

研究速報

レーダネットワークにおける MMSE を用いた
障害物の位置推定羽多野裕之^{†a)}(学生員) 山里 敬也^{††}(正員)
岡田 啓[†](正員) 片山 正昭^{††}(正員)Target Position Estimation Using MMSE for A Radar Network
Hiroyuki HATANO^{†a)}, Student Member,
Takaya YAMAZATO^{††}, Hiraku OKADA[†], and
Masaaki KATAYAMA^{††}, Members[†]名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻, 名古屋市
Department of Electrical Engineering and Computer Science,
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-
8603 Japan^{††}名古屋大学エコトピア科学研究所, 名古屋市
EcoTopia Science Institute, Nagoya University, Furo-cho,
Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

a) E-mail: hatano@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

あらしし 複数のレーダと MMSE を用いて, 車輻前方近距離に存在する障害物の位置を推定する. MMSE を用いる際に設定するパラメータは, 推定精度を大きく左右する. 本論文では, パラメータ設定の異なる 3 手法を位置推定精度の点から車輻環境下で比較する.

キーワード レーダネットワーク, 位置推定, MMSE, ITS

1. まえがき

本論文では, レーダネットワークを用いて, 車輻前方, 近距離に存在する障害物の位置を高い精度で推定することを考えている. 現在研究されている複数のレーダを用いて高い精度で位置を推定する手法として次の二つに大別できる. 一つは, 複数のレーダから得られた任意の測距値対と三角測量で得られた位置をトラッキングする手法である [1] ~ [3]. そしてもう一つは, MMSE を用いて, 各レーダの測距値に含まれる測距誤差が最小になるように位置を推定する手法である [4] ~ [6]. 本論文では, 後者の MMSE を用いた障害物の位置推定について考えている. MMSE は目的関数として定めた誤差含有値と真値との平均二乗誤差が最小になるようにパラメータを推定する手法である. この MMSE における目的関数と推定するパラメータの設定パターンはいくつか考えることができる. しかし, これらの設定によって位置推定精度が左右されることが予想される. したがって, 位置推定誤差が最も小さくなるように設定をする必要がある. 本論文では設定パターンとして考え得る 3 手法を検討している.

一方, 複数のレーダと MMSE を用いて高い位置推

定精度を達成するためには, 検出対象物を取り囲むように多数のレーダを並べることが効果的であると考えられる. しかし, 本論文が考えるレーダネットワークでは, 車輻用という性質からレーダの設置方法が制限される. 具体的には次の 2 点が挙げられる.

- 車輻前方に直線状に装着しなければならない
- 車幅内に複数のレーダを設置しなければならない

以上のような制約は, 位置推定特性に大きな影響を与えることが予測される. 従来, このような制約のもとで, パラメータ設定に関する比較は行われていない. 本論文では, パラメータ設定の異なる 3 種類の MMSE 手法を挙げ, 車輻用・近距離という環境下において位置推定精度の観点から比較検討を行う. そして, 設定したパラメータが位置推定に与える影響を検討する.

2. システムモデル

総数 K 個のレーダを図 1 のように車輻前方に配置する. 車輻中心を原点とした座標系を用いる. 車輻幅方向を x , 進行方向を y とする. 各アンテナは車幅一杯に等間隔に配置されており各アンテナ間の距離を d とする. アンテナの x 座標は左から X_1, X_2, \dots, X_K とする. 各アンテナと障害物との距離はそれぞれ R_1, R_2, \dots, R_K であり, 障害物の方角をそれぞれ $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K$ とする. 座標 (X, Y) は障害物が存在する位置を表す. システムモデルを図 2 に示す. 添字 \sim は測定値を, 添字 $\hat{\cdot}$ は推定値を表す. 各レーダは, それぞれ測距値 $\tilde{R}_1, \tilde{R}_2, \dots, \tilde{R}_K$ を出力する. K 個の測距値と MMSE を用いて障害物の座標は推定される. 各受信機における測距値 \tilde{R} には測距誤差 $\epsilon (= \tilde{R} - R)$ が含まれる. レーダの精度が有限で, かつ, 障害物が二次元平面上に均一に存在する場合, ϵ は有限精度の範囲 $(-\epsilon_{\max} \leq \epsilon \leq \epsilon_{\max})$ で一様分布するものとしてモデル化できる.

