびに、その系列の過去の系列データを選択記録するようにしている⁽⁹⁾。



正六角形ゾーン構成に配置した格子点と移動端末
受信信号
ra →

受信信号
rb →
受信信号
rc →



(b)トレリス線図
図2 動作原理図

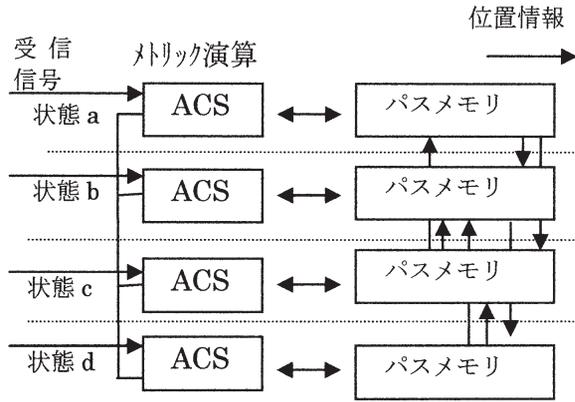


図 3 位置検出回路構成

2. 2 位置検出のための最適格子配列

(1) 2次元の場合

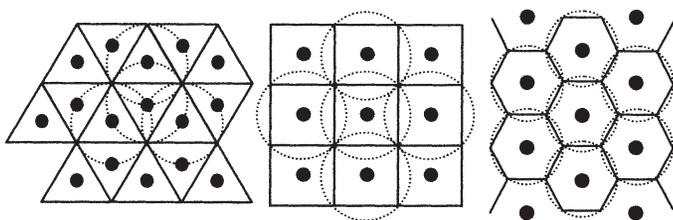
物体の位置を2次元空間で最適に検出するためには、区切りを示すセルを均等とし、平面を隙間なく埋め尽くす必要がある。この正多角形で平面を埋める方法は、タイル貼りの問題として知られ、正三角形、正四角形、正六角形の3通りしかないことが証明されている⁽¹¹⁾。各セルの重心を格子点とした格子配列を図4に示す。

セルの半径を R とした場合の各正多角形の隣接セルまでの距離、単位セルの面積、曖昧になる面積（半径 R の面積から正多角形の面積を引いた値）は表1のようになる。ここで、曖昧になる面積が最も小さいのは、正六角形のセルであり、正六角形が最適に検出する格子配列であることが分かる。

表1 各セル構成の比較⁽¹²⁾

セル構成	隣接セルまでの最少距離	単位セル面積	曖昧な面積	隣接セル数
正三角形	R	$\frac{3\sqrt{3}}{4}R^2$	$(2\pi - \frac{3\sqrt{3}}{2})R^2$	3
正四角形	$\sqrt{2}R$	$2R^2$	$(2\pi - 4)R^2$	4
正六角形	$\sqrt{3}R$	$\frac{3\sqrt{3}}{2}R^2$	$(2\pi - 3\sqrt{3})R^2$	6

(セル半径 R)



(a) 正三角形構成 (b) 正四角形構成 (c) 正六角形構成

図 4 各セルの重心を格子点とした格子配列

(2) 3次元の場合

同半径の球を敷き詰めた時、最も密度の高いのは立方体の8個の頂点と6面の中心に球が配置されている面心立方格子構造(略称 FCC(face-centered cubic lattice))である。これは、ケプラーの予想として知られ、3次元は1998年にトマス・ヘイズによって証明されている⁽¹³⁾。図5に面心立方格子構造の格子配列を示す。

- ・充填率 74% ($\sqrt{2}\pi/6$)
- ・隣接する格子数 12

面心立方格子構造の充填率は74%になるのに対し、単純立方格子構造では充填率はたった53% ($\pi/6$)である。

物体の位置を3次元空間で最適に検出するためには、この面心立方格子構造の各格子を各セルの中心とすることにより、位置決め最適化を行うことが可能であると考えられる。

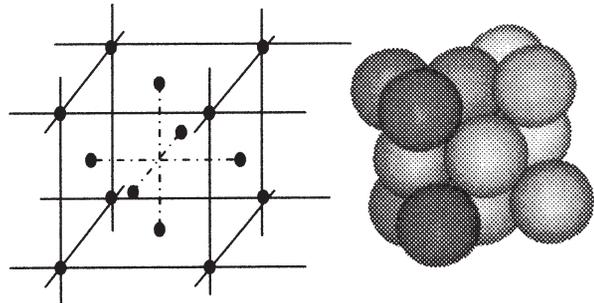


図 5 面心立方格子構造における格子の配列

3. 3次元における問題点

図6は、固定ノードにモノポールアンテナを用い、 $8 \times 8 \times 8$ の単純立方体の格子配列において、各格子の位置とその時に得られる受信レベルを全て比較したものである。

