

修士論文

適応的信号処理によるプラスチック地雷
探知レーダ・システム

指導教員 廣瀬 明 助教授



東京大学 大学院新領域創成科学研究科 基盤情報学専攻

36322 原 貴弘

平成17年1月31日提出

目次

第 1 章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 研究の背景	1
1.3 ミリ波を用いた本研究の特徴	2
1.4 プラスチック地雷探知システムの概要	2
1.4.1 測定部分	2
1.4.2 区分化部分	2
1.4.3 認識部分	4
1.5 本論文の構成	4
第 2 章 地中レーダと地雷探知	5
2.1 地雷除去における課題	5
2.2 人道的対人地雷探知・除去の必要性	5
2.3 対人地雷探知・除去に関する研究	7
2.3.1 金属探知器	7
2.3.2 地中レーダを用いた地雷探知器	7
第 3 章 理論	8
3.1 測定の原理	8
3.2 VNA の基本原理	8
3.3 VNA を用いた FDR	8
3.4 VNA を用いた TDR	10
3.5 複素型自己組織化マップを用いた適応的画像区分化	12
3.6 周波数領域に拡張された適応的三次元レーダ画像区分化	12
3.7 周波数領域に拡張された特徴ベクトルの抽出	12
3.8 SOM による区分化と SOM のダイナミクス	14
3.9 実験システムの構成	16
3.10 平面走査系	17
3.11 ミリ波フロントエンド部	17
3.12 制御部	18
3.13 計測されるデータの特徴	18
第 4 章 実験	21
4.1 実験における諸パラメータ	21
4.2 地表面に置かれた金属缶に関する実験	21
4.3 地表面近くに埋設された金属缶に関する実験	21
4.4 地表面に置かれた模擬地雷に関する実験	21
4.5 地表面近くに埋設された模擬地雷に関する実験	24
4.6 本実験のまとめ	24

第 5 章	合成開口による前処理	26
5.1	合成開口処理	26
5.2	合成開口処理の結果	27
5.3	実験	27
第 6 章	周波数領域におけるゆらぎに着目した改善	32
6.1	位相アンラッピング	32
6.2	一次元位相アンラッピングアルゴリズム	32
6.3	周波数領域における位相変化のゆらぎ	34
6.4	周波数領域における位相変化のゆらぎに着目した特徴ベクトル抽出	34
6.5	実験	37
6.5.1	地表面に置かれた金属缶に関する実験	37
6.5.2	地中に埋設された金属缶に関する実験	38
6.5.3	地表面に置かれたプラスチック地雷に関する実験	38
6.6	地中に埋設されたプラスチック地雷に関する実験	40
第 7 章	考察	41
第 8 章	まとめ	42
	図目次	43
	表目次	45
	参考文献	46
	発表文献	48
	謝辞	49

概要

本論文では、干渉型レーダを用い、複数の周波数で測定した地中レーダイメージを用いたプラスチック地雷探知システムについて述べる。本システムでは、干渉型レーダで複数の周波数での観測を行うことにより、高い空間分解能を実現する。また、干渉型レーダによって、取得された同相成分、直交成分を複素数の形で解釈し、それを複素自己組織化マップを用いて適応的に区分化を行う。この区分化によって、地中に埋設されたプラスチック地雷が適切に区分化されることを示す。また、周波数領域での位相変化のゆらぎに着目することによってより高精度の区分化が行えることも示す。

第 1 章： 序論

1.1 はじめに

電波を用いたリモートセンシングは波長を比較的容易に変えることができるため、広い応用範囲を持つ。中でも、ミリ波帯 (30~300GHz) の利用は、高角度分解能性、機器の小型軽量化、光では透過しない媒質中でも伝搬可能であるといった理由から活発になっている。

本研究ではベクトルネットワークアナライザを用いて測定を行うことによって、ミリ波帯においても振幅と位相を測定することが可能となっている。また、複数の周波数で測定を行うことにより、周波数情報のみでなく、深さ情報も得ることが可能となる。

一方、複素ニューラルネットワークは振幅と位相を統合的に取り扱うことができる特徴を持っており、電磁波計測に対する応用もしばしば試みられてきた。

そこで我々はこれらの特徴を生かして、地中埋設物の認識を行うことを目的とする。

1.2 研究の背景

合成開口レーダシステムに代表される電波による物体撮像技術は広い応用範囲を持つ [1]。それは、そのようなレーダシステムで利用されるミリ波やマイクロ波が、可視光に比べて長い波長を有するため、水分(雲)などの様々な原因による吸収や散乱に強いという特徴を持つためである。また、電磁波の波長を可変にすることによって、吸収や散乱の波長特性に依存した検出、認識を行うことも可能である。また、偏波 FM-CW レーダなどのように、偏波情報も積極的に利用して計測を行うと言った研究もなされている [2]。

また、地中レーダ (Ground Penetrating Radar:GPR) は地層、埋設物などの地下構造を高速・高精度に可視化できるイメージングレーダとして実用化が進んでいる [3] [4,5]。地中レーダは、その特徴から地下水脈調査、遺跡調査、地雷探査など様々な分野で応用がなされている。

一方、このような電磁波による対象物検出・認識においては、コヒーレンスの高い電磁波を用いているため、電磁波強度だけでなく位相情報も得ることが行われている。それによって、たとえば航空機などを用いて、上空から土地の表面の利用状況を得るだけでなく、土地の起伏についても同時に情報を得ることができる。

そして通常、検出された反射波あるいは透過波の生データは、何らかの形で情報処理されて、出力信号として取り出される。近年、そこに学習性や自己組織化機能を持ったニューラルネットワークを用いることにより、より高度な情報処理を実現し、高い対象物体認識性や画像再構成性を得ようとする試みがなされている [6]。特に、複素ニューラルネットワーク [7] [8] は振幅と位相を統合的に取り扱うことができることから、電磁波計測に関する応用もしばしば行われてきた [9]。

これらの特徴から誘電率変化や誘電率境界による位相変化に着目することにより、反射率が低いプラスチックなどの識別を効果的に行うことが期待できる。この技術が可能となれば、プラスチック対人地雷などの探知を有効に行えるといった応用が期待できる。

1.3 ミリ波を用いた本研究の特徴

ミリ波を用いて地雷探知を目指す本研究の特徴としては次のようなことがあげられる。

まずあげられる特徴は、深度方向の分解能の向上が期待できるという事である。測定に使用する周波数幅が f_s であるとする、時間分解能 ΔT は次のように表すことができる。

$$\Delta T = \frac{1}{f_s} \quad (1.1)$$

ミリ波帯では非常に広範な周波数を利用することができるため(本研究では 10GHz 程度を考えている)、数センチ程度の深度方向の分解能を実現することができると考えられ、それによって地表から数センチ程度のところに埋設された対人地雷と、地表での反射を識別できる可能性がある。

また、地雷のような複雑な形状を持つ物体からのレーダ散乱断面積は周波数依存性を有する。波長に比べて反射物体が小さい場合はレイリー散乱が生じ、これは波長に比べて大きな物体であるほど強い反射を生じるため、ミリ波という波長が短い帯域を用いることは有効であると考えられる。

また、本システムは複数周波数を用いたデータを取得することが可能であるため、人工的な構造を持つプラスチック地雷での共振現象や、空間的なテクスチャの違いによる周波数領域での位相のゆらぎなどをとらえることが期待できる。

1.4 プラスチック地雷探知システムの概要

本論文では主に、レーダイメージ区分化の手法、及び、データ取得のための実験システムの構成と、付随する理論などを詳しく述べる。これは、我々のグループが提案するプラスチック地雷探知システムの一部である。

我々のグループでは実用を意識したプラスチック地雷探知システムの開発を進めており、全体の構成は図 1.1 の様になっている。

本システムは、大きく測定部分、区分化部分、認識部分の 3 つからなっている。区分化部分について本論文で詳しく述べる。

1.4.1 測定部分

実用面を考慮すると、測定部分は小型軽量かつ高速に測定ができることが要求される。また、本システムは周波数を大きく変化させて測定を行うため、広帯域性も要求される。

上記の要求を満たすため、我々のグループではすでに小型軽量のアンテナを提案している <5>。このアンテナを二次元アレイ化することにより、高速な測定の実現を目指している。

1.4.2 区分化部分

測定部分で取得された複数周波数でのレーダイメージを、いくつかの領域に区分化する。この区分化は主に複素自己組織化マップを用いて行われる。

詳細を本論文で述べる。

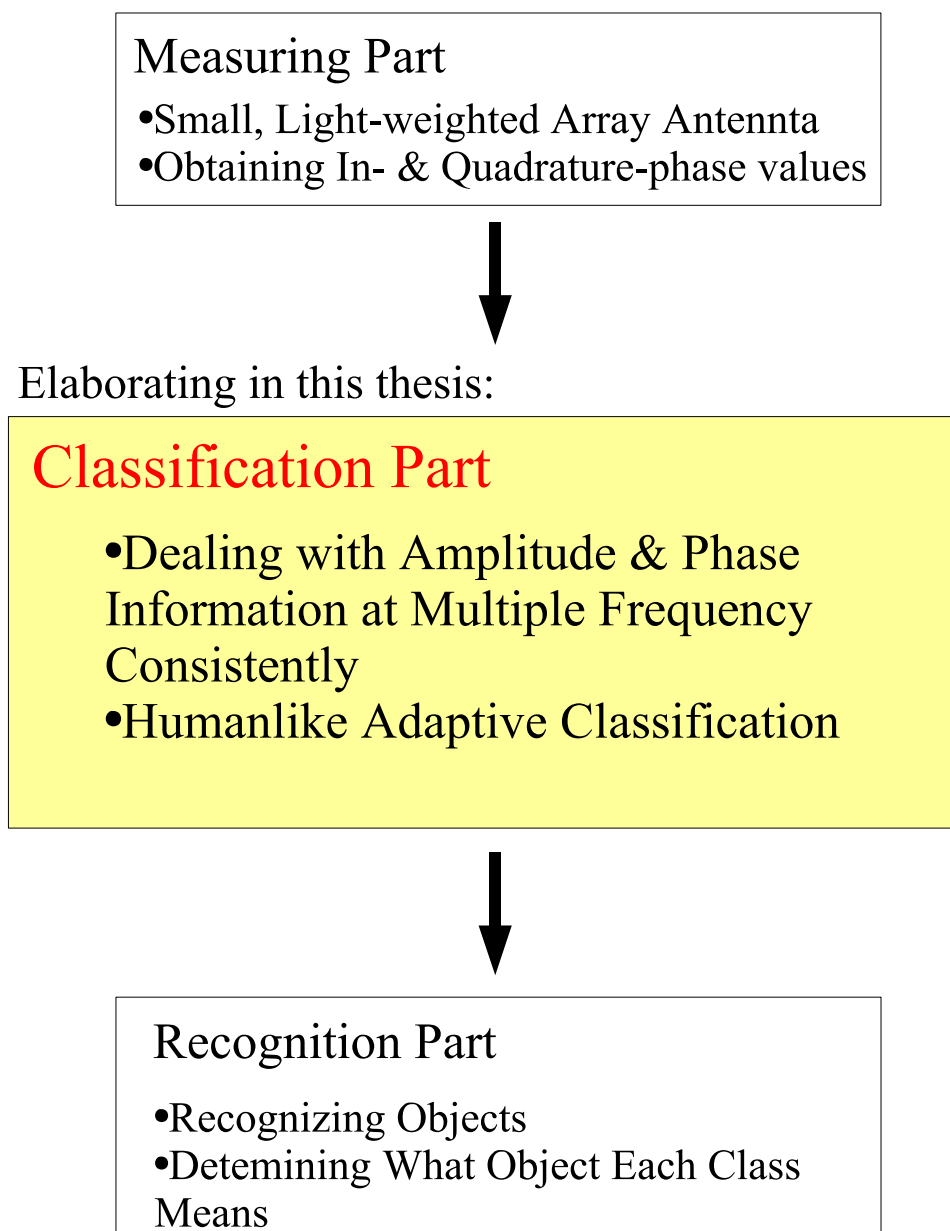


図 1.1: プラスチック地雷探知システムの概要。

1.4.3 認識部分

区分化部分でいくつかの領域に分けられたレーダイメージに対して、それぞれの領域がどういったものに対応するかを認識する。

現在我々のグループでは、この部分を複素連想記憶 (Complex-valued Associative Memory) を用いて適応的に処理することを検討し、様々な実験を行っている。

1.5 本論文の構成

本論文の構成としては、まず第 2 章で本研究の応用として期待される地雷探知に関する現状について述べる。第 3 章では本研究の計測、信号処理などの理論について述べる。第 4 章では提案する実験システムを用いた実験結果について述べる。第 5 章では、空間分解能を向上させる合成開口処理について述べる。第 6 章では、周波数領域における位相変化のゆらぎに着目した改善手法について述べる。第 7 章では実験結果に対する考察を述べる。第 8 章では本論文のまとめを述べる。

第 2 章： 地中レーダと地雷探知

金属・非金属を問わず地中埋設物を探知できる地中レーダは地雷探知用センサとしての実用化が期待されている。世界的には地中レーダを地雷探知に応用するための研究はすでに多数報告されている [10-13]。しかし、実用化に至るまでには解決すべき問題点がいくつか指摘されている。ここでは、地雷探知・除去に関する問題点や課題を様々な角度から述べる。

2.1 地雷除去における課題

現在、地球上には約 1 億個もの不明な地雷が埋まっていると考えられており、さらに年間 2 0 0 万個の割合で増えていっている [14] [15]。

アフガニスタン为例にとってみると、現在のような人の手に頼った方法では、国土のうちわずか 20% の土地の地雷を除去するのでさえ、約 4,300 年はかかると考えられている。また、アフガニスタンではこの 15 年間で地雷によって 20,000 人も市民が死亡し、400,000 人も市民が負傷したと言われている。

現状では、地雷除去は一部の専門家の手作業によって進められているが、除去作業中の事故も少なくない。平均すると、5,000 個の地雷を除去する毎に一人の専門家が死亡し、2 人が負傷している。このままでは、世界中の地雷を除去するためには 20,000 人も専門家の命が犠牲になる計算になる [16]。

以上のような事情から現在、地雷探知機の開発が急務となり、各国で研究が進められている [17] [18]。

我が国においても、文部科学省「対人地雷の探知・除去技術に関する研究開発に関する研究会」が平成 1 4 年 5 月 2 7 日に取りまとめた報告書「対人地雷の探知・除去技術に関する研究開発の進め方について」に基づいて科学技術振興事業団が「人道的観点からの対人地雷の探知・除去活動を支援するセンシング技術、アクセス・制御技術の研究開発」を推進している [19]。このプロジェクトは 3 年を目途に、地雷と土壌の物性値の相対的な違いに着目し、対人地雷を安全、確実かつ効率的に探知可能なセンシング技術や、比較的平坦な地雷原に安全かつ効率的にセンサ、マニピュレータ等を持ち込むための遠隔操作可能なアクセス機材や、それに装着するマニピュレータ及びその制御技術の開発を目指している。また、5 年を目途地雷に含まれる火薬自体の性質にも着目し、対人地雷をより一層安全、確実かつ効率的に探知可能なセンシング技術や、多様な地形の地雷原に安全かつ効率的にセンサ、マニピュレータ等を持ち込むための高度なアクセス・制御技術、さらには、地雷の確認や除去の作業に利用可能な自律制御、バイラテラル制御等の高度なマニピュレーション技術の開発を目指している。

2.2 人道的対人地雷探知・除去の必要性

地雷探知には、人道的対人地雷探知・除去と軍用地雷探知・除去の 2 種類がある。

これらの相違点は表 2.1 のようにまとめられる [20]。

表 2.1 を見ても分かる通り、人道的対人地雷探知・除去と軍用地雷探知・除去は、本質的に目的が異なっている。特に、人道的対人地雷探知・除去では、除去後の土地利用を考慮に入れるため、地中で地雷を爆破するといった処理の方法は、植生を破壊したり、農耕地である場合には、地雷の破片がその後の農耕を難しくするために、望ましい方法ではない。

