

超広帯域レーダを用いた人体の 超高速立体イメージング

Fast 3-D Imaging of Human Body using Ultra-Wideband Radar

阪本 卓也

Takuya SAKAMOTO

本研究では超広帯域レーダを用いた超高速立体イメージング技術を開発した。自動運転車に求められる走行環境の把握のうちで最も重要な測定対象は人体である。いかなる状況であっても求められるのは歩行者を高精度に検出して事故を防ぐことである。レーダイメージング技術はカメラが機能しない悪条件下でも対象物の形状を得ることができ、形状に基づく対象物の特定が容易になる。現行のレーダイメージングではデータの信号処理に許容できない時間を必要とし、自動運転に必要なリアルタイム性能が達成できていない。我々は、目標形状とデータの間に成り立つ可逆変換に基づくイメージング法を開発し、この手法が従来使われていたイメージング法と比較して約100倍の高速イメージング性能を実現していることを確認した。

The study is focused on developing fast three-dimensional imaging methods for ultra-wideband radar. As a real-world example of this technology's applications, it is absolutely mandatory for a self-driving car to be able to accurately detect humans and other vulnerable road users even under adverse conditions; such collisions have the potential to result in injury or death. Although many current automobile radar systems can measure the distance to a target, they cannot distinguish humans from other objects. This is because imaging generally comes with a high computational load even with the fastest imaging method known, which is not at all easy to resolve. We have developed an imaging algorithm that is faster than F-K migration by a factor of 100, and its performance has been confirmed through simulations and measurements.

はじめに

自動車用レーダの普及は目覚ましいが、レーダイメージングによる対象物体の識別には技術的な課題が多い。近距離の目標を測定するためには、距離分解能を高くするため、広い周波数帯域幅が必要になる^[1]。これを実現するには、米国連邦通信委員会 (FCC: Federal Communications Commission) が2002年に標準化したことで世界的な法整備の始まった超広帯域 (UWB: Ultra Wide Band) 信号を用いる必要がある。超広帯域信号を用いるレーダは超広帯域レーダと呼ばれ、近距離の物体を高い分解能でイメージングすることが可能となる^[2]。超広帯域レーダによるイメージングは、地下探査レーダ^[3]・壁透過レーダ・保安検査レーダなどに応用され、その重要性が広く認識されつつある。レーダはマイクロ波やミリ波を用いることから、カメラが機能しない悪条件下においても物体識別に十分な検出能および分解能を有するため、光学カ

メラを補完するセンシング技術として注目を集めている。

レーダイメージングの原理

カメラ等の一般的な光学測定では、ホログラフィなどの特殊な例を除くと対象物からの反射波の強度のみを用いる。一方、レーダによるイメージングでは反射波の振幅情報に加えて位相情報が得られる。これは光と比べて非常に低い周波数の電磁波を用いることで容易に実現されるためである。レーダに用いるマイクロ波などは建物の壁や衣服などを容易に透過するため、それを有効に利用したアプリケーションが盛んに研究されている。同じように空気中でも粉塵、煙や霧といった可視性の低い条件下でも使用できるといった利点がある。

光学測定に用いられる CCD などの素子アレイに対応するものがレーダイメージングでも使用される。アレイアンテナ

ナやアンテナを機械的に移動させて等価的に仮想アレイを構成する合成開口レーダ技術が広く用いられる。このように、一般的に光学素子と異なりアレイアンテナ等は大型の装置となり、実開口レーダが用いられるのは稀である。例えば、空港の保安検査等で用いられるボディスキャナでは鉛直方向の1次元アレイを水平方向に移動させながら測定を行う方法が用いられる。

従来のレーダイメージング技術

仮に数ナノ秒以下程度の幅の狭いパルスを送信アンテナから放射する場合を考える。この場合、空間的なパルス幅は数十センチメートルとなり、近距離での測定も可能であるし、数十センチメートル程度離れた2目標物体を分離識別することができる。受信アンテナで受信された信号には、対象物体からの反射波が含まれる。簡単に近似すると、反射波は送信信号が伝搬距離に対応した時間だけ遅延したものとなり、空気中の伝搬速度を考慮すれば伝播距離が得られる。

