修士論文

スプリットルックSAR画像の相互相関を用いた船舶検出のシミュレーションとRadarsat データへの応用

Simulation on the Detection of Ships Using Cross-Correlation of Split-Look SAR Images and Applications to Radarsat Data

2002年2月5日提出

指導教員　大内和夫 教授

高知工科大学 大学院
工学研究科基盤工学専攻 博士前期課程
環境システムコース

1045005 矢口英暢

要約

本論文の目的は、合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar: SAR）のスプリットルック処理を使って生成された2セットの画像間の相関特性を利用して船舶を検出するアルゴリズムの開発である。本研究で提案する検出法は2画像間の相関性を利用するため、従来の強度を利用する方法では困難とされていたノイズに埋もれた船舶画像の検出も可能である。

SARはコヒーレントなシステムなので、画像にはスペックルと呼ばれる揺らぎの非常に大きなノイズを含まれる。このノイズ軽減処理の1つがスプリットルック処理である。スプリットルック処理とは合成開口長をいくつかのサブ開口に分割し、各々の開口で独立にスプリットルック画像を生成する。これらの画像は異なる角度から同一の領域を観測しているのでスペックルには相関性が無く、船舶のような確定論的ターゲットには相関性があるという特徴をもつ。ルック画像間の加法平均をとればランダムな値を持つスペックルは低減され、確定論的ターゲットは強調される。これがスプリットルック処理の原理である。

本検出法は2セットのスプリットルック画像を使用する。各画像の同一領域を小さな範囲(moving window)で切り出し相互相関関数（Cross-Correlation Function: CCF）よりその範囲の相関値を求める。moving windowを1ピクセルずつずらしながら画像全域で相関値を求め、その相関値をピクセル値とした画像(相関画像)を生成する。スプリットルック画像で相関性のあるターゲットは、相関画像の同じ位置で高いピクセル値として得られれる。そして相関画像のノイズとターゲットを区別するために閾値を設け2値化しターゲットを検出する。

本研究では、まず本手法のシミュレーションを行い、検出可能なターゲットサイズと最適なmoving windowサイズを求めた。シミュレーションではスプリットルック画像の相関特性をもつスペックル画像生成しターゲットを検出した。その結果、ターゲットサイズが約10×10ピクセル以上であれば検出可能で、ターゲットと同サイズのmoving windowが最適であるという結果が得られた。そして、本手法をRadarsat画像へ適用したところ、スプリットルック画像で船舶のあった場所で高い相関値が得られ、船舶の検出に成功した。また、船舶画像の強度をノイズと同レベルまで低下させた画像を生成し本手法を適用したところ、低い相関値ではあったが船舶を検出することができた。

目 次

図 目 次

第1章　序論

1.1　研究の背景

マイクロ波を使ったレーダは雲や霧の有無にかかわらず、昼でも夜でも利用可能な全天候型レーダであるため、海洋航行や船舶確認に利用されてるのは良く知られている。これまでの海洋レーダや SAR（Synthetic Aperture Radar）を用いた船舶検出では CFAR（Costant False Alarm Rate）と呼ばれる方法が主に使われていた。CFAR は船舶とバックグランドとの強度差を利用しており、広い範囲にわたって観測された画像を小さな範囲（window）で切り出し統計的に処理された window 内の強い強度だけを抽出する。window を 1 ピクセルずつずらしながら同様の手順を繰り返し、画像全体にわたって船舶の抽出を行う。船舶からの後方散乱値が強くバックグランドの強度と区別ができれば検出は可能だが、船舶の後方散乱が弱くバックグランドノイズに埋もれてしまうと検出は困難となる。

これに対して本研究で用いる検出法は強度差ではなく 2 つの画像間の相関性を利用しているため、たとえ船舶がランダムなノイズに埋もれてしまったとしても検出は可能である。この 2 つの画像は SAR 画像生成プロセスでスプリットルック（マルチルック）処理を行うことで生成することができ、2 画像間のノイズには相関が無く、船舶のような確定論的（ランダムでない）ターゲットには相関があるという特徴がある。この特徴がノイズに埋もれた船舶の検出を可能とする。

スプリットルック画像は合成開口長を分割し、それぞれのサブ開口で独立に生成される。各開口はオーバーラップしていないため、スプリットルック画像間のノイズは統計的に異なる値となり相関性は無くなる、しかし船舶のような確定論ターゲットには相関がある。

本手法はこのスプリットルック画像の相関性を利用した検出法であるため、後方散乱断面積の大きな金属製の船舶はもちろん、後方散乱断面積の小さい木製、プラスティックス製の船体の検出にもに応用が可能である。

1.2　研究の内容

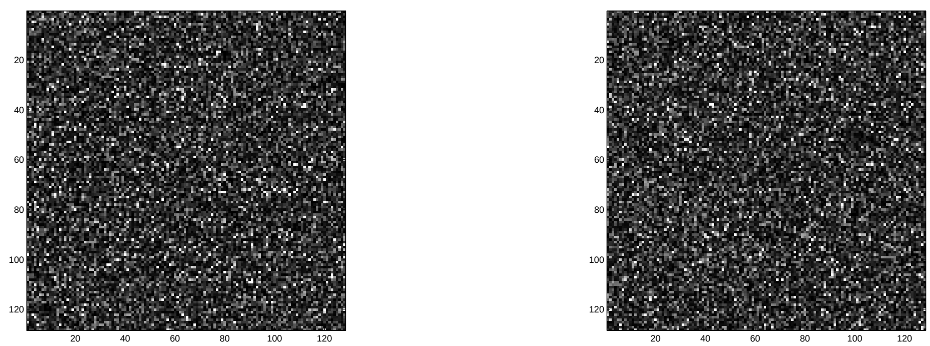
本研究の目的はスプリットルック画像間の相関特性を利用した船舶検出法の開発である。まず、シミュレーションで検出可能なターゲットサイズと最適な moving window サイズを求めた。そして、実際の Radarsat の画像で本手法の適用を試みた。また、Radarsat の船舶画像の強度を目視で確認が困難となるまで減少させ、本手法を適用した。

本研究で用いる船舶検出の手法を以下に述べる。まず、同一の海洋を観測した 2 セットのスプリットルック画像を生成する。各画像の同一領域を小さな範囲（moving window）で切り出し、相互相関関数より相関値を求める。1 ピクセルずつ moving window を移動させ画像全域の相関値を求め、相関値をピクセル値とした新たな画像（相関画像）を生成する。相関性のある

確定論的ターゲットは、相関画像で高いピクセル値としてあらわされる。相関画像の相関値の高い部分とそうでない部分を区別するために閾値を設け 2 値化しターゲットを検出する。

シミュレーションではスプリットルック画像の相関特性を踏まえ、相関性のない 2 セットのスペックル画像に相関性のある小さなターゲットを埋め込んだ画像（図 1.1）使用し、ターゲットの検出を行った。この 2 画像に本手法を用いると図 1.2 のようにターゲットが検出される。また、ターゲットサイズと moving window サイズを変化させシミュレーションにおける検出可能なターゲットサイズと、最適な moving window サイズを求めた。

シミュレーションの結果をもとに実際の Radarsat 画像で本手法を適用した。そして目視可能な船舶画像を切り出し、船舶の強度をノイズと同レベルまで減少させ船舶の検出を試みた。



(a) Look 1　　(b) Look 2

図 1.1: スプリットルック画像の相関特性をもつシミュレーション用ルック画像

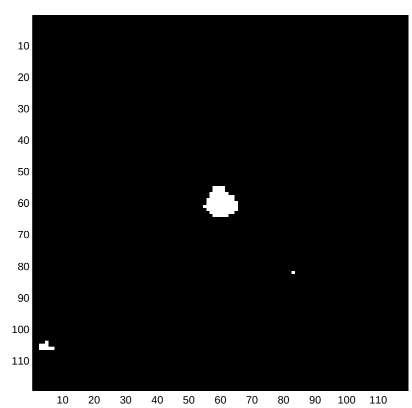


図 1.2: 相関画像の 2 値化によって検出されたターゲット

1.3 本論文の構成

2 章では本手法の基礎となるスプリットルック SAR 画像の生成法を解説する。パルス照射方向（レンジ方向）とレーダ（又はプラットフォーム）進行方向（アジマス方向）での 2 次元画像生成プロセスからスプリットルック処理にいたるまでを理論展開していく。3 章ではスプリットルック画像間のスペックルと確定論的ターゲットの相関性を記述するため、スペックルの統計特性を導出する。まず、散乱面に分布する点散乱体からの散乱されたマイクロ波から画像複素振幅や画像強度を求め、散乱面と画像の統計特性について述べる。4 章では 2 章や 3 章で得られた結果をベースとして船舶の検出シミュレーションの手順と結果を述べる。ここでは、検出可能なターゲットサイズと最適な moving window のサイズを求めるために moving window サイズを変化させ、ターゲット部分とノイズ部分の相関値の変化を調べた。5 章では 4 章での結果をもとに実際の Radarsat 画像に本手法を適用し船舶の検出を行った。さらにいくつかの船舶画像を切り出し、船舶の強度をノイズと同レベルまで低下させた画像で本手法を行い、その結果を船舶ごとに示す。

第2章　合成開口レーダとスプリットルック処理

2.1　SARの特徴

合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar： SAR）は航空機やシャトル、人工衛星などに搭載され、海洋や陸の観測だけでなく氷雪の観測や地下資源の探査など幅広く応用されている。これはSARがマイクロ波を使った能動型レーダであることに起因する。電磁波の中でも長い波長帯（約1 cm〜約1 m）のマイクロ波は大気や雲、雨を貫通するので天候の影響を受けにくい。例えば、1年中雲や霧の多い熱帯地域などでの観測に威力を発揮する。また、波長によっては土壌や植生をある程度透過するので、地下資源の探索や考古学、森林学などにも利用される。能動型のレーダはレーダ自身のアンテナからマイクロ波を放射し、対象物によって反射・散乱された散乱波をアンテナで受信する。したがって太陽を放射源とする受動型センサの観測に対して、能動型であるレーダは昼夜の別なく観測することができる。これは観測の時間的制限がないので、日照時間の短い高緯度地域などでは特にその威力を発揮する。