表 2.1: 人道的対人地雷探知・除去と軍事用地雷探知・除去の相違点。

	人道的対人地雷探知・除去	軍事用地雷探知・除去
探知・除去の地域	一般市民の生活圏、農地、山林等	戦場で軍の移動作戦に必要な場所のみ
探知・除去の地雷の特徴	一般市民が犠牲になる地雷の探知・除去	交戦中の敵軍の地雷探知・除去
探知・除去の地雷の種類	対人地雷	対人地雷、対戦車地雷、敷設爆薬等
探知・除去の時期	戦争や紛争が完全に終了した後	戦時中・紛争中
探知・除去地雷の取り扱い	種類と数を公表し、すべて廃棄処理	一般に、公表しない
探知・除去に従事する人	訓練を受けた専門家、国連の機関、NGO	軍人、PKF
探知・除去の安全の程度	安全を最優先	多少の犠牲あり
探知・除去率	100%に近い	100%には程遠い
探知・除去の困難さ	100%に近い技術的に容易ではない	100%には程遠いため技術的に容易
探知・除去技術	探知技術に高度な技術が要求される。	特殊な構造の重車両により爆破、爆索
探知・除去後の環境	植生を保存した方法で探知・除去	爆破、鋤等による植生破壊、住民無視
探知・除去幅	地雷が埋設されているすべての土地	軍隊の移動に必要な1mから5m程度
探知・除去後	土地の再利用と平和的復興を目指す	土地の再利用を目指さない
探知・除去機の構造	対弾構造でなく軽装備な機器	対弾構造で重装備な機器、武器の搭載
探知・除去の時間	長時間かけて高い信頼性が要求される	短時間で処理し軍隊が瞬時に移動する
探知・除去機の詳細	基本的に公表される	武器であるため詳細は公表されない
探知・除去機の保有形態	国や民間、NGOが保有	軍が保有
武器としての取り扱い	平和目的以外の用途に使われないことが重要	作戦上の重要な武器
軍用への転用可能性	平和目的以外の用途に使われないことが重要	最初から武器運用の仕様
部品の転用可能性	平和目的以外の用途に使われないことが重要	最初からミリタリ規格

2.3 対人地雷探知・除去に関する研究

地雷除去を特に困難なものとしているのが、プラスチック地雷である。プラスチック地雷は金属部品を極力使用せず(地雷によっては全く使用していない)に作られているために、従来型の地雷のように金属探知機を用いて探知することが非常に難しい。また、対人地雷(anti-personnel mine:AP)は、対戦車地雷(anti-tank mine:AT)と比べると、大きさが直径数センチ程度と小さく、他の地中からの反射と識別するためには高い空間分解能が必要となる。ある実験においては、1つの地雷を認識するまでに500から1000もの誤報知が生じた例もある。

以下に、現在行われている対人地雷探知・除去に関する研究動向について述べる。

2.3.1 金属探知器

使用実績が一番ある地雷探知機は金属探知機であり、その方式は大きく分けると磁界を強制的に作り、地雷に生じる渦電流を計測して地雷の有無を認識するアクティブ磁気方式と、磁力の有無のみを探知するパッシブ磁気方式がある。

これらの方式は金属に対しては有効であるが、プラスチック及び木製容器の対人地雷の探知は困難である。現状では、プラスチック地雷内にある起爆装置内の1g以下の金属を探知する手法が実施されているが、地雷以外の「金属缶」及び「金属片」を探知してしまい、探知率を著しく低下させている。

2.3.2 地中レーダを用いた地雷探知器

基本的な原理は航空機用のレーダと同じであるが、航空機の場合探知目標物と探知アンテナの間に介在する物質は空気と水であるが、地中探知の場合は空気、水、土の粒径、土の種類、含水率、誘電率等の条件により探知特性が異なり、反射信号の異なる問題が生じる [21]。

現在、日本から NGO としてカンボジアの地雷除去のために民間のセンサメーカーが協力しているが、現地における地雷探知性能が向上しない理由として、対人地雷の埋設環境及びラテライト土質の影響による電波特性の変化が大きな原因と思われる。また、電波の特性として、地中に向けて電波を発射した場合、地表面における反射が大きく、探知目標物(地雷)の信号がこのノイズの中に埋もれてしまい探知率の低下の原因となっている。

第 3 章 : 理論

3.1 測定の原理

本研究で用いる測定系ではミリ波の発信、解析に VNA(Vector Network Analyser) を用いている。本章では VNA を用いた各種測定の原理について述べる。

3.2 VNA の基本原理

Vector Network Analyzer(VNA) は、RF 信号中の振幅と、位相の双方を解析することができる測定器であり、アナライザからの入射信号と、テスト・デバイスを通過（もしくは反射）した伝送信号を比較することによって S-パラメータなどを測定することができる (図 3.1) [22] [23]。

ネットワークを特性化するパラメータとしては H-パラメータ、Y-パラメータ、Z-パラメータなどがあるが、これらのパラメータを得るためには、ネットワークの入力ポート、または出力ポートにおける電圧値や電流値を周波数の関数として測定する必要がある。また、測定の一部として、開放か短絡終端のいずれかを実施する必要がある。しかし、高周波ではプローブ自体に無視できないほどのインピーダンスがあるため、電圧計や電流計を接続すること自体が正確な測定を妨げてしまう。また、アクティブデバイスでは、短絡や開放によって発振したり、壊れることがある。

このような点を克服するために開発されたのが S-パラメータである (図 3.2)。ポート 1,2 での入射信号をそれぞれ a_1, a_2 、反射信号を b_1, b_2 としたときに、S-パラメータは式 (3.1) で与えられる。

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} & \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \\ \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} & \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

我々の実験では VNA を用いて S-パラメータのうち、 S_{11} のみを計測している。

3.3 VNA を用いた FDR

Frequency-Domain Reflectometry(FDR) は周波数領域における反射測定であり、VNA では周波数掃引測定によって実現することができる。

VNA 内蔵の発信器によって

$$x(t) = \exp(j\omega t) \quad (3.2)$$

という正弦波が発生されているとき、DUT を通したテスト信号が $y(t)$ であるとすると、VNA では

$$S_{11} = \frac{y(t)}{x(t)} = y(t) \exp(-j\omega t) \quad (3.3)$$

という結果を観測していることとなり、それによって FDR を実現している [24] [25]。

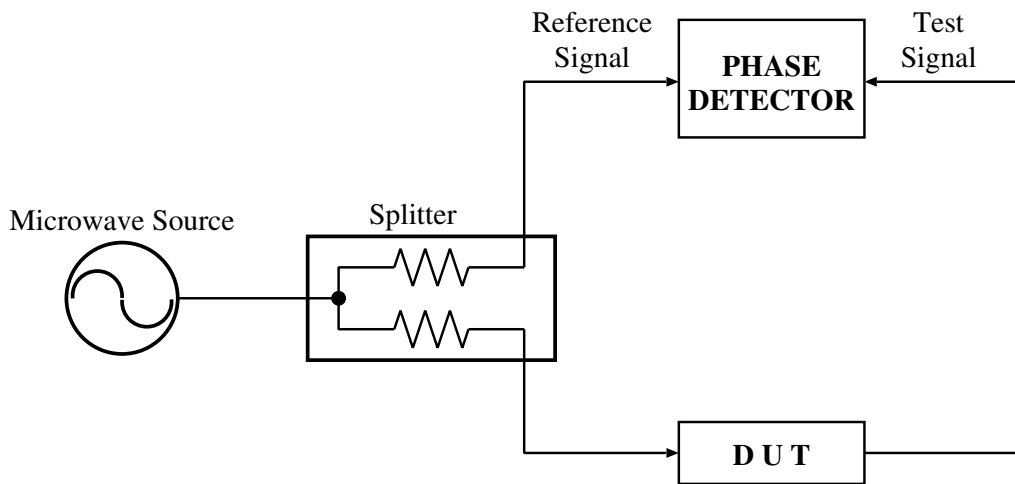


図 3.1: スプリッタで分割された基準信号と測定対象 (DUT:Device Under Test) を経験したテスト信号を比較することによって解析を行う。

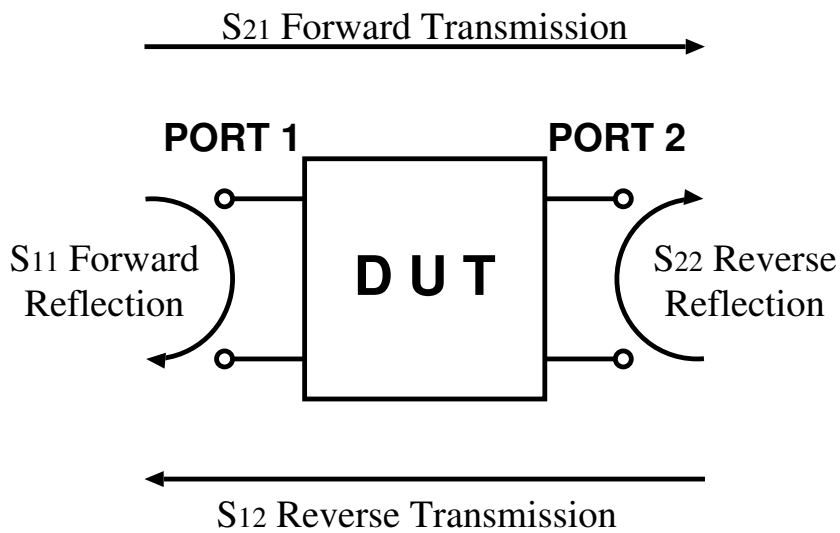


図 3.2: S-パラメータの概念図

3.4 VNA を用いた TDR

Time-Domain Reflectometry(TDR) は時間領域における反射測定であり、直接測定するには、高速のステップ波形を印加し、高速オシロスコープでそれを測定するという方法がある。

一方、VNA を用いて TDR を実現するには、FDR データを計測すれば良い。

線形なシステムにおいては、入力 $x(t)$ と出力 $y(t)$ の関係は、システムのインパルス応答 $h(t)$ を用いて次のような畳み込み積分で表すことができる。

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau \quad (3.4)$$

ここで、入力が式 (3.2) で与えられる場合、式 (3.4) を変形すると

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \exp(j\omega(t-\tau))d\tau \quad (3.5)$$

$$= \exp(j\omega t) \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \exp(-j\omega\tau)d\tau \quad (3.6)$$

$$= \exp(j\omega t)H(j\omega) \quad (3.7)$$

となるから、式 (3.3) を考慮すると、

$$H(j\omega) = S_{11} \quad (3.8)$$

となるから、

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1}[S_{11}] \quad (3.9)$$

となり、FDR データを逆フーリエ変換することによって TDR が実現できることが分かる。

ここで、フーリエ変換 \mathcal{F} 、逆フーリエ変換 \mathcal{F}^{-1} は次のように定義される。

$$F(\omega) = \mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t)dt \quad (3.10)$$

$$f(t) = \mathcal{F}^{-1}[F(\omega)] = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp(j\omega t)d\omega \quad (3.11)$$

例として、図 3.3 の様に、アンテナから距離 $r/2$ だけ離れた場所に理想導体の反射体がある場合を考える。減衰を考えないものとし、波数を k とすると、受信信号 $y(t)$ は、

$$\begin{aligned} y(t) &= \exp\{j(\omega t - kr)\} \\ &= \exp\left\{j\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)\right\} \end{aligned} \quad (3.12)$$

となる。ただし、 c は光速である。

この時、式 (3.7)(3.9) より、

$$\begin{aligned} h(t) &= \mathcal{F}^{-1}\left[\exp\left(-j\omega\frac{r}{c}\right)\right] \\ &= \delta\left(t - \frac{r}{c}\right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

となり、時間領域でのインパルス応答となっていることが確認できる。

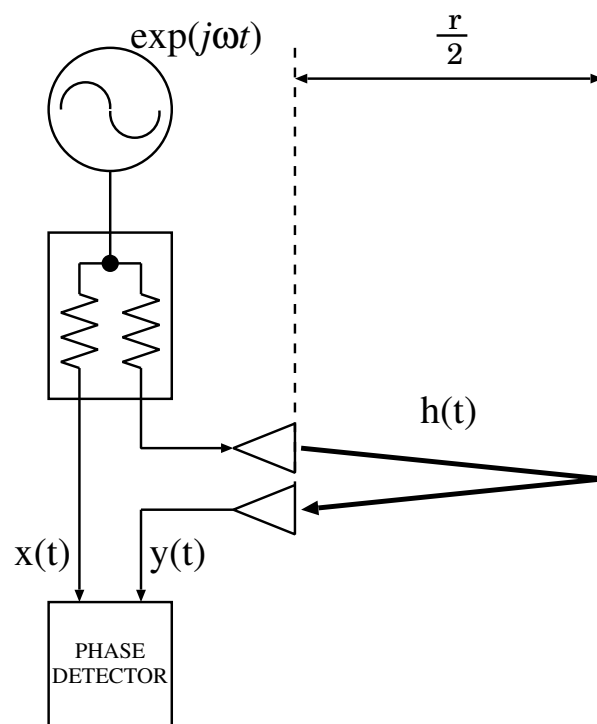


図 3.3: この場合、DUT は反射物を含む空間であり、空間のインパルス応答が $h(t)$ となる。

3.5 複素型自己組織化マップを用いた適応的画像区分化

レーダイメージングにおける重要な処理の一つとして画像区分化があげられる。InSAR などの干渉型のレーダを用いて測定を行うと、振幅（対象物の反射率を反映）と位相（アンテナと対象物の距離を反映）を含んだ複素データを得ることが可能である。

単一周波数での干渉型合成開口レーダ (InSAR) データにおいては、画像区分化を行う際に複素型自己組織化マップ [26] を用いることが有効であることがすでに Suksmono らによって確認されている [27]。

SOM(Self Organizing Map:自己組織化マップ) [28] [29] [30] を用いたレーダ画像区分化ではまずレーダ画像を小さなブロックに分割し、そのブロックごとに、そのブロックの統計的性質を反映した特徴ベクトルを生成する。この特徴ベクトルの情報空間における分布を反映するような区分化を行うことにより、画像区分化を行っている。

3.6 周波数領域に拡張された適応的三次元レーダ画像区分化

本研究の大きな特徴として、複数周波数において計測を行っているということが挙げられる。本研究の目的でもある地中埋設物探査を行う際には、深さ方向の情報というものが不可欠であり、本システムではそれを複数周波数を利用した干渉型レーダを用いることによって実現しようとしている。

周波数領域でのデータが、時間方向（本研究においては深さ方向）のデータと本質的には等価であるということは、フーリエ変換などの手法によっても確認ができるが、本論文では、フーリエ変換のように周波数と時間情報を線形に変換するのではなく、適応的に処理を行うことを考え、従来の空間領域のみの特徴ベクトル抽出を拡張し、周波数情報を積極的に利用した特徴ベクトル抽出手法を提案する。

3.7 周波数領域に拡張された特徴ベクトルの抽出

図 3.4 に示すように、区分化システムは特徴抽出器と、自己組織化マップ (SOM:Self Organizing Map) の二段からなっている。

まず、測定周波数点数 F 枚の入力画像からそれぞれ $L \times L$ の小ブロックが切り出される。その後、特徴抽出器によってそのブロックの統計的性質を示す特徴ベクトル（複素型の平均値と共分散）を計算する。

その後、特徴ベクトルは SOM に対する入力となり、そのブロックがどのクラスに属するかを分類する。

以上の作業をすべてのブロックで繰り返し、最終的な区分化が行われる。

本システムにおいては、各ブロックは平均 M 、二次の共分散 $K(\xi, \eta)$ といった統計的な量によって特徴付けられる。また、 K は、基準周波数 f_b 内の空間領域における共分散 K_s と、本論文が新たに提案する周波数領域における共分散 K_f に分けられる。ここで、 (i, j) 点の周波数 f におけるデータを $z(i, j, f) = (\text{In-phase voltage}) + \sqrt{-1} \times (\text{quadrature-phase voltage})$ とするとき、 $L \times L$ のブロックの M 、 K は次の式で与えられる。

$$M = \frac{1}{L^2} \sum_{i=0}^{L-2} \sum_{j=0}^{L-2} z(i, j, f_b) \quad (3.14)$$

$$K(\xi, \eta, \Delta f) = \frac{1}{L^2} \sum_{i=0}^{L-2} \sum_{j=0}^{L-2} z(i, j, f_b) z^*(i + \xi, j + \eta, f_b + \Delta f) \quad (3.15)$$