ここで伝搬距離は送信アンテナから対象物体の反射点までの距離と、反射点から受信アンテナまでの距離の和となる。古典的なイメージング法である逆伝搬法では、受信アンテナを仮想の送信アンテナに見立てて、受信信号を仮想の送信信号として逆方向に(計算機内で)電波伝搬させることでイメージングを実現する。この方法はディフракションスタックマイグレーション法やDAS(delay and sum)マイグレーション法などとも呼ばれ、合成開口レーダなどに広く用いられている^[4]。

この逆伝搬法を周波数・波数領域で行うものがF-K (frequency-wavenumber)マイグレーション法であり、従来知られている手法の中で最も高速なイメージング法として、合成開口レーダや保安検査ボディスキャナなどで広く

使われている^[5]。

具体的な処理手順は以下の通りである。各々の送受信アンテナの位置に対して受信信号が得られるため、アンテナ位置を2次的に走査する(あるいは2次元アレイアンテナを用いる)場合には空間2方向および時間1方向の3次元データとなる。このデータを電波伝搬方向ごとに平面波分解することで逆伝搬法を周波数領域で記述できる。処理手順としては、空間(x) - 空間(y) - 時間(t)領域の受信データを3次元フーリエ変換し、波数(k_x) - 波数(k_y) - 角周波数(ω)領域に変換する。角周波数を電波の伝搬方向毎に波数(k_z)に変数変換し、波数(k_x) - 波数(k_y) - 波数(k_z)領域に変換する。さらに、ヤコビアン(Jacobian)を考慮して逆3次元フーリエ変換することで空間(x) - 空間(y) - 空間(z)領域で表現することができ、イメージングが完了する。

以上のように、3次元フーリエ変換が2回必要となり、高速フーリエ変換FFT (Fast Fourier Transform)を用いることで高速なイメージングが実現できる。ただし、データサイズによっては計算時間が許容範囲を超えることもあり、高速フーリエ変換よりも本質的に高速なフーリエ変換アルゴリズムが知られていないため、計算速度に限界が存在するのは明らかである。

逆変換と高速レーダイメージング技術

我々はこうした問題を解決すべく、高速UWBレーダ画像化手法であるSEABED (Shape Estimation Algorithm based on BST and the Extraction of Directly scattered waves)法を開発した。この手法は、目標が明瞭な境界を有するという条件のもとで、目標形状とレーダ信号の間に可逆な変換関係である境界散乱変換(BST : Boundary Scattering Transform)が成り立つことを利用し、画像化を行う。空気中に設置された測定対象物の境界をFigure 1左(r-domain)に示す。簡単のため2次元問題を仮定し、座標

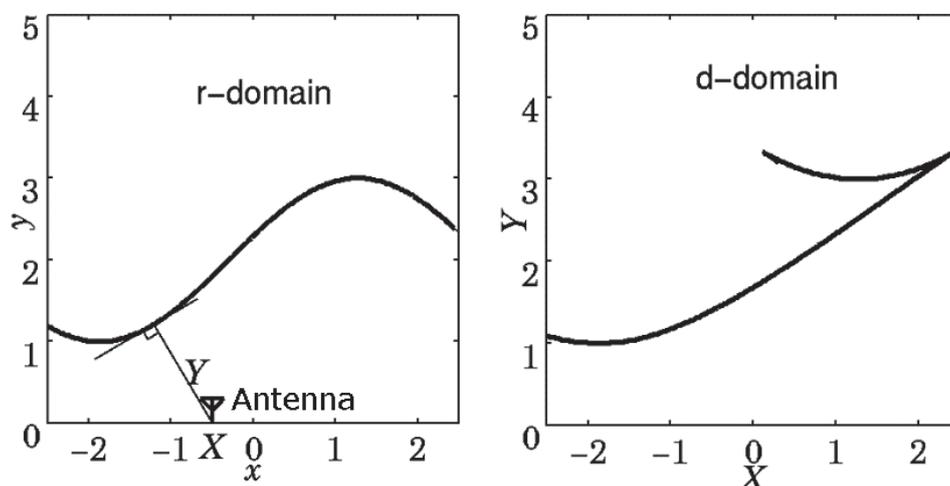


Figure 1 Target boundary shape (left) and echo delay (right).