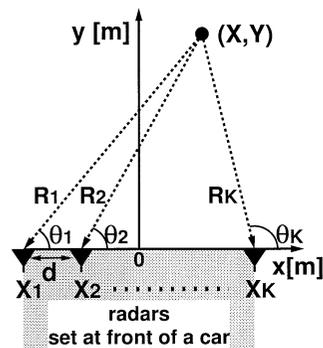


図 1 複数レーダと障害物との座標関係図
Fig. 1 Layout of multiple radars and a target.

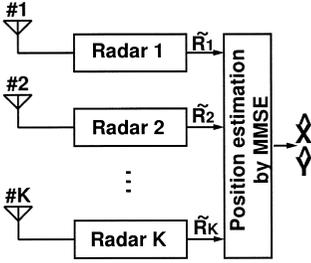


図2 システムモデル
Fig.2 System model.

3. MMSE を用いた位置推定手法

位置の推定精度の改善を考えると、

(1) 測距値から直接位置を推定する精度を上げる (Direct Position Estimate: DPE),

(2) まず、測距値そのものの推定精度を上げ、次に位置を求める (Two-Step Estimate: TSE), 二つの方法が考えられる。(1)をMMSEで求めることを考えると、MMSEで推定するパラメータは求める座標 (\hat{X}, \hat{Y}) となる。また、最小化する目的関数は、

$$(1-a) \text{ 測距誤差 } |R(\hat{X}, \hat{Y}) - \tilde{R}|^2$$

(Minimizing Range Error: MRE)

$$(1-b) \text{ 位置推定誤差 } |(\hat{X} - \tilde{X})^2 + (\hat{Y} - \tilde{Y})^2|$$

(Minimizing Position Error: MPE)

の2通りが考えられる。また(2)の場合、推定するパラメータは両端の \hat{R}_1 と \hat{R}_K となり、最小化する目的関数は各々 $|\hat{R}_1 - \tilde{R}_1|^2$, $|\hat{R}_K - \tilde{R}_K|^2$ となる。本論文ではMERE (Minimizing Either side of Range Error) 手法と呼ぶ。

3.1 DPE 手法

(1-a) DPE-MRE 手法

目的関数を次のように定め位置 (\hat{X}, \hat{Y}) を推定する。

$$\arg \min_{\hat{X}, \hat{Y}} \left[\sum_{k=1}^K (R_k(\hat{X}, \hat{Y}) - \tilde{R}_k)^2 \right] \quad (1)$$

ここで、 $R_k(X, Y) = \sqrt{(X - X_k)^2 + Y^2}$ である。つまり、MRE 手法は座標 (\hat{X}, \hat{Y}) をパラメータとして、各受信機までの距離 $R_k(\hat{X}, \hat{Y})$ と、各受信機が測距した値 \tilde{R}_k との誤差が、すべてのレーダにおいて最小になるように推定座標 (\hat{X}, \hat{Y}) を導く手法である。

(1-b) DPE-MPE 手法

目的関数を次のように定め位置 (\hat{X}, \hat{Y}) を推定する。

$$\arg \min_{\hat{X}, \hat{Y}} \left[\sum_{i=1}^K \sum_{\substack{j=i+1 \\ i \neq j}}^K (\hat{X} - \tilde{X}_{ij})^2 + (\hat{Y} - \tilde{Y}_{ij})^2 \right] \quad (2)$$

ここで $\tilde{X}_{ij}, \tilde{Y}_{ij}$ は次のように求められる。

$$(\tilde{X}_{ij}, \tilde{Y}_{ij}) = (\tilde{R}_i \cos \theta_i, \tilde{R}_i \sin \theta_i) \quad (3)$$

$$\cos \theta_i = \frac{\tilde{R}_i^2 + (j-i)^2 d^2 - \tilde{R}_j^2}{2\tilde{R}_i(j-i)d} \quad (4)$$

$$\sin \theta_i = \frac{2}{\tilde{R}_i(j-i)d} \cdot \sqrt{s(s-\tilde{R}_i)(s-\tilde{R}_j)(s-(j-i)d)} \quad (5)$$