2.2　SARの原理

SARは合成開口の名のとおり小さなアンテナで大きなアンテナ（開口）を合成して高分解能を得る。この合成開口処理はプラットフォーム進行方向（アジマス方向）で行われる。プラットフォームとはレーダを搭載する衛星や航空機のことである。SARはSide Looking Radarの一種で、進行方向に対して直角の斜め下方向にマイクロ波を照射する。マイクロ波照射方向（レンジ方向）ではパルス圧縮（レンジ圧縮）とよばれる技術を使い高い分解能を得る。通常、レンジ方向の分解能に比べアジマス方向の分解能が高いので、スプリットルック処理を行う。この処理はレンジ方向とアジマス方向の分解能を等しくするだけでなく、ノイズを軽減させるという目的もある。

2.3　パルス圧縮（レンジ圧縮）技術

レンジ方向における分解能向上技術が「パルス圧縮（レンジ圧縮）」である。この技術は長い送信パルスに周波数変調（Frequency Modulation: FMまたはチャープ変調）をかけ、受信後に受信データに処理を施すことによってレンジ方向での高い分解能を得る。

従来の方形パルスを使ったレーダでは、送信パルス幅が短いほどレンジ方向の分解能が向上する。しかし、高圧のパルスを連続して放射する電力には限界があるため、長いパルスに変調をかけて高分解能を得るパルス圧縮技術が開発された。航空機搭載のレーダでは方形パルスを稀に使うことはあるが、衛星搭載のレーダにとっては太陽電池を電力源としているのでパルス圧縮は必要不可欠な技術である。

パルス圧縮技術では送信信号に図 2.1 のような周波数変調された長いパルスを用いる。そして、散乱体から反射・散乱して返ってきた受信信号と参照信号（送信パルスと等しいパルス幅と変調率をもつ）との相互相関より尖鋭な画像を得る。

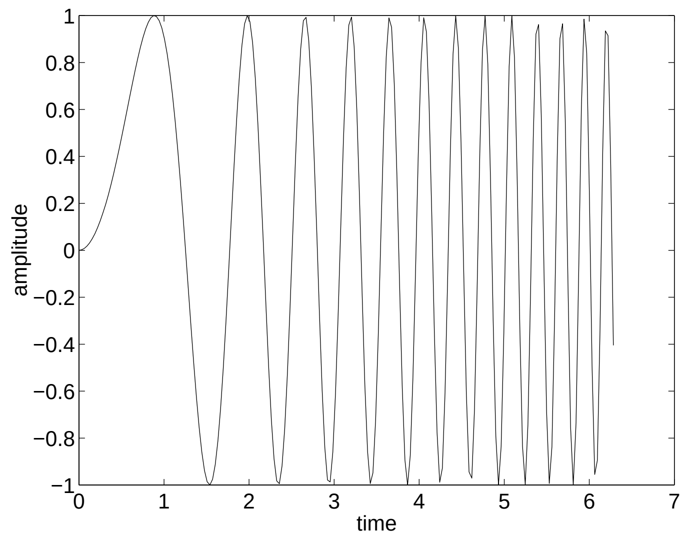


図 2.1: 周波数変調した信号

図 2.2 に示すようにアンテナから距離 R_0 にある点散乱体の画像である点拡張関数（Point Spread Function: PSF）を得るまでのプロセスを以下に述べる。

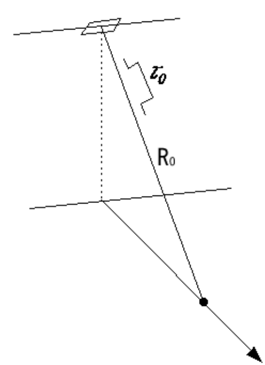


図 2.2: レンジ方向のパルス送信

周波数変調をした送信パルスは

$$E_t(\tau) = E_0' \exp(i2\pi f_c \tau + i\alpha\tau^2) \quad : \quad (-\tau_0/2 \leq \tau \leq \tau_0/2) \tag{2.1}$$

と表わされる。そして、点散乱体から返ってきた受信信号は

$$E_s(\tau) = E_0 \exp(i2\pi f_c(\tau - 2R_0/c) + i\alpha(\tau - 2R_0/c)^2) \tag{2.2}$$

となる。受信信号は送信信号より往復時間 $2R_0/c$ だけ遅れて受信される。ここで、E_0 はパルス形を内含する振幅、τ は散乱面における斜レンジ時間変数、τ_0 はパルスの持続時間、f_c は中心周波数、α はチャープ定数、c は光の速度とする。式（2.2）の受信信号の指数関数の第一項 $\exp(i2\pi f_c\tau)$ は周波数シフトがかけられ除去されるので、この時点で消去すると受信信号は

$$E_s(\tau) = E_0 \exp(-i4\pi f_c R_0/c) \exp(i\alpha(\tau - 2R_0/c)^2) \tag{2.3}$$

となる。点散乱体の PSF は受信信号と参照信号との相互相関から得られる。参照信号は送信信号（式 2.1）の複素共役を使い

$$E_r(\tau) = rect(\tau/\tau_0) \exp(-i\alpha\tau^2) \tag{2.4}$$

で与えられる。rect 関数はある区間のみ 1 の値を持つ関数で、パルス持続時間 τ_0 より

$$\begin{aligned} rect(\tau/\tau_0) &= 1 \quad : \quad -\tau_0/2 \le \tau \le \tau_0/2 \\ &= 0 \quad : \quad otherwise \end{aligned} \tag{2.5}$$

と定義される。ここで τ_0 はパルス持続時間である。斜レンジ方向の点拡張関数は受信信号と参照信号の相関より次のようにして得られる。尚、この相互相関の計算過程は付録 A に記す。

$$\begin{aligned} E_R(\tau') &= \int_{-\infty}^{\infty} E_s(\tau + \tau') E_r(\tau) d\tau \\ &= E_0 \exp\left(i\alpha \left(\tau' - 2R_0/c\right)^2\right) sinc\left(\alpha\tau_0 \left(\tau' - 2R_0/c\right)\right) \end{aligned} \tag{2.6}$$

ここで τ' は生成された画像におけるレンジ時間変数で、$\exp(i4\pi f_c R_0/c)$ と重要でない定数はすべて E_0 に含めた。画像は距離で表したほうが扱いやすいため、点拡張関数を時間関数から空間関数に

$$Y = \left(\frac{\tau' c}{2} - R_0\right) \Big/ \sin\theta_i \tag{2.7}$$

と変換すると

$$E_R(Y) = E_0 \exp\left(i\alpha \left(2\sin\theta_i/c\right)^2 Y\right) sinc\left(\frac{\pi}{\rho_R} Y\right) \tag{2.8}$$

となる。また、$\exp(i\alpha(2\sin\theta_i/c)^2 Y)$ を E_0' に含めた強度点拡張関数は

$$|E_R(Y)|^2 = |E_0'|^2 sinc^2 \left(\frac{\pi}{\rho_R} Y\right) \tag{2.9}$$

となり $|E_0'|^2 = 1$、$z = \pi Y/\rho_R$ とした式 (2.9) を図 2.3 に示す。

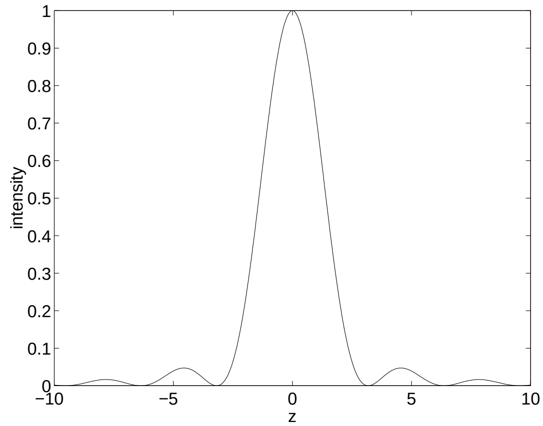


図 2.3: 強度点拡張関数

レンジ分解能 ρ_R は図 2.3 に示した $sinc^2((\pi/\rho_R)Y)$ 関数の中心から最初の 0 となるまでの幅で定義（レーリー基準) すると

$$\rho_R = \frac{\pi c}{2|\alpha|\tau_0 \sin\theta_i} \tag{2.10}$$

で与えられる。ここで θ_i は入射角、α/π は送信信号の変調率である。式 (2.10) より画像における分解能はチャープ率（α/π）が大きく、パルス幅（τ_0）が大きいほど向上することがわかる。日本が打ち上げた JERS-1 SAR はパルス幅時間 $\tau_0 = 35.2[\mu s]$、チャープ率 $\alpha/\pi = -4.3 \times 10^{11}[Hz/s]$、チャープバンド幅 $B_R = |\alpha|\tau_0/\pi = 15[MHz]$、入射角 $\theta_i = 34°$、そして光の速度 $c = 300[Ms]$ なので、レンジ方向の距離分解能幅は $\rho_R \simeq 18m$ となる。

2.4 合成開口（アジマス圧縮）技術

図 2.4 にあるようにアンテナが A から B に移動ししている間、点散乱体 P からの散乱波を受信しつづける（受信時間 T_A)。受信した信号をコヒーレントに処理することにより実開口のアンテナを使って、アジマス方向に長さ $L(= VT_A)$ の仮想のアンテナを生成したものと同等の効果を得る。これが合成開口の考え方である。

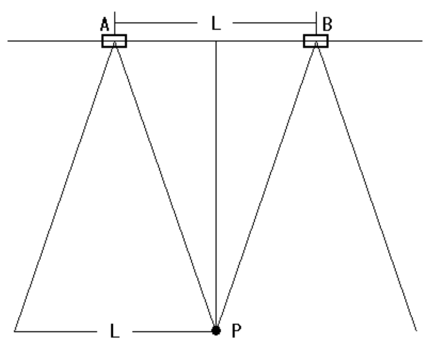


図 2.4: 合成開口長 L

アジマス方向での受信信号はアンテナと地表のターゲット間の相対的な距離変化によってドップラー変調を受ける。この変調信号と合成開口時間 T_A の幅を持つ受信信号から得るであろう「期待」信号の参照信号との相互相関よりアジマス方向の PSF を得る。これが、「合成開口」又は「アジマス圧縮 (azimath compression)」と呼ばれる技術である。

