

人体の散乱周波数特性を考慮した 高速UWBパルスレーダイメージング技術

阪本卓也*, 佐藤 亨 (京都大学)

Study on the frequency-dependent scattering characteristic of human body
for a fast UWB radar imaging algorithm
Takuya Sakamoto and Toru Sato (Kyoto University)

Abstract

The UWB pulse radars are promising as an environment measurement method for surveillance cameras. Radar imaging of a nearby target is known as one of ill-posed inverse problems, for which a various studies have been done. We have proposed a fast algorithm of radar imaging, SEABED algorithm, for UWB pulse radars. This algorithm is based on a reversible transform, BST (Boundary Scattering Transform), between the target shape and the observed data. This transform enables us to estimate target shapes quickly and accurately for perfect conductors, which does not depend on the frequency. However, the electric parameters of a human body strongly depends on the frequency. In this paper, we investigate the frequency-dependency of the scattering on the surface of a human body. We have quantitatively evaluate the offset error of the ranging with UWB pulse radars.

キーワード：人体，UWBパルスレーダ，形状推定，周波数依存性
(human body, UWB pulse radar, shape estimation, frequency-dependency)

1. はじめに

テロや犯罪などを防止するための監視システムが盛んに導入されている。光学カメラを利用した監視システムはプライバシーの観点から問題が指摘されている。そこでUWB(超広帯域)パルスレーダを現行の光学カメラシステムの代替あるいは補完として使用することが有効と考えられる。レーダを使用することで人体の皮膚などのテクスチャは記録されない一方、体型の立体形状を正確に推定できるためである。レーダによりアンテナ近傍の物体形状を推定する問題は設定不適切逆問題の一種として知られ、多くの手法が提案されてきた[1]~[4]。これらの従来手法は反復計算に基づくために長い計算時間が必要であり、リアルタイム用途への応用は困難であった。この計算時間の問題を解決するために、我々は境界散乱変換(Boundary Scattering Transform; 以下BSTと略す)に基づいた高速な形状推定法を提案してきた[5]~[8]。このアルゴリズムはSEABED(Shape Estimation Algorithm based on BST and Extraction of Directly scattered waves)法と呼ばれ、目標形状とデータの間になり立つ可逆な変換関係であるBSTにより、反復に基づくことなく目標形状をデータから直接推定できる特徴を有する。ただし、この手法は目標が明瞭な境界を有するという条件を仮定しているため、任意の問題設定

に適用できるわけではない。しかし、地中レーダ等と異なり、監視システムなどの応用においては対象物体の多くがこの条件を満たしている。SEABED法は目標境界からの散乱波を用いてアンテナと散乱点の距離を測定する。しかし、散乱波形は一般に目標形状に依存するため、相関処理が正常に機能せず推定距離に誤差が生じる。我々はSEABED法による目標形状推定とグリーン関数積分による散乱波形推定を反復的に処理する高精度形状推定アルゴリズムを開発した[9],[10]。このアルゴリズムにより、散乱波形の歪みを補償し、中心波長 λ に対して目標形状推定精度を約 0.01λ 程度にまで向上させた。これまでは目標物体として完全導体などの電気特性に周波数依存性のない材質を仮定してSEABED法の特性を検討してきた。しかし、SEABED法を人体のイメージングに使用する場合には人体の誘電率および導電率が周波数に依存することにより、散乱波形の歪みが生じる。これは従来の狭帯域レーダにはない超広帯域レーダに特有の問題であり、UWB信号を利用するSEABED法を使用する上で検討する必要がある。本稿では人体の周波数特性による測距誤差を定量評価し、SEABED法の推定像に与える影響を議論する。