を (x, y) で表現する。境界の下側は空気, 上側は金属や誘電体などとする。位置 $(X, 0)$ の単一のアンテナ (▽) を送受両方に用いるモノスタティックレーダを想定し, このアンテナを x 軸に沿って走査しながら超広帯域信号の送受信を行う。この場合, 強い反射波が目標境界の直交条件を満たす点より受信される。アンテナと反射点間の距離を Y とすると, X と Y の関係を図1右 (d-domain) のように曲線で表現することができる。

このとき, r-domain の目標形状である曲線 (x, y) から d-domain の受信信号の特徴である曲線 (X, Y) への写像を表す変換式

$$\begin{cases} X = x + y dy/dx \\ Y = y \sqrt{1 + (dy/dx)^2} \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

が成り立ち, これを境界散乱変換と呼ぶ。この逆変換である逆境界散乱変換 (IBST : Inverse BST) は

$$\begin{cases} x = X - Y dY/dX \\ y = Y \sqrt{1 - (dY/dX)^2} \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

と表される。我々はこれらの変換式を初めて導出し, レーダイメージングへ応用した^[6]。

アンテナ位置 X は既知であり, 反射波の伝播距離 Y は超広帯域レーダの遅延時間により測定可能であるため, d-domain は測定データそのものである。このため, 筆者の提唱する逆境界散乱変換を用いることで, 目標の形状を高速に得ることが可能となった。このイメージング手法は SEABED 法と呼ばれる。従来, 計算量が課題であったレーダイメージングを, SEABED 法では閉形式の変換として定式化することで, 高速なイメージングを実現することが可能となった。

こうして開発された SEABED 法は従来法であるマイグレーション法や逆伝搬法などと異なり, 反復計算を要せず, 信号と目標の間の1対1の関係を閉じた方程式で表現することで高速な画像化を実現する。実験データによる検証で, 従来法と SEABED 法によるイメージング法は多くの場合, ほぼ同じクオリティの画像を生成することが確認された一方, 処理時間に関しては可逆変換により飛躍的な短縮が可能であることが分かった。この手法は送受信に同じアンテナを用いるモノスタティックレーダから送受信に異なるアンテナを用いるバイスタティックレーダへ適用できるよう拡張された。バイスタティックレーダの場合の逆境界散乱変換は次式のとおりである^[7]。

$$\begin{cases} x = X - \frac{2Z^3 Z_x}{Z^2 - d^2 + \sqrt{(Z^2 - d^2)^2 + 4d^2 Z^2 Z_x^2}}, \\ y = Y + Z_Y \{d^2(x - X)^2 - Z^4\} / Z^3, \\ z = \sqrt{Z^2 - d^2 - (y - Y)^2 - \frac{(Z^2 - d^2)(x - X)^2}{Z^2}} \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

右辺にアンテナ位置 (X, Y) と遅延時間から求めた伝搬距離 Z とその偏微分 $Z_x = \partial Z / \partial X$ と $Z_y = \partial Z / \partial Y$ を代入するだけで立体目標形状 (x, y, z) を得ることができるため, 高速な処理で立体イメージングが可能になった。

複雑な形状のイメージング

以上の方法では超広帯域信号の反射波の遅延時間が正確に測定でき, 各々の遅延時間 Z がアンテナ位置 X と Y の伝搬距離関数 $Z(X, Y)$ として明確に表現できることを前提にしていた。比較的単純な形状の目標の場合, 複数の目標物体からのエコーが重畳して受信されてもそれらを複数の目標ごとに分離することで複数の伝搬距離関数を取り出すことができる。一方, 人体のように複雑な形状の目標を測定する場合には膨大な数の反射点から大量のエコーが重なることにより, 遅延時間を単純にアンテナ位置の関数として表現することが難しくなる。このため, 従来の SEABED 法では人体のように複雑な形状の目標をイメージングすることができなかった。

こうした問題を解決するため, 伝搬距離 Z のアンテナ位置 X および Y による偏微分 Z_x および Z_y を反射波のピーク点の分布の統計的な特徴を用いて計算する手法を開発した。こうして得られた Z, Z_x, Z_y を SEABED 法で用いられる逆境界散乱変換に代入することで, イメージングを実現する。この手法により目標物体の形状の複雑度に関わらずに適用可能な高速イメージング法が開発された。この手法は RRPM (Revised Range Point Migration) 法と呼ばれる^[8]。