比較はレベル情報の情報間距離をもとめ球の大きさで図示している。球の半径が小さければ、距離が近いものであり、似通ったレベル情報になる。本例では離れた2か所において、ほぼ同じ情報が存在することが分かる。

これは、致命的な欠点であり、S/Nに関わらず誤検出する場合があることになる。

この現象は、アンテナが指向特性を持つため、電波伝搬方向により、アンテナ利得が異なることにより生じる。図7に有限地板上モノポールアンテナの放射特性を示す。

解決するためには、全方向に均一な (4π ステラジアンに均等) 電波伝搬を実現する必要がある。しかし、 4π ステラジアンに均等に感度のあるアンテナを実現することは原理的に無理である。

そこで、図8に示すように、xyzの3つの直交軸にダイポールアンテナを付けたアンテナを設け、これに3相信号を給電することにより、全方向に円偏波を信号を均一に放射させることができる。

図9に予測される全方向に均一なアンテナ利得を持つ理想的なアンテナパターンを示す。

受信側では、同じ形式のアンテナで受信し、ベクトル合成することにより、距離と比例した受信レベルを検出することが可能となる。

図 10 は検証のため、送受 2 つのアンテナを傾け、そのアンテナ出力を計算機シミュレーションしたものである。各アンテナ素子の傾きからの信号のレベル、位相は異なるが、各素子毎に、受信レベルを検出し、ベクトル演算することにより、電磁波全体の受信レベルを算出できることが分かる。