2. SEABED 法

2.1 システムモデル

ここではモノスタティックレーダシステムを扱う。無指向性アンテナを走査しながらモノサイクルパルスの送受信を繰り返すことで得られる受信波を A/D 変換し、メモリ内に保存する。得られるデータから信号処理により目標の形状を推定する。本稿では 2 次元問題を扱い、電波の伝播は TE 波とする。目標及びアンテナは、図 1 上図に示すように平面内に存在すると仮定し、目標は明瞭な境界を有し、均一な誘電率を有する物体であると仮定する。目標及びアンテナが存在する空間を実空間と呼ぶ。実空間の点を (x, y) で表現する。ここで x 及び y はいずれも真空中での送信パルスの中心波長 λ により正規化する。但し $y > 0$ とする。アンテナの走査は実空間の x 軸上とする。アンテナの位置 $(x, y) = (X, 0)$ での受信電界を $s'(X, Y)$ と定義する。但し、 Y は送信からの時間 t 及び真空中の光速 c を用いて $Y = ct/(2\lambda)$ と定義する。 $y > 0$ であるため、 $Y > 0$ が成り立つ。但し、アンテナの位置における電界の瞬時包絡線が最大となる時刻を $t = 0$ とする。雑音除去を目的として $s'(X, Y)$ の Y 方向に送信波形を用いた整合フィルタを適用することで得られる受信波形を新たに $s(X, Y)$ と呼び、処理に用いる。 (X, Y) で表現される空間をデータ空間と呼ぶ。図 1 下図は、上図の物体形状に対するデータ空間の例を示す。この曲線を疑似波面と呼ぶ。ここで X 及び Y はそれぞれ送信パルスの中心波長及び送信パルスの中心周期で正規化されている。本稿では $s(X, Y)$ を用いて目標形状を推定する問題を扱う。データ空間から実空間への変換は形状推定に他ならない。

2.2 境界散乱変換と逆変換

SEABED 法は目標形状とパルスの遅延時間の中に成り立つ可逆な変換関係を利用したレーダイメージング手法である。SEABED 法は目標形状を逆変換により直接的に推定可能であり、その解は数学的に逆問題の正確な解となっている。

2 次元の境界散乱変換は次式で表わされる [5]。

$$X = x + ydy/dx \quad (1)$$

$$Y = y\sqrt{1 + (dy/dx)^2} \quad (2)$$

ここで (X, Y) の軌跡は前節で述べた疑似波面に相当する。 (x, y) は目標境界面上の点であり、 $y > 0$ 及び $Y > 0$ を仮定する。

境界散乱変換の逆変換は次式で表わされる。

$$x = X - YdY/dX \quad (3)$$

$$y = Y\sqrt{1 - (dY/dX)^2} \quad (4)$$

式 (4) の y が実数となる条件より $|dY/dX| \leq 1$ が満たされる必要がある。この条件は疑似波面を推定する際に手がかりとして使用することができる。式 (3) 及び (4) を逆境界散乱変換 (Inverse Boundary Scattering Transform; 以下 IBST と略す) と呼ぶ。

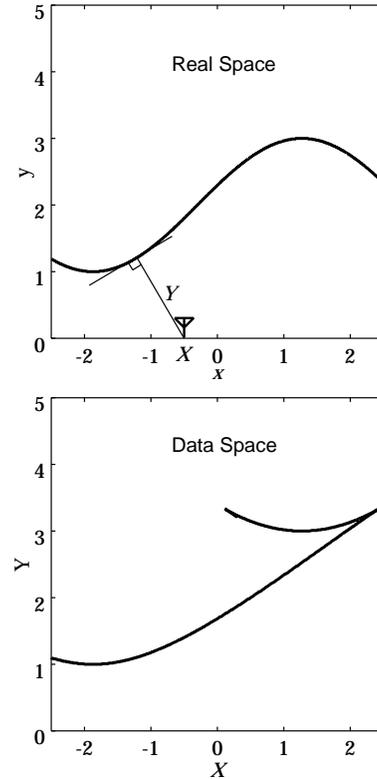


図 1 目標境界と疑似波面の例

Fig. 1 An example of a target shape and quasi wavefronts.