本システムではこれを 2 次まで考えている。すなわち、平均 M 、分散 $K(0, 0, 0)$ (エネルギー)、共分散 $K(0, 1, 0)$ 、 $K(1, 0, 0)$ 、 $K(1, 1, 0)$ 、そして周波数領域における共分散 $K(0, 0, \Delta f_n)$ を考える。よって、特

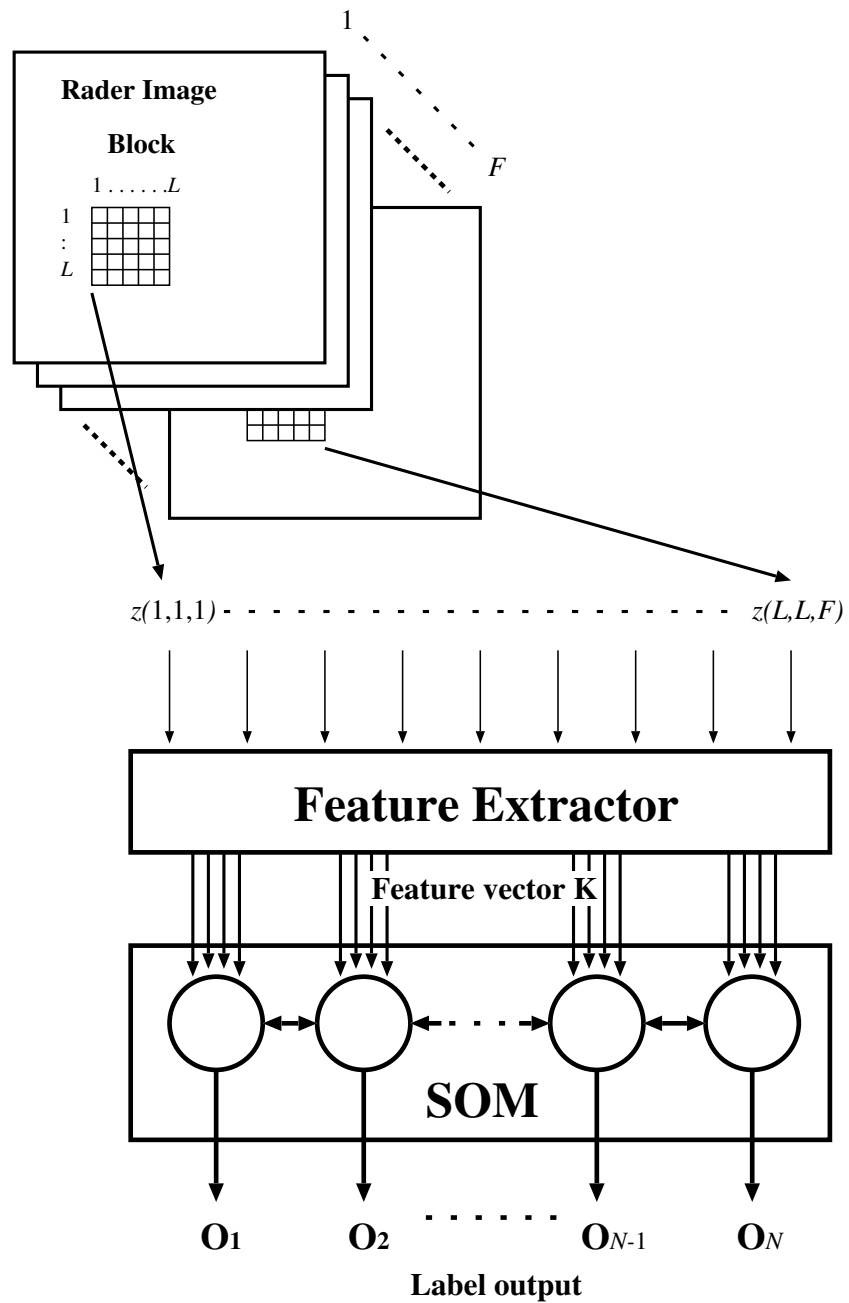


図 3.4: 適応的三次元レーダ画像区分化システムの構成

徴ベクトル \mathbf{K} は次のようになる。

$$\mathbf{K} \equiv [\mathbf{K}_s, \mathbf{K}_f] \quad (3.16)$$

$$\mathbf{K}_s \equiv [M, K(0, 0, 0), K(0, 1, 0), K(1, 0, 0), K(1, 1, 0)] \quad (3.17)$$

$$\mathbf{K}_f \equiv [K(0, 0, \Delta f_1), K(0, 0, \Delta f_2), \dots, K(0, 0, \Delta f_n)] \quad (3.18)$$

式 (6.21)..(3.18) において、 $K(0, 0, 0)$ は常に実数であり、その他は複素数である。

このように、周波数方向に対しても共分散をとることにより、特定の深さの部分に周囲に比べて特徴的な部分があった場合には、その深さに対応した特定の周波数に特徴的な値が検出されることが期待できる。また、それによって、その部分が特徴ベクトル K の情報空間上で別の領域に分布し、その結果として別の領域として区分化されることが期待できる。

通常、我々が画像を区分化する場合を考えてみると、山があった場合にはその山を一つの領域として区分化するであろう。すなわち、傾斜の大きさに着目するのであって、傾斜の向きにはあまり注目しない。そのようなことを考えると、空間領域におけるパラメータは無指向性であるべきである。

ここで、 $K(\xi, \eta, f_b) \in \mathbf{K}_s$ を次のように表す。

$$K_s(\xi, \eta, f_b) = |K(\xi, \eta, f_b)| e^{j\varphi(\xi, \eta, f_b)} \quad (3.19)$$

式 (3.19) においては、位相項 $\varphi(\xi, \eta, f_b)$ に傾斜情報が含まれていると考えられるから、傾斜に関して向きを持たない新たなパラメータ K'_s を定義する。

$$K'_s(\xi, \eta, f_b) = |K(\xi, \eta, f_b)| e^{j|\varphi(\xi, \eta, f_b)|} \quad (3.20)$$

式 (3.20) を用いることによって、新たな特徴ベクトル \mathbf{K}' を次のように定義する。

$$\mathbf{K}' \equiv [\mathbf{K}'_s, \mathbf{K}_f] \quad (3.21)$$

3.8 SOM による区分化と SOM のダイナミクス

本システムでは図 3.4 に示されるように、適応的な区分化を行うために SOM を用いている。SOM は適応的な区分化を行うニューロ的構造である。SOM は一連の入力信号に対して、代表値（クラスを代表するベクトル）を生成し、その後各入力値がどのクラスに含まれるかを分類する。

生成されたそれぞれの代表値の情報空間における位置は、入力信号の情報空間における分布を反映している。この情報空間は、特徴ベクトルを構成する基底ベクトルによって構成される。代表値の位置を適応的に変化させることによって、システムは適切な区分化を行うことができる。

適応的な代表値の生成は以下のような手順で行われる。ここでは、クラスの数固定されている場合を考える。クラス数はアプリケーションの性質や、入力画像によって決められる。図 3.5 は、SOM による適応的信号処理を概念的に示した物である。

はじめに、代表値を情報空間にランダムに配置する。その後、特徴ベクトルが一つ一つ SOM に入力される。SOM は入力された特徴ベクトルに最も近い代表ベクトルを探し、入力ベクトルは最も近い代表ベクトルに代表されるクラスに分類される。それと同時に、代表ベクトルは少しだけ入力ベクトルの方へ近付けられる。この作業を繰り返すことによって、この代表ベクトルは入力ベクトルの情報空間における濃度が高い方へ移動する。

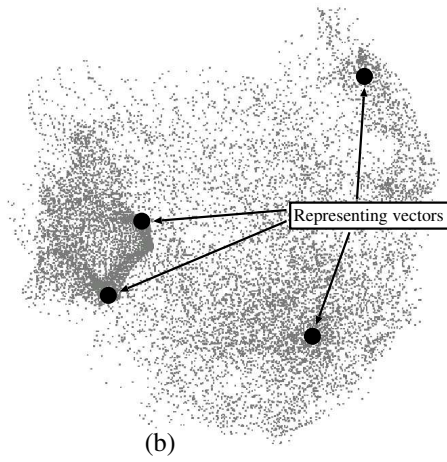
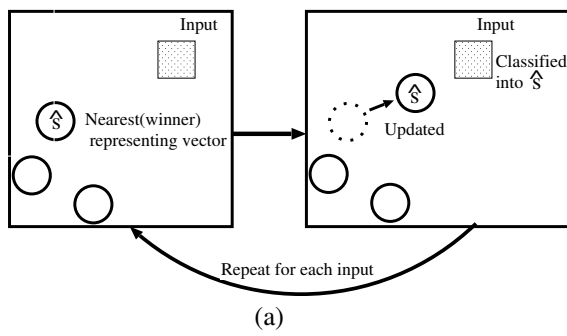


図 3.5: SOM の概念図

代表値の位置の変更が終了したら、次に SOM は入力ベクトルの分類を行う。この分類は単純にどの代表ベクトルが最も入力ベクトルに近いかによって行われる。代表値はすでに、入力ベクトルの空間分布を反映しているため、こういった単純な方法でも最適な分類が行われる。

以下に、代表値の生成と、入力特徴ベクトルの分類を行うアルゴリズムを示す。

適応的な代表ベクトルの生成 :

- 1) 参照ベクトルの初期化 : 参照ベクトル $\mathbf{w}_s(t)$ ($t = 0$) をランダムに初期化する。
- 2) 代表点の更新と適応的分類 : それぞれの特徴ベクトル \mathbf{K}' に対して以下の (a)(b) を繰り返す。

2.1 \mathbf{K}' が属するクラス $C_{\hat{s}}$ を探す。

$$\begin{aligned} \mathbf{K}' &\in C_{\hat{s}} \\ \text{if } \|\mathbf{K}' - \mathbf{w}_s(t)\| &= \min_s \{\|\mathbf{K}' - \mathbf{w}_s(t)\|\} \end{aligned} \quad (3.22)$$

ここで、 $C_{\hat{s}}$ はクラスであり、 $\|\cdot\|$ はユークリッド距離を表す。

2.2 参照ベクトルを更新する。

$$\mathbf{w}_s(t+1) = \mathbf{w}_s(t) + h_{s\hat{s}}(t)[\mathbf{K}' - \mathbf{w}_s(t)] \quad (3.23)$$

ここで、 $h_{s\hat{s}}(t)$ は近傍関数である。

近傍を用いていない SOM では局所相互作用が生じないために、連続関数の近似ができない可能性がある。つまり、地理的に近く、ある幾何学的距離ないにある複数のノードを同じ入力 x に対して活性化することにより、局所的な緩和または平滑かを生むことができる。そして、連続して学習を進めることによって大局的な順序づけを実現できる。

ここで、最適ノード c と、任意のノード i に対して、時刻 t における近傍関数は $h_{ci}(t)$ と表現できる。近傍関数は以下のように表すことができる。

$$h_{ci}(t) = \begin{cases} \alpha(t) & (i \in N_c) \\ 0 & (i \notin N_c) \end{cases} \quad (3.24)$$

ここで、 α は学習率係数と呼ばれ、 $0 \leq \alpha \leq 1$ の値をとる。 $\alpha(t)$ と N_c の大きさ (近傍の範囲) は両方とも、時間とともに減少させることが多い。特に SOM を用いた学習が収束するためには、

$$h_{ci}(t) \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (3.25)$$

である必要がある。より滑らかな近傍を実現するために、以下のようなガウス関数を用いることもある。

$$= h_{ci}(t) = \alpha(t) \cdot \exp\left(-\frac{\|r_c - r_i\|}{2\sigma^2(t)}\right) \quad (3.26)$$

3.9 実験システムの構成

実験システムは、図 3.6 で示されるように、平面走査系としての X Y 位置決めテーブル、周波数軸上での測定を行うミリ波フロントエンド部、そして、システム全体を制御する PC を中心とした制御部から構成される。

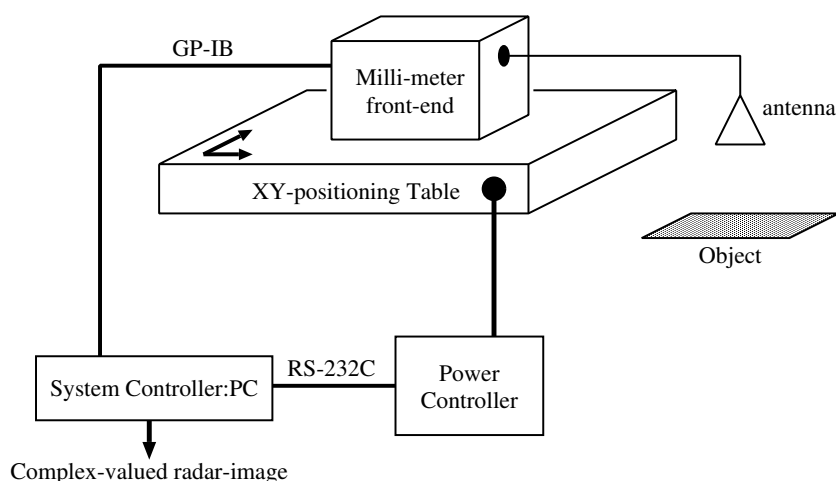


図 3.6: XY 二次元位置制御が可能なテーブルの上に VNA に載せ、アンテナとの相対位置が変化しないようになっている。システム全体は PC によって制御、計測が自動的に行われる。

3.10 平面走査系

平面走査系は、X 軸、Y 軸の 2 軸の位置決め装置を組み合わせて構成されており、それぞれはパワーコントローラから供給される電流によって回転トルクを発生するモータによって駆動している。位置決め精度は $\pm 0.1\text{mm}$ で、可動範囲は $1000\text{mm} \times 950\text{mm}$ である。

この位置決め装置上に、ミリ波フロントエンド部搭載用のアルミ合金製のテーブルを作製して設置している。このテーブルは VNA の転落防止用のストッパーとアンテナ取り付け用のガイドを有している。アンテナは長さ 1250mm のガイドの先端に設置されており、走査系を構成する金属による影響を低減するように設計した。

また、センサ部であるアンテナのみでなく、ミリ波フロントエンド部全体を走査系に組み込む構造としたのは、計測器とアンテナの相対位置の変化によって生じるケーブルの変形を低減するためである。これは、本実験では振幅情報のみではなく位相情報も利用しており、また、本実験ではミリ波帯という非常に波長が短い帯域の電波を利用しているため、ケーブルの変形による位相変化が無視できないと考えられるためである。

3.11 ミリ波フロントエンド部

ミリ波フロントエンド部は実際にミリ波を用いて計測を行う。測定原理としては第 3.2 節で述べたように、発信器によって生成された信号を分波器で分波し、そのうち一方を測定に用い、他方を参照信号として用いる。測定対象を経験したのち、再び受信された測定信号と、参照信号を干渉させることによって測定対象による振幅、位相の変化を検出する。これらの作業は VNA によって行われる。

測定信号の流れとしては、VNA から出た信号は変形による位相変化が小さいリジッド同軸ケーブルを通して送信用ホーンアンテナに給電される。ホーンアンテナから放射された電波は測定対象で反射した後に、受信用ホーンアンテナで受信され、再びリジッドケーブルを通して VNA に戻る。

この結果として、受信される信号はケーブル、アンテナ、空間、測定対象に関する情報を持っている。

言い換えれば、式 (3.9) で与えられるインパルス応答は、この場合はケーブル、アンテナ、空間、測定対象全体のシステムに関するインパルス応答となっている。

3.12 制御部

制御部は主に、XY 位置決めテーブル用パワーコントローラと PC によって構成される。

XY 位置決めテーブル用パワーコントローラは、XY 位置決めテーブルの X 軸、Y 軸用モータに供給する電流をそれぞれ独立に制御することにより、二次元動作を可能としている。また、モータに付属したエンコーダがモータの回転角に応じた電気信号をコントローラに出力する。コントローラはこのエンコーダ信号を位置フィードバック信号として用いることによって、 $\pm 0.1\text{mm}$ という精度での位置決めを実現している。

