

レーダー：電波の目

情報学研究科 通信情報システム専攻
超高速信号処理分野
佐藤 亨

1. はじめに

ロボット技術が急速に進歩し、日常生活に家事を補助するロボットが入ってくるのも、そう遠い将来のことではないと考えられています。もちろん、人間と同じように周囲の状況を把握し、即座に判断を下すことは、まだまだ困難な課題で、鉄腕アトムが登場するのはいつのことか予測もできませんが、家事労働を掃除機や洗濯機などの家電製品が置き換えてきたように、単純な仕事から徐々にロボットが処理可能な範囲は広がってゆくでしょう。

人間が周囲環境を理解するとき視覚がもっとも重要であるのと同様に、ロボットにおいてもカメラによる画像化が主要な手段であるのは言うまでもありません。しかし人間の視覚には、単にカメラの働きだけではなく、過去に蓄積された家具の配置や大きさに関する知識との照合など、その後の脳における複雑な情報処理を瞬時に行う能力が伴っています。この点で現在の情報処理技術は脳の働きに遠く及ばず、現在のロボットの多くは、超音波距離センサーなどの補助的測定手段を必要とします。そもそも、ロボットが人間の五感に制約される必要はないので、利用可能な物理的原理による計測技術をすべて動員しようとするのが当然です。

電波もその一つで、目標までの距離を正確に測定できること、見えないところにも届くことなどの特長があります。ここでは、最新のレーダー技術についてご紹介します。

2. 電波でものを測る

「やまびこ」は、遠くの山で音波が反射して帰ってくるまでの時間差によって生じる現象です。レーダーはこの原理を電波に応用したもので、短いパルス波を目標に向かって送信し、反射波が受信されるまでの時間差から距離を測定します。電波の用途は、もちろん携帯電話に代表される通信が主なものですが、計測も重要な電波の利用方法の一つです。すでに1925年には、電離層の高さを測定するのにパルスレーダーの技術が使われたという記録があります。

ただし、電波の伝わる速さは音波よりはるかに速いので、正確に距離を測定するためには、時間差を精密に測ることが必要です。たとえば、室内の物体形状を知るには数cmの測定精度が要求されます。電波は1秒間に約30万kmを進みますから、0.1ナノ秒（100億分の1秒）といった非常に短い時間を計る技術が必要となるわけです。このような技術が実用的となり、またそれにとまなう電波の利用方法などの規則が整備されたのは、ここ数年のことにすぎません。レーダーを室内計測に利用するというのは、まさに21世紀の技術なのです。

電波と光は、どちらも電磁波の一種ですが、波長（波の山と山の間隔）が大きく異なります。可視光は数百ナノmの波長を持つものに対して、その100倍以上、通常0.1mmより長い波長の電磁波を電波と呼びます。携帯電話に使われる電波の波長は10cmから30cm程度です。光が直進する、というのは、目に見えるものの大きさが光の波長に比べてはるかに長いので、電波の場合は音波と同様に、ものかげに回り込む「回折」という現象が現れます。ピルの陰でも携帯電話が通じるのは反射や回折のた

めです。

3. さまざまなレーダー

このような、電波の「波」としての性質を利用した装置として、フェーズドアレーアンテナがあります。図1に示すように、平面上に並べた多数のアンテナから同時に電波を発射（左）すると電波が干渉しあってアンテナ列と平行な波面が作られ、電波は上向きに進みますが、少しずつ時間差をつけて発射（右）すると斜めに進みます。この方法によって、アンテナを動かさずに電波の向きだけを変えることができます。与える時間差の制御を電子的に行うと、電波の照射方向を瞬時に切り替えることが可能です。