SEABED 法では最初に、 $s(X, Y)$ から疑似波面の抽出を行なう。疑似波面は $ds(X, Y)/dY = 0$ 及び $|dY/dX| \leq 1$ の条件を満たすように選ぶ。後者の条件は式 (4) の Y が実数となるために必要である。疑似波面として点集合 (X, Y) を逐次抽出し、大きな電力を有するものを選択し、不要成分を除去する。最後に、抽出した疑似波面に IBST を適用し、目標形状を推定する。

3. 人体の電気特性

人体の電気特性は米国 FCC (Federal Communications Commission) によって 150MHz から 5.8GHz までの範囲に関して公開されている [11]。人体の比誘電率および導電率を図 2 および図 3 に示す。比誘電率については全周波数範囲にて約 20% 程度の変化が確認できる。導電率については同周波数帯にて約 6 倍もの大きな変化が確認できる。伝搬インピーダンス $Z(\omega)$ は比誘電率 $\epsilon(\omega)$ および導電率 $\sigma(\omega)$ を用いて次式で表される。

$$Z(\omega) = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma(\omega) + j\omega\epsilon_0\epsilon(\omega)}} \quad (5)$$

ここで ϵ_0 および μ_0 はそれぞれ真空の誘電率及び透磁率である。また、 ω は角周波数である。式 (5) により求められる人

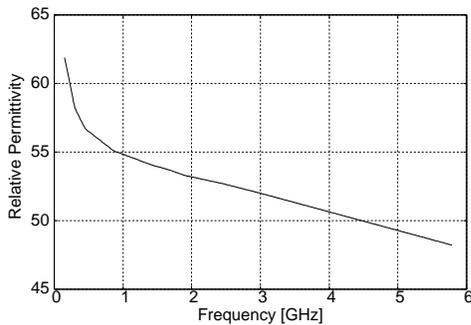


図 2 人体の誘電率の周波数特性

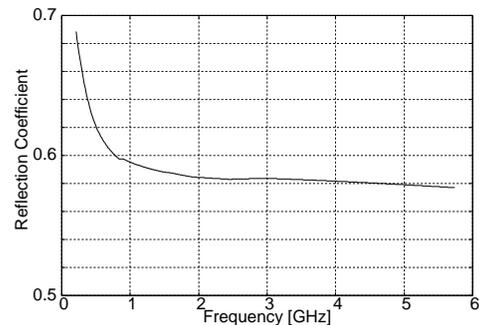


図 5 平面波垂直入射の場合の人体の電力反射係数

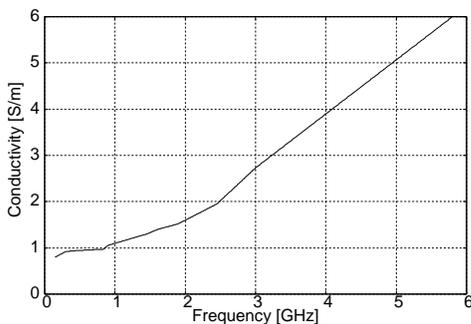


図 3 人体の導電率の周波数特性

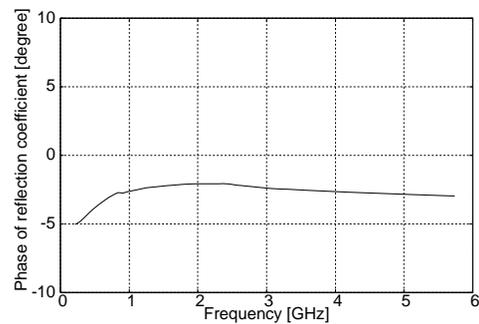


図 6 平面波垂直入射の場合の人体の反射係数の位相特性

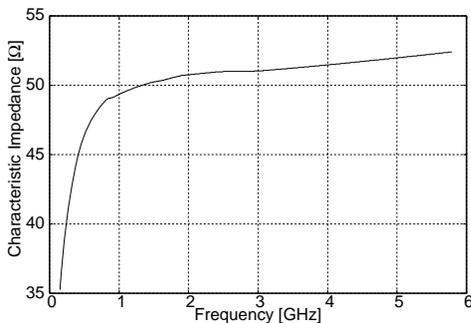


図 4 人体の伝搬インピーダンスの周波数特性

体の伝搬インピーダンスの大きさを図 4 に示す．約 1GHz よりも大きな周波数に対しては $Z(\omega)$ は約 50Ω 程度であり，周波数の増加に伴って緩やかに大きくなる傾向以外は大きな周波数依存性は見られない．これは式 (5) において ω が大きくなると σ の影響が小さくなり， σ の強い周波数依存性が影響しなくなるためである．一方，1GHz よりも低い周波数帯においてはインピーダンスが急激に低下している．