PC は、XY 位置決めテーブル用パワーコントローラ制御、VNA 制御、計測データの受信を行っている。

XY 位置決めテーブル用パワーコントローラは、PC から RS-232C インターフェースを通じて動作制御されており、XY 位置決めテーブルの位置、速度、加速度などの情報を PC にフィードバックしている。

VNA は PC から GP-IB インターフェースを通じて制御されており、測定結果や、計測状態などを PC にフィードバックしている。

全体の制御は PC によって行われており、本システムは制御用 PC として EPSON 製 PC9801 互換機 PC-486SE を使用し、制御用のプログラムは C++ を用いて記述した。

3.13 計測されるデータの特徴

これまで述べたように、XY 二次元測定範囲の各点において、周波数 F 領域での掃引を行うことによって、 XYF 三次元でのデータが取得できる。具体的に言えば、各ピクセル値が VNA によって測定される複素型のデータ S_{11} である $X \times Y$ ピクセルの画像が測定周波数点数 F 枚取得できるということである。これらの画像をいったん PC に取り込んだ後、各種処理を行っていくことを考える。

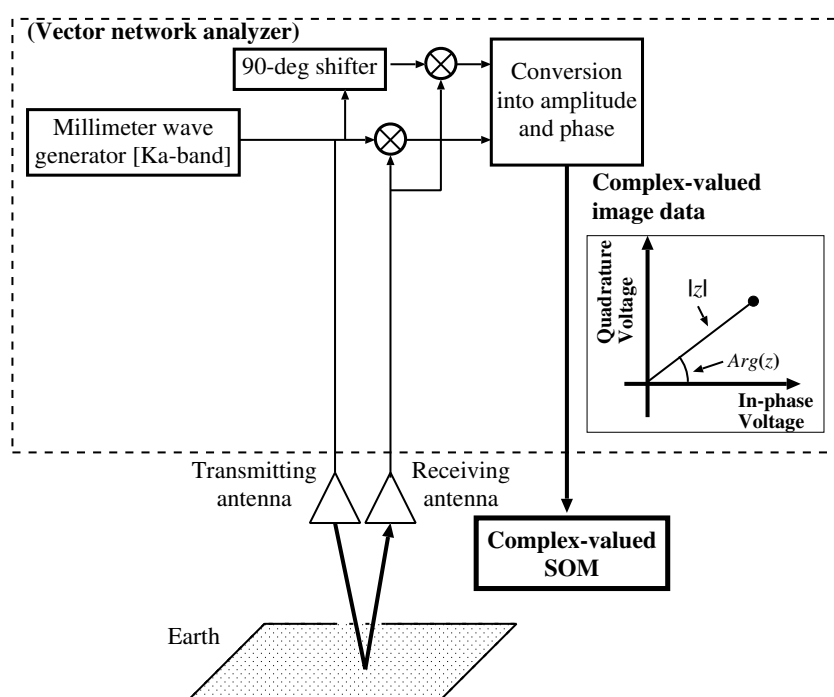


図 3.7: ミリ波フロントエンドの構成。主に VNA(Vector Network Analyzer) とホーンアンテナから構成される。

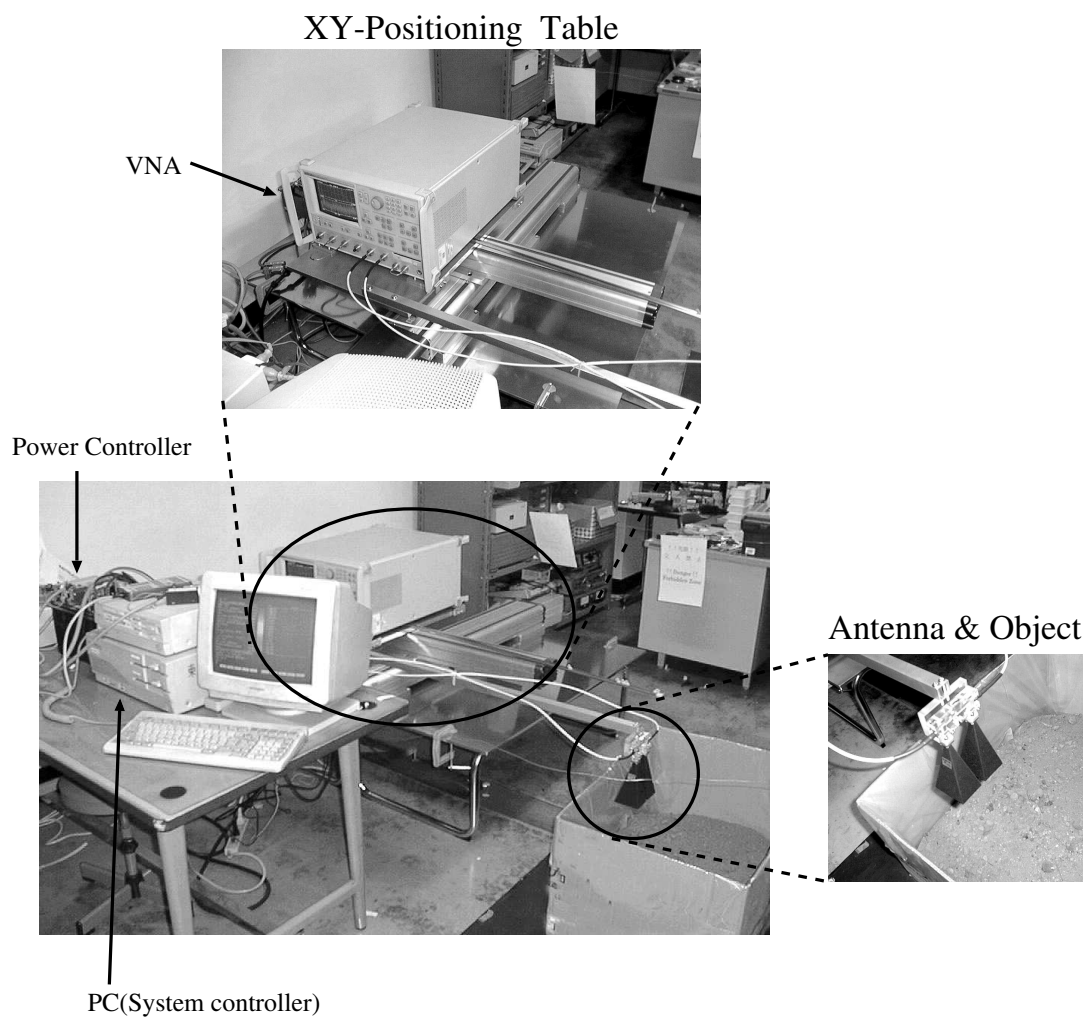


図 3.8: 実際の実験装置の様子。図 3.6 に対応する。

第 4 章： 実験

4.1 実験における諸パラメータ

測定はアンテナを下向きに向け、地面を観測するような形で行った。表 4.1 にそれぞれの測定対象の構成をまとめた。模擬地雷は火薬の代わりに火薬と同等の誘電率を持つ充填物を用いている以外は、実物に忠実に作製されている。本実験では中国製 TYPE72 型地雷の模擬地雷を用いた。測定に関する諸パラメータは表 4.2 の通りである。

4.2 地表面に置かれた金属缶に関する実験

まず、地表面に置かれた金属缶の測定を行った。何も処理を加えていない測定結果のうち、周波数が 30GHz での測定結果を表示したものが図 4.1 の左側の画像である。この画像では、振幅と位相をグレースケールで表示している。このように、金属のように反射率の高いものを地表面に置いて直接測定した場合は、測定結果を人間の目で見ると、中央周辺に丸い円状のものが存在することが見て取れる。

この結果を、複素型 SOM を用いて区分化した結果が図 4.1 の右側である。この画像では、グレースケールのそれぞれの色をある一つのクラスに対応させている。また、それぞれのクラスの表示色は、画像中の面積が大きいものから順に、お互いが近い色にならないように決めている。この結果を見ると、何も処理していないデータでは、中央のパターンが同心円状に変化しているにも関わらず、そのパターンを一つの領域として区分化できていることが見て取れる。人間がこの処理前のデータを見た場合には、おそらく中央付近に円状の物体があり、その周りはランダムであるといった風に認識するだろう。このことを考えると、複素型 SOM による区分化の結果は妥当なものであると考えられる。

4.3 地表面近くに埋設された金属缶に関する実験

次に、地表面近くに埋設された金属缶に関する実験を行った。測定結果は図 4.2 の右側の様になった。まず、図 4.1 と比べてわかるように、地表での反射のために金属による反射の影響が比較的小さくなっている。中心付近には円形の反射パターンが見えるものの、地表に置いた場合の結果に比べるとはっきりしないものとなっている。

続いて、図 4.2 の右側に区分化の結果を示す。地表に置いた場合に比べると、円形のパターンとして区分化されていないものの、中心付近が別の一つの領域として区分化されており、金属缶の認識が行われていると言える。

4.4 地表面に置かれた模擬地雷に関する実験

ここで、測定対象を比較的検出が容易であると考えられる金属缶から、検出が比較的難しいプラスチック製の模擬地雷に変えて以降の実験を行った。

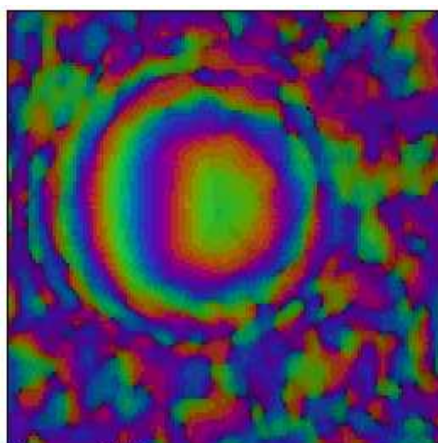
まず、地表面に模擬地雷を設置して測定を行った。その結果を図 4.4 の左側に示す。これは、金属を地表

表 4.1: 測定対象である金属缶と模擬地雷の構成

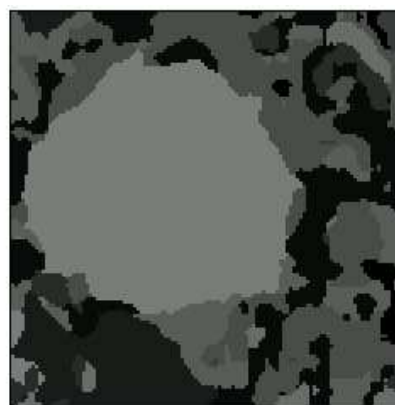
	金属缶	模擬地雷
直径	100mm	78mm
高さ	45mm	40mm
材質	金属	合成ゴム, 鋼, 樹脂, 火薬と同等の誘電率を持つ充填物

表 4.2: 実験における諸パラメータ

掃引開始周波数 f_{\min}	30.0GHz
掃引終了周波数 f_{\max}	40.0GHz
周波数サンプル数 N_f	81
周波数間隔 Δf	125MHz
空間走査範囲 $X \times Y$	381.0mm \times 381.0mm
空間走査間隔 ΔX (ΔY)	3.0mm
空間サンプル数 $N_x \times N_y$	128 \times 128
区分化クラス数 s_{\max}	16



Original Image



Classified Data

図 4.1: 地表に置かれた金属缶の区分化の様子

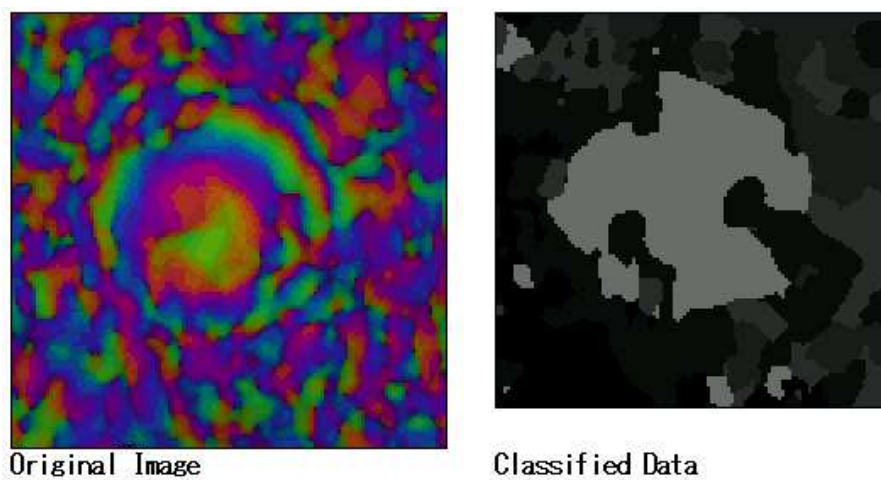


図 4.2: 地表面近くに埋設された金属缶の区分化の様子

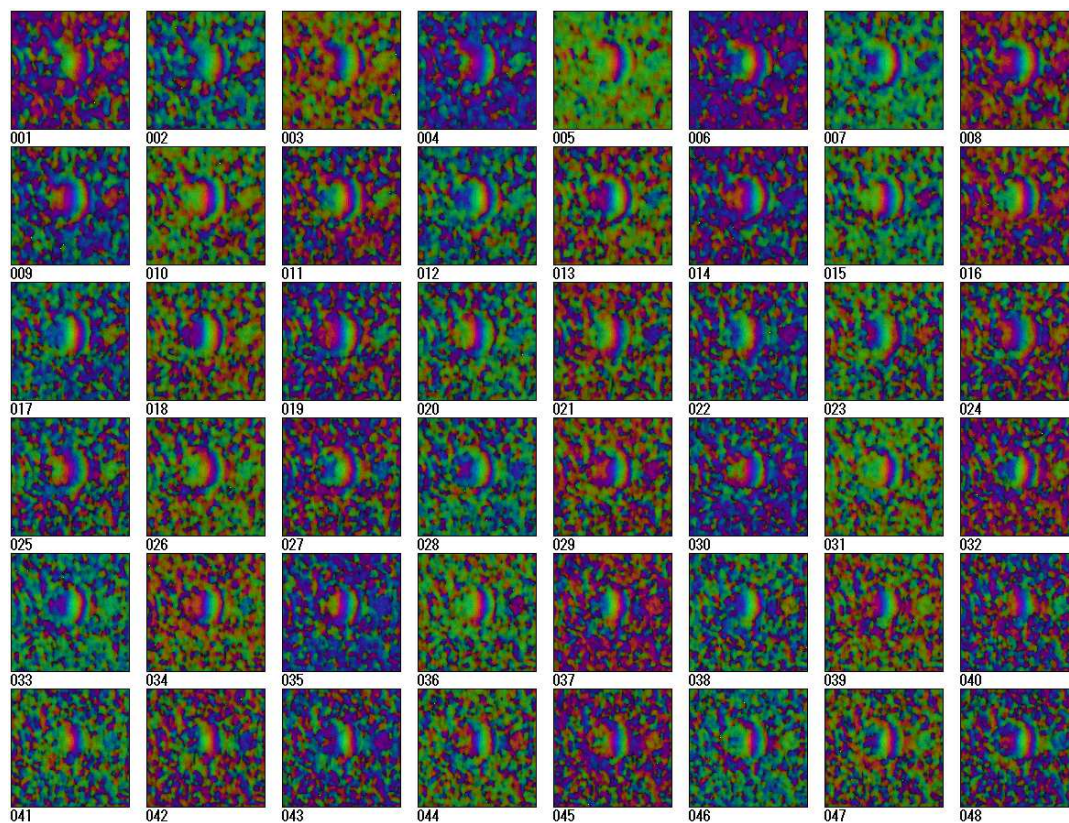


図 4.3: 地表面に置かれたプラスチック地雷の複数周波数での測定結果

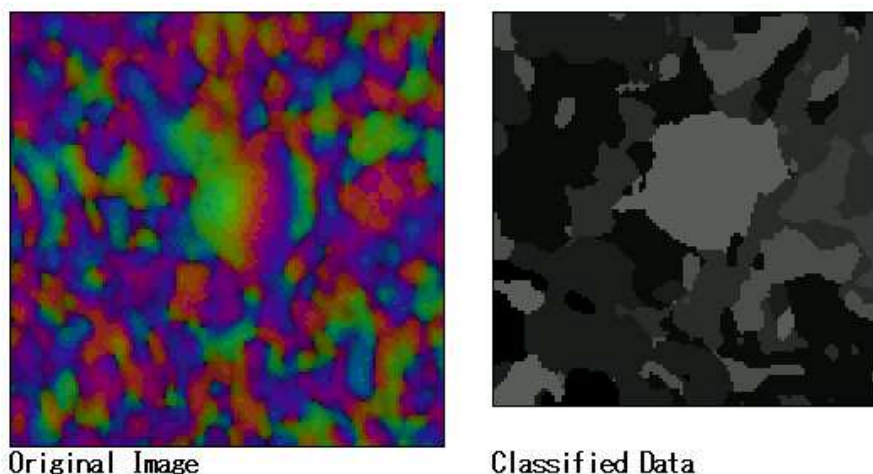


図 4.4: 地表に置かれたプラスチック地雷の区分化の様子

においた図 4.1 はもちろんのこと、図 4.2 と比較しても明らかに測定対象が見えにくい結果となっている。

また、図 4.3 に複数の周波数での測定結果を示す。この図を見ると周波数によっては中心付近の地雷によるパターンがはっきり見えるものと、あまり良く見えないものがあることがわかる。即ち、周波数に対して反射が依存していると言える。このことから、複素自己組織化マップの特徴ベクトルに、周波数相関に関するものを採用したことの有効性が期待できる。

