

Evaluation of Position Estimation of a Human Body around a Vehicle by FDTD Propagation Analysis

Yuki ITO*, Hisato IWAI*, Hideichi SASAOKA* and Kiyokazu IEDA**

(Received March 11, 2019)

As a method of estimating position of a human body around a vehicle, a sensing technique using radio wave is considered. In this paper, we assume radio wave is transmitted from a transmitting antenna on the side of a vehicle and the received signals including the reflected waves from a human body are received by multiple receiving antennas mounted also on the side of the vehicle. Based on the array of the received signals, the position of the human is estimated. We calculated the propagation characteristics of the received signals by FDTD. We used the near-field Beamformer and the near-field MUSIC methods as the estimation methods. We showed as a result of the analysis on the estimation that even when the number of the elements of the receiving array is small such as 3, the resolution in the angular domain is high when MUSIC is applied. However, the range resolution is unacceptably low considering the practical usage of the estimation method. We therefore consider a different arrangement of the array antennas to improve the estimation accuracy. We show that the probability that the estimation error becomes 1 m or less can be improved from 50% to 90%.

Key words : position estimation, FDTD, near-field Beamformer, near-field MUSIC

キーワード : 位置推定, FDTD, 近距離 Beamformer 法, 近距離 MUSIC 法

FDTD 伝搬解析による車両周辺における人体位置推定の評価

伊藤 優希, 岩井 誠人, 笹岡 秀一, 家田 清一

1. まえがき

近年, 車両の所有者に対するサービス向上を目的として車両周辺の人体位置を電波により検出する技術が注目されている^{1,2)}. このようなサービスの例として, 不審者の可能性のある人体接近の検出による車両盗難の未然防止³⁾や人体の接近方向に対応するドアの自動開閉などが考えられる. これらのサービスを実現するためには, 車両周辺の人体の正

確な位置を推定する技術を確立する必要がある. たとえばアレーアンテナを用いた電波による位置推定は多く研究されており複雑な反射物がない単純な環境では精度が高いことが示されている⁴⁻⁷⁾. しかしながら, 車両周辺では, 大きな電波反射物体である車両からの反射波が存在し, 直接波のみの環境のような単純な伝搬環境ではなくなる. このような伝搬環境における位置推定特性を明確にするため

* Department of Electronics, Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan
Telephone: +81-774-65-6267, Fax: +81-774-65-6801, E-mail: iwai@mail.doshisha.ac.jp

** Aisin Seiki Co., Ltd., Aichi, 448-8650, Japan

には、車両周辺の伝搬環境を模擬した環境で位置推定精度を評価する必要がある。車両周辺環境における伝搬特性については幾つかの報告がなされている。文献^{8,9)}では、車両内外の伝搬特性が実測により分析されている。また、簡単な車両モデルを用いた車両外周辺環境の伝搬シミュレーション¹⁰⁾がある。しかしながら、緻密にモデル化した車両周辺の伝搬特性を解析したものは少ない。上記のように車両周辺の伝搬特性は多数の複雑な部品で構成される車両の複雑な反射波を考慮する必要があるため、簡単な車両モデルでは十分な評価は困難であると考えられる。緻密にモデル化した車両周辺の伝搬特性を解析する手法として FDTD(Finite Difference Time Domain)計算がある。FDTD 計算は、近年のコンピュータの急速な発展と普及により、無線通信の伝搬解析のような従来よりもスケールの大きい空間を対象とした列車¹¹⁻¹⁴⁾、飛行機内外¹⁴⁻¹⁶⁾などの電磁界解析にも用いられている。また、車室内(車室)環境の伝搬特性評価^{17,18)}に用いられた例もある。

本稿では、緻密な 3D 車両モデルを用いて実環境を再現し、車両周辺に人体が存在する環境の伝搬特性を大規模な FDTD 計算により求める。その得られた伝搬特性を用いて、人体の位置推定精度を分析する。位置推定法として近距離 Beamformer(BF)法および近距離 MUSIC 法を用い、二つのケースにおける位置推定の分析結果を示す。また、アレー配置を考慮し位置推定誤差の改善を検討する。

2. 人体位置推定システムモデル

本稿では、車両の側面に単一送信アンテナと複数受信アンテナを設置する位置検出システムを想定する。送信アンテナから電波(本稿では 2.5 GHz とした)を送信し、車両周辺に存在する人体による反射波を複数の受信アンテナにより受信する。受信信号から得られる複数の伝搬チャネル係数(振幅および位相が検出可能とする)を用いて人体位置を推定する。位置検出方法としては近距離 BF 法および近距離 MUSIC 法を用いた。伝搬チャネル係数の計算方法を次節に示す。