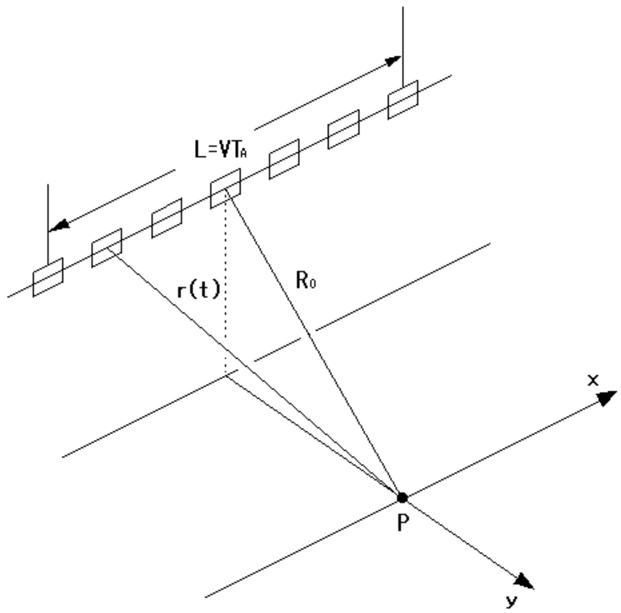


図 2.5: SAR のジオメトリ

図 2.5 にあるように点散乱体 P が散乱面の直行座標の中心にあるとする。合成開口時間 T_A、プラットフォームの速度を V とし、任意の時間 t におけるアンテナと点散乱体 P との距離を $r(t)$、プラットフォームが点散乱体の真上に来たときの点散乱体との距離を $R_0(t=0)$ とする。ここではパルス圧縮とは独立して考え、地球の自転によるレンジ方向のドップラー成分は簡略化のため省略する。点散乱体からのアジマス方向の時間 t に依存する受信信号は式 (2.3) の右辺から

$$
\begin{aligned}
E_s(t) &= E_0 \exp(-i4\pi(f_c/c)r(t)) \\
&= E_0 \exp(-i2kr(t))
\end{aligned}
\tag{2.11}
$$

となる。ここで $k = 2\pi f_c/c$ は波数である。点散乱体との距離 $r(t)$ は Vt と比べて非常に大きいため

$$
\begin{aligned}
r(t) &= \left(R_0^2 + (Vt)^2\right)^{1/2} \\
&\simeq \left(R_0 + \frac{(Vt)^2}{2R_0}\right)
\end{aligned}
\tag{2.12}
$$

と近似でき、受信信号は

$$E_s(t) = E_0 \exp\left(-i2k\left(R_0 + \frac{(Vt)^2}{2R_0}\right)\right)$$
$$= E_0 \exp(-i2kR_0)\exp(-i\beta t^2) \tag{2.13}$$

と書ける。β はドップラー定数で

$$\beta = \frac{kV^2}{R_0}$$
$$= \frac{2\pi V^2}{\lambda R_0} \tag{2.14}$$

とする。式 (2.13) はアジマス方向にチャープされた受信信号で、参照信号は受信信号のチャープ成分の複素共役

$$E_r(t) = rect(t/T_A)\exp(i\beta t^2) \tag{2.15}$$

で与えられる。ここで rect 関数は

$$rect(t/T_A) = 1 \quad : \quad -T_A/2 \le t \le T_A/2$$
$$= 0 \quad : \quad otherwise \tag{2.16}$$

である。アジマス方向の受信信号と参照信号の相互相関は

$$E_A(t') = \int_{-\infty}^{\infty} E_s(t+t')E_r(t)\,dt$$
$$= E_0' \exp(-i\beta t'^2)\,sinc(\beta T_A t') \tag{2.17}$$

となり、アジマス方向における点拡張関数が得られる。この相互相関関数の計算過程は付録 B に示す。画像面を距離で扱うために空間変数を

$$X = Vt' \tag{2.18}$$

とおくと、空間変数を用いた点拡張関数は

$$E_A(X) = E_0' \exp\left(-i\left(\beta/V^2\right)X^2\right) sinc\left(\frac{\pi}{\rho_A}X\right) \tag{2.19}$$

と表すことができる。またアジマス方向の強度点拡張関数は $\exp(-i(\beta/V^2)X^2)$ を E_0'' に含めると

$$|E_A(X)|^2 = |E_0''|^2 sinc^2\left(\frac{\pi}{\rho_A}X\right) \tag{2.20}$$

で与えられ、式（2.20）は図 2.3 と同じ形で $z = \pi X/\rho_A$ としたものである。ρ_A はアジマス方向の空間分解能で

$$\rho_A = \frac{\lambda R_0}{2VT_A}$$
$$= \frac{\lambda R_0}{2L} \tag{2.21}$$

このようにアジマス方向の空間分解能は合成開口長やレンジの遠近に依存している。

ちなみに、日本の人工衛星 JERS-1 SAR は $\lambda = 0.235m$、$R_0 = 750km$、$L = 15km$ なので分解能幅 $\rho_A \simeq 6m$ となっている。

2.5　スプリットルック処理

SAR 画像にはコヒーレント系に特有の揺らぎの非常に大きなスペックルノイズが生成される。このようなノイズの軽減法の 1 つとしてスプリットルック処理がある。図 2.6 のように合成開口長 L を N 分割し、長さ L/N のそれぞれのサブ開口で独立にルック画像を生成する。各サブ開口で生成された N 個のスプリットルック強度画像の加法平均をとることでノイズを軽減する。また、レンジ方向の分解能に比べアジマス方向の分解能が数倍よいため、アジマス方向の分解能を低下させ両方向の分解能をそろえる役目も果たしている。

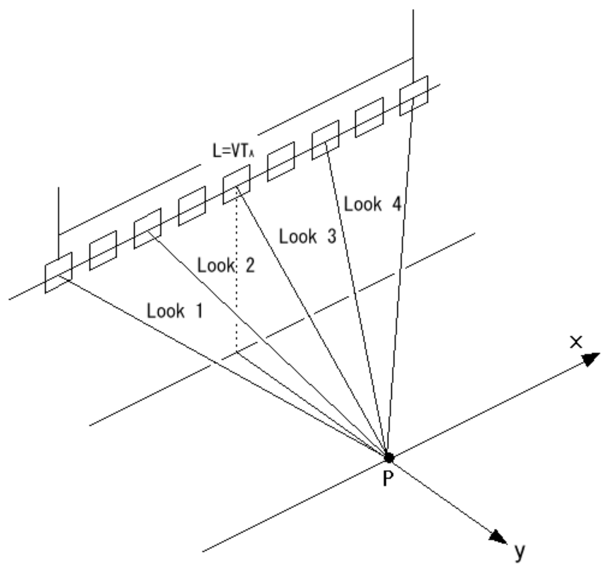


図 2.6: 分割した開口

任意のルック画像における点拡張関数の導出プロセスは以下のとおりである。受信信号は式 (2.13) より再定義すると

$$\begin{aligned} E_s(t) &= E_0 \exp(-i2kR_0) \exp(-i\beta t^2) \\ &= E_0' \exp(-i\beta t^2) \end{aligned} \quad (2.22)$$

となる。ここで、$\exp(-i2kR_0)$ は E_0' に含めた。そして、ルック n の参照信号を

$$E_r^{(n)}(t) = rect\left((t - T_n) / (T_A/N)\right) \exp(i\beta t^2) \quad (2.23)$$

とする。ここで、n はルックナンバー、N は全ルック数、T_A は全開口合成時間で T_n はルック n における参照信号の中心時間である。ここでの rect 関数は

$$\begin{aligned} rect((t - T_n)/(T_A/N)) &= 1 \quad : \quad -T_A/(2N) \le t - T_n \le T_A/(2N) \\ &= 0 \quad : \quad otherwise \end{aligned} \quad (2.24)$$

で与えられる。そしてルック n の中心時間は

$$\begin{aligned} T_n &= \frac{nT_A}{N} - \frac{T_A}{2} - \frac{T_A}{2N} \\ &= \frac{T_A}{2N}(2n - N - 1) \end{aligned} \tag{2.25}$$

となる。例えば 4 ルックのスプリットルック処理でルック 2 画像の中心時間は $T_n = -T_A/8$ となる。

受信信号と参照信号の相互相関関数よりスプリットルック PSF を求めると

$$\begin{aligned} E_{AN}^{(n)}(t') &= \int_{-\infty}^{\infty} E_s(t+t')E_r^{(n)}(t)\,dt \\ &= E_0'' \exp(-i\beta t'^2)\exp(-i2\beta T_n t') sinc\left(\frac{\beta T_A}{N}t'\right) \end{aligned} \tag{2.26}$$

となる。相互相関の計算過程は付録 C に示す。ここで β を再定義すると式 (2.14) より

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{kV^2}{R_0} \\ &= \frac{2\pi V^2}{\lambda R_0} \end{aligned} \tag{2.27}$$

となる。空間変数であらわした PSF は

$$E_{AN}^{(n)}(X) = E_0'' \exp\left(-i\left(\beta/V^2\right)X^2\right)\exp\left(-i2\left(\beta T_n/V\right)X\right) sinc\left(\frac{\pi}{\rho_{AN}}X\right) \tag{2.28}$$

となる。$\exp(-i(\beta/V^2)X^2)\exp(-i2(\beta T_n/V^2)X^2)$ を E_0''' に含め任意のルック画像の強度点拡張関数は

$$|E_{AN}^{(n)}(X)|^2 = |E_0'''|^2\, sinc^2\left(\frac{\pi}{\rho_{AN}}X\right) \tag{2.29}$$

で与えられる。式（2.29）の形も図 2.3 と同じで $z = \pi X/\rho_{AN}$ である。空間変数は

$$X = Vt' \tag{2.30}$$

で、空間分解能幅は

$$\begin{aligned} \rho_{AN} &= \frac{\lambda R_0 N}{2VT_A} \\ &= \frac{\lambda R_0 N}{2L} \end{aligned} \tag{2.31}$$