以上のとおり，人体の伝搬インピーダンスは 1GHz を境に，その周波数依存性が大きく異なる．UWB パルスレーダにおける実際の人体からの散乱波は，上記の電気特性と形状との双方の要因により決まる．ここでは簡単のために，空气中に設置された無限平板に平面波が入射する場合の単純なモデルにより散乱波形歪みの評価を行う．このモデルにより人体の

材質のみによる影響を見積もり，形状に依存しない議論が可能である．SEABED 法はモノスタティックレーダを想定し，目標境界の法線方向の散乱波のみを扱うことから，送信波の入射方向を目標境界に対し垂直にとる．以上のモデルの電圧反射係数 $R(\omega)$ は次式で示される．

$$R(\omega) = \frac{Z(\omega) - Z_0}{Z(\omega) + Z_0} \quad (6)$$

電力反射係数 $|R(\omega)|^2$ を図 5 に示す．同図より，反射係数は全体として低域通過型フィルタの特性を有するものの，1GHz よりも高い周波数における周波数依存性はそれほど大きくはない．一方，1GHz よりも低い周波数帯においては急激に反射係数が大きくなることからわかる．電圧反射係数の位相特性を図 6 に示す．位相に関しては，全帯域において高々 -5 度であるものの 2GHz よりも低い周波数に対して比較的大きな位相変化が確認できる．以上で議論してきた人体の電気特性の測距精度への影響について，次節で議論する．

4. 人体の散乱と周波数特性

数値計算に基づく研究において UWB パルスレーダの送信波形としてモノサイクルパルスがしばしば用いられる [5], [6]．モノサイクルパルス $p(t)$ は次式で表され，レイズドコサインにより正弦波の 1 周期を切り出したような波形である．

$$p(t) = -\frac{1}{2}(1 + \cos \omega_0 t) \sin \omega_0 t \quad (-\pi \leq \omega_0 t \leq \pi) \quad (7)$$

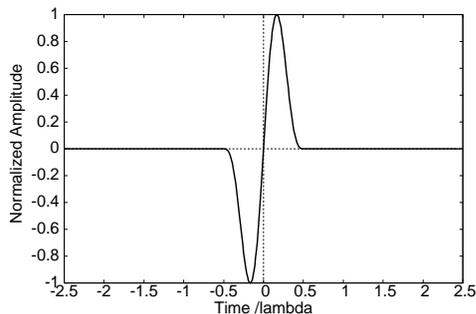


図7 モノサイクルパルスの波形

ただし $\omega_0 t < -\pi$ または $\omega_0 t > \pi$ では $p(t) = 0$ と定義する．図7にモノサイクルパルスの波形を示す．ただし同図の横軸に相当する時間は中心波長に対応する時間で正規化されている．こうして生成されるモノサイクルパルスの比帯域は96.3%であり，中心波長と距離分解能が同程度となる．したがって，モノサイクルパルスの占有帯域幅は中心周波数 $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ 程度となる．以下では，UWB 信号の典型例として上記のモノサイクルパルスを取り上げ，人体からの散乱波形の歪みを評価する．