2.1. 人体反射波の伝搬チャネル係数計算方法

送信アンテナから水平偏波の電波を送信した場合の複数受信アンテナにおける伝搬チャネル係数を FDTD 計算により求める。人体位置推定には、人体反射波のみの伝搬チャネル係数が必要である。しかし、人体と車両が存在する場合は、人体反射波だけでなく直接波や車両からの反射波が存在する。Fig. 1 は、これら影響を取り除き人体反射波のみの伝搬チャネル係数を取得する方法の模式図を示している。はじめに、人体が存在しない(車両のみが存在する)場合の送信アンテナと各受信アンテナ間の伝搬チャネル係数(h_1)を求める。これには直接波および車両からの反射波が含まれている。次に、車両と人体が存在する場合の伝搬チャネル係数(h_2)を計算する。それらの差を求めることにより直接波と車両反射波の影響を除去し、人体反射波のみの伝搬チャネル係数($h_3=h_2-h_1$)を求める。ただし、人体による反射波でも、さらに車両で反射して受信されるものはこの方法では除去できず人体位置推定に影響を及ぼす。

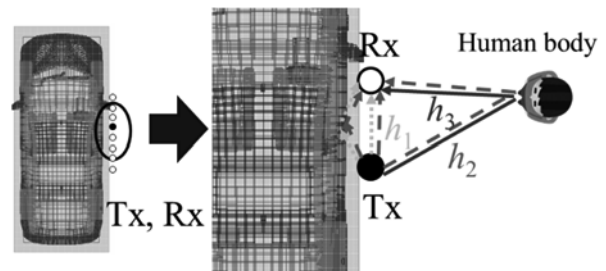


Fig. 1. Schematic diagram of channel coefficient calculation of reflected wave from human.

2.2. 人体位置推定法

一般的な到来方向推定では、波源が遠方にあるため到来波を平面波と扱うことが通常である。しかし、波源が近傍領域にある場合には、到来波は球面波として扱う必要がある。本稿で想定する環境では、車両から人体までの距離はアレー開口長と比較して十分遠方とは言えず、近傍領域と取り扱う必要がある。そのため、到来方向のみを推定する方法である一般の BF 法や MUSIC 法ではなく、文献⁴⁾で示される球面波モードベクトルに基づく近距離 BF 法および近距離 MUSIC 法を用いる。BF, MUSIC 法の

到来方向推定は一般的に角度の一次元領域でスペクトルのピークを探索する。したがって単一アレーアンテナを用いた場合これらの方法では基本的に距離を含めた位置推定はできない。これに対して、近距離 BF および MUSIC 法は、角度と距離の二次元領域でスペクトルのピークを探索する。この二次元スペクトルのピークを人体の推定位置とするため単一アレーアンテナでも距離方向を含めた位置推定が可能である。

2.2.1. 近距離 Beamformer 法

Fig. 2 に示すように、素子数が $K=2p+1$ (p : 正の整数)、素子間隔が d の等間隔リニアアレーで受信することを考える。なお、アレーの中心素子が座標原点に位置し、この素子を受信信号の位相基準とする。また、第 k 素子 ($k=-p, \dots, p$) の受信信号を $h_k(t)$ とする。電波源は L 個存在し、 l 番目の波源は、原点を通るアレーのブロードサイドからの角度 (DOA: Direction of Arrival) θ_l 、および原点からの距離 r_l ($l=1, 2, \dots, L$) に位置しているとする。この第 l 波源に対するステアリングベクトル $\mathbf{a}(r_l, \theta_l)$ は次式で表される。

$$\mathbf{a}(r_l, \theta_l) = \begin{bmatrix} \frac{r_{0,l}}{r_{-p,l}} \exp(-j\tau_{-p,l}), \dots \\ \frac{r_{0,l}}{r_{p,l}} \exp(-j\tau_{p,l}) \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

$$r_{k,l} = r_{0,l} \sqrt{1 + \left(\frac{kd}{r_{0,l}}\right)^2 - \frac{2kdsin\theta_l}{r_{0,l}}} \quad (2)$$