図2は、この方式のアンテナを利用した京都大学の大型大気観測レーダーです。直径110mの敷地に

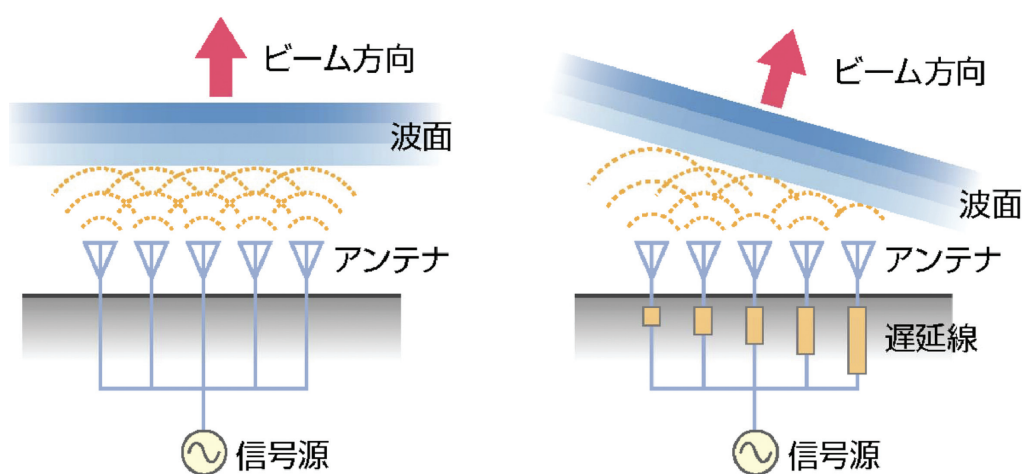


図1. アレーアンテナの原理。複数のアンテナから同時に電波を発射した場合（左）と、少しずつ時間差をつけて発射した場合（右）

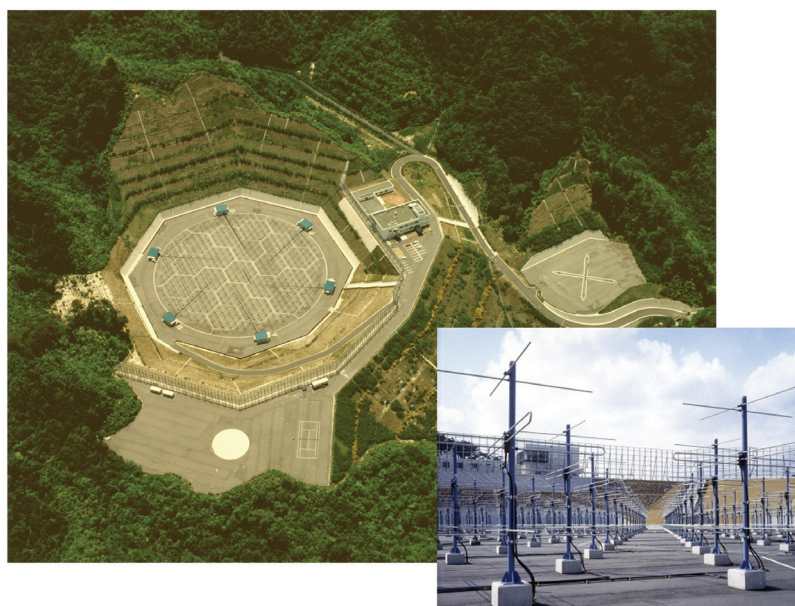


図2. MUレーダー（京大大学生存圏研究所信楽MU観測所）

475本のアンテナを配置し、上空600kmまでの大気の乱れからの微弱な散乱エコーを受信します。雨粒を観測する気象レーダーと異なり、空気そのものを観測することで晴れた空や雲の上の高さまで測定できます。空気の運動、すなわち風によるドップラー効果から、風速を測ることができます。同じ原理による小型のレーダーはウィンドプロファイラーと呼ばれ、気象庁が全国に30数台を配置して毎日の天気予報に利用しています。

レーダーは、気象観測のほか、航空機、船舶、自動車などの移動体の観測にも広く利用されています。遠い移動物体としては、地球周回軌道に残された人工衛星やロケットの残がい（宇宙のゴミ：スペースデブリ）を監視するためのレーダー（図3）もあります。このレーダーも上記のMUレーダー