と定義される。スプリットルック処理を行っていない分解能幅 ρ_A よりも分解能幅が N 倍大きくなっている。JERS-1 SAR の場合 $\rho_A \simeq 6m$ なので 3 ルックとなると $\rho_{AN} \simeq 18m$ となり、レンジ方向の分解能 $\rho_R \simeq 18m$ とほぼ等しくなる。このようにしてレンジ方向との分解能をそろえている。

スプリットルック画像は異なる中心時間で作られる。プラットフォームは移動しているため各ルック画像は異なる位置で同じターゲットを観測していることになる。後述するがこのような処理された画像間のスペックルノイズには相関がなく、船舶のような確定論的ターゲットには相関性がある。したがって、このルック間で強度の加法平均をとることで、スペックル成分は減少し、確定論的ターゲットは強調される。これがスプリットルック処理の原理である。

第3章　散乱面と画像の統計特性

3.1　スペックルノイズ

SAR スペックルとは画像上で観測されるゴマ塩状のランダムなノイズのことである。スペックルは、位相や振幅が互いにランダムに異なる波の干渉より発生する。これはSAR のようなコヒーレントなシステム特有のもので、SAR 画像を利用する上で大きな障害となっている。身近な例をあげると、星の瞬きや遠方からのラジオ放送のフェーディングなどがある。これは、星の瞬きは大気の厚さのランダムな変化、フェーディングは電離層の揺らぎが原因となっている。

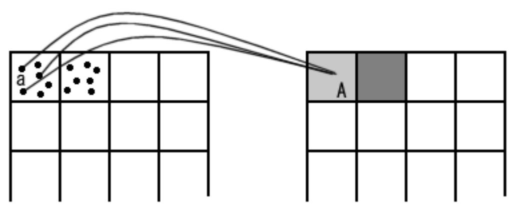


図 3.1: スペックルの画像複素振幅の生成

図 3.1 のように画像上の 1 画素の複素振幅 A は、その画素に対応する地表面上の 1 空間分解能の面積内にある多くの点散乱体からの散乱波の和と考えられる。ランダムな散乱面からのそれぞれの散乱波の位相や振幅は互いにランダムに異なるので画像上の 1 画素の複素振幅は

$$A(X,Y) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{j=1}^{M} a_j \exp(i\phi_j) \tag{3.1}$$

と表すことができる。a_j と ϕ_j は独立なランダム変数で、ϕ_j は $[-\pi, \pi]$ の間で一様に分布している。これより求められた 1 画素の画像強度 $I(X,Y)$ は

$$I(X,Y) = A_r^2(X,Y) + A_i^2(X,Y) \tag{3.2}$$

となる。ここで $A(X,Y)$ は画像における複素振幅、a_j と ϕ_j は 1 つの散乱波の振幅と位相、$I(X,Y)$ は画像強度、$A_r(X,Y)$ と $A_i(X,Y)$ は複素振幅の実数成分と虚数成分である。

これよりスペックルの複素画像振幅と強度画像の自己相関関数（Auto-Correlation Function: ACF）を求め、スプリットルック画像のスペックルと確定論的ターゲットの相関性について解説する。

3.2 ホワイトノイズ近似

ホワイトノイズとは幅広いスペクトルをもち空間的に相関していないランダムな散乱場を指す。ホワイトノイズとは

1. 振幅と位相がたがいに統計的に独立した変化をしている。散乱面の任意の位置 $(x_1,\, y_1)$ からの後方散乱波の振幅 $\sqrt{\sigma(x_1,\, y_1)}$ と位相 $\phi(x_1,\, y_1)$ は互いに独立した変化をし統計的に相関していない。

2. 散乱面の位置 $(x_1,\, y_1)$ の振幅 $\sqrt{\sigma(x_1,\, y_1)}$ と位相 $\phi(x_1,\, y_1)$ はそれ以外のすべての位置 $(x_2,\, y_2)$ での振幅 $\sqrt{\sigma(x_2,\, y_2)}$ と位相 $\phi(x_2,\, y_2)$ と相関していない。唯一相関している場合が $(x_1\!=\!x_2,\, y_2\!=\!y_2)$ の時のみで空間的にデルタ相関していると考える。

$$\delta(x_1 - x_2,\, y_1 - y_2) = \begin{cases} 0 & : \quad x_1 \neq x_2,\, y_1 \neq y_2 \\ 1 & : \quad x_1 = x_2,\, y_1 = y_2 \end{cases} \tag{3.3}$$

3. 分解能幅内に中心極限定理を満たす多く（約 5 ～ 8 個）の散乱体があり、位相はランダムな値をとり $[-\pi, \pi]$ の間で一様に分布している。

といった条件を満たしているものとする。

以上の条件を満たした後方散乱場のアンサンブル平均は

$$\begin{aligned} \langle a(x,y)\rangle &= \langle\sqrt{\sigma(x,y)}\rangle\langle\cos(\phi(x,y)) + i\sin(\phi(x,y))\rangle \\ &= 0 \end{aligned} \tag{3.4}$$

となる。これは条件 3 より、位相 ϕ は $[-\pi, \pi]$ の間で一様に分布していて $\langle\cos(\phi)\rangle = \langle\sin(\phi)\rangle = 0$ となるためである。次に自己相関関数を求めると

$$\begin{aligned} \langle a(x_1,y_1)a^*(x_2,y_2)\rangle &= \langle\sqrt{\sigma(x_1,y_1)}\sqrt{\sigma(x_2,y_2)}\rangle \\ &\quad \cdot\{\langle\cos(\phi(x_1,y_1) - \phi(x_2,y_2))\rangle + i\langle\sin(\phi(x_1,y_1) - \phi(x_2,y_2))\rangle\} \end{aligned} \tag{3.5}$$

となる。ϕ はそれぞれランダムな値をとるのでその位相差 $\phi(x_1,y_1) - \phi(x_2,y_2)$ もランダムな値となる。すると位相部分の実数成分と虚数成分のアンサンブル平均は 0 となる。しかし、条件 2 より $x_1 = x_2, y_1 = y_2$ の場合のみに限っては有限の値をとる。したがって後方散乱場の自己相関関数は

$$\langle a(x_1,y_1)a^*(x_2,y_2)\rangle = \langle\sqrt{\sigma(x_1,y_1)}\sqrt{\sigma(x_2,y_2)}\rangle\, \delta(x_1\!-\!x_2,\, y_1\!-\!y_2) \tag{3.6}$$

と表すことができる。

3.3 スペックルの自己相関関数

3.3.1 画像複素振幅の自己相関関数

点散乱体の画像は点拡張関数として表され、広がりのある画像は多くの点拡張関数の和から成っていると考えられる。点散乱体が散乱面で連続に分布していると考えると式 (3.1) より

$$A(X,Y) = \int\!\!\int_{-\infty}^{\infty} a(x,y)E_{AR}(X-x, Y-y)\, dxdy \tag{3.7}$$

と表すことができる。ここで E_{AR} は2次元の点拡張関数

$$E_{AR}(X,Y) = E_A(X)\,E_R(Y) \tag{3.8}$$

で、$E_A(X)$ と $E_R(Y)$ はそれぞれ式 (2.19)、式 (2.8) で与えられるアジマス、レンジ方向の点拡張関数である。式 (3.7) は、画像複素振幅の後方散乱場と PSF のコンボリューション (畳み込み) 積分（convolution integral）で与えられることを意味している。このような SAR 画像生成プロセスはコンボリューションモデルと呼ばれる。

簡単のためアジマス方向のみの画像複素振幅について考える。すると式 (3.7) は

$$A(X) = \int_{-\infty}^{\infty} a(x) E_A(X-x)\,dx \tag{3.9}$$

とおける。画像複素振幅の自己相関関数は

$$\begin{aligned}\langle A(X_1)A^*(X_2)\rangle &= \left\langle \int_{-\infty}^{\infty} a(x_1)E_A(X_1-x_1)dx_1 \int_{-\infty}^{\infty} a^*(x_2)E_A^*(X_2-x_2)dx_2 \right\rangle \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} \langle a(x_1)a^*(x_2)\rangle\, E_A(X_1-x_1)\,E_A^*(X_2-x_2)\,dx_1dx_2\end{aligned} \tag{3.10}$$

となる。ここで $\langle a(x_1)a^*(x_2)\rangle$ は互いに相関が無く $x_1 = x_2$ の場合のみ値を持つので式 (3.6) よりホワイトノイズ近似

$$\langle a(x_1)a^*(x_2)\rangle = \langle \sqrt{\sigma(x_1)}\sqrt{\sigma(x_2)}\rangle\, \delta(x_1-x_2) \tag{3.11}$$

が適用される。式 (3.11) を式 (3.10) に代入し、x_2 の変数で積分し、$x = x_1$、$\langle\sigma\rangle = \langle\sigma(x)\rangle$ とおくと

$$\langle A(X_1)A^*(X_2)\rangle = \langle\sigma\rangle \int_{-\infty}^{\infty} E_A(X_1-x)\,E_A^*(X_2-x)\,dx \tag{3.12}$$

となる。さらに式 (2.17) と式 (2.18) から E_A を式 (3.12) に代入すると

$$\begin{aligned}\langle A(X_1)A^*(X_2)\rangle &= \langle\sigma\rangle|E_0|^2 \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dt_1\, rect\,(t_1/T_A)\exp\,(-i\frac{\beta}{V^2}(X_1-x)^2)\exp\,(-i\frac{2\beta}{V}(X_1-x)\,t_1) \\ &\cdot \int_{-\infty}^{\infty} dt_2\, rect^*\,(t_2/T_A)\exp\,(i\frac{\beta}{V^2}(X_2-x)^2)\exp\,(i\frac{2\beta}{V}(X_2-x)\,t_2) \\ &= \langle\sigma\rangle|E_0|^2 \int_{-\infty}^{\infty} dx \iint_{-\infty}^{\infty} dt_1dt_2\, rect\,(t_1/T_A)\,rect^*\,(t_2/T_A) \\ &\cdot \exp\,(-i\frac{\beta}{V^2}(X_1^2-X_2^2))\,exp\,(-i\frac{2\beta}{V}(X_1t_1-X_2t_2)) \\ &\cdot \exp\,(i\frac{2\beta}{V^2}(X_1-X_2+Vt_1-Vt_2)\,x)\end{aligned} \tag{3.13}$$