$$\tau_{k,l} = \frac{2\pi}{\lambda} (r_{k,l} - r_{0,l})$$

ここで、 λ は波長、 $r_{k,l}$ は第 l 波源と第 k 素子の距離、 $\tau_{k,l}$ は第 l 波源から到来波の第 k 素子における位相遅れ (位相基準は原点) である。アレー受信ベクトル \mathbf{h} は次式で表せる。 h_k は第 k 素子の伝搬チャネルである。ただし、 $[\]^T$ は転置行列を示している。

$$\mathbf{h} = [h_{-p}, \dots, h_0, \dots, h_p]^T \quad (3)$$

近距離 Beamformer 法は、アレーアンテナのメインローブを角度、距離にわたって走査し、アレーの出力電力が大きくなる波源位置を探索する手法である。次式で表される BF 処理による出力電力が極

大となる位置 (r, θ) を本研究では推定位置とした。

$$P_{BF}(r, \theta) = \frac{\mathbf{a}^H(r, \theta) \mathbf{R}_{hh} \mathbf{a}(r, \theta)}{\mathbf{a}^H(r, \theta) \mathbf{a}(r, \theta)} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_{hh} = [\mathbf{h}\mathbf{h}^H]$$

ただし、 $[\]^H$ はエルミート行列を示している。

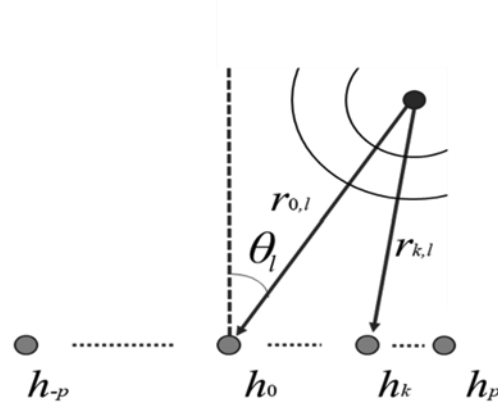


Fig. 2. Linear array and near-field wave source.

2.2.2. 近距離 MUSIC 法

近距離 MUSIC 法は、伝搬チャネルの相関行列の固有値解析により固有ベクトルを求め、MUSIC スペクトルが最大となる波源位置を探索する手法である。次式で表される MUSIC スペクトルが極大となる位置 (r, θ) を推定位置とした。

$$P(r, \theta) = \frac{\mathbf{a}^H(r, \theta) \mathbf{a}(r, \theta)}{\mathbf{a}^H(r, \theta) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{a}(r, \theta)} \quad (5)$$

$$\mathbf{E}_N = [e_2, \dots, e_K]$$

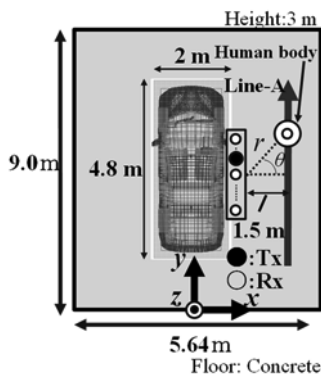
ただし、 e_i は \mathbf{R}_{hh} の固有ベクトル、固有ベクトルに対応する固有値 μ_i は $\mu_2 > \dots > \mu_K$ と大きい順に並んでいる。

3. 人体位置推定精度の評価環境

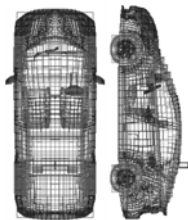
本研究で想定する環境モデルを Fig. 3 に示す。他の車両が近辺にない屋外駐車場環境を想定し、FDTD による伝搬特性を解析する。5.64 m × 9.0 m × 3.0 m の大きさの三次元空間に車両、送受信アンテナ、人体を配置する。下面 (床) は 0.1 m の厚さのコンクリート層、上面および側面は吸収境界 PML (Perfectly Matched Layer) とする。車両の大きさは 2.0 m × 1.5 m × 4.8 m であり、複数の立方体を組み合わせた 3D メッシュモデルである (Fig. 3)

(b). セルサイズは、電波の波長の 1/10 である 0.012 m とした. 車両の側面から 0.12 m 離れた位置に送受信アンテナを設置した. 人体は Fig. 3 (c)に示すように二種類の大きさの円柱を組み合わせて簡易にモデル化した. 人体の中心位置は、受信アレーの中心位置を原点とする xy 平面に平行な二次元平面上の極座標(距離 r , 角度 θ)により表す. また、車両を構成する物質、人体モデルの電気定数を Table 1 に示す^{11, 13)}. Table 2 に FDTD 計算に用いた各種計算諸元を示す. なお、素子間隔を半波長で固定しているので、素子数とアレー開口長が比例している. 評価対象とした素子数は同表に示すように $N=3, 11, 27$ とする. なお、今回は雑音の影響を考慮していない.