実際に、これを区分化したものを図 4.4 の右側に示す。これを見ると、中心付近に円形の物体が存在していることがはっきりとわかる。すなわち、複素自己組織化マップによる区分化が適切に行われていると考えられる。

4.5 地表面近くに埋設された模擬地雷に関する実験

次に、地表面近くに埋設された模擬地雷に関する実験を行った。まず、測定結果は図 4.5 の左側の様になり、中心付近に何かがあると思って見れば何かがある、という程度にしか判別はできない。実際に何も情報を与えられずに人間がこの画像を見たとしても、そこに何かがあると判別するのは難しい。

この結果を区分化したものを図 4.5 の右側に示す。この図においては、中心付近に何か物体が存在していることをはっきりと確認することができ、地中に埋設されたプラスチック模擬地雷に関しても効果的な区分化が行われているといえる。

4.6 本実験のまとめ

本実験を通じて地中に埋設されたプラスチック地雷のイメージングが可能であることを示した。しかし、区分化されたターゲット領域の大きさは実際のものよりも大きくなっている。これは、アンテナのビームパターンが広がりを持っており、空間分解能があまり高くないことに起因していると思われる。

本システムではターゲット領域を区分化したが、プラスチック地雷認識などの応用を考えた際には、区分化された領域が何の領域なのかを識別する必要がある。具体的な例を挙げると、地雷領域、背景領域といった識別である。

この対象識別を行うにあたっては、区分化されたターゲット領域が実際のものよりも大きいということ

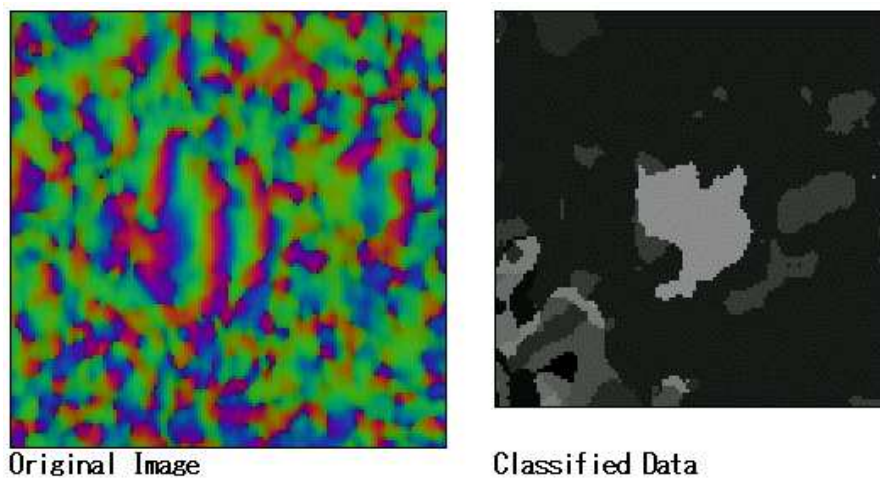


図 4.5: 地中に埋設されたプラスチック地雷の区分化の様子

は望ましいことではない。そこで、次章以降でその点の改善について述べる。

第 5 章： 合成開口による前処理

上記の実験では複素自己組織化マップ (Complex-valued Self-Organizing Map: C-SOM) を用いたレーダイメージングを行い、それによって地中に埋設されたプラスチック地雷のイメージングが可能であることを示した。しかし、区分化された領域が、実際のターゲットよりも大きくなってしまいうという問題点もあった。そこで、C-SOM によって区分化を行う前に、前処理として空間分解能を高めることを考える。具体的には、合成開口処理を行うことによって空間分解能を高めることを目指す。また、合成開口処理を行うことによって信号対雑音比が向上し、より高精度での区分化がなされるのではないかと考える。

5.1 合成開口処理

一般に図 5.1、図 5.2 のように、大開口のアンテナほど方位分解能は高くなる。しかし、実際の測定では大きなアンテナの利用は困難である。そこで、小開口アンテナを用いて大開口アンテナと同様に高い方位分解能が得られる手法を用いる。この処理を合成開口処理という (図 5.3)。分解能を決定するのはアンテナのビームの広さであるが、これはアンテナの開口の大きさに関する。アンテナからの放射ビームの広がり

角 β とアンテナの開口長 D と波長 λ の関係は

$$\beta \approx \frac{\lambda}{D} \quad (5.1)$$

となり、アンテナとターゲットまでの距離を R とすると、方位分解能は

$$\Delta x = \beta R \approx \frac{\lambda R}{D} \quad (5.2)$$

となる。

次に、合成開口処理を行った時の方位分解能を考える。ターゲットが距離 R にあるとする。このターゲットに開口長 D のアンテナから電波が照射されたとすると、式 (5.2) から βR の距離だけターゲットは電波を受けることになる。そこで、受信アンテナに帰ってくる電波は、長さ βR の開口長 D' のアンテナから電波を受けることになる。この開口長 D' の分解能は

$$\Delta x' = \frac{\lambda R}{D'} = \frac{\lambda R}{\beta R} = \frac{\lambda}{\beta} \approx D \quad (5.3)$$

となり、アンテナの開口と同程度になる。以上が一般的な合成開口処理の原理である。

実際には、以下のような処理を行う。

まず、送信アンテナから送信される連続波を $x(t)$ とし、地中の点 (x_0, y_0, z_0) での反射係数を $g(x_0, y_0, z_0)$ とすると、受信波 $y(t)$ は以下のように表せる。

$$y(t) = g(x_0, y_0, z_0)p(x, y, x_0, y_0, z_0)x(t) \quad (5.4)$$

ただし、

$$p(x, y, x_0, y_0, z_0) = \exp\left(-j\frac{4\pi f R \sqrt{\epsilon_r}}{c}\right) \quad (5.5)$$

また, f は測定周波数, R はアンテナとターゲットの距離, ϵ_r は地中の比誘電率を表す. よって,

$$S_{11} = g(x_0, y_0, z_0)p(x, y, x_0, y_0, z_0) \quad (5.6)$$

以上から, (x, y) での受信信号は

$$S_{11}(x, y) = \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty g(x_0, y_0, z_0) \times p(x, y, x_0, y_0, z_0) dx_0 dy_0 dz_0 \quad (5.7)$$

となる. 以上より, 反射係数 $g(x_0, y_0, z_0)$ は,

$$g(x_0, y_0, z_0) = \int_{-\frac{L_y}{2}}^{\frac{L_y}{2}} \int_{-\frac{L_x}{2}}^{\frac{L_x}{2}} S_{11}(x, y) \times p^*(x, y, x_0, y_0, z_0) dx dy \quad (5.8)$$

となる.

5.2 合成開口処理の結果

ここでは、合成開口処理の効果をわかりやすいように、地表に設置した金属缶のレーダイメージを合成開口処理を行った結果について述べる。Fig.5.5 に合成開口処理を行う前のレーダ画像処理の結果を示す。この画像では一辺が 381mm となっており、金属缶と思われる同心円状のパターンの大きさは約 20cm となっている。しかし、実際の缶の直径は約 10cm で、実際のサイズを反映していないことがわかる。一方、Fig.5.6 をみると、缶の大きさは約 10cm となり、実際の大きさに近くなっている。また、振幅画像を比べると、処理前のは缶の中心付近で最も強度が強くなっており、周囲に行くに従って緩やかに減衰している。処理後のものでは、缶の範囲では強度はほぼ均一となっており、輪郭もはっきりしている。また、位相画像を比べても、周囲の土のランダムな部分と缶の規則的な部分の差異がはっきりしていることが見て取れる。

5.3 実験

以下に、合成開口処理を行ったデータを用いた区分化の結果を示す。

地上に設置した金属缶を、区分化すると、図 5.8 のようになる。参考として図 5.7 に合成開口処理を行わずに区分化を行った結果を示す。この結果を比較すると合成開口処理を行ったものはターゲットである金属缶の形がより円に近い形で区分化されていることが分かる。また、背景部分もより少ないクラスに区分化されており、背景のランダムなテクスチャを一つのものとして認識していることが分かる。また、缶の大きさも実際の大きさとほぼ同じ大きさの領域として認識されている。