中心周波数 $f_0 = 1\text{GHz}$ の場合のモノサイクルパルスに対し，前節の人体の反射係数 $R(\omega)$ をフィルタとして適用することで平面形状で近似した人体からの散乱波形を得る．図8に送信波形および受信波形をそれぞれ実線および破線で示す．ただし，振幅は入射波で正規化されている．人体の伝搬インピーダンスは真空のインピーダンスよりも小さいため，散乱波形はほぼ逆位相となっている．散乱波のピークは入射波のピークに対して約76%であり，完全導体に対して-2.4dBとなる．図9は図8の送信波と散乱波のピーク振幅を合わせたものである．ただし，散乱波は比較しやすいよう逆位相にしている．同図のとおり，時間領域では歪みは信号振幅に比べて小さい．

SEABED 法では送信波形に整合したフィルタを受信信号に適用することで遅延時間を得る．モノサイクルパルスの中心周波数をさまざまに変化させて，遅延時間を推定し，その推定誤差を図10に示す．この誤差は歪みに起因するものであるため，オフセット誤差となる．同図より，遅延時間を長く推定する傾向にあることがわかる．また，1GHz 程度よりも低い中心周波数に対してオフセット誤差が特に大きいことも確認できる．また，中心周波数が高い場合でも一定のオフセット誤差が残ることも確認できる．遅延時間を長く推定する傾向にあるのは，図6の位相特性が影響している．遅延時間推定誤差を距離換算し，中心波長で正規化したものを図11に示す．モノサイクルパルスの場合には距離分解能がおよそ中心波長と等しいため，同図は実用上の影響を見積もるのに適当である．同図より1GHz よりも低い周波数では推定誤差が著しく増加している．また，2GHz よりも高い周波数帯でも，周波数が高くなるにつれて緩やかに誤差の増加が確認できる．同図より，オフセット誤差は1%未満と小さいものの，高精度レーダ

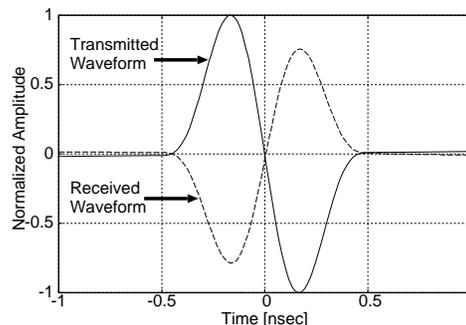


図8 モノサイクルパルス入射時の人体からの散乱波形

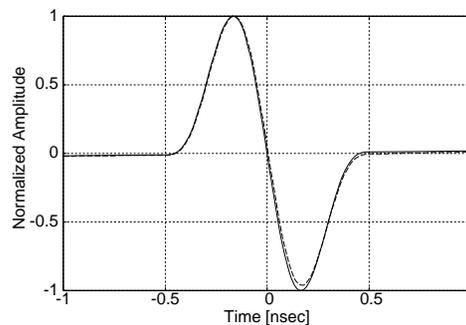


図9 モノサイクルパルス入射時の散乱波形の波形歪み

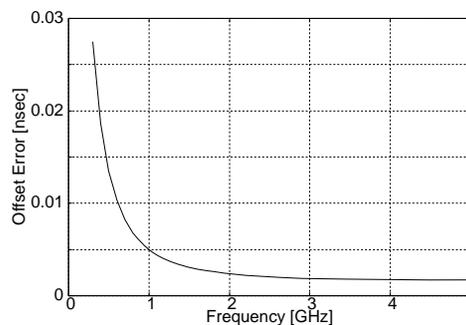


図10 人体の散乱周波数特性によるレンジ推定オフセット誤差

イメージング手法 [9], [10] の精度である 1% に対して無視できない．

5. 人体の周波数依存性による SEABED 法の画像劣化

本節では，前節までに議論した人体の周波数依存性による測距誤差が SEABED 法のイメージングにどのような影響を与えるかについて適用例を示す．ただし，前節で求めた測距誤差は形状を平板で近似する場合の特性であるため，実際の誤差とは異なる．本稿では，目標形状による波形歪みと材質による波形歪みを独立に扱えると近似し，形状による波形歪みは我々の波形推定処理 [9], [10] にて除去し，その残差である