となり統計的に一様な散乱面は空間的に十分大きいとして x 積分にはデルタ関数の近似を行うと

$$\begin{aligned}\int_{-\infty}^{\infty} \exp(i\frac{\beta}{V^2}(X_1-X_2+Vt_1-Vt_2)\,x)dx &\simeq \delta\left(t_1-t_2+\frac{(X_1-X_2)}{V}\right) \\ &= 1 \quad : \quad t_1 = t_2 - \frac{(X_1-X_2)}{V}\end{aligned} \tag{3.14}$$

となり、式 (3.13) は

$$\langle A(X_1)A^*(X_2)\rangle = \langle\sigma\rangle|E_0|^2 \exp(i\frac{\beta}{V^2}(X_1-X_2)^2)$$
$$\cdot\int_{-\infty}^{\infty} dt_2\, rect\left(\left(t_2-\frac{X_1-X_2}{V}\right)\Big/T_A\right) rect^*(t_2/T_A)\exp(-i\frac{2\beta}{V}(X_1-X_2)\,t_2) \quad (3.15)$$

を得る。ここで (X_1-X_2) のとる値は分解能幅と比較できる位で Vt_2 は合成開口長程度であるため

$$rect\left(\left(t_2-\frac{X_1-X_2}{V}\right)\Big/T_A\right) \simeq rect(t_2/T_A) \quad (3.16)$$

と近似される。t_2 について積分を行うと

$$\langle A(X_1)A^*(X_2)\rangle = |A_0|^2\langle\sigma\rangle\, sinc\,(\frac{\beta}{V}T_A(X_1-X_2)) \quad (3.17)$$

を得る。ここで、A_0 は不必要な定数を含んだ規格化定数である。統計的に一様な画像面を考えているので、ランダムな複素振幅は位置に依存しない。つまり、自己相関関数は統計的に定常であるので

$$\langle A(X)A^*(X+X')\rangle = I_0\, sinc\left(\frac{\pi}{\rho_A}X'\right) \quad (3.18)$$

となる。式 (2.21) よりアジマス方向の分解能幅は、$\rho_A = \pi V/(\beta T_A)$、$X' = X_1 - X_2$、$I_0$ は定数である。

3.3.2 画像強度の自己相関関数

スペックル強度の相関関数について考える。強度の自己相関関数は

$$\begin{aligned}\langle I(X_1)I(X_2)\rangle &= \langle A(X_1)A^*(X_1)A(X_2)A^*(X_2)\rangle \\ &= \frac{1}{M^2}\sum_{j=1}^{M}\sum_{j'=1}^{M}\sum_{j''=1}^{M}\sum_{j'''=1}^{M}\langle a(x_j)a^*(x_{j'})a(x_{j''})a^*(x_{j'''})\rangle \\ &\cdot E_A(X_1-x_j)E_A^*(X_1-x_{j'})E_A(X_2-x_{j''})E_A^*(X_2-x_{j'''}) \end{aligned} \quad (3.19)$$

から求められる。j を区別するのは x をそれぞれ独立した値として扱うためである。この複雑な式もホワイトノイズ近似によって簡単な形となる。後方散乱場は互いに相関していないので式 (3.19) は以下の組み合わせ以外の場合は 0 となる。

(a) $j = j' \neq j'' = j'''$ の場合 (M(M-1) 個の項)

(b) $j = j''' \neq j' = j'''$ の場合 (M(M-1) 個の項)

(c) $j = j' = j'' = j'''$ の場合 (M 個の項)

この組み合わせは互いに複素共役の場合か、すべて等しい場合である。また、(c) の項は M 個しかなく M が大きな場合は他の項と比べて小さくなるため無視できる。したがって式 (3.19) は

$$\begin{aligned}\langle I(X_1)I(X_2)\rangle = \frac{1}{M^2}\sum_{j=1}^{M}\sum_{j'=1}^{M}\langle\sigma(x_j)\sigma(x_{j'})\rangle\Big[&|E_A(X_1-x_j)|^2\left|E_A(X_2-x_{j'})\right|^2 \\ &+ E_A(X_1-x_j)E_A^*(X_1-x_{j'})E_A(X_2-x_{j'})E_A^*(X_2-x_j)\Big]\end{aligned} \quad (3.20)$$

となる。$\langle\sigma(x_j)\rangle$ と $\langle\sigma(x_{j'})\rangle$ は互いに相関性の無い一定の平均値をもつので

$$\langle\sigma(x_j)\sigma(x_{j'})\rangle = \langle\sigma(x_j)\rangle\langle\sigma(x_{j'})\rangle = \langle\sigma\rangle^2 \tag{3.21}$$

とまとめることができる。式 (3.21) を式 (3.20) に代入し、x を連続した値にすると

$$\begin{aligned}\langle I(X_1)I(X_2)\rangle = \langle\sigma\rangle^2 \iint_{-\infty}^{\infty} dx_1 dx_2 \, |E_A(X_1-x_1)|^2 \, |E_A(X_2-x_2)|^2 \\ + \langle\sigma\rangle^2 \iint_{-\infty}^{\infty} dx_1 dx_2 E_A(X_1-x_1)E_A^*(X_1-x_2)E_A(X_2-x_2)E_A^*(X_2-x_1)\end{aligned} \tag{3.22}$$

となり、さらに

$$\begin{aligned}\langle I(X_1)I(X_2)\rangle = \left|\langle\sigma\rangle \int_{-\infty}^{\infty} |E_A(X_1-x)|^2 \, dx\right|^2 \\ + \left|\langle\sigma\rangle \int_{-\infty}^{\infty} E_A(X_1-x)E_A^*(X_2-x)dx\right|^2\end{aligned} \tag{3.23}$$

が得られる。そして式 (3.12) より

$$\langle I(X_1)I(X_2)\rangle = \langle I\rangle^2 + |\langle A(X_1)A^*(X_2)\rangle|^2 \tag{3.24}$$

と簡単な式で書くことができる。平均値で補正され、規格化された自己相関関数は、式 (3.18) より

$$\begin{aligned}C_I(X') &= \frac{\langle I(X)I(X+X')\rangle}{\langle I\rangle^2} - 1 \\ &= \frac{|\langle A(X)A^*(X+X')\rangle|^2}{\langle I\rangle^2} \\ &= sinc^2\left(\frac{\pi}{\rho_A}X'\right)\end{aligned} \tag{3.25}$$

となる。このように $sinc^2(\pi/\rho_A X')$ は $0\sim1$ の値をとるので、スペックル強度画像の自己相関関数 (相互相関関数) は $0\sim1$ の値をとる。

平均値で補正され規格化された自己相関関数の一般式は 2 次元で

$$C_{IA}(X',Y') \equiv \frac{\langle I(X,Y)I(X+X',Y+Y')\rangle}{\langle I\rangle^2} - 1 \tag{3.26}$$

と表せ、異なる画像強度 I_1、I_2 の相互相関関数は

$$C_{IC}(X',Y') \equiv \frac{\langle I_1(X,Y)I_2(X+X',Y+Y')\rangle}{\langle I_1\rangle\langle I_2\rangle} - 1 \tag{3.27}$$

と表すことができる。

3.4　スプリットルック画像のスペックル相互相関関数

スプリットルック処理された2セットの画像のスペックル相互相関を考える。スプリットルック画像は1章でも述べたように合成開口長を分割し異なる中心時間で生成される。ルック1とルック2の中心時間を $t=0$ を中心とした $-T_C$ と T_C、ルックの開口時間を T_{AN} とする。中心時間は任意の変数なので、ルック1とルック2の開口時間がオーバーラップすることがある。こうして生成されたルック間のスペックル画像強度の相互相関関数を中心時間の関数として表す。ガウス統計に従うスペックル強度の相互相関関数は、自己相関関数と同じように式(3.24)より

$$\langle I_1(X;-T_C)I_2(X;T_C)\rangle = \langle I\rangle^2 + |\langle A_1(X;-T_C)A_2^*(X;T_C)\rangle|^2 \tag{3.28}$$

と表すことができる。画像複素振幅の相互相関関数はホワイトノイズ近似を適用し、x_2 で積分し、$x=x_1$、$\langle\sigma\rangle = \langle\sigma(x)\rangle$ とすると

$$\begin{aligned}\langle A_1(X;-T_C)A^*(X;T_C)\rangle &= |E_0|^2 \iint_{-\infty}^{\infty} dx_1 dx_2 \, \langle a(x_1)a^*(x_2)\rangle \exp\left(-i\left(\beta/V^2\right)\left((X-x_1)^2-(X-x_2)\right)^2\right)\\ &\cdot \int\int_{-\infty}^{\infty} dt_1 dt_2 \, rect((t_1+T_C)/T_{AN})\, rect^*((t_2-T_C)/T_{AN})\\ &\cdot \exp\left(-i2(\beta/V)((X-x1)t_1-(X-x_2)\,t_2\right)\\ &= |E_0|^2\langle\sigma\rangle\int_{-\infty}^{\infty}dx\int\int_{-\infty}^{\infty} dt_1 dt_2 \, rect\ ((t_1+T_C)\,/T_{AN})\ rect^*\,((t_2-T_C)\,/T_{AN})\\ &\cdot \exp\ \left(-i2\,(\beta/V)\,(X-x)\,(t_1-t_2)\right)\end{aligned} \tag{3.29}$$

となる。ここで x 積分にはデルタ関数の近似を行い、さらに t_1 で積分して $t_2=t$ とおくと

$$\langle A_1(X;-T_C)A^*(X;T_C)\rangle = |A_0| \int_{-\infty}^{\infty} rect((t+T_C)/T_{AN}) rect^*((t-T_C)/T_{AN})\, dt \tag{3.30}$$