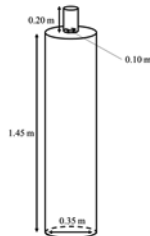
位置推定の評価は二つのケースを対象とする. まず、人体の中心位置を $(r, \theta) = (2.25 \text{ m}, 45^\circ)$ に固定した場合を Case 1 とする. この場合の角度および距離の二次元スペクトル(BF および MUSIC スペクトル)を示す. 次に、人体が Fig. 3 (a)に示す Line-A 上を移動した場合を Case 2 とする. この場合の位置推定誤差を累積確率分布で示し、位置推定精度を評価する.



(a) Arrangement of vehicle and human body



(b) Vehicle model



(c) Human body model

Fig. 3. Evaluation environment.

Table 1. Electric constants of vehicle and human body model.

Material	Relative permittivity	Conductivity [S/m]
Vehicle body		∞
Inner wall	2.25	2.26×10^{-4}
Seat	1.00	1.00×10^{-7}
Window	5.00	1.00×10^{-7}
Human body	52.7	1.77

Table 2. FDTD calculation parameter.

Excitation frequency	2.5 GHz
Excitation polarization	y direction
Cell size	0.012 m cubic
Position of transmit antenna	(1.0, 5.01, 0.8)
Number of receiving antennas N	3, 11, 27
Interval of receiving antennas	0.06 m
Center position of receiving antennas	(1.0, 4.5, 0.8)

4. 人体位置推定結果

4.1. BF・MUSIC スペクトラム

人体位置を $(r, \theta) = (2.25 \text{ m}, 45^\circ)$ に固定した場合の近距離 BF および近距離 MUSIC 法を用いた場合の二次元スペクトルを Fig. 4 および 5 に示す. 横軸および縦軸は、それぞれ探索した角度および距離を示している. スペクトルの値は探索範囲内の最大値で正規化している. 黒丸は実際の人体モデルの位置を示している. また、スペクトルのピークの角度・距離の値をまとめて Table 3 に示す.

分解能の評価指標として -3 dB 以上のスペクトル値の領域を考える. 同図中に黒線でその領域を示し、その領域を S とする. また、それぞれにおける S の角度および距離方向の幅を Table 4 にまとめて示す. 同表に示すように、素子数の増加に伴い両手法ともに S の角度、距離幅が減少している. また、 $N=3$ および 11 の角度幅を比較すると素子数増加により特に BF 法において大きな分解能の向上がみられる. また、MUSIC 法では、 $N=3$ と素子数が少ない場合においても高い分解能であることがわかる. 一方、