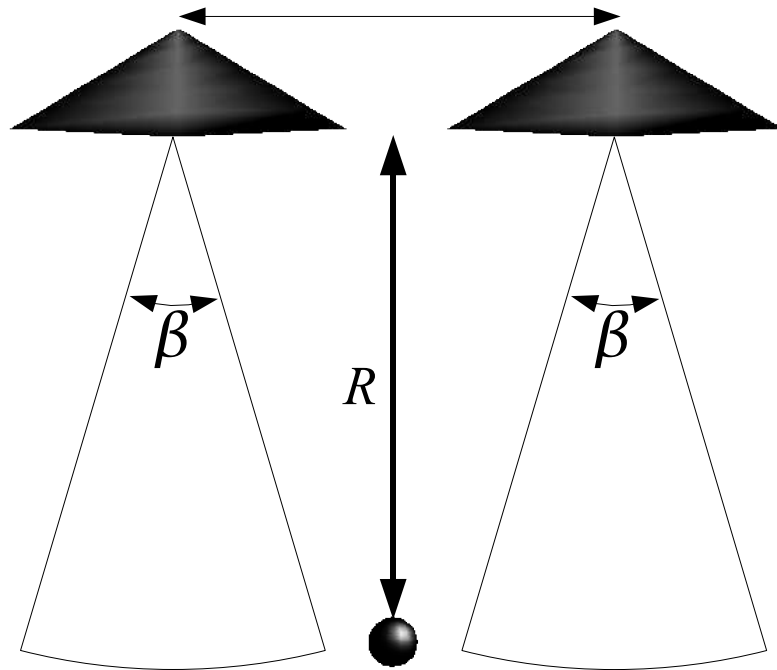


図 5.1: 大開口アンテナの方位分解能

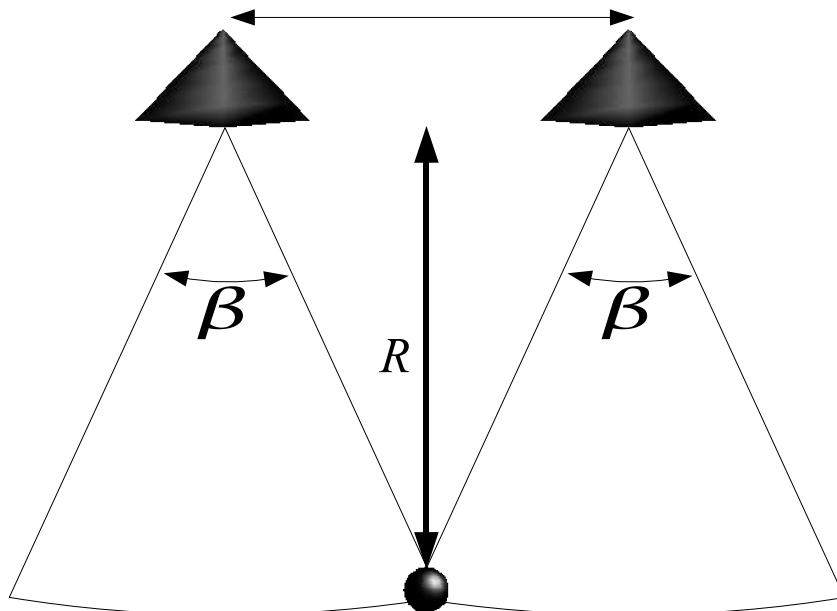


図 5.2: 小開口アンテナの方位分解能

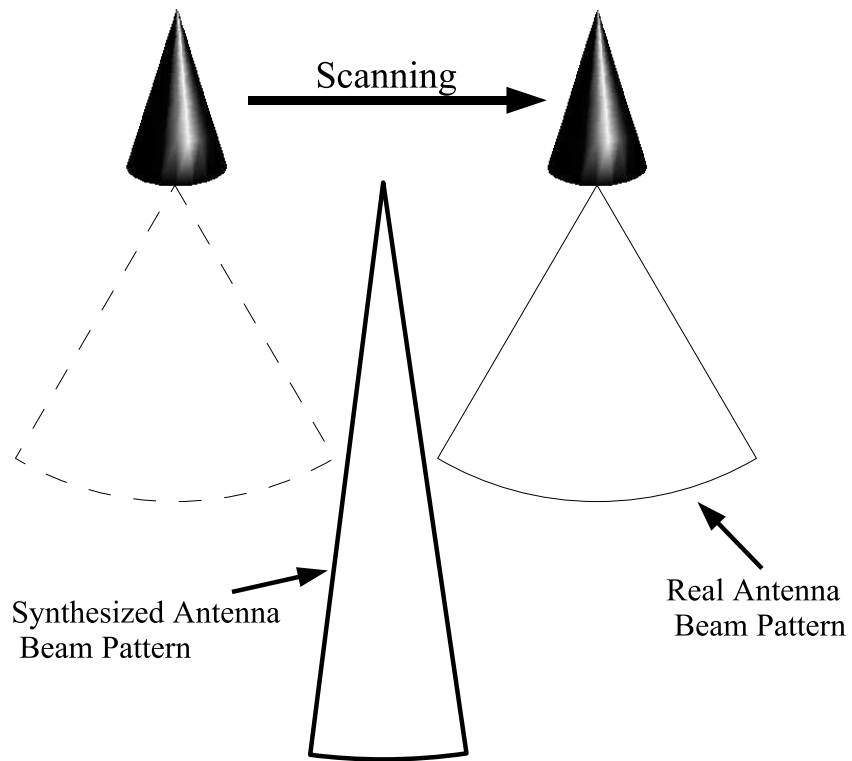


図 5.3: 合成開口によるビームパターン

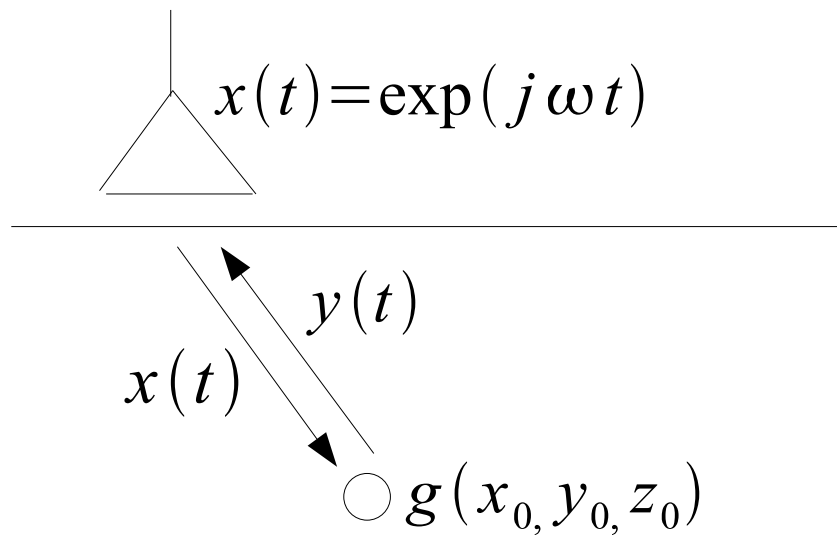


図 5.4: 測定の位置関係

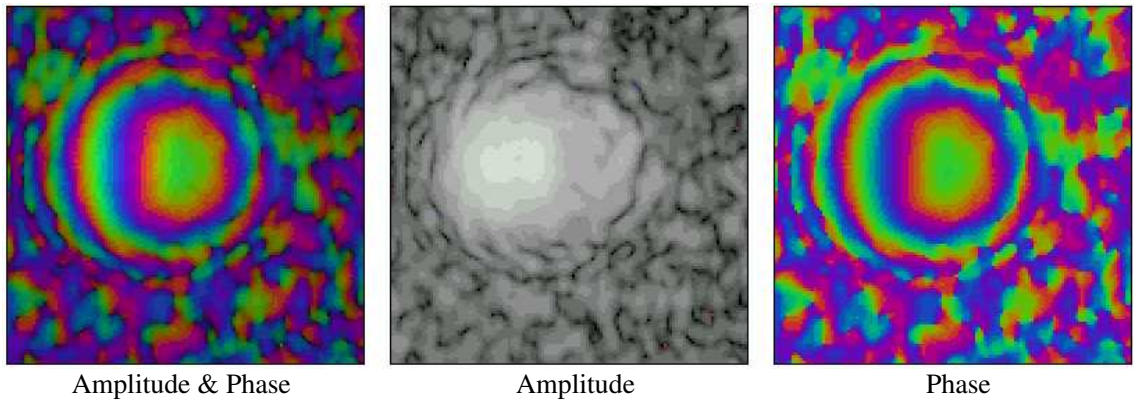


図 5.5: 地表に設置した金属缶の合成開口処理前のレーダ画像

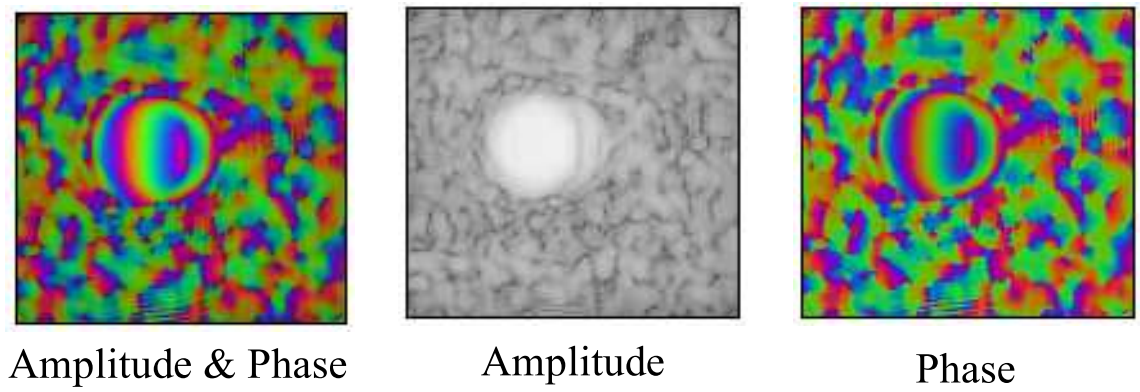


図 5.6: 地表に設置した合成開口処理後のレーダ画像

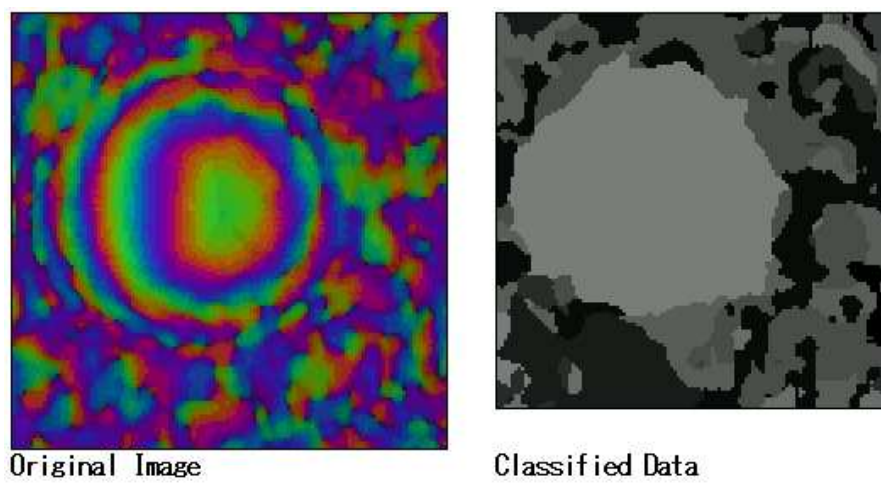


図 5.7: 地表に置かれた金属缶の区分化の様子

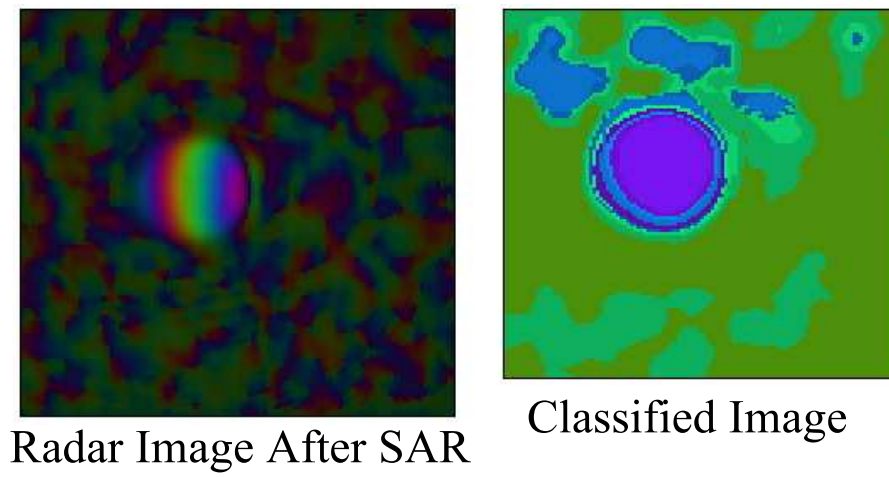


図 5.8: 地表に設置した金属缶を合成開口処理を行った後に区分化したもの

第 6 章： 周波数領域におけるゆらぎ に着目した改善

第 5 章では、合成開口処理により区分化の性能が向上することを示した。一方、合成開口処理を行ったデータの周波数領域での位相変化を調べたところ、人工的な構造を持つ測定対象と、それ以外のランダムな背景では位相変化に差異があることが分かった。

本章ではその差異に着目した新たな特徴ベクトルの抽出手法を提案し、それを用いた区分化の結果を示す。

6.1 位相アンラッピング

第 3 章で述べたとおり、干渉型レーダにおいては位相情報が測定対象との距離に関する情報を持っている。また、この位相情報は測定に用いる周波数が増えることによって回転する。

しかし、干渉型レーダで観測されたデータは、 $(-\pi, \pi]$ のように主値 2π の範囲に折り畳まれる。そのため、周波数領域における位相回転の様子を知るには、この折り畳まれた値を元の値に開く必要がある。この作業を位相アンラッピング [31] と呼んでいる。たとえば、一次元の関数、

$$f(t) = 10 \sin 10t \quad (6.1)$$

を考えてみる。このデータを等間隔でサンプリングした場合、実際の分布は図 6.1 における \times 印で表されるものであるにも関わらず観測される値の分布は $+$ 印で表されるものになってしまう。

つまり、観測されるデータを ϕ として表すことにするとその実際の値 ψ は整数 k を用いて

$$\psi = \phi \pm 2\pi k (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (6.2)$$

として表され位相アンラッピングとはこの正しい k を求めることと同義である。

6.2 一次元位相アンラッピングアルゴリズム

我々のシステムでは、周波数を変化させて測定を行っているため、周波数の変化に伴って位相も変化する。しかし、第 6.1 節でも述べたように、観測される位相は主値 $(-\pi, \pi]$ に折り畳まれたものである。そこで、周波数軸上で変化する位相を調べるために、それをアンラップすることを考える。これには一般的な一次元位相アンラッピングのアルゴリズムが適用できる。

ここでは、例として

$$s(f) = e^{j5\pi f} \quad (6.3)$$

という周波数変化に伴って位相が変化する複素信号を考える。

このとき、この受信された信号 $s(f)$ から連続した位相である $\varphi(f) = 5\pi f$ を復元することを考える。受信される信号は $\psi(f)$ は、以下のようにして位相を取り出すことができる。

$$\psi(f) = \arctan [\Im(s(f)), \Re(s(f))] \quad (6.4)$$

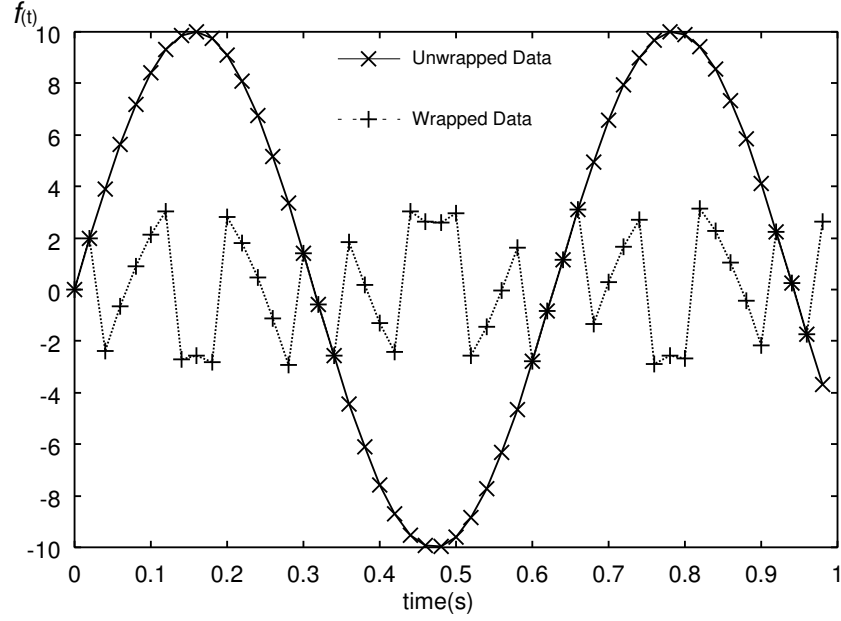


図 6.1: 位相アンラッピング: ラップされたデータは "+" マークであり、アンラップされたデータは "x" である。

ここで, \Re , \Im はそれぞれ実部と虚部を示している. この \arctan 演算子は, 次のようにラッピング演算子として考えることができる.

$$\psi(f) = \mathcal{W}[\varphi(f)] \quad (6.5)$$

位相アンラッピングのアルゴリズムは以下のようなものである [32].

ラッピング演算子 \mathcal{W} は位相を $(-\pi, \pi]$ に折り畳むので,

$$\begin{aligned} \mathcal{W}\{\varphi(f)\} = \psi(f) &= \varphi(f) + 2\pi k(f), \\ f &= 0, 1, \dots, N_f - 1 \end{aligned} \quad (6.6)$$

と表せる. ここで, $k(f)$ は,

$$-\pi < \psi(f) \leq \pi \quad (6.7)$$

となるように選んだ整数列である.

ここで, 差分演算子 Δ は次のように定義される.

$$\begin{aligned} \Delta\{\varphi(f)\} &= \varphi(f+1) - \varphi(f), \\ \Delta\{k(f)\} &= k(f+1) - k(f), \quad f = 0, 1, \dots, N_f - 2 \end{aligned} \quad (6.8)$$

式 (6.6)(6.8) を用いて折り畳まれた位相の差分を求めることにより, 次の式が得られる.

$$\Delta\{\mathcal{W}\{\varphi(f)\}\} = \Delta\{\varphi(f)\} + 2\pi\Delta\{k_1(f)\} \quad (6.9)$$

式 (6.9) に再びラッピング演算子を適用することによって,

$$\begin{aligned} \mathcal{W}\{\Delta\{\mathcal{W}\{\varphi(f)\}\}\} &= \mathcal{W}\{\Delta\{\psi(f)\}\} = \\ &= \Delta\{\psi(f)\} + 2\pi[\Delta\{k_1(f)\} + k_2(f)] \end{aligned} \quad (6.10)$$

が得られる. ここで, k_1 , k_2 の添字は二つのラッピング操作による整数列を区別するためのものである.

式 (6.10) の結果は折り畳まれた位相の折り畳まれた差分となっている. ラッピング演算子 \mathcal{W} は, $(-\pi, \pi]$ の値を生成するため, ここで, ナイキスト条件

$$-\pi < \Delta\{\varphi(f)\} \leq \pi \quad (6.11)$$

が満たされているとすると, 式 (6.10) における $2\pi[\Delta\{k_1(f) + k_2(f)\}]$ という項がゼロにならない.

したがって,

$$\Delta\{\varphi(f)\} = \mathcal{W}\{\Delta\{\mathcal{W}\{\varphi(f)\}\}\} = \mathcal{W}\{\Delta\{\psi(f)\}\} \quad (6.12)$$

を計算することによって,

$$\varphi(F) = \varphi(0) + \sum_{f=0}^{F-1} \mathcal{W}\{\{\Delta\mathcal{W}\{\varphi(f)\}\}\} \quad (6.13)$$

が得られる.

これより, 位相アンラッピングは以下のように計算することができる.

- 1) 位相の差分を計算し, 主値を求める. :

$$D(f) = \psi(f+1) - \psi(f) \quad \text{for } f = 0, \dots, N_f - 2$$

$$\Delta(f) = D(f) + 2\pi k(f), \quad -\pi < \Delta(f) \leq \pi$$

- 2) アンラップされた位相の初期化:

$$\varphi(0) = \psi(0)$$

- 3) 折り畳まれた位相の差分を足すことによってアンラップする:

$$\varphi(f) = \varphi(f-1) + \Delta(f-1) \quad \text{for } f = 1, \dots, N_f - 1$$

6.3 周波数領域における位相変化のゆらぎ

第 6.1 節で述べた位相アンラッピングを, 合成開口を施した位相データに施した後に, 周波数領域における位相変化を調べた. すると, 人工的な構造を持つ測定対象と, それ以外の背景領域では位相変化の様子が異なっていることが分かった.

図 6.2 は, 地表に置かれた金属缶部分での位相変化の様子である. この図を見ると, 周波数変化に対して線形に位相が変化していることが分かる. 他方, 図 6.3 は背景領域である土の部分での位相変化を表している. 図 6.2, 図 6.3 においては, 横軸が周波数を表しており, 30GHz-40GHz に対応している. 縦軸は位相を表している. 図 6.3 を図 6.2 と比較すると, 位相変化が揺らいでいることが分かる.

アンテナから放射された電波はある程度の広がりをもっている. そのため, 受信アンテナでは, 広がりのある面からの反射波をとらえることになる. この受信波をアンテナ開口面全体で積分したものが受信信号として観測されることになる. そのため, 表面がランダムに変化している背景部分 (地表面) で反射された電波は周波数変化に対して揺らぎを持つものと考えられる.

6.4 周波数領域における位相変化のゆらぎに着目した特徴ベクトル抽出

本節では第 6.3 節でのべた位相変化のゆらぎに着目した特徴ベクトルの抽出手法を提案する.