が導かれる。これは、ルック間のスペックル複素振幅の相互相関は各々の rect 関数の相互相関であることを示している。rect 関数を

$$\begin{aligned} rect((t\pm T_C)/T_A) &= 1 \quad : \quad -T_{AN}/2 \le t\pm T_C \le T_{AN}/2 \\ &= 0 \quad : \quad otherwise \end{aligned} \tag{3.31}$$

とすると、式(3.30)は2つの rect 関数の重複範囲 $[-T_{AN}/2+T_C, T_{AN}/2-T_C]$ での積分で求められ

$$\langle A_1(X;-T_C)A^*(X;T_C)\rangle = |A_0|^2\,|T_{AN}-2T_C| \tag{3.32}$$

となる。この相関プロセスを図3.2に示す。$T_C=0$ のときはルック1とルック2が完全に重複しているため相関値は最大となる。rect 関数が $T_C=T_{AN}/4$ たけ離れていると重複面積が $T_C=0$ の時の半分となり、両関数が T_{AN} だけ離れると重複部分は無くなり相関値は0となる。

式3.32より、ルック1とルック2のスペックル強度の相互相関関数は

$$\frac{\langle I_1(X;-T_C)I_2(X;T_C)\rangle}{\langle I\rangle^2} = 1+|T_{AN}-2T_C|^2 \tag{3.33}$$

となる。図3.2のようにスプリットルック処理されたスペックル強度画像の相関性は各々の rect 関数、つまり分割された開口の重複領域が減少するにしたがい減少し、開口の重複がなくなる（$T_{AN}\le|T_C|$）とルック間での相関が完全に0となる。

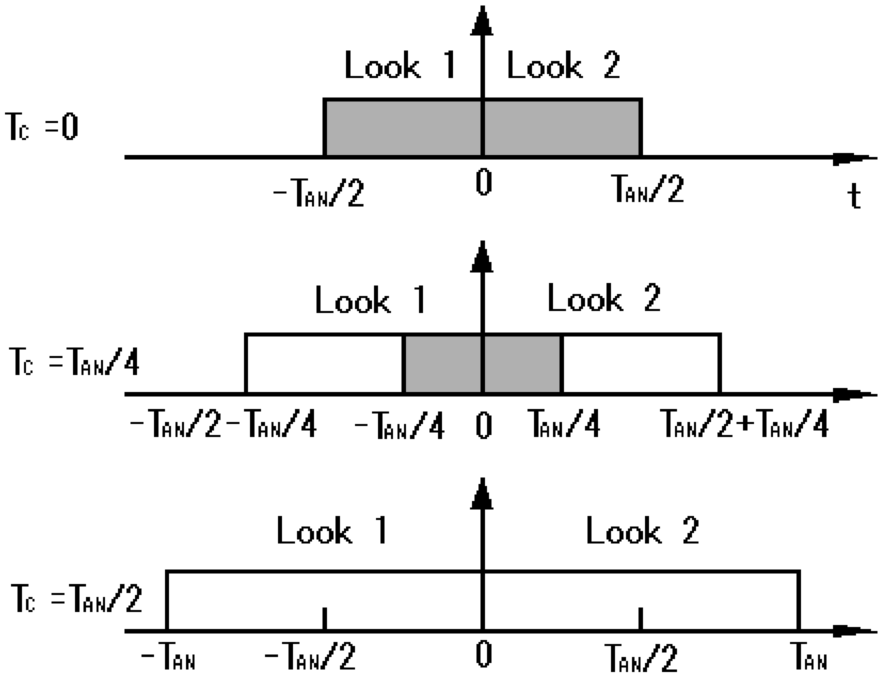


図 3.2: 中心時間に依存する rect 関数の重複部分の変化

3.5 確定論的ターゲットの相互相関関数

スプリットルック画像間の確定論的ターゲットにおける相互相関を考える。簡単のためターゲットを rect 関数として、ルック 1、ルック 2 各々のターゲット強度を

$$\begin{aligned} I_1(X) &= I_0\, rect(X/X_T) \\ I_2(X) &= I_0\, rect(X/X_T) \end{aligned} \tag{3.34}$$

とする。I_0 は定数である。rect 関数は

$$\begin{aligned} rect(X/X_t) &= 1 \quad : \quad -X_T/2 \le X \le X_T/2 \\ &= 0 \quad : \quad otherwise \end{aligned} \tag{3.35}$$

として 2 画像のターゲットの相互相関関数は

$$\begin{aligned} C_T(X') &= I_0^2 \int_{-\infty}^{\infty} I_1(X)\, I_2^*(X+X')\, dX \\ &= I_0^2 \int_{-X_T/2}^{X_T/2} rect(X/X_T)\, rect^*((X+X')/X_T)\, dX \end{aligned} \tag{3.36}$$

と導かれる。図 3.3 に相互相関の過程を示す。$X' = -X_T$ のときは重複している部分が無いので相関はない。$X' = -X_T/2$ のときは rect 関数の半分だけ重複している。$X' = 0$ となったとき、2 つの rect 関数は完全に重複しているので最大の相関値となる。

前節で述べたように開口時間が重複していないスプリットルック画像の相互相関はスペックルに相関は無く、ターゲット画像には高い相関値となる。

この相関性の違いからターゲットを抽出するのが本手法の基本原理と成る。

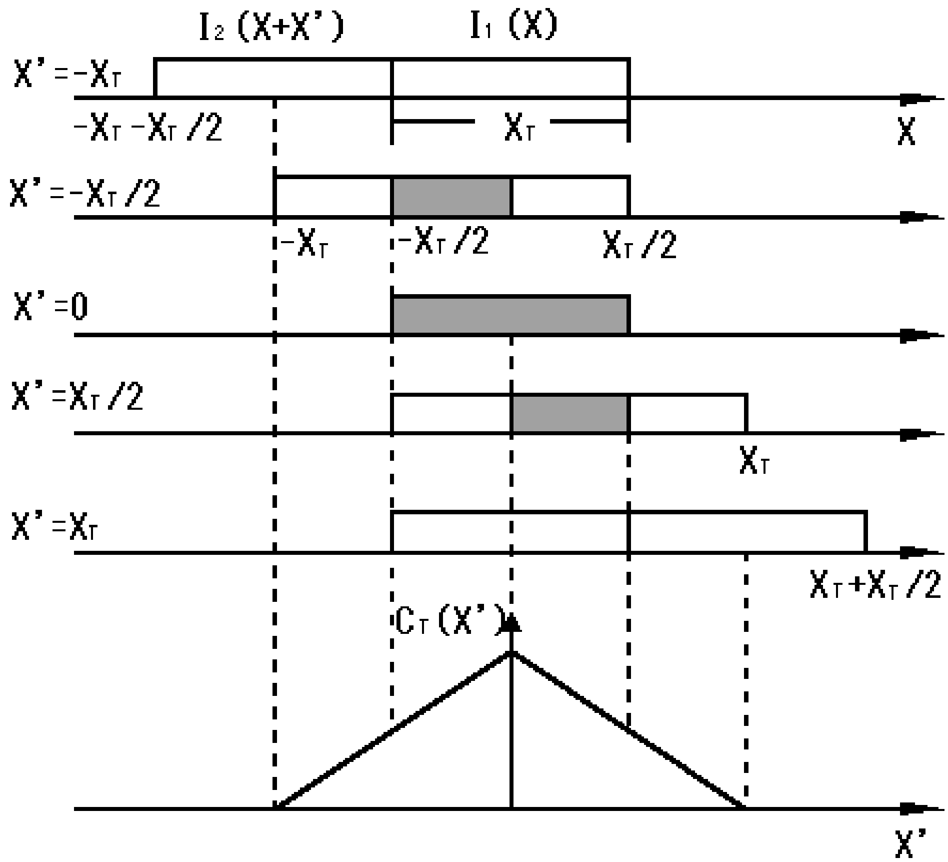


図 3.3: ターゲットの相互相関による相関値の変化

第4章　シミュレーション

4.1　スプリットルック画像の相互相関を用いた船舶検出法

4.1.1　シミュレーション用ルック画像の生成

スプリットルック画像にはルック間でスペックルには相関がなく、確定論的ターゲットには相関があるという特徴がある。そこで、この特徴を踏まえてノイズに埋もれた船舶のシミュレーション画像を生成した。

まず、2 セットのスペックル強度画像を作る。ランダムなノイズはガウス（Gauss）統計として近似されるため、中心極限定理を満足させる必要がある。一般に中心極限定理を満足させるためには 1 つの分解能面積内に 5 ～ 8 個以上の互いに統計的に独立した散乱体が必要とされる。また、式（4.1）の a_j と ϕ_j は統計的に相関性がなくそれぞれ独立で、ϕ_j は $[-\pi, \pi]$ の間で一様に分布していなければならない。画像複素振幅は式（3.1）より

$$A(X,Y) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{j=1}^{M} a_j \exp(i\phi_j) \tag{4.1}$$

と表せる。本研究では 1 分解能面積内に 20 個の散乱体があるとし、散乱波の振幅の平均を 1 とした。そして 128×128 ピクセルの大きさで複素振幅画像を生成した。

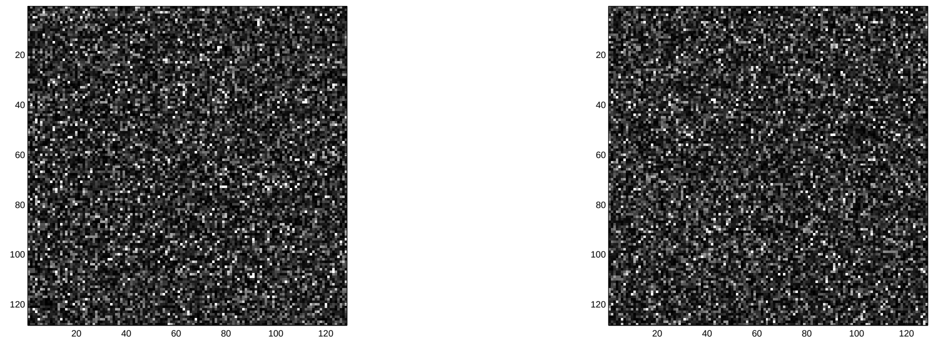
$$A(X,Y) = \sum_{j=1}^{20} \exp(i2\pi R_j) \tag{4.2}$$