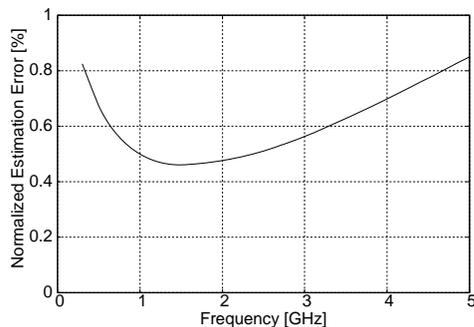


図 11 人体の散乱周波数特性によるレンジ推定オフセット誤差（波長で正規化）

材質による波形歪みについてのみ議論する．適用例に用いる真の目標形状を図 12 に破線で示す．仮定する目標形状は滑らかな凸面同士の間にはエッジ点が存在する形状である．同図内の x 軸に沿ってアンテナ走査を行い，UWB パルスの送受信を行い，擬似波面を得る．この目標形状に対応する真の擬似波面を同図に一点鎖線で示す．擬似波面の存在するデータ空間 (X, Y) と実空間 (x, y) は実際には別の空間であるが，ここでは両者の比較のため便宜上重ねて表示している．使用するモノサイクルパルスの中心周波数を 1GHz と仮定する．前節の検討により測距誤差は 5.0psec であり，測定距離に換算すると 0.75mm に相当する．したがって測定される擬似波面は図 12 の真の擬似波面を 0.75mm だけ遠方にシフトさせたものとなる．人体の周波数依存性による誤差を考慮した擬似波面に対して逆境界散乱変換 (IBST) を適用することで得られる推定形状を図 12 に実線で示す．推定像は遠方にシフトし，そのシフト量は真の形状の勾配 dy/dx が大きくなるほど顕著である．逆境界散乱変換エッジ部分については測距誤差により誤って小さな凹面として推定されている．以上のように，人体の周波数依存性による測距誤差は高い精度が要求される応用に対してレーダイメージを劣化させることが確認できる．

6. ま と め

本稿では UWB パルスレーダのための高速形状推定法である SEABED 法を人体のイメージングに利用することを想定し，周波数依存性のある人体からの散乱波形歪みを簡単なモデルで定量的に評価した．人体形状を平板と仮定した場合の散乱特性を調べ，低域通過特性を有することを明らかにした．また，遅延時間の推定誤差については中心周波数 1GHz のモノサイクルパルスで約 5psec と小さいものの我々の開発した高精度レーダイメージング技術への影響は無視しえないことを明らかにした．また，波形歪みによる SEABED 法の推定像の劣化についても適用例を示した．

今後，材質と形状の双方による波形歪みの影響を評価する必要がある．現在，図 13 に示す人体形状ダミーを利用した UWB パルスレーダ実験システムを整備している．ダミーを用いることで人体の材質に依存せず形状による波形歪みへ