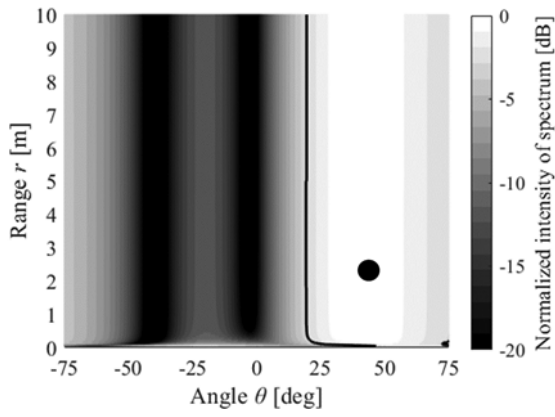
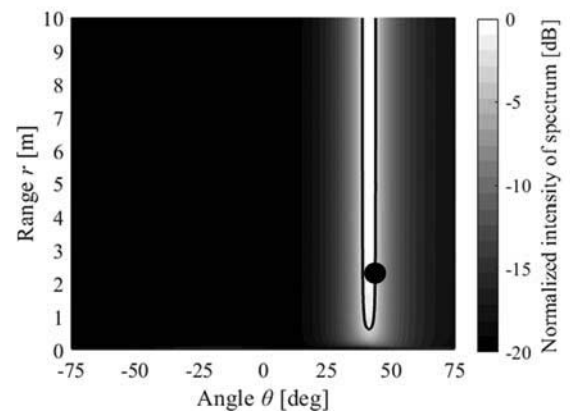
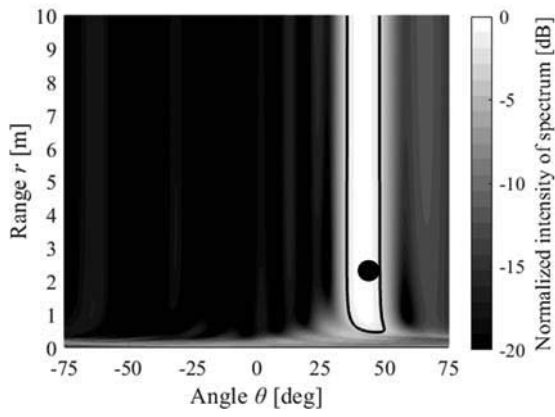
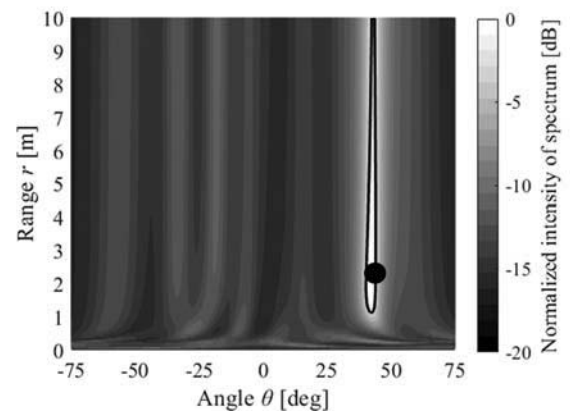
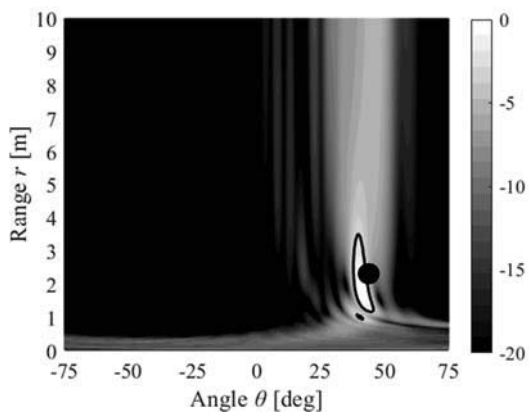
(a) $N=3$ (a) $N=3$ (b) $N=11$ (b) $N=11$ (c) $N=27$

Fig. 4. BF spectrum.

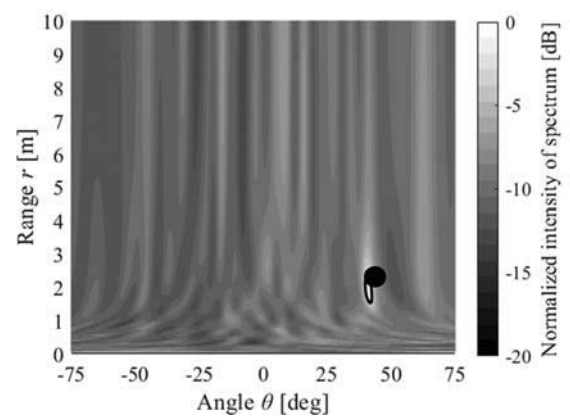
(c) $N=27$

Fig. 5. MUSIC spectrum.

距離方向に関しては素子数が少ない場合($N=3$ および 11)では分解能が低く正確な推定は困難である。素子数を増加させることで両手法において S の幅が低下し分解能が向上する。しかし、実用を想定した際の現実的な素子数としてたとえば $N=11$ を考えると、この素子数では十分な分解能とは言えない。この低い分解能が、位置推定精度に影響を与え位置推定誤差が大きくなる。これについては次節で示す。

また、スペクトルのピークと実際の人体位置の誤差は、 $N=11$ の場合、両手法ともに角度および距離方向それぞれにおいて約 3.5° , 0.3 m である。この誤差は実用的な観点からは十分小さいと言えるが、分解能が低くピークは不明瞭であり、雑音を考慮すると位置推定精度に大きく影響すると予想される。

Table 3. Range and angle of spectrum peak.

		Range [m]	Angle [deg]
BF	(a) $N=3$	≥ 10.0	40.9
	(b) $N=11$	1.95	41.4
	(c) $N=27$	1.70	41.3
MUSIC	(a) $N=3$	≥ 10.0	41.2
	(b) $N=11$	1.95	42.0
	(c) $N=27$	1.90	41.1

Table 4. Width of S in range and angle.