異なる位置で同じレベル情報

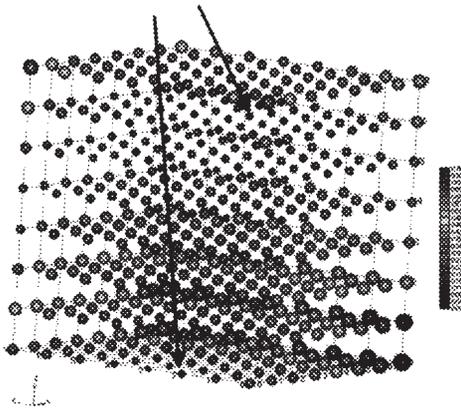


図 6 各格子点からの受信信号レベル情報間距離

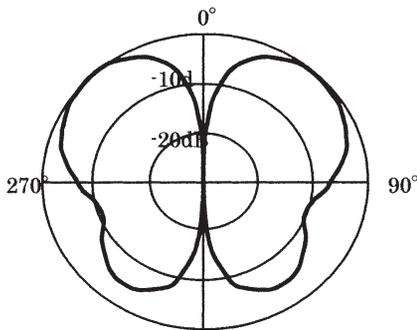


図 7 有限地板上モノポールアンテナの放射特性

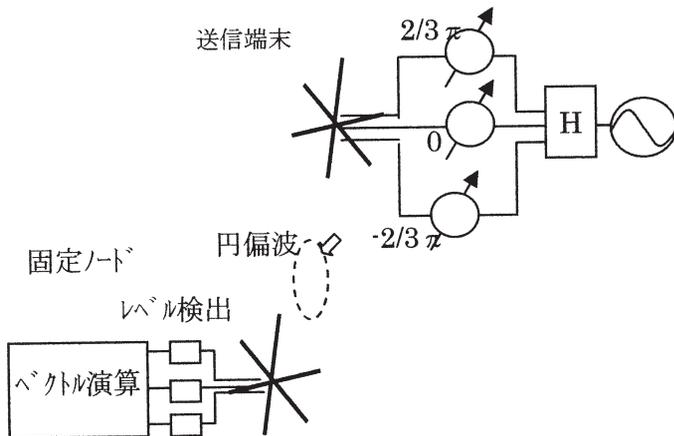


図 8 3つの直交軸にダイポールアンテナを設けた全方向に円偏波を信号を均一に発射するアンテナ

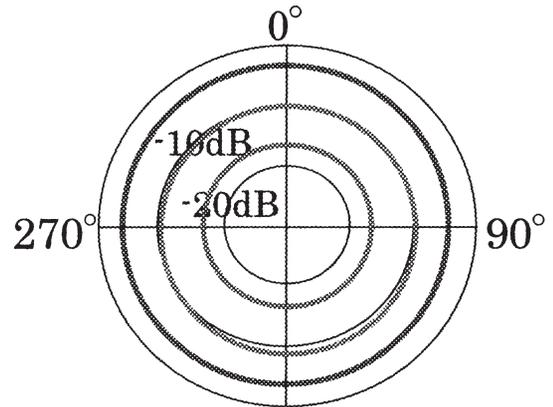


図 9 全方向に均一なアンテナ利得

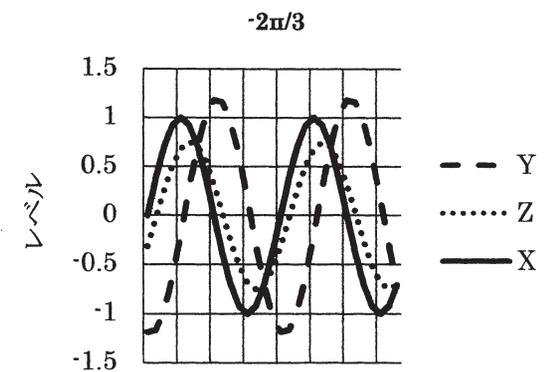
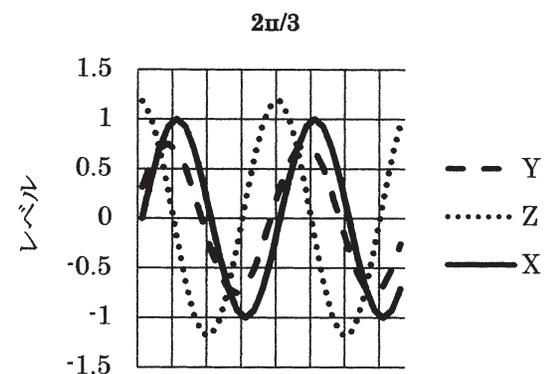
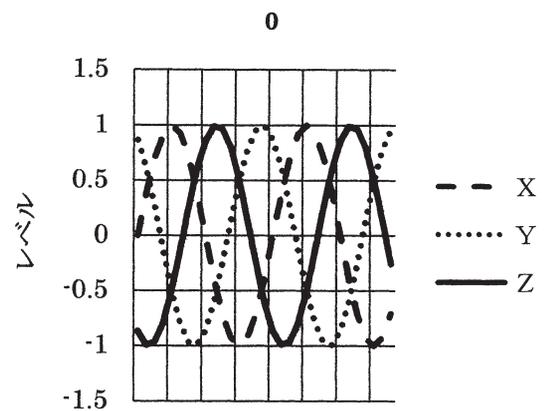


図 10 送受 2 つのアンテナを傾けた後、受信アンテナ各素子の出力信号

4. フィールド試験

4. 1 フィールド試験系の構成

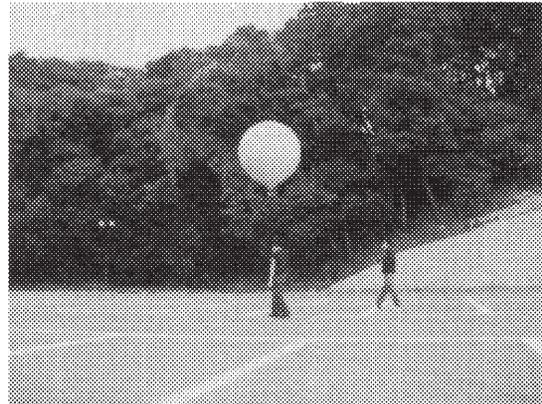
フィールド試験を実施した。図 11 はフィールド試験のシステム構成図である。

風船に送信端末をつけ、複数の固定ノードにより、受信し、ビタビアルゴリズムを用いて、風船の位置を測定した。各固定ノード（無線基地局 No1~3）のアンテナはモノポールアンテナを用いた。図 12 に測定風景と固定ノードを示す。

4. 1 試験結果

位置検出の結果を図 14 に示す。ビタビアルゴリズムを用いた場合と、単純にレベルと距離による単純計算により位置を推定した従来の方法を比較した。図 6 に示したように、離れた場所によく似た同じレベルがあるため、従来の方法では、推定位置が一瞬飛んで大きく外れる時があることが分かる。これに比べ、ビタビアルゴリズムを用いた場合、隣接格子への移動のみが位置の状態遷移として出力されることにより、改善されていることが分かる。