ただし、 $s = \frac{1}{2}(\tilde{R}_i + \tilde{R}_j + (j-i)d)$ である。つまり、MPE 手法は座標 (\hat{X}, \hat{Y}) をパラメータとして、任意の測距値 $\tilde{R}_i, \tilde{R}_j (i, j > 1, i \neq j)$ から導かれた座標 $(\tilde{X}_{ij}, \tilde{Y}_{ij})$ との誤差が全アンテナで最小となるように推定座標 (\hat{X}, \hat{Y}) を導く手法である。

3.2 TSE-MERE 手法

まず目的関数を次のように定め位置 \hat{R}_1 を推定する。

$$\arg \min_{\hat{R}_1} \left[\sum_{i=2}^K \sum_{\substack{j=i+1 \\ i \neq j}}^K (\hat{R}_1 - \tilde{R}_{1(ij)})^2 \right] \quad (6)$$

ここで、 $\tilde{R}_{1(ij)}$ は、任意の測距値 $\tilde{R}_i, \tilde{R}_j (i, j > 2, i \neq j)$ から導かれる \hat{R}_1 の値で次式のように求められる。

$$\tilde{R}_{k(ij)} = \sqrt{\tilde{R}_i^2 + (i-k)^2 d^2} \cdot \frac{i-k}{j-i} \sqrt{\tilde{R}_i^2 + (j-i)^2 d^2 - \tilde{R}_j^2} \quad (7)$$

つまり、MERE 手法は \hat{R}_1 をパラメータとして、 \tilde{R}_1 を除く任意の二つの測距値から導かれた $\tilde{R}_{1(ij)}$ に含まれる誤差が全レーダで最小となるような推定距離 \hat{R}_1 を導く手法である。同様に \hat{R}_K についても求める。そして、位置 (\hat{X}, \hat{Y}) は \hat{R}_1, \hat{R}_K を用い、式(3)~(5)のような幾何学的な演算を用いて求める。

4. 数値シミュレーションによる特性評価

検討を行った3手法についてシミュレーションにより評価する。障害物は座標(0,5) [m]に配置をした。車載環境下で考えるために、以下のパラメータを与えた。まず、車幅は2mとした。最大測距誤差 ϵ_{\max} は、近年価格が下がりつつある一般的な車載用レーダの値を用いる。代表的な測距誤差は数十cmである[7],[8]。今回は一例として ϵ_{\max} を文献[9]で得られた0.3mとした。また、レーダの数 K についても一般的な車載用レーダを想定し定める。近距離における障害物を検出するためには広視野角が必要とされる。しかし、一般的な車載測距用レーダは、誤検出を防ぎ装置を簡

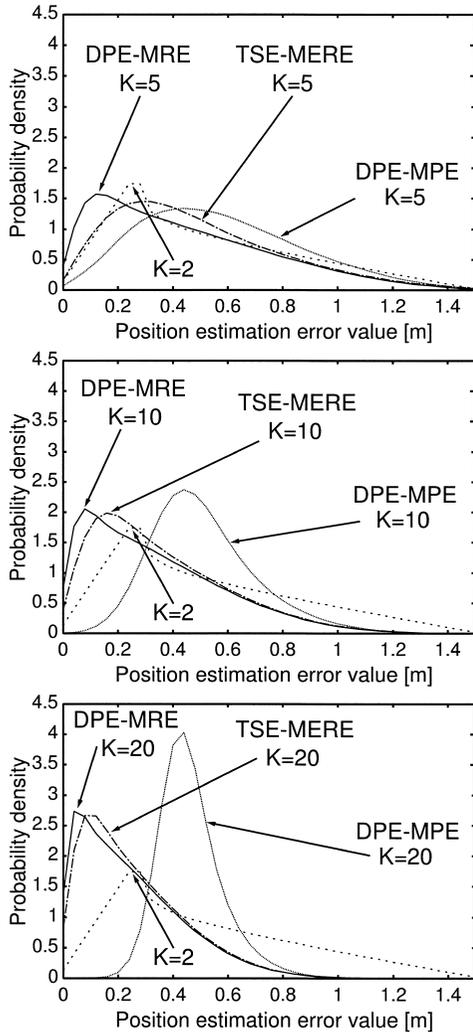


図3 各手法の位置推定誤差分布 ($K = 5, 10, 20$)