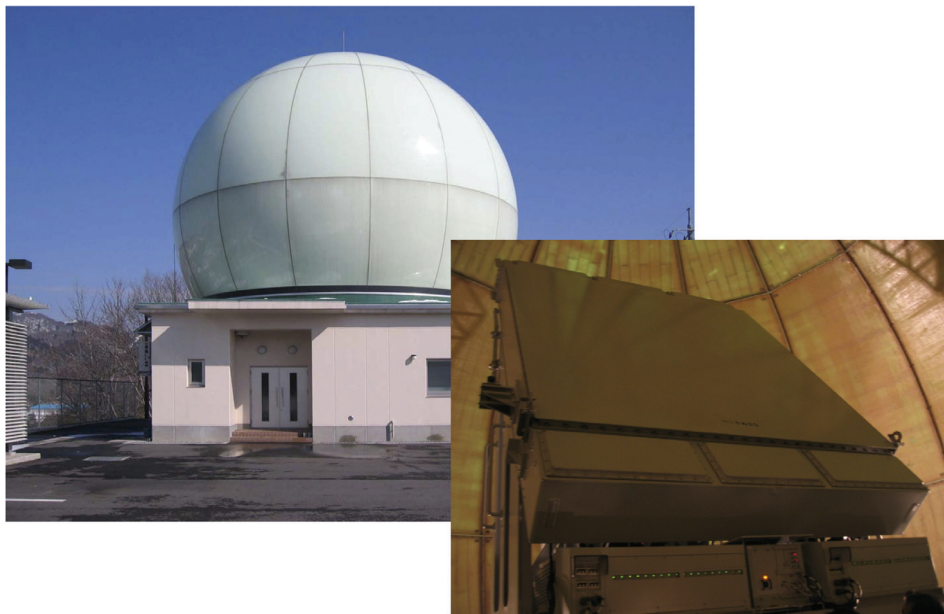


図3. スペースデブリ観測用レーダー（日本宇宙フォーラム上斎原スペースガードセンター）

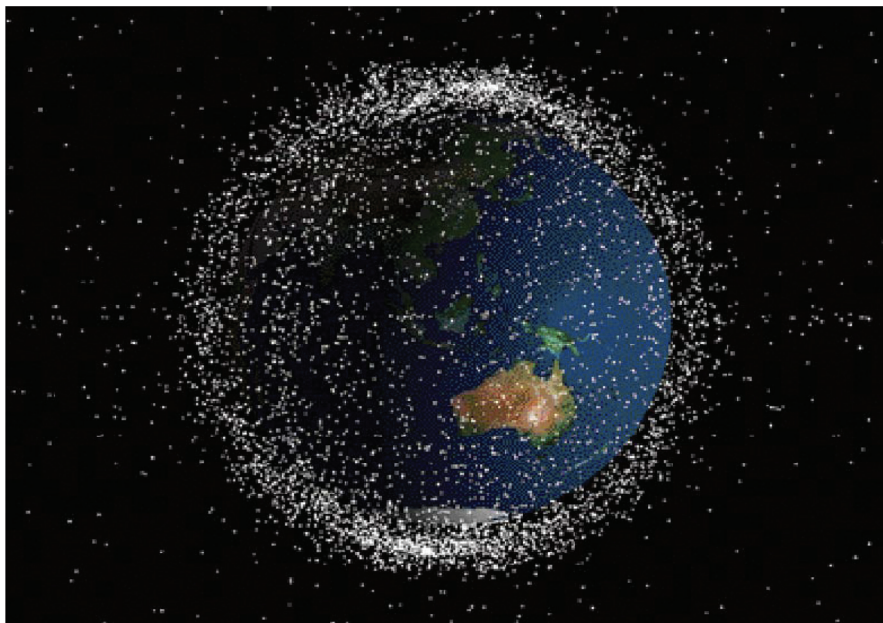


図4. スペースデブリ（宇宙のゴミ）の分布。

と同じフェーズドアレイアンテナを備え、同時に10個までの軌道運動物体を観測することができます。直径3mのパネルに約1,800本の小型アンテナを配置し、これを回転台に載せて全方位を観測できるようにしています。図4は、世界の観測網によって追跡されているスペースデブリの、ある瞬間における分布の様子を描いたものです。ここに示されたのは直径10cm程度以上の比較的大きなもので、約8,000個が知られていますが、もっと小さい直径1mm～1cm程度のものでも人工衛星などに衝突すると致命的な損害を与えます。これらは数百万個にも及ぶと推定されていて、深刻な宇宙の環境問題となっています。