開発技術の測定データへの適用

RRPM 法の性能を評価するため, 実際に測定されたレーダ受信信号に適用する。同じデータに従来法である F-K マイグレーションも適用し, RRPM 法とのイメージング性能の比較も行う。送受信アンテナとして超広帯域特性かつ広いビーム幅を有するビバルディアンテナを用いる。使用するアンテナのゲインは 10 dBi であり, 垂直偏波 (z 方向) である。送受信アンテナは水平方向 (x 軸方向) に 5.0 cm 離して設置し, 両アンテナをポジションで走査し, 各々の場所でレーダ測定を行う。アンテナの走査は 1.0 cm 間隔で行い, 走査範囲としては x 軸方向に -37.0 cm から 37.0 cm まで, 鉛

直方向であるz軸方向に-75.0 cmから75.0 cmまでとし、全部で $75 \times 151 = 11325$ 点にて測定を行う。

本実験では周波数領域での測定を行い、受信されたデータを時間領域に変換することでイメージング手法への入力データとする。測定にはネットワークアナライザAgilent社のPNA E8364Bを用い、周波数サンプル点数2001とし、周波数走査は5.0 GHzから25.0 GHzまでとする。アンテナ特性や伝搬を考慮した受信信号は、中心周波数13.4 GHzであり、3-dB帯域幅および10-dB帯域幅は各々2.3 GHzおよび14.9 GHzであった。送信電力は2.0 dBmである。金属塗装をしたマネキンをアンテナ走査面(x-z)から50.0 cm離して設置し、測定を行う。

本測定に用いる人体模型^[9]をFigure 2に示す。同図左側中央に送受信アンテナが見られる。この人体模型正面において送受信アンテナを上記のとおり走査し、各々の場所で測定を行う。得られたデータをFKマイグレーションおよび提案するRRPM法でイメージング処理を行った結果をFigure 3およびFigure 4に示す。いずれの図においても人体の3次元形状が正しく得られていることがわかる。処理に必要な計算時間は、使用するハードウェアに依存するが、浮動小数点演算回数で比較すると、提案するRRPM法による処理はFKマイグレーション法に対して約100倍の高速処理が実現できる^[9]。



Figure 2 Metal-coated mannequin and antennas used in the measurement.
*Copyright © IEEE. All rights reserved. Reprinted with permission from "High-resolution weighted range point migration method for fast 3-dimensional imaging with ultra wideband radar," T. Sakamoto, T. Sato, P. Aubry and A. Yarovoy, Proc. IEEE Radar Conference 2013.DOI: 10.1109/RADAR.2013.6585985

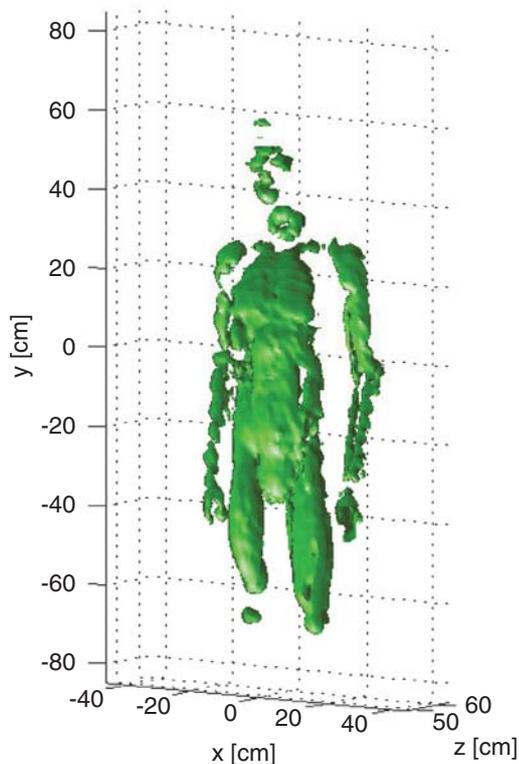


Figure 3 Target image generated using the F-K migration algorithm.
*Copyright © IEEE. All rights reserved. Reprinted with permission from "Fast Imaging method for security systems using ultrawideband radar," T. Sakamoto, T. Sato, P. Aubry, and A. Yarovoy, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol.52, no.2, pp.658-670, 2016.