Fig. 3 Distribution of target position estimation errors. ($K = 5, 10, 20$)

略化するために視野角が狭い．このようなレーダを用いて近距離レーダネットワークを構築することも含め，レーダの数を $K = 5, 10, 20$ と設定した [5]．参考のため，両端の二つ ($K = 2$) のレーダの測距値 \hat{R}_1 と \hat{R}_2 のみを用いて幾何学的に位置推定を行った場合も示す．図3に位置推定誤差 D の分布を示す．位置推定誤差 D は，障害物が実際に配置されている位置 (X, Y) と推定された位置 (\hat{X}, \hat{Y}) とのユークリッド距離を用い，次のように定義する．

$$D = \sqrt{(X - \hat{X})^2 + (Y - \hat{Y})^2} \quad (8)$$

まず，MRE はレーダ数 $K = 2$ のときと比べて平均値，分散値ともに小さく，優れた特性を示している．また，MERE についてもレーダ数 $K = 10$ 以上で $K = 2$ のときと比べて優れた特性を示している．これらはレーダ数の増加とともに顕著に現れる．また，MRE と MERE を比較すると MRE の方が良い特性を示しているが，その差はレーダ数が増えるにつれ小さくなる．一方，MPE は，レーダの数 K の増加とともにある一定の誤差が生じている．

図3は，推定誤差として一次元的なユークリッド距離 (式 (8)) で評価している．しかし，図3では，障害物に対してどちらの方向に推定誤差が生じたのかが分からない．位置推定精度を議論する際に， x 方向， y 方向を加味した二次元的な位置推定特性を把握することは重要である．したがって，推定された位置の分布を見るために，レーダ数 $K = 20$ のときの位置推定分布を図4に示す．各図，底面を車輛前方の障害物が配置されている座標面を表す．底面には等高線も示す．

まず，すべての手法で共通する特徴を述べる．一つ目として， y 軸方向の推定誤差より x 軸方向の推定誤差の方が大きいことが分かる．これは，アンテナを x 軸に沿って一直線で配置したためである．測距誤差は，各レーダと障害物を結んだ線方向に生じる．この測距誤差を x 軸方向成分と y 軸方向成分とに分けて考えると， y 成分の方が大きくなる．そのため， x 軸方向に比べ y 軸方向の誤差を効果的に抑制できたと考えられる．二つ目の特徴として，等高線から分かるように，図4の分布は最大値を中心に対称であることが分かる．これは，アンテナと障害物との位置関係が対称であるためである．

次に各手法間で見られる特徴を述べる．一つ目として，MRE 手法が最も分布の分散が小さいのが確認できる．特に， Y 座標の誤差が小さい．これは，MRE 手法における目的関数内の誤差 ϵ_k は，他手法と異なり，平均0を中心に対称である一様分布であるためである．このため，MMSE によって効果的に誤差が0へと近づくと考えられる．加えて，アンテナを x 軸に沿って一直線で配置したため， x 軸方向に比べ y 軸方向の誤差を効果的に抑制できたと考えられる．二つ目の特徴として，MPE 手法は他手法と比べ， y 座標の推定誤差が0.5 m ほど車輛側に生じていることが分かる．これは，MMSE を用いて Y 座標を推定する際に，根号，累乗を含んだ非線形な演算 (式 (5)) から導かれた \tilde{Y}_{ij} を用いているためである．この \tilde{Y}_{ij} に含まれる誤差は，平均が0ではない非対称な値となり，推定