ここで、位相に含まれている R_j は乱数（$0 \sim 1$）である。そして、複素振幅から式（3.2）よりスペックルの強度画像

$$I(X,Y) = A_r^2(X,Y) + A_i^2(X,Y) \tag{4.3}$$

を生成した。尚、このシミュレーション用ルック画像の生成法を記した MATLAB のプログラムを付録 F に記す。

次に、それぞれの画像にターゲットを埋め込む。上記と同様の方法で小サイズのスペックル強度画像を 1 つ作る。この小サイズのスペックル画像を 2 セットの大きなスペックル画像の同じ場所にターゲットとして埋め込む。ターゲットが船舶画像に相当し、周りのノイズ強度と同レベルに平均強度を設定してある。このようにして生成された 2 つのシミュレーション用ルック画像を図 4.1 に示す。



(a) Look 1 画像　　(b) Look 2 画像

図 4.1: シミュレーション用スプリットルック画像

4.1.2　moving window と相関画像

2 つのルック画像上で moving window を 1 ピクセルずつ移動させながら 2 次元相互相関関数を算出し、相関関数の座標中心の値より新たな相関画像を生成する。

moving window で切り出された 2 画像の相互相関関数（CCF）を図 4.2 と図 4.3 に示す。図 4.2 はピークはなく低い相関値となっている。これは moving window 内にターゲットがないノイズ部分のみでの相互相関なので、ルック画像間のノイズには相関していないことを示している。一方、図 4.3 には相関関数の中心にピークが出ている。これは moving window 内にターゲットがあり、相関しているためである。このピークの有無によりターゲットの存在を判断していく。

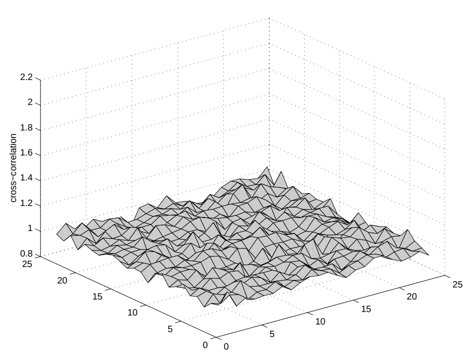


図 4.2: moving window 内にターゲットが無い場合の CCF

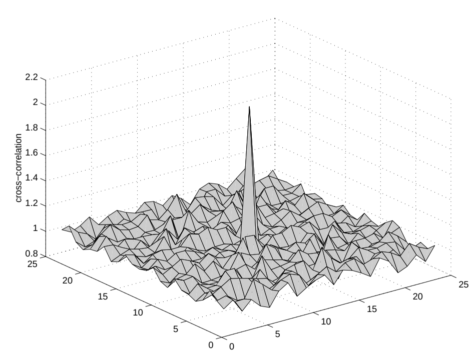


図 4.3: moving window 内にターゲットがある場合の CCF

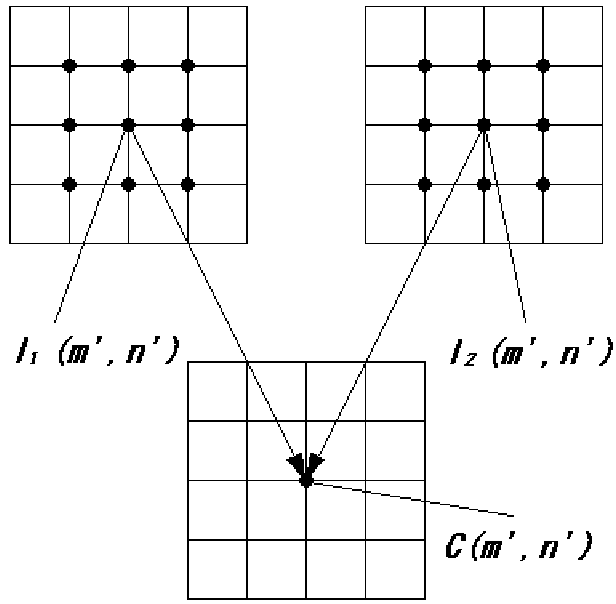


図 4.4: 2 画像間の相互相関による相関値の導出

M×N サイズの moving window を使って相互相関関数の中心の値（相関値）を求め相関画像を生成する過程は以下のとおりである。それぞれのルック画像を moving window によって切り出し、それぞれの画像強度を I_1、I_2 とする。図 4.4 のように相関画像の (m', n') の位置にあるピクセル値は各々のルック画像の (m', n') を中心とした M×N のピクセルを切り出し、相互相関関数によって算出する。相関値は

$$C(m', n') = \frac{\sum_{m=-i}^{i} \sum_{n=-j}^{j} I_1(m+m', n+n') I_2(m+m', n+n')}{\sum_{m=-i}^{i} \sum_{n=-j}^{j} I_1(m+m', n+n') \sum_{m=-i}^{i} \sum_{n=-j}^{j} I_2(m+m', n+n')} \tag{4.4}$$

から算出される。ここで $i = (M-1)/2$、$j = (N-1)/2$ である。これを 1 ピクセルずつ移動しながらすべての m' と n' に行い、相関画像を生成する。

式 (4.4) は一般的に

$$C(X', Y') = \frac{\langle I_1(X+X', Y+Y') I_2(X+X', Y+Y') \rangle}{\langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle} \tag{4.5}$$

とアンサンブル平均を使って表示される。

なお、実際の演算では切り出した画像に高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform: FFT）をかけた周波数領域で行う。図 4.4 では M と N は奇数であるが実際の演算では FFT を使うため moving woindow サイズは偶数で行う。周波数領域で演算を行う相関画像の生成プログラム（MATLAB）を付録 G に示す。

以上のようにして求められた相互相関関数の座標中心の値から相関画像（図 4.5）を生成する。相関画像を生成することによって、ルック画像では確認できなかったターゲットが、相関画像で高いピクセル値として確認することができる。

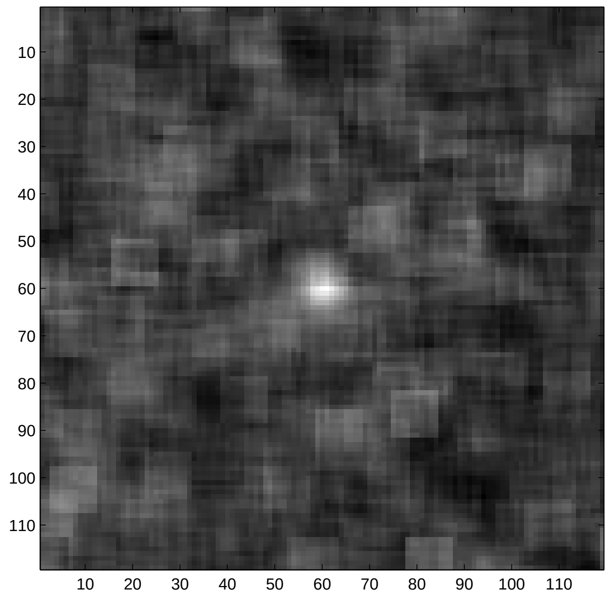


図 4.5: moving window の相互相関によって生成された相関画像

4.1.3　相関画像の 2 値化

相関画像でのターゲットとバックグランドを区別するために相関画像の強度に閾値をもうけ 2 値化し、ターゲットを検出する。閾値は相関画像の

$$(\text{平均値}) + (\text{標準偏差}) \times n : (n = 1, 2, 3, \cdots) \tag{4.6}$$

より求める。閾値は相関画像強度の平均値と標準偏差と n の大きさよって変わる。そして、図 4.6 のように n を大きくすると相関値が高い部分、つまりターゲットがあった場所だけが残るようになる。尚、相関画像の強度に閾値もうけ 2 値化するプログラム（MATLAB）を付録 H に記す。

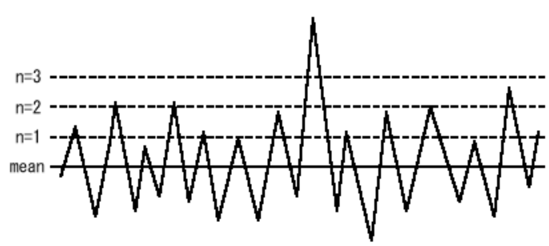


図 4.6: 閾値の設定

図 4.5 の相関画像の強度に閾値をもうけ 2 値化すると図 4.7 のようにノイズが抑えられはっきりとターゲットを検出することができる。ここで問題となるのは、n が大きすぎるとノイズ

のみではなくターゲットの情報も失われてしまうことである。そこで、最適な閾値を求める必要が生じてくる。この問題については後述する。

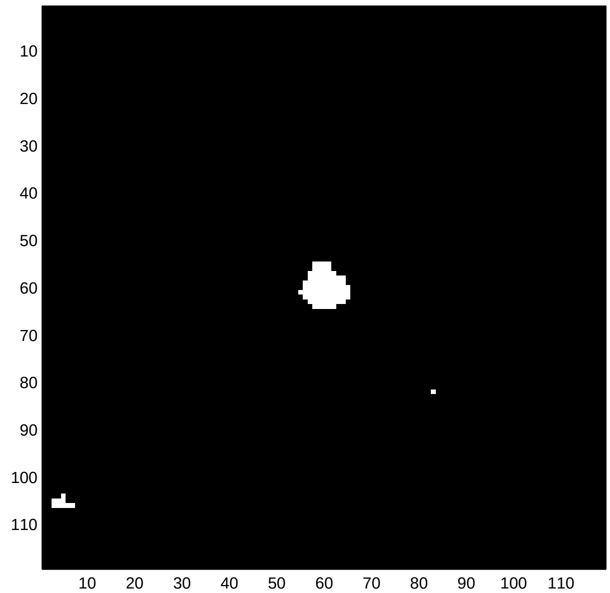


図 4.7: 相関画像の 2 値化によって検出されたターゲット

4.1.4 シミュレーション手順のまとめ

前述したプロセスを図 4.8 のブロックダイアグラムに示す。そして、シミュレーション手順を以下に述べる。

1. 2 セットのスペックル画像（128×128）を生成し、ターゲットを埋め込む。
2. 各画像を moving window で画像を切り出し、それぞれの画像で高速フーリエ変換を行う。
3. 高速フーリエ変換によって生成された各画像の画像スペクトル S_1 と S_2^* を掛け合わせ、逆高速フーリエ変換を行い CCF を算出する。
4. 相互相関関数の座標中心を相関画像のピクセル値とする。
5. moving window を 1 ピクセルずつ移動させながら画像全域で同様の手順を行い、相関画像を生成する。
6. 相関画像に閾値をもうけ 2 値化しターゲットを抽出する。