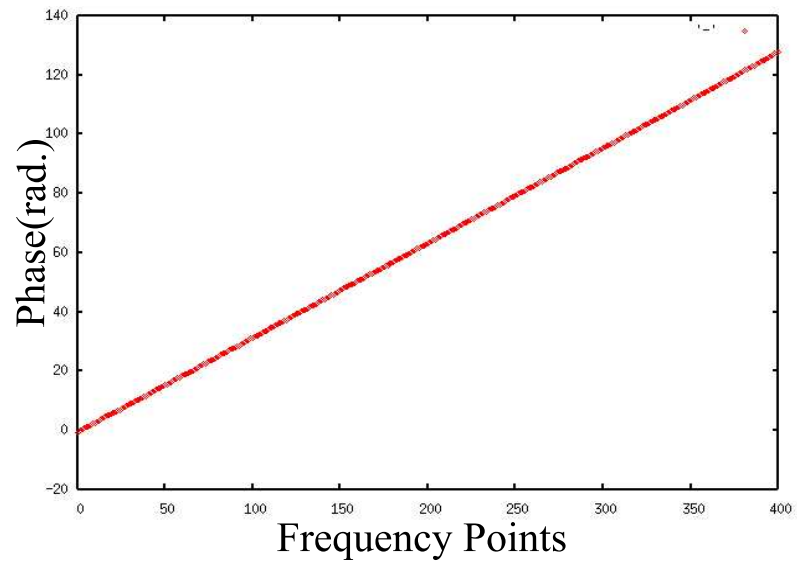


図 6.2: 金属缶部分での位相変化の様子

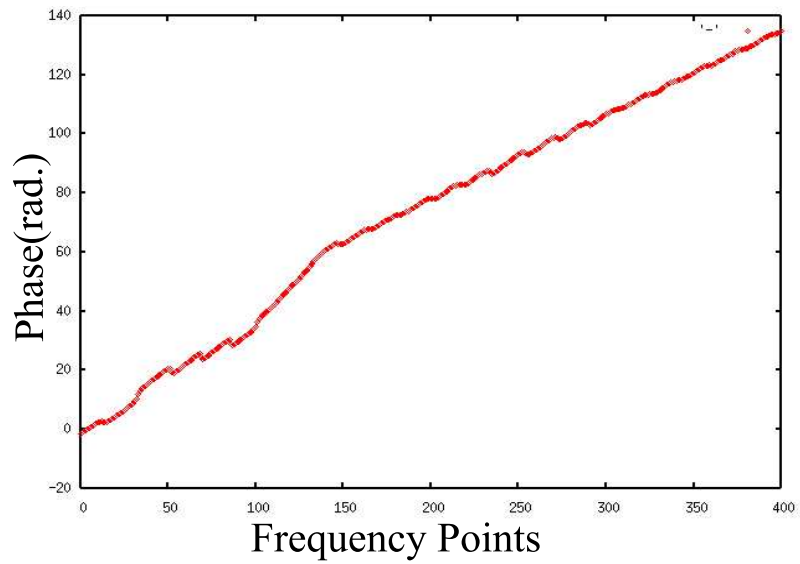


図 6.3: 背景領域での位相変化の様子

(i, j) 点の周波数 f におけるデータを $z(i, j, f) = (\text{In-phase voltage}) + \sqrt{-1} \times (\text{quadrature-phase voltage})$ とするとき、 $L \times L$ のブロックの平均 M 、空間における特徴ベクトル K は次の式で与えられる。

$$M = \frac{1}{L^2} \sum_{i=0}^{L-2} \sum_{j=0}^{L-2} z(i, j, f_b) \quad (6.14)$$

$$K_s(\xi, \eta) = \frac{1}{L^2} \sum_{i=0}^{L-2} \sum_{j=0}^{L-2} z(i, j, f_b) z^*(i + \xi, j + \eta, f_b) \quad (6.15)$$

本システムではこれを 2 次まで考えている。すなわち、平均 M 、分散 $K(0, 0, 0)$ (エネルギー)、共分散 $K(0, 1, 0)$ 、 $K(1, 0, 0)$ 、 $K(1, 1, 0)$ を用いる。

次に、周波数領域における特徴ベクトルについて考える。

(i, j) 点の f における位相を $\varphi(i, j, f)$ とする。すなわち、

$$\varphi(i, j, f) = \arg(z(i, j, f)) \quad (6.16)$$

である。

このとき、 $\varphi(i, j, f)$ を位相アンラッピングしたものを $\Phi(i, j, f)$ と表す時、周波数が ζ 点変化したときの位相変化を $\psi(i, j, f, \zeta)$ と表す。すなわち、

$$\psi(i, j, f, \zeta) = \Phi(i, j, f + \zeta) - \Phi(i, j, f) \quad (6.17)$$

と表せる。

ここで、 $\psi(i, j, f, \zeta)$ の周波数領域における平均を $\overline{\psi(i, j, \zeta)}$ とする。

$$\overline{\psi(i, j, \zeta)} = \frac{\sum_f \psi(i, j, f, \zeta)}{N_f - N_\zeta} \quad (6.18)$$

ここで、 N_f は測定周波数点数である。

このとき、周波数領域における $\psi(i, j, f, \zeta)$ のゆらぎを表現するパラメータとして、 $\psi(i, j, f, \zeta)$ の周波数領域における分散 $V(\psi(i, j, \zeta))$ を次のように定義する。

$$V(\psi(i, j, \zeta)) = \frac{\sum_{f=0}^{N_f - \zeta} \left(\psi(i, j, f, \zeta) - \overline{\psi(i, j, \zeta)} \right)^2}{N_f - N_\zeta} \quad (6.19)$$

上記の $V(\psi(i, j, \zeta))$ を用いて、周波数領域での特徴ベクトル K_f を次のように定義する。

$$K_f = \sum_{i=0}^{L-2} \sum_{j=0}^{L-2} \sqrt{V(\psi(i, j, \zeta))} \quad (6.20)$$

よって、特徴ベクトル \mathbf{K} は K_b 、 K_f を用いて次のようになる。

$$\mathbf{K} \equiv [\mathbf{K}_s, K_f] \quad (6.21)$$

$$\mathbf{K}_s \equiv [M, K(0, 0, 0), K(0, 1, 0), K(1, 0, 0), K(1, 1, 0)] \quad (6.22)$$

式 (6.21)..(6.22) において、 $K(0, 0, 0)$ 、 K_f は常に実数であり、その他は複素数である。

また、SOM によるクラス決定の際に特定の要素による影響が大きくなりすぎることを避けるために、特徴ベクトルのそれぞれの要素は、分布を正規分布として標準偏差が 1 となるように標準化してある。

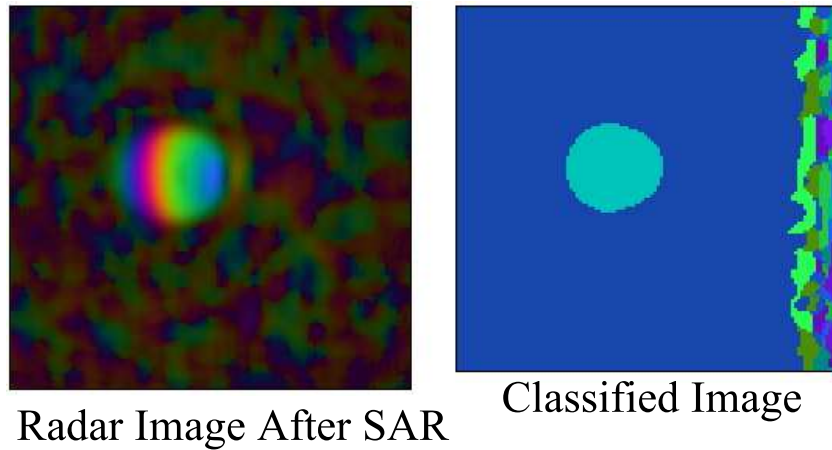


図 6.4: 地表面に置かれた金属缶の区分化: 周波数ゆらぎに着目した特徴ベクトルを用いたもの

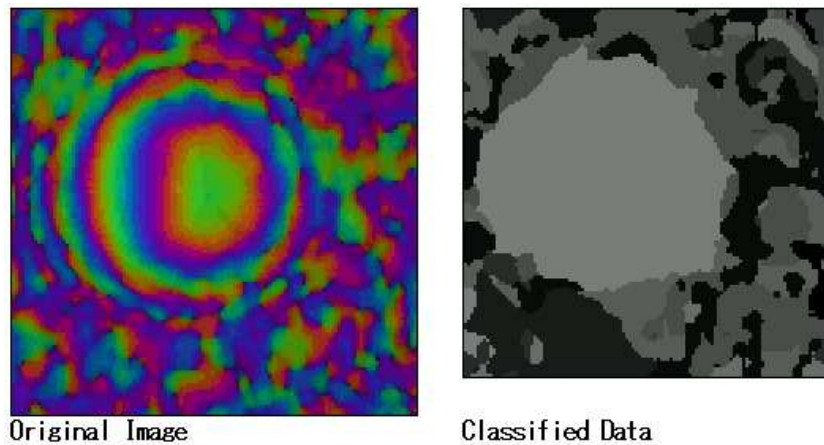


図 6.5: 地表面に置かれた金属缶の区分化: 第 3.7 節の特徴ベクトルを用いたもの

6.5 実験

以下に、新たな特徴ベクトルを利用した実験結果を示す。本手法では、周波数領域における特徴ベクトルの次元が少なくなったので、全体としての特徴ベクトルの次元も少なくなっており、計算時間の短縮がなされた。

6.5.1 地表面に置かれた金属缶に関する実験

図 6.4 に、周波数ゆらぎに着目した特徴ベクトルを用いた区分化の結果を示す。また、比較のために 3.7 で述べた特徴ベクトルを用いた区分化の結果を 6.5 に再掲する。図 6.4 をみると、区分化の結果として金属缶領域が一つの領域として区分化されている。また、図 6.5 では背景領域も多くの領域に区分化されているが、図 6.4 では一つの大きな領域として区分されていることが分かる。区分された金属缶領域の大き

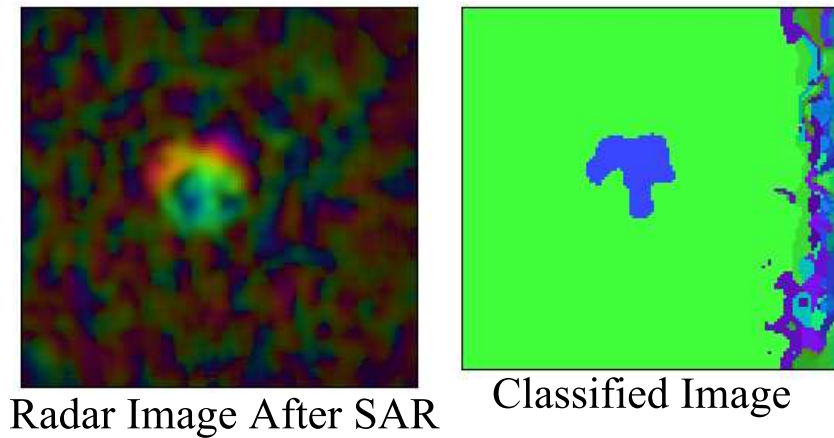


図 6.6: 地中に埋設された金属缶の区分化: 周波数ゆらぎに着目した特徴ベクトルを用いたもの

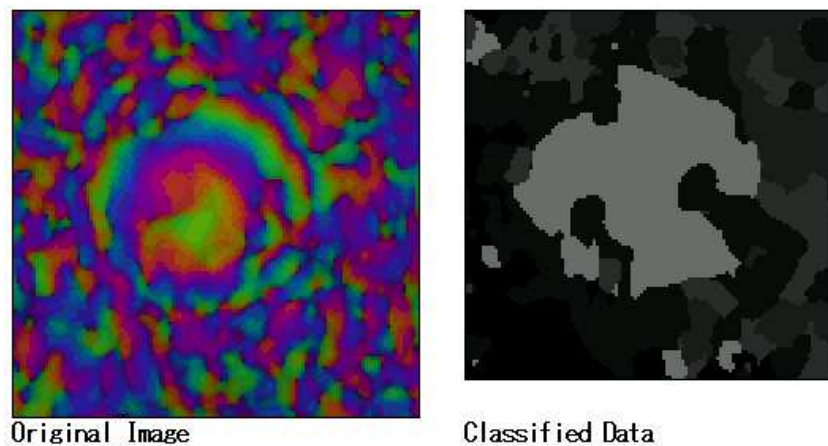


図 6.7: 地表面に置かれた金属缶の区分化: 第 3.7 節の特徴ベクトルを用いたもの

さも実際の大きさに近くなっており、きわめて良好な結果が得られたといえる。

6.5.2 地中に埋設された金属缶に関する実験

図 6.6 を見ると、第 6.5.1 節と同様に対象である金属缶領域が一つの領域に区分化されていることが分かる。ただし、区分化された形は円形ではない。しかし、背景領域が大きくな一つの領域に区分されていることを考えると良好な結果になっているといえる。

6.5.3 地表面に置かれたプラスチック地雷に関する実験

図 6.8 をみると、反射強度が小さいプラスチック地雷に対しても対象であるプラスチック地雷部分が区分化されていることが見て取れる。また、背景領域も大きな一つの領域に区分がなされている。