4. レーダーによる室内環境の計測

上記の例は、数百本から数千本という多数のアンテナ素子を配列した大規模な装置です。また各アンテナにそれぞれ送受信機を接続するためコストも高く、高性能ですが日常的な用途には不向きです。このように多数のアンテナ素子を用いるのは、電波のビームを絞って、観測する方向を明確にするためです。光では小さなレンズで容易に鋭いビームを作ることができるのに対して、電波では大掛かりになってしまうのは、先に述べたように波長が長いからです。波長5cmのマイクロ波では、波長500ナノmの可視光と同じ鋭さのビームを形成するのに、10万倍も大きな開口が必要になってしまいます。

将来の家事ロボットのように室内環境を電波で計測する場合、大きなアレーアンテナを備えることは現実的ではありません。このような場合に利用できる技術として、開口合成法があります。図5に示すように、小型のアンテナを平面内で走査して目標を測定することを繰り返し、得られた受信信号を重ね合わせれば、あたかも多数のアンテナで観測したのと同等の効果を得ることができます。図のように近距離の目標を測定する際には、ちょうどレンズで集光するように電波を1点に集中させ、その点をフェーズドアレイの仕組みで順次移動させることで、3次元の領域を高い分解能で測定することが可能です。ただし、光の場合によく知られているように、焦点を非常に小さく絞ると波としての性質があらわになり、使用する光の波長の半分程度の大きさ以下にすることはできません。これは波長の長い電波の場合には大きな制約となります。また、これらの処理は受信信号をデジタル化して行いますが、膨大な計算を必要とするため、現在のパーソナルコンピュータでは数十分もの時間がか