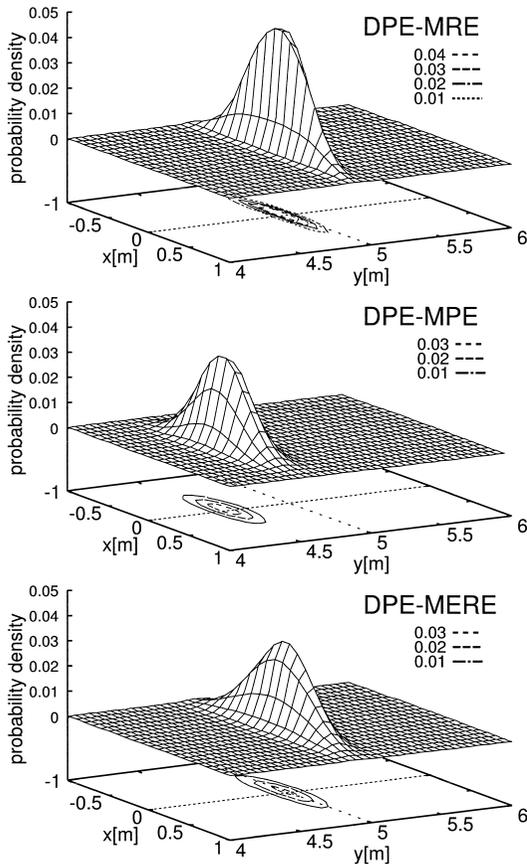


図4 各手法の位置推定分布 ($K = 20$)

Fig.4 Distribution of target position estimation. ($K = 20$)

された Y 座標に誤差が生じたと考えられる。図3において MPE 手法の推定誤差が大きいのもこれが原因である。一方、この MPE 手法は、他手法と比べ、 x 座標の推定誤差が比較的小さい。これは、他手法と比べて、式(3)における x 方向の誤差成分が小さいためである。以上の検討より、 X 座標の推定誤差は MPE 手法が、 Y 座標の推定誤差は MRE 手法が最も小さいこととなる。したがって、これらを組み合わせた手法が、更なる高い位置推定精度を有すると考えられる。

なお、紙面の都合上 $K = 20$ のみしか示していないが、以上で述べた特徴は他のレーダ数 K のときでも得ることができた。ただし、 K の増加とともに位置推定分布の分散は小さくなる。

5. むすび

本論文では、複数のレーダと MMSE を用いて、車輛前方、近距離における障害物の位置を高い精度で推

定することを考えた。具体的には位置推定精度に影響を及ぼす目的関数、推定するパラメータが異なる3種類の MMSE 手法を考え、位置推定精度の観点から車載環境下で比較検討した。その結果、MRE 手法が最も位置推定誤差を抑制できることが分かった。MPE 手法は x 座標の推定は最も誤差が小さいが y 座標の推定に大きな誤差が生じることが分かった。

謝辞 本研究の一部は、「文部科学省 21 世紀 COE プログラム」の助成を受けて行われたものである。記して謝意を表する。

文献

- [1] L. Giubolini, "A multistatic microwave radar sensor for short range anticollision warning," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.49, no.6, pp.2270–2275, Nov. 2000.
- [2] M. Klotz and H. Rohling, "A high range resolution radar system network for parking aid applications," International Conference on Radar Systems, Brest, France, May 1999.
- [3] R. Mende, "A multifunctional automotive short range radar system," German Radar Symposium 2000, Berlin, Germany, Oct. 2000.
- [4] M. Schiementz and F. Folster, "Angle estimation techniques for different 24 GHz radar networks," International Radar Symposium 2003, Dresden, Germany, pp.405–410, Oct. 2003.
- [5] H. Rohling, A. Hoess, U. Luebbert, and M. Schiementz, "Multistatic radar principles for automotive radarnet applications," German Radar Symposium 2002, Bonn, Germany, Sept. 2002.
- [6] M. Klotz and H. Rohling, "24 GHz radar sensors for automotive applications," International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, Wroc law, Poland, vol.1, pp.359–362, May 2000.
- [7] R. Abou-Jaoude, "ACC radar sensor technology, test requirements, and test solutions," IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems., vol.4, no.3, pp.115–122, Sept. 2003.
- [8] M.E. Russell, C.A. Drubin, A.S. Marinilli, W.G. Woodington, and M.J.D. Checolo, "Integrated automotive sensors," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.50, no.3, pp.674–677, March 2002.
- [9] H. Hatano, T. Yamazato, H. Okada, and M. Katayama, "Performance analysis of UWB impulse radar using parallel IPCP receiver," 1st International Symposium on Wireless Communication System, Port Louis, Mauritius, pp.115–119, Sept. 2004.

(平成 17 年 3 月 28 日受付, 7 月 14 日再受付,
8 月 23 日最終原稿受付)