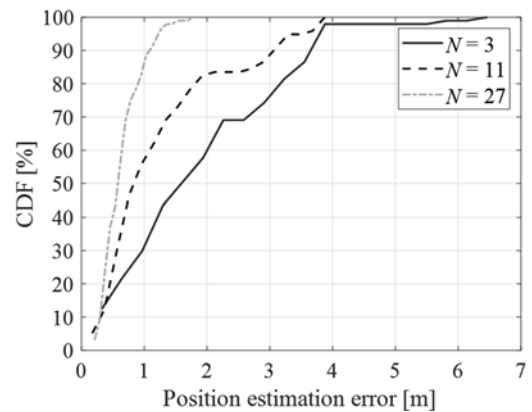
		Range [m]	Angle [deg]
BF	(a) $N=3$	≥ 10.0	≥ 55.4
	(b) $N=11$	≥ 10.0	12.7
	(c) $N=27$	2.20	7.80
MUSIC	(a) $N=3$	≥ 10.0	5.20
	(b) $N=11$	≥ 10.0	3.80
	(c) $N=27$	0.950	2.60

4.2. 人体位置推定誤差

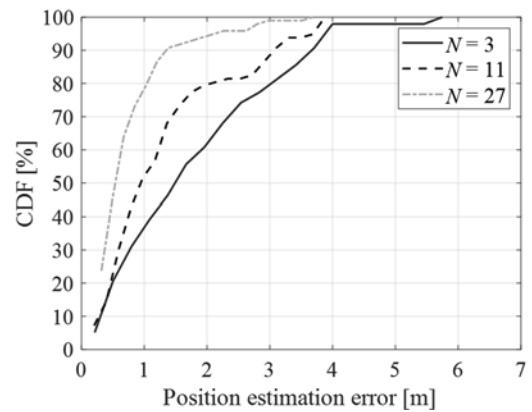
人体が Fig. 3(a)の Line-A 上を移動した場合の位置推定誤差を Fig. 6 に示す。同図は、人体の実際の位置と推定位置との距離を位置推定誤差とし、その累積確率分布を示している。また、位置推定精度の評価の指標として位置推定誤差が 1 m 以下となる確率を両手法まとめて Table 5 に示す。

Table 5 から BF および MUSIC 法において $N=3$ および 11 を比較すると、素子数の増加によりそれぞれ 27% , 16% の改善が得られている。また、 $N=11$ の場合は、両手法ともに約 50% 以上の位置推定誤差が 1 m 以下である。しかし、本稿の目的は車両周辺の人体の位置推定でありこれらの推定精度は必ずしも十分小さいとは言えない。位置推定誤差をさらに小さくする方法の検討が必要である。

この位置推定誤差が生じる主な原因を確認するために、 $N=11$ の場合の車両がある場合(A)とない場合(B)を比較した推定誤差分布を Fig. 7 に示す。車両がない場合位置推定誤差が 1 m 以下の確率は約 90% であり、車両がある場合と比較すると推定誤差が小さい。この結果から、車両からの反射波の影響が位置推定誤差に影響していると考えられる。このため、車両が存在する場合の伝搬特性を考慮した対策手法の検討が必要である。



(a) BF



(b) MUSIC

Fig. 6. CDF of position estimation error.

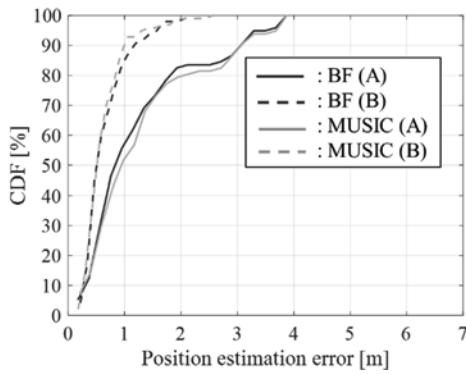


Fig. 7. CDF of position estimation error
($N = 11$ (A/B)).