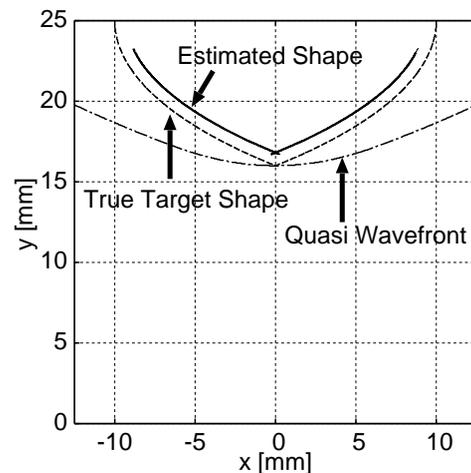


図 12 目標形状，その擬似波面，および SEABED 法による推定形状

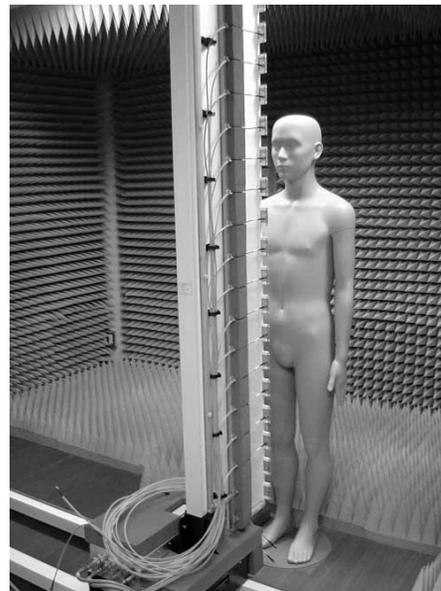


図 13 人体形状ダミーを用いた実験風景

の影響のみを見積もることが可能である．他に，実際の人体を用いた実験および人体モデルを用いた FDTD 法による波形歪みの定量評価を進める予定である．

文 献

- [1] E. J. Bond, X. Li, S. C. Hagness, and B. D. van Veen, "Microwave imaging via space-time beamforming for early detection of breast cancer," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 8, pp. 1690–1705, 2003.
- [2] R. M. Narayanan, X. Xu, and J. A. Henning, "Radar penetration imaging using ultra-wideband (UWB) random noise waveforms," *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, vol. 151, no. 3, pp. 143–148, 2004.
- [3] J. van der Kruk, C. P. A. Wapenaar, J. T. Fokkema, and

- P. M. van den Berg, "Three-dimensional imaging of multicomponent ground-penetrating radar data," *Geophysics*, vol. 68, no. 4, pp. 1241–1254, 2003.
- [4] T. J. Cui, Y. Qin, G. L. Wang, and W. C. Chew, "High-order inversion formulas for low-frequency imaging of 2D buried targets," *Proceedings of 2004 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1, pp. 189–192, 2004.
- [5] T. Sakamoto and T. Sato, "A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform," *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E87-B, No. 5, pp. 1357–1365, May, 2004.
- [6] T. Sakamoto and T. Sato, "A phase compensation algorithm for high-resolution pulse radar systems," *IEICE Trans. Communications*, vol. E87-B, no. 11, pp. 3314–3321, Nov., 2004.
- [7] 佐藤 亨, 阪本卓也, "UWB パルスレーダによる物体像再構成アルゴリズム," *電子情報通信学会論文誌*, vol. J88-B, no. 12, pp. 2311–2325, Dec. 2005.
- [8] 阪本卓也, 木寺正平, 佐藤 亨, 杉野 聡 "UWB パルスレーダによる高速立体形状推定法の実験的検討," *電子情報通信学会論文誌* (accepted).
- [9] S. Kidera, T. Sakamoto, T. Sato, and S. Sugino, "A high-resolution imaging algorithm based on scattered waveform estimation for UWB pulse radar systems," *IEICE Trans. on Commun.* vol. E89-B, no. 9, pp. 2588–2595, Sep. , 2006.
- [10] S. Kidera, T. Sakamoto, and T. Sato, "A High-resolution Imaging Algorithm Based on Scattered Waveform Estimation for UWB Pulse Radar Systems," *Proc. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp.1725–1728, Seoul, Korea, July, 2005.
- [11] Federal Communications Commission (FCC), Office of Engineering and Technology (OET) Bulletin No. 65, Supplement C, Aug. 1997.