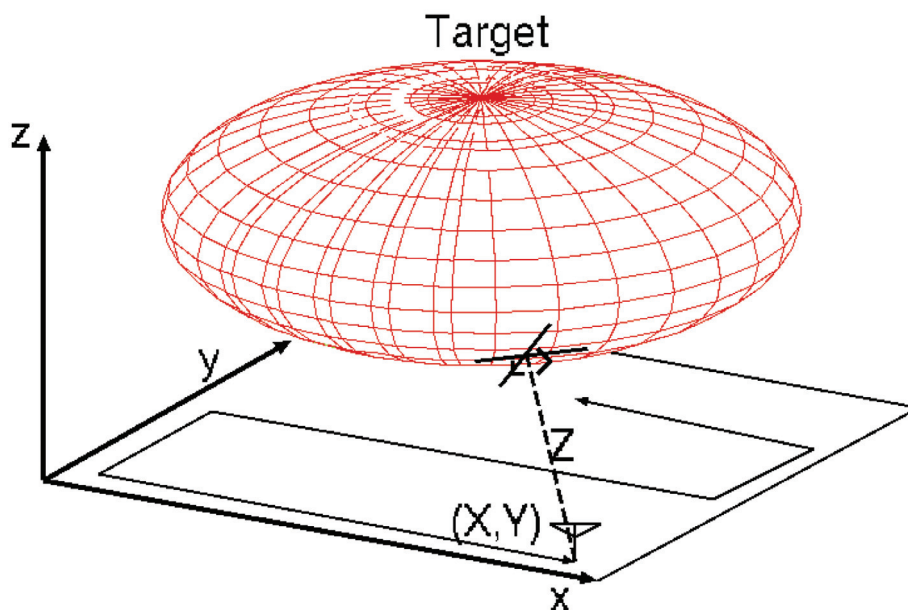


図5. 小型アンテナの走査による目標の計測。

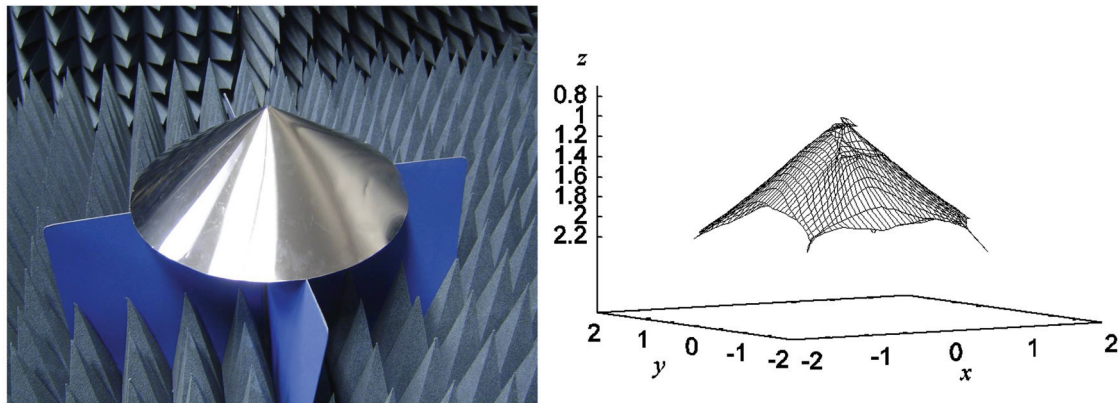


図6. 超広帯域レーダーによる物体形状推定実験の目標（左）と再現された形状（右）。
座標軸の数値の単位は、使用する電波の波長です。

かってしまいます。

私たちの研究室では、この問題を解決するための信号処理の手法を研究しています。図5のようにアンテナを走査して目標を観測するとき、小型アンテナから送信した電波は球面状に広がるため、反射波の時間遅れから距離 Z は正確に測定できても、それがどの方向から帰ってきたかはわかりません。しかし、電波は物体表面に直交する方向に強く反射されますから、物体の形状がわかっているならばアンテナ位置とその点における物体までの距離は簡単に計算できます。多くの測定点（ X 、 Y ）における目標までの距離 Z から目標の形状を推定する問題は、多数の未知数を求める連立方程式を解くのとよく似ており、逆問題と呼ばれます。一般に逆問題は解決困難であることが多いのですが、境界面に直交する方向に反射波が向かう性質に着目することで、物体形状と測定対象となる目標までの距離の間に単純な関係式が成り立つことが導かれ、これを解くことで直接に物体形状を求めることが可能となりました。

この方法を用いると、アンテナを走査して目標までの距離 Z が求められれば、ほとんど瞬時に物体形状を計算することができます。図6左に示すように先端の尖った形状の場合、従来の開口合成法では、再現された形状は波長の半分程度に丸まってしまうますが、開発した手法では右図のように、正しい形状が再現されています。ここで左図の背景に見える剣山のようにとがったものは、電波吸収体です。この実験では、測定誤差が波長の $1/100$ 程度という、極めて高い分解能が得られました。たとえば 3GHz の中心周波数のマイクロ波ですと、波長は 10cm ですから、 1mm の精度で物体形状が推定できることになります。

ここで用いているのは超広帯域（Ultra Wide Band; UWBと略します）パルスレーダーです。上記の方法では、目標までの距離 Z を正確に測定することが重要ですが、そのためにはパルスをできる限り短くする必要があります。電波の占有帯域幅はパルスの長さの逆数にほぼ等しく、上記の実験では 2GHz という非常に広い帯域幅を持つパルスを使用しています。それでもパルス長は約 1ナノ秒 で、普通の意味での距離分解能は 15cm という比較的大きな値になります。開発した方法では、送信したパルス波形と受信したパルス波形を精密に比較することで、 1mm の精度に対応するわずかな遅延時間を測定しています。