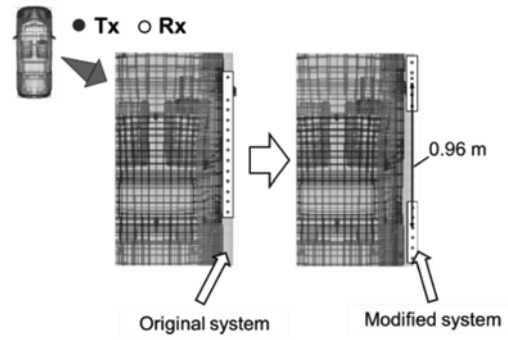
Table 5. Probability of position estimation error less than 1 m.

		Probability of position estimation error less than 1 m [%]		
		$N = 3$	$N = 11$	$N = 27$
A	BF	30	57	87
	MUSIC	36	52	79
B	BF	40	88	100
	MUSIC	46	93	99

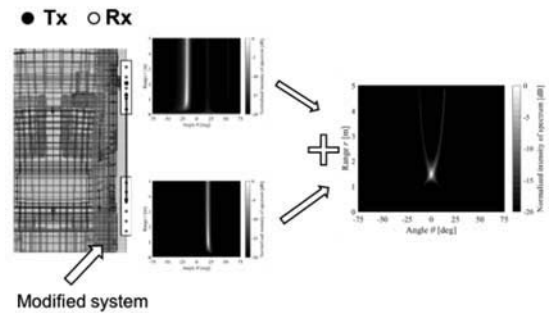
5. 推定精度向上の検討

推定精度を改善するためにアレーアンテナの配置を検討する。距離方向に対する分解能が高くない理由の一つとして、開口長が小さいと考えられる。開口長を拡大する必要があるが、素子数の増加は信号処理やコストの観点からも避けるべきである。そこで、受信素子を二つに分けて Fig. 8 (a)のように配置する。二つのアレーの距離は 0.96 m とした。このアレー配置は、もとの開口長と比較して約 2 倍になっている。この方式の位置推定手順を模式図として Fig. 8 (b)に示す。二つのアレーにおいて各々で BF・MUSIC スペクトルを計算する。この得られたスペクトルを足し合わせたスペクトルから人体位置を推定する。

Fig. 9 に二種類のアレー配置で人体が Line 上を移動した場合の位置推定誤差の累積確率分布を示す。受信素子は $N = 11$ である。位置推定誤差が 1 m 以下となる確率は両手法ともに 50% から 90% となり改善がみられた。

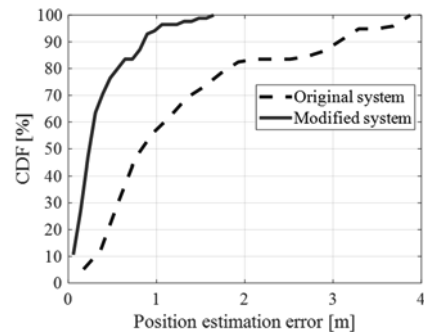


(a) Arrangement of array antennas

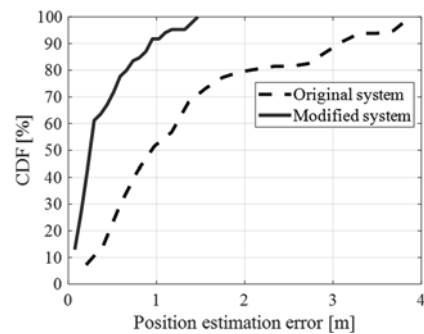


(b) Position estimation procedure

Fig. 8. Position estimation method in modified system.



(a) BF



(b) MUSIC

Fig. 9. CDF of position estimation error in original and modified systems.

6. まとめ

車両周辺の人体位置を推定する方式の推定精度を評価することを目的として、車両周辺に人体が存在する環境で大規模 FDTD 計算を行い、近距離 BF 法および近距離 MUSIC 法を用いて位置推定精度を評価した。人体位置を固定した場合の結果を用いて、両手法のスペクトルを示した。角度方向に関して MUSIC 法では受信素子数が少ない場合においても比較的高い分解能であった。一方、距離方向に関しては現実的な素子数を考えると分解能が十分とは言えない。次に、人体が車両周辺の直線上を移動した場合の位置推定誤差分布を示した。車両の有無に関する 2 つのケースの推定誤差を比較し、車両からの反射波が位置推定誤差に影響することを示した。このため、車両が存在する場合の複雑な伝搬特性を考慮した位置推定方式の検討が必要である。また、推定精度を改善するために異なるアレーアンテナの配置を検討した。受信素子数は同じで開口面を広くすることで推定誤差が 1 m 以下となる確率を 50% から 90% に改善可能であることを示した。