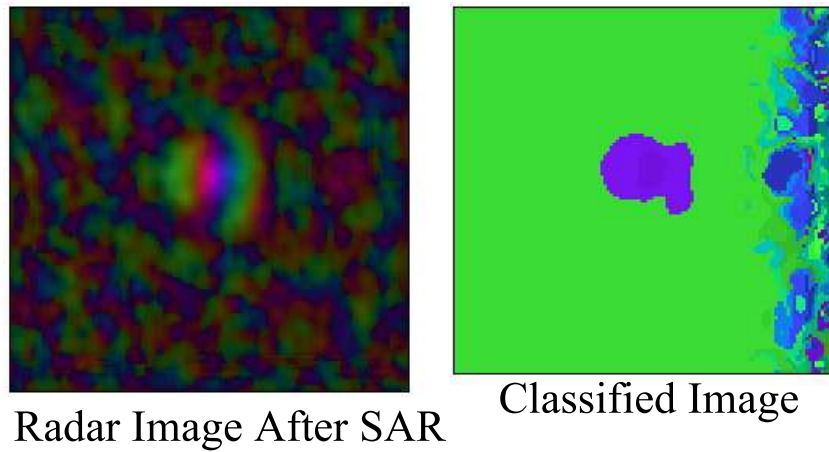


図 6.8: 地表面に置かれたプラスチック地雷の区分化: 周波数ゆらぎに着目した特徴ベクトルを用いたもの

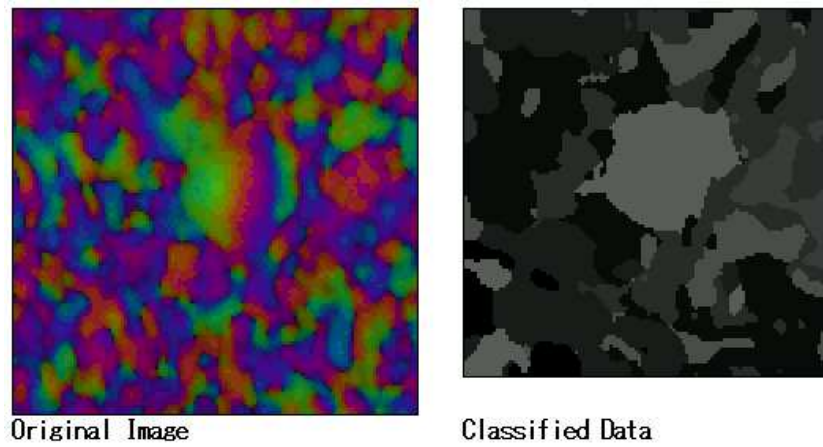


図 6.9: 地表面に置かれた金属缶の区分化: 第 3.7 節の特徴ベクトルを用いたもの

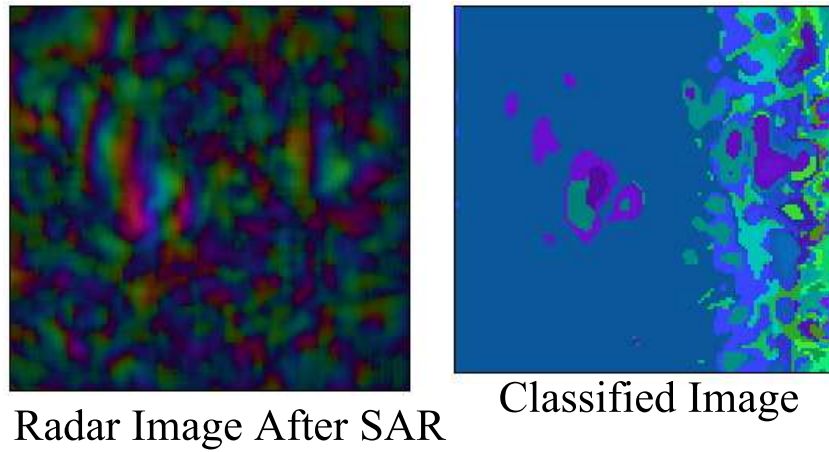


図 6.10: 地中に埋設されたプラスチック地雷の区分化: 周波数ゆらぎに着目した特徴ベクトルを用いたもの

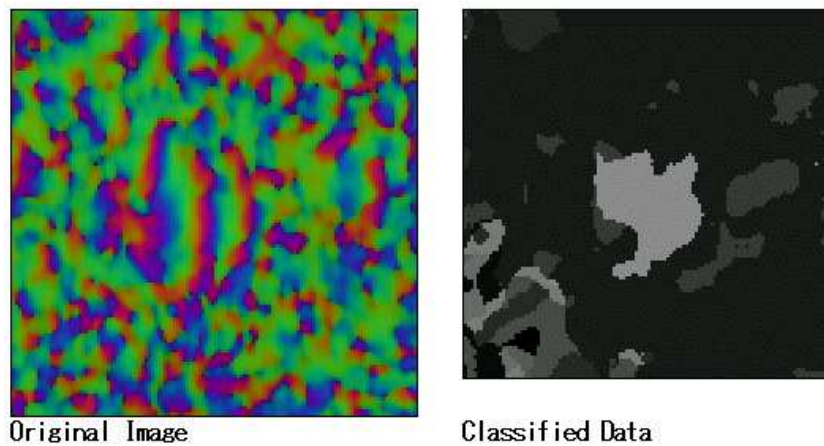


図 6.11: 地中に埋設された金属缶の区分化: 第 3.7 節の特徴ベクトルを用いたもの

このように、反射強度が小さなプラスチック地雷に関しても、周波数ゆらぎに着目することによって、適切な区分化がなされており、反射率が近い背景の地表の部分とも区別ができていることから、周波数ゆらぎに着目した特徴ベクトルの有効性を確認できる。

6.6 地中に埋設されたプラスチック地雷に関する実験

最後に、図 6.10 に地中に埋設されたプラスチック地雷の区分化の結果を示す。この図を見ると、中央付近に地雷領域と思われる領域が区分化されているが、その周囲にもいくつか同じ領域が点在している。プラスチック地雷領域の区分化には成功しているものの、それ以外の細かい点が同じクラスに区分化されており、この点は今後改善する必要があるものと思われる。

第 7 章： 考察

ミリ波フロントエンドで取得されたデータを C-SOM で処理することによって、適切な区分化が行われた。特に、反射率が土に近いプラスチック地雷に関してもテクスチャの違いに着目することによって判別ができています。また、C-SOM で処理を行う前に、合成開口処理を行うことで、空間分解能及び信号対雑音比が向上した。これによって、実際の測定対象の大きさを反映した区分化が行えることが分かった。

ところで、実際に埋設されているプラスチック地雷探知に用いる場合の検討を行ってみたい。

実際に地雷埋設域で本システムを使用する際には、小型かつ高速に動作する必要がある。現在の実験システムでは、アンテナを機械的に走査しているため、データ取得に非常に時間がかかっている。具体的に言えば、本論文に使用したデータは 3mm 間隔で 128×128 点を測定しており、それに要する測定時間は約 30 時間である。我々のグループではその点を改善するため、小型アレイアンテナの開発を進めている。小型アレイアンテナを用いれば、測定に要する時間は大幅に短縮されると思われる。

また、現在の信号処理においては合成開口処理に 5 時間程度¹を要している。この点については、合成開口処理が行っている演算が畳み込み積分であることから、高速フーリエ変換を用いるなど、計算アルゴリズムを検討することによって高速化が可能であると思われる。

C-SOM による区分化に関しては、周波数ゆらぎに着目した特徴ベクトルを用いることにより、特徴ベクトルの次元を 6 次元とする事ができた。これによって、第 3.7 節で述べた特徴ベクトルを用いた場合に比べ、大幅に時間短縮ができた。第 3.7 節で述べたものでは、約 10 分かかっていたが、周波数ゆらぎに着目したものでは約 2 分で処理が終わっている。

しかし、今後、実用的な面を考えると、信号処理をより高速化することが望まれるものと思われる。

¹Pentium4@3.0GHz

第 8 章：まとめ

本研究では、複数周波数で取得されたレーダイメージを、複素自己組織化マップを用いて適応的に区分することにより、地中に埋設されたプラスチック地雷を可視化できることを示した。また、合成開口処理を用いて空間分解能を向上させることにより、より精度が高い区分化を行えることを示した。さらに、周波数領域における位相変化のゆらぎに着目することにより、高速かつ精度の高い区分化が実現できることを示した。

目 次

1.1	プラスチック地雷探知システムの概要。	3
3.1	VNA の概念図	9
3.2	S-パラメータの概念図	9
3.3	FDR の例	11
3.4	適応的三次元レーダ画像区分化システムの構成	13
3.5	SOM の概念図	15
3.6	三次元レーダ画像測定システムの概念図	17
3.7	ミリ波フロントエンドの構成	19
3.8	実際の実験装置の様子	20
4.1	地表に置かれた金属缶の区分化の様子	22
4.2	地表面近くに埋設された金属缶の区分化の様子	23
4.3	地表面に置かれたプラスチック地雷の複数周波数での測定結果	23
4.4	地表に置かれたプラスチック地雷の区分化の様子	24
4.5	地中に埋設されたプラスチック地雷の区分化の様子	25
5.1	大開口アンテナの方位分解能	28
5.2	小開口アンテナの方位分解能	28
5.3	合成開口によるビームパターン	29
5.4	測定の位置関係	29
5.5	地表に設置した金属缶の合成開口処理前のレーダ画像	30
5.6	地表に設置した合成開口処理後のレーダ画像	30
5.7	地表に置かれた金属缶の区分化の様子	30
5.8	地表に設置した金属缶を合成開口処理を行った後に区分化したもの	31
6.1	位相アンラッピング：ラップされたデータは "+" マークであり、アンラップされたデータは "-" である。	33
6.2	金属缶部分での位相変化の様子	35
6.3	背景領域での位相変化の様子	35
6.4	地表面に置かれた金属缶の区分化：周波数ゆらぎに着目した特徴ベクトルを用いたもの	37
6.5	地表面に置かれた金属缶の区分化：第 3.7 節の特徴ベクトルを用いたもの	37
6.6	地中に埋設された金属缶の区分化：周波数ゆらぎに着目した特徴ベクトルを用いたもの	38
6.7	地表面に置かれた金属缶の区分化：第 3.7 節の特徴ベクトルを用いたもの	38
6.8	地表面に置かれたプラスチック地雷の区分化：周波数ゆらぎに着目した特徴ベクトルを用いたもの	39
6.9	地表面に置かれた金属缶の区分化：第 3.7 節の特徴ベクトルを用いたもの	39

6.10 地中に埋設されたプラスチック地雷の区分化: 周波数ゆらぎに着目した特徴ベクトルを用いたもの	40
6.11 地中に埋設された金属缶の区分化: 第 3.7 節の特徴ベクトルを用いたもの	40

表 目 次

2.1	人道的対人地雷探知・除去と軍事用地雷探知・除去の相違点	6
4.1	測定対象である金属缶と模擬地雷の構成	22
4.2	実験における諸パラメータ	22

参考文献

- [1] J. C. Curlander and R. N. McDonough. *Synthetic Aperture Radar -System and Signal Processing-*. John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [2] 森山敏文. 偏波 FM-CW レーダによる埋設物探査に関する研究. PhD thesis, 新潟大学大学院自然科学研究科, 1999.
- [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, Vol. J85-C , No.7, pp. 520–530, July 2002.
- [4] D. Daniels, D. Gunton, and H. E. Scott, editors. *Special issue on subsurface radar*, Vol. 135, Part F , No.4. IEE, Aug. 1988.
- [5] 関根松夫. レーダ信号処理技術. 電子情報通信学会, 1991.
- [6] Akira Hirose and Motoi Minami. Complex-valued region-based-coupling image clustering neural networks for interferometric radar image processing. *IEICE Trans. Electron.*, Vol.E84-C, No.12, pp. 1932–1938, December 2001.
- [7] Akira Hirose, editor. *Complex-Valued Neural Networks Theories and Applications*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, November 2003.
- [8] 廣瀬明. 複素ニューラルネットワーク. SCG ライブラリ. サイエンス社, May 2005.
- [9] Andriyan Bayu Sukusmono and Akira Hirose. Adaptive noise reduction of insar images based on a complex-valued mrf model and its application to phase unwrapping problem. *IEEE Trans. Electron and Remote sensing*, Vol.40, No3, pp. 699–709, March 2002.
- [10] R.J. Chignell, P.A. Jackson, and K. Madani. Early developments in ground-probing radar at era technology ltf. In *IEE Proceedings*, Vol. 135, No.4, pp. 362–370. IEE, August 1998.
- [11] Richard J Chignel. Ground penetrating radar - a sensor for mine detection. *Conference Publication No.431, IEE*, October 1996.
- [12] Leon Peters Jr. and Jeffrey J. Daniels. Ground penetrating radar as a surface environmental sensing tool. In *Proceedings of the IEEE*, Vol. 82, No.12, pp. 1802–1822, December 1994.
- [13] K. Kappra, M. Ressler, L. Nguyen, and T. Ton. Army research laboratory landmine and unexploded ordnance experiments and result. *SPIE*, Vol. 3752, , 1999.
- [14] J. Williams, editor. *International Committee of the Red Cross, Montreux*, April 1993.
- [15] P. Jackson, editor. *Microwave Engineering European Edition*, October 1994.
- [16] P Mallinson and D. J. Daniels. Impulse radar mine detection, detection of abandoned land mines. *Conference Publication No.431, IEE*, October 1996.

- [17] P. Verlinde, M. Acheroy, and Y. Baudoin. The belgian humanitarian demining project (hudem) and the european research context. 対人地雷の人道的探知・除去に関するワークショップ, pp. 19–48. 日本学術会議, 2001.
- [18] 佐藤源之. 地中レーダによる地雷探知技術の現状と課題. 対人地雷の人道的探知・除去に関するワークショップ, pp. 49–54. 日本学術会議, 2001.
- [19] 文部科学省ホームページ. <http://www.mext.go.jp/>.
- [20] 日本学術会議 工学共通基盤研究連絡委員会 自動制御学専門委員会. 人道的対人地雷探知・除去技術の研究推進について, 2000.
- [21] G. Topp, J. Davis, and P. Annan. Electromagnetic determination of soil water content. *Water Resour. Res.*, Vol. 16, No. 1, pp. 574–588, 1980.
- [22] Wiltron. *Series 371XXA Vector Network Analyzer Operation Manual*, 1996.
- [23] 手代木扶, 米山務. 新ミリ波技術. オーム社, 1999.
- [24] Jason Jon Yoho. *Physically-Based Realizable Modeling and Network Synthesis of Subscriber Loops Utilized in DSL Technology*. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [25] B.L. Nguyen, A.M. Geels, J. Bruining, and E.C. Slob. Calibration measurements of dielectric properties of porous media. *SPE Journal*, Vol. 4, No. 4, December 1999.
- [26] Simon Haykin. 適応フィルタ理論. 科学技術出版, 2001.
- [27] A. B. Suksmono and A. Hirose. Adaptive complex-amplitude texture classifier that deals with both height and reflectance for interferometric sar images. *IEICE Transaction on Electronics*, Vol. E83-C, No. 12, pp. 1905–1911, December 2000.
- [28] T Kohonen. *Self-Organizing Maps*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1995.
- [29] T. Kohonen. *Self-Organization and Associative Memory*. Springer-Verlag, third edition, 1989.
- [30] 徳高平蔵, 岸田悟, 藤村喜久郎. 自己組織化マップの応用. 海文堂, 1999.
- [31] Chiglia Dennis C. and Pritt Mark D. *Two-Dimensional Phase Unwrapping Theory, Algorithms, and Software*. Wiley-Interscience. John Wiley & Sons, Inc, 1997.
- [32] Ito K. Analysis of the phase unwrapping problem. *Applied Optics*, Vol. 21, No. 14, p. 2470, July 1982.

発表文献

- <1> Hirose Akira and Hara Takahiro. Complex-valued self-organizing map: A framework of adaptive processing for multiple-frequency millimeter-wave interferometric imaging system. In *International Symposium on Systems & Human Science (SSR)*, pp. 333–338, Nov. 19-20 2003.
- <2> Takahiro Hara and Akira Hirose. Plastic mine detecting radar system using complex-valued self-organizing map that deals with multiple-frequency interferometric images. *Neural Networks*, Vol. 17/8-9, pp. 1201–1210, 2004.
- <3> Akira Hirose and Takahiro Hara. Complex-valued self-organizing map dealing with multi-frequency interferometric data for radar imaging systems. In *Workshop on Self-Organizing Maps (WSOM'03), Proc.*, pp. 255–260, September 2003.
- <4> Arai T., et al., editors. *Systems and Human Science - For Safety, Security, and Dependability*, chapter Complex-valued self-organizing map: A framework of adaptive processing for multiple-frequency millimeter-wave interferometric imaging systems. Elsevier, February 2005. ISBN:0444518134.
- <5> Inaba Takashi, Takahiro Hara, and Akira Hirose. Wideband and compact microwave front-end circuit for adaptive plastic landmine imaging arrays. In *International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP) Sendai*, 2004.
- <6> トー ジアユンエリス, 原貴弘, 廣瀬明. 多段連想によるプラスチック地雷同定. Technical report, 電子情報通信学会/ニューロコンピューティング研究会, 2004. (発表予定).
- <7> 原貴弘, 廣瀬明. 周波数領域におけるゆらぎに着目した空間テクスチャ区分レーダシステム. Technical report, 電子情報通信学会/ニューロコンピューティング研究会, 2004. (発表予定).
- <8> 原貴弘, 廣瀬明. 素自己組織化マップによるプラスチック地雷探査レーダシステムへの合成開口処理の適用. Technical report, 信学会/総合大会, 2004. 発表予定.
- <9> 原貴弘, 廣瀬明. 複素自己組織化マップによるプラスチック地雷の適応的メーキング. Technical Report EMT04-76, 信学会/電気学会電磁界理論研究会, 2004.
- <10> 稲葉崇, 原貴弘, 廣瀬明. プラスチック地雷探査用適応的イメージング・アレイのための広帯域小型マイクロ波フロントエンド回路. Technical Report EMT04-42, 信学会/電気学会電磁界理論研究会, 2004.
- <11> 廣瀬明, 原貴弘. 複素自己組織化マップによるプラスチック地雷の適応的イメージング. Technical Report SANE2003-61, 信学会宇宙航行エレクトロニクス研究会, 2003.
- <12> 廣瀬明, 原貴弘. 複素自己組織化マップによる複数周波数干渉型レーダ・イメージング. Technical Report EMT03-28, 信学会/電気学会電磁界理論研究会, 2003.

謝 辞

本研究を進めるにあたって、指導教官である廣瀬 明助教授には数多くのアドバイスを頂いた。その旨、ここに深く感謝する。

また、研究室の諸先輩をはじめとして、多くの同期や後輩の協力なくしてはこの論文を完成させることはできなかったと、深く感謝する。

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (A)15206047 によって行われた。