上記の実験では、一つの小型アンテナを平面上で走査しましたが、これでは計算は高速でも測定自体にたいへん時間がかかります。かといってアンテナを2次元に多数配置するのは構造上もコスト面でも現実的ではありません。家事ロボットなどでは、高さ方向に1列にアンテナを数本～十数本配置し、ロボットが室内を移動するのを利用して必要な2次元のデータを収集することを考えています。

ここに示した方法は、そのままでは円錐や球など、比較的簡単な形状の物体にしか適用できません。また受信される信号に雑音が入ると、性能が大きく劣化することもわかっています。このような問題を解決するためのさまざまな方法を考案し、その特性を検証しています。

5. 災害現場での利用

電波を使うことのもう一つの利点は、光が透過しない媒質を通して目標を測定できることです。これは煙に覆われた火災現場での消防士の活動や、震災などによるがれきの下の探査、なだれによって雪に埋もれた遭難者の探索などに有効と考えられ、災害現場でレーダーを救援活動に利用するためのさまざまな研究が進められています。

図7は、壁面を通して物体形状を測定するための実験風景です。右図に示す金属物体を、左図のようにモルタル板で覆い、その上で送受信アンテナ（TxおよびRx）を走査して距離測定を行い、前節の手法を適用します。しかし、モルタル板中では電波の伝搬速度は空気中より遅いため、光と同様に屈折が生じるほか、到達時間に遅れを生じます。この屈折の効果と余分な遅延の影響を補正することで、空気中の場合と同様に正確な物体形状を推定できることが確認できました。ただし今回の実験は、がれき中の探査などに比べるとはるかに単純化された条件下ですので、現実の災害現場で利用できる手法とするには、まだまだ改良が必要です。

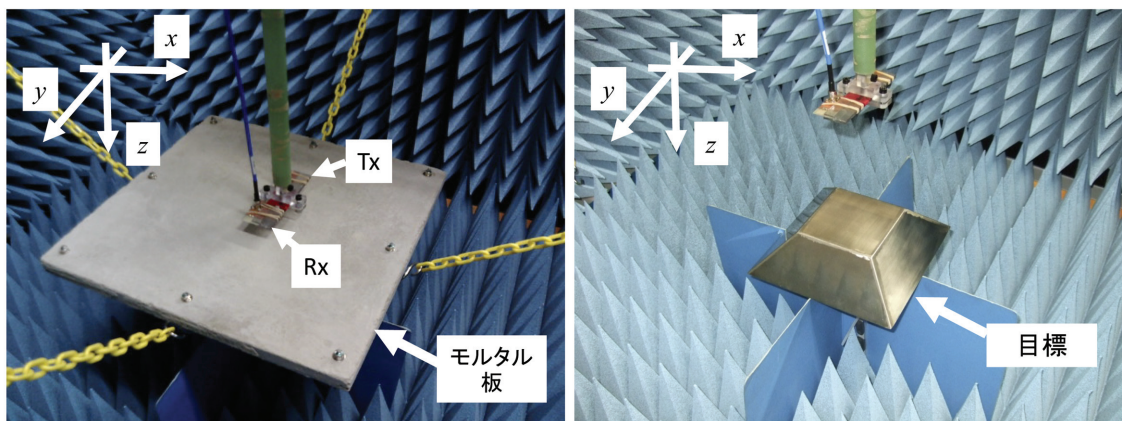


図7. モルタル板を透過した物体形状測定。モルタル板を置いた状態（左）と取り除いた状態（右）。

6. おわりに

レーダー技術の最近の動向を簡単にまとめ、電波を使って物の形を知るための研究の一端をご紹介します。第2次世界大戦を契機に発達し、その後も軍事技術として捉えられることの多かったレーダーですが、エレクトロニクスやロボット技術の進歩により、これからの生活には欠かせない基盤技術となってゆくと考えられています。ここではご紹介できませんでしたが、自動車の衝突防止レーダーのように、急速に実用化が進みつつある分野もあります。身近な高度技術であるレーダーに、多少なりとも興味を持って頂ければ幸いです。