図 13 は1当りの移動機の移動距離を確率密度で表したものである。ビタビアルゴリズムを用いた場合、は隣接格子までの距離2以下に集中しているの比べ、従来方法では分散していることが分かる。



(a)測定風景



(b)固定ノード (モノポールアンテナ)

図 12 実験風景と固定ノード

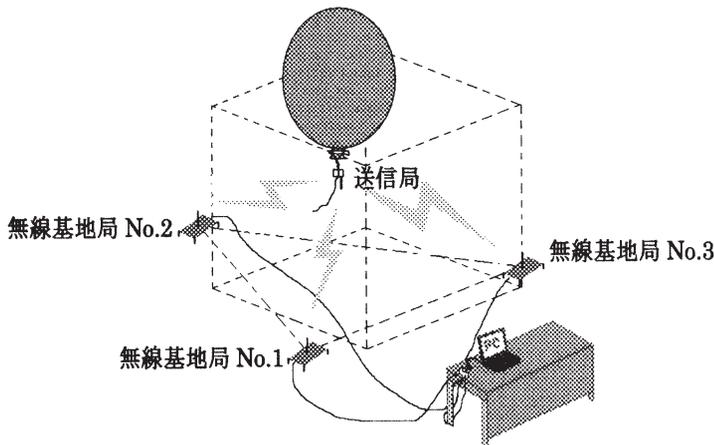
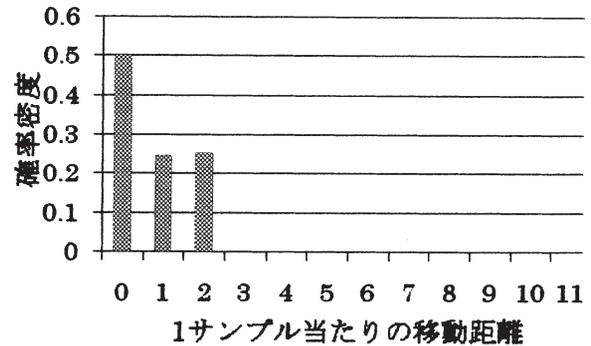


図 11 フィールド試験システム構成図

提案方法



従来方法

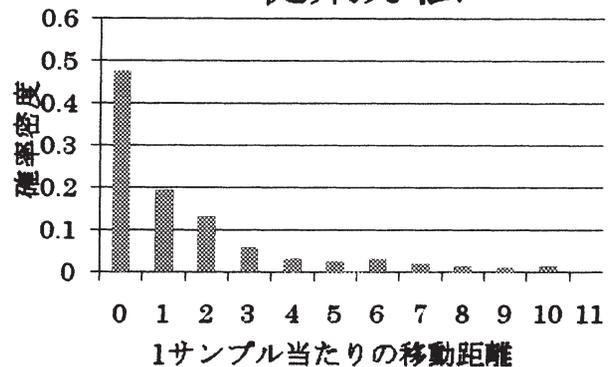
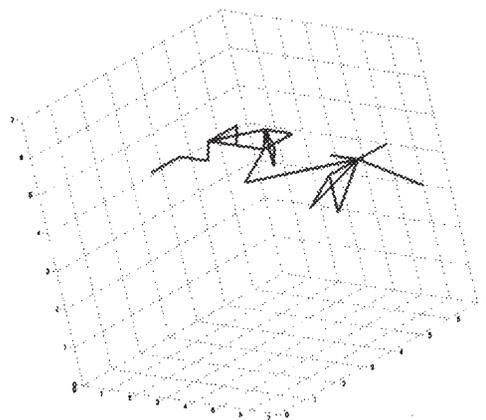
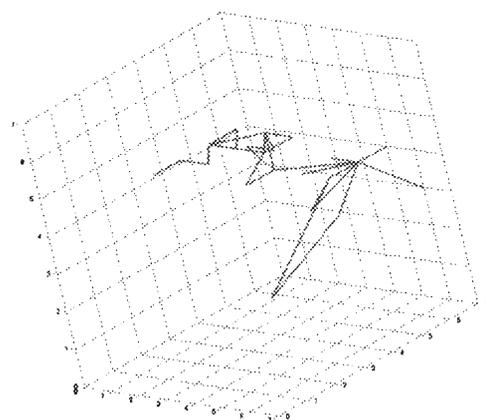