参考文献

- 高瀬由佳, 家田清一, 佐藤健斗, 西森健太郎, “MIMO センサを用いた到来方向の車載基礎検討”, 信学ソ大, B-1-123 (2017).
- 百田光希, 矢畑皓平, 新浩一, 西正博, “実環境を考慮した車両周辺におけるヒト検知システムの特性評価”, 信学技報, **116**[397], AP-2016-129, 1-6 (2017).
- 大槻好之, “マルチセンシングによるカーセキュリティ・システム”, 計測と制御, **44**[3], 220-223 (2005).
- 菊間信良, 田中健佑, 榊原久二男, “アレーアンテナを用いた電波源位置推定の今昔物語”, 信学技報, **117**[150], AP2017-61, 87-92 (2017).
- 菊間信良, 山下祐希, 平山祐, 榊原久二男, “DOA-Matrix 法と SAGE アルゴリズムを併用した複数の近傍波源の位置推定”, 信学論(B), **J94-B**[9], 1046-1055 (2011).
- N. Kikuma, K. Tanaka, K. Sakakibara, “Performance Improvement of Localization of Radio Sources by Using Spatial Smoothing Processing in Near-Field DOA-Matrix Method with SAGE Algorithm”, *Proc. IEEE MTT-S International Conference* (2017).
- 秋元広幸, 高橋応明, 宇野亨, 有馬卓司, “MUSIC 法による近傍波源推定の基本的検討と PCB への応用”, 信学論(B), **J87-B**[9], 1434-1441 (2004).
- D. Balachander, T. R. Rao, N. Tiwari, “In-Vehicle RF Propagation Measurements for Wireless Sensor Networks at 433/868/915/2400MHz”, *Proc. International Conference on Cryptography, Security and Privacy 2013* (2013).
- T. O. Olasupo, C. E. Otero, L. D. Otero, K. O. Olasupo, I. Kostanic, “Path Loss Models for Low-Power, Low-Data Rate Sensor Nodes for Smart Car Parking Systems”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, **19**, 1774-1782 (2017).
- P. L. Iturri, E. Aguirre, L. Azpillicueta, U. Garate, F. Falcone, “ZigBee Radio Channel Analysis in a Complex Vehicular Environment”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, **56**, 232-245 (2014).
- 日景隆, 入江洋平, 野島俊雄, 山田渉, 杉山隆利, “列車内無線サービスにおける乗客を有する車両内伝搬特性の FDTD 解析”, 信学技報, **111**[376], AP2011-153, 43-46 (2012).
- 白船雅己, 日景隆, 野島俊雄, 佐々木元晴, 山田渉, 杉山隆利, “FDTD 解析による高速鉄道車両内 5GHz 帯無線接続サービスの伝搬特性推定”, 信学論(B), **J97-B**[9], 762-769 (2014).
- 川原悠輔, 河野太一, 鷺見勇紀, 日景隆, 野島俊雄, 大宮学, “並列 FDTD 解析を用いた準閉空間モデルの電磁界解析”, 信学技報, **205**[107], EMCJ2005-30, 55-60 (2005).
- 安孫子友祐, ルイレイハリス, 日景隆, 野島俊雄, 渡辺聡一, 篠塚隆, “大規模 FDTD 解析と界強度ヒストグラムを用いた閉空間内電磁界評価法”, 信学論(B), **J90-B**[11], 1097-1105 (2007).
- 木下真樹, 日景隆, 野島俊雄, ニッ森俊一, 河村暁子, 米本成人, “大規模 FDTD 解析を用いた航空機における無線 LAN 電波の伝搬特性評価”, 信学技報, **112**[155], MW2012-50, 149-152 (2012).
- 関口徹也, 日景隆, 山本学, 野島俊雄, ニッ森俊一, 河村暁子, 米本成人, “大規模 FDTD 解析を用いた 4.4GHz 帯 WAIC システムのための機内-機外伝搬特性推定”, 信学技報, **117**[382], AP2017-172, 121-124 (2018).
- 大平将康, 安在大祐, 王建青, “車体表面電界通信方式における伝搬特性及びその向上手法の検討”, 信学論(B), **J99-B**[6], 424-431 (2016).
- 森田淳樹, 岩井誠人, 笹岡秀一, “車両モデルを用いた FDTD 法による車室内伝搬特性の解析”, 信学技報, **116**[397], AP2016-135, 33-38 (2017).