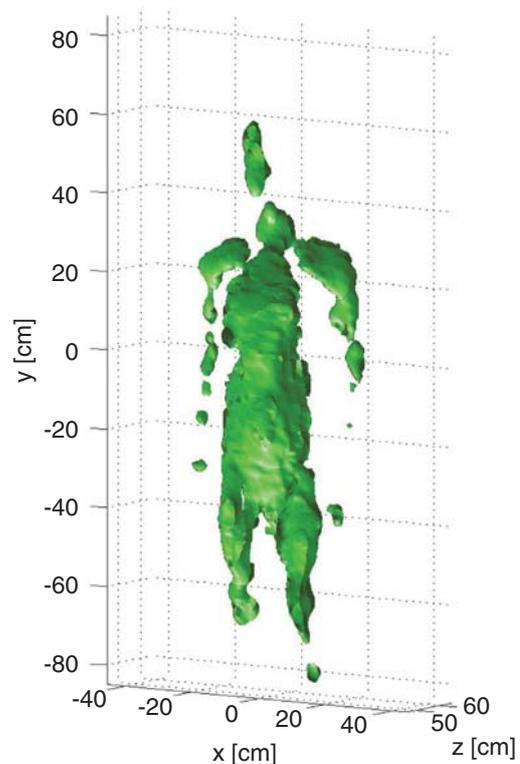


Figure 4 Target image generated using the proposed fast imaging algorithm.
*Copyright © IEEE. All rights reserved. Reprinted with permission from "Fast Imaging method for security systems using ultrawideband radar," T. Sakamoto, T. Sato, P. Aubry, and A. Yarovoy, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol.52, no.2, pp.658-670, 2016.

おわりに

超広帯域レーダを用いたイメージングの計算手法について、従来知られていた最速の手法であるFKマイグレーション法よりも更に高速な処理が可能となるイメージング手法を開発した。開発した手法は、目標形状と信号の遅延時間との間に成り立つ可逆変換式である境界散乱変換およびそれを用いたイメージング手法であるSEABED法を基礎とし、複雑な形状であっても適用可能となるように拡張されたRRPM法によって実現される。開発した手法を人体モデルから得られるレーダ測定データに適用し、両手法で正しく人体の形状がイメージングされ、立体的な形状の情報が得られることを確認した。演算回数による比較を行い、特定の条件下で提案手法は従来手法と比べて約100倍の高速処理を実現できることが明らかとなった。

謝辞

この研究は、京都大学大学院情報学研究科佐藤 亨教授, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands のAlexander Yarovoy教授およびPascal Aubry氏, Omniradar BV, the NetherlandsのTimofey Savelyev博士のご協力があって成し遂げることができました。心より感謝いたします。

参考文献

- [1] D. L. Mensa, "High resolution radar cross-section imaging," Fourth ed. Artech House, 1991.
- [2] A. G. Yarovoy, L. P. Ligthart, J. Matuzas, B. Levitas, "UWB radar for human being detection," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol.23, no.5, pp.36-40, 2008.
- [3] 佐藤源之, "地中レーダによる地下イメージング," 電子情報通信学会論文誌C, vol.J85-C, no.7, pp.520-530, 2002.
- [4] X. Zhuge, A. G. Yarovoy, T. Savelyev, L. Ligthart, "Modified Kirchhoff migration for UWB MIMO array-based radar imaging," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.48, no.6, pp.2692-2703, 2010.
- [5] Sheen *et al.*, United States Patent, 5,859,609, 1999.
- [6] T. Sakamoto and T. Sato, "A target shape estimation algorithm for pulse radar systems based on boundary scattering transform," IEICE Transactions on Communications, vol.E87-B, no.5, pp.1357-1365, 2004.
- [7] S. Kidera, Y. Kani, T. Sakamoto, and T. Sato, "A fast and high-resolution 3-D imaging algorithm with linear array antennas for UWB pulse radars," IEICE Transactions on Communications, vol.E91-B, no.8, pp.2683-2691, 2008.
- [8] T. Sakamoto, T. Sato, P. Aubry and A. Yarovoy, "High-resolution weighted range point migration method for fast 3-dimensional imaging with ultra wideband radar," Proc. IEEE Radar Conference 2013. DOI: 10.1109/RADAR.2013.6585985
- [9] T. Sakamoto, T. Sato, P. Aubry, and A. Yarovoy, "Fast Imaging method for security systems using ultrawideband radar," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol.52, no.2, pp.658-670, 2016.



阪本 卓也

Takuya SAKAMOTO

兵庫県立大学大学院 工学研究科
准教授
博士 (情報学)