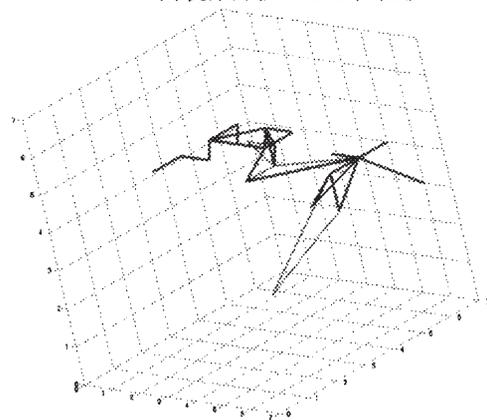
図 13 移動機の1サンプル当り移動距離の確率密度



(a) ビタビアルゴリズムによる位置検出



(b) 従来方法による位置検出



(c) ビタビアルゴリズムと従来方法の比較

図 14 フィールド試験結果

5. あとがき

ビタビアルゴリズムを用いた位置検出法を提案し、 $8 \times 8 \times 8$ の 3次元モデルによる位置検出フィールド試験を実施し、検証した。

その結果、次のことが分かった。

・フィールド試験において、従来の位置検出方法では、時々、大きく外れる位置を算出してしまう場合があるのに比べ、

提案するビタビアルゴリズムを用いた位置検出では、隣接格子をたどる状態遷移になることから、大きく外れる位置を算出することがなく、非常に有効であることがわかった。

・3次元位置検出において、用いるアンテナは全方法に均一な利得を有するアンテナにする必要がある。実現するアンテナとして3つの線状アンテナをxyz軸上に設けた 4π ステラジアンアンテナを考案した。

・3次元位置推定するための、最適セル構造を考え、面心立方格子構造(略称 FCC(face-centered cubic lattice))が最も適していることを示した。

今後は、実用化するために必要なビタビアルゴリズムを用いた位置検出 LSI を開発する予定である。

5. 謝辞

アンテナに関し貴重なご意見をいただいた豊橋科学技術大学大平孝教授殿、防衛大学山田吉英教授殿、幾何学に関し貴重な資料をいただいた津田塾大学福原真二教授殿に深謝いたします。

文 献

- [1] 朝生、齋川、服部、“セルラーシステムにおける電界強度と移動速度情報を用いた最尤位置検出法”，情報処理学会論文誌 Vol. 45, No5, pp1409-1416, March 2004
- [2] 川端、朝生、犀皮、服部、“セルラーシステムにおける最尤推定法に基づく TDOA システムの位置検出性能評価”，信学論(B) Vol. J87-B No. 2, Feb. 2002
- [3] 朝生、齋川、服部、“移動通信における TDOA を用いた INS-PX 位置検出法の提案”，シミュレーション学会論文誌 Vol. 22 No4, pp79-85 2003
- [4] 高島、趙、柳原、福井、福永、原、北山、“センサネットワークにおける受信電力と最ゆう法を用いた位置推定”，信学会論(B) Vol. J89-B No. 5 2006
- [5] Neal Patwari, A. O. Hero III, M. Perkins, Neiyer S. Correal, R. J. O' Dea, "Relative Location Estimation in Wireless Sensor Networks", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 51, No. 8, Aug. 2003
- [6] A. J. Weiss, "On thr Accuracy of Cellular Location System Based on RSS Measurements", IEEE trans. on Vehicular Technology, Vol52, No6, 2003
- [7] 郡” ビタビ復号アルゴリズムを用いた位置検出の検討” 信学技報, MoMuC2007-68, 2008
- [8] 郡” ビタビアルゴリズムを用いた 3次元位置検出の検討” 信学技報, MoMuC2008-82, 2009
- [9] 今井秀樹, “符号理論”, 電子情報通信学会, 2000
- [10] 久保田、郡、加藤, “SST(Scarce State Transition) 型ビタビ復号回路”, 信学会論文誌 B, Vol69B no11, 1986
- [11] H.S.M.Coseter, "Introduction to Geometry", Wiley, New York
- [12] 進士、安達、生越、鹿兒島、冠、坂上、鈴木、須田、関口、服部、平出、室田、山田, “移動通信”, 丸善株式会社, pp139-140, 1989
- [13] ジョージ・G・スピーロ著、青木薫訳『ケプラー予想』新潮社、2005年