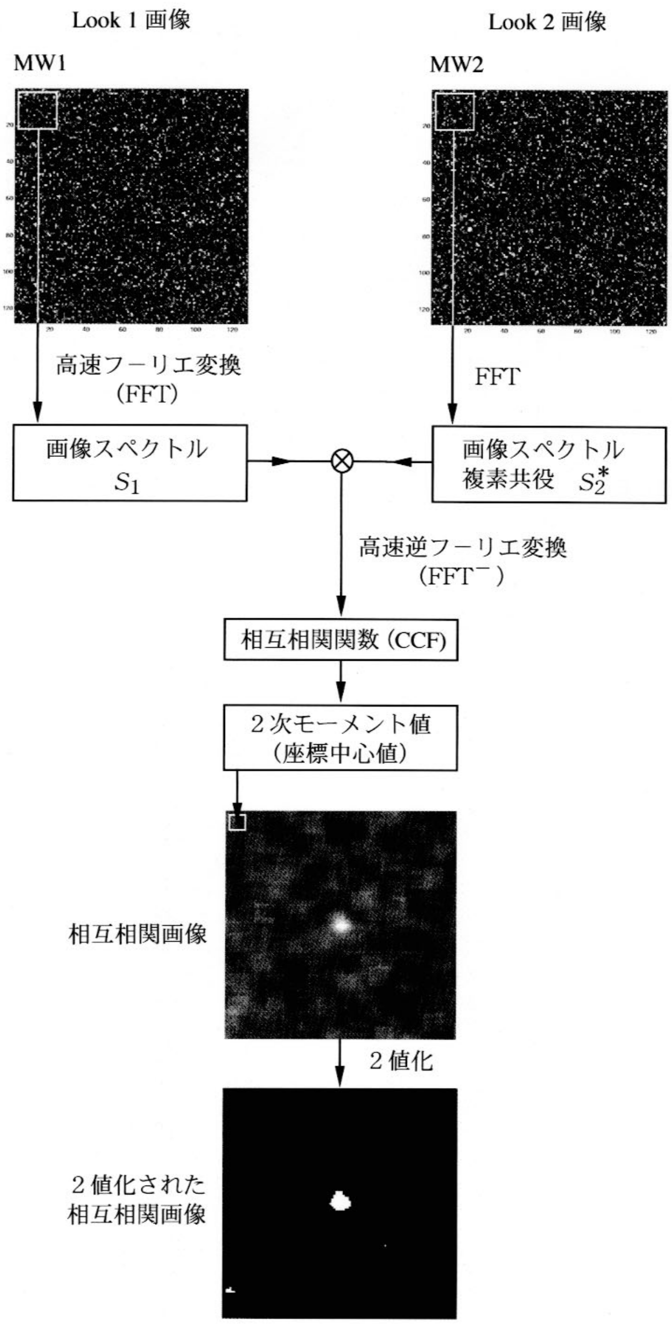


図 4.8: シミュレーション手順のまとめ

4.2 最適な moving window サイズ

ターゲットの検出能力はターゲット部分の相関値とノイズ部分の相関値によって左右される。ターゲット部分の相関値が高く、ノイズ部分の相関値が低ければターゲットは精度良く検出される。そこで、ターゲット部分とノイズ部分にわけて moving window サイズごとの相関値の変化を調べた。

4.2.1 ターゲットと moving window サイズの関係

ターゲットサイズに対して最も相関のピークが高くなる moving window サイズを求める。まず moving window サイズのスペックル画像を 2 セットつくり、ルック画像と同じように中心にターゲットを埋め込む。2 つの画像の 2 次元相互相関関数を算出し、ピークの値をその 2 つの画像の相関値とする。画像のピクセル値は試行ごとに変わってしまうため、相関のピーク値にばらつきがでてしまう。そのため 1000 回の試行をし、その平均値を相関値とした。1 つのターゲットサイズにつき 30×30 から 2×2 ピクセルまで moving window サイズを変化させ相関値を求めた。そして、この試行を 2×2 から 20×20 ピクセルのターゲットサイズに適用した。この結果を図 4.9 から図 4.18 の×印に示す。図 4.9 から図 4.18 の縦軸は式 (4.4) から算出された相関値、横軸は moving window サイズとした。理論値を実線で示し、理論値はターゲットと moving window の面積比に 1 を加えたものである。

図 4.9 から図 4.18 の結果より、すべてのターゲットサイズでターゲットと moving window サイズが等しくなったときに最も高い相関値が得られた。moving window サイズがターゲットサイズ以下になるとそれは自己相関関数のピーク値となり相関値は 2 に近づいている。この場合、moving woindow 内にノイズ部分は無く、相関性のあるターゲットのみの画像のため高い相関値となっている。しかし、2×2 や 4×4 ピクセルなどの小さな window サイズでは高い相関値ではあるが理論値の 2 から離れている。これは moving window のサイズが小さくなることによってその中のサンプル数が少なくなったためである。ターゲットより moving window サイズが大きい場合も相関値が理論値に沿いながら下がっている。

4.2.2 ノイズと moving window サイズの関係

本来ノイズ部分には相関は無いため相関値は低くなるはずである。しかし、ランダムな統計特性によって相関画像のノイズ部分でも高い値が出る場合がある。シミュレーションではターゲットの位置がわかっているためノイズとターゲットとの区別はできる。しかし、実際の画像を使った検出ではノイズに埋もれたターゲットの場所はわからないため相関画像のノイズ（ノイズ部分の高い相関値）が多くてはターゲットの検出が困難となってしまう。このような相関値の違いは moving window の大きさに依存するため、ここではノイズ部分の相関値と moving window サイズの関係について調べた。

ターゲットと moving window サイズの関係で用いた方法と同様にして相関値をとる。ただし、画像内にターゲットは埋め込まない。1000 回の試行をし、その平均値を図 4.9 から 4.18 の ◯ 印に表す。moving window も同様に 30×30 から 2×2 ピクセルまで変化させた。この ◯ 印のノイズの平均は × 印と比較するため図 4.9 から図 4.18 のすべての図に示してある。

図から一般的なトレンドとして、平均値は 1 のあたりで一定だが、window サイズごとにば

らつきが変化していることがわかる。moving window サイズが小さくなるにつれてばらつきが大きくなっている。これも、moving window 内のピクセル数が少なくなったためである。

4.2.3 結果

相関画像を使ったターゲット検出では、ターゲット部分の相関値（×）とノイズ部分の相関値（○）のエラーバーの間隔が検出能力の目安となる。エラーバーの間隔が大きいほどターゲット部分とノイズ部分の相関値の差は大きくなり検出能力が高くなる。図 4.9 から図 4.18 のほとんどのターゲットサイズで、ターゲットと window サイズが等しいとき最もエラーバーの間隔が大きくなり、検出能力は高いと言える。しかし、ターゲットサイズ 2×2 ピクセルの図 4.9 では、window サイズが 2×2 ピクセルのときでもターゲット部分の相関値とノイズ部分の相関値のエラーバーが重なっている。これでは、ターゲット部分にピークが出ていたとしてもノイズが大きいため検出は非常に困難である。

図 4.9 から図 4.18 の結果と実際の検出シミュレーションより、コンスタントに検出できるターゲットサイズは 10×10 ピクセル以上。そして最適な moving window サイズはターゲットサイズと等しい moving window サイズである。また、ターゲットサイズと moving window サイズが共に 8×8 ピクセルの場合でも少量のノイズを含むこともあるが検出は可能である。ターゲットサイズ 6×6 ピクセル以下になると moving window のピクセル数が少ないため、ターゲット部分の相関値が高い場合でもノイズが多くなるため検出は難しい。

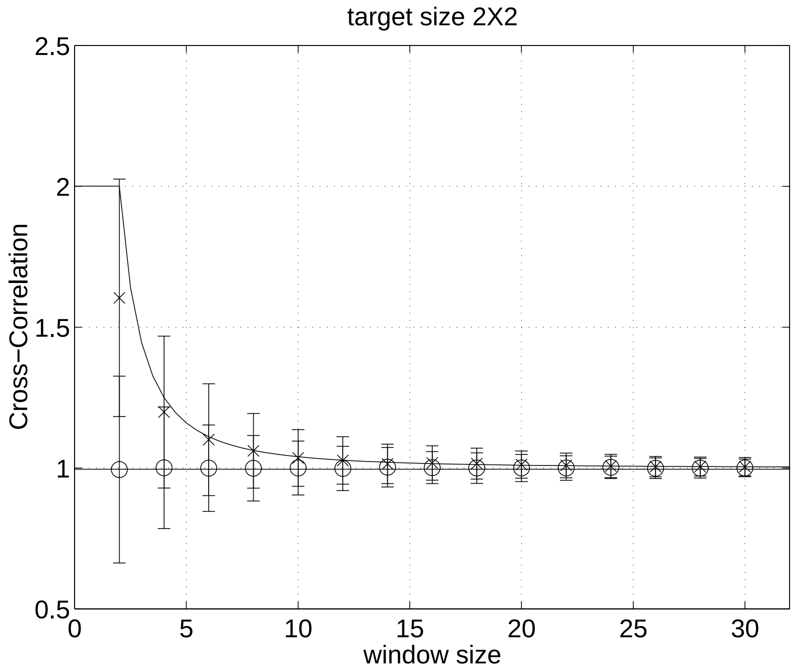


図 4.9: ターゲットサイズ 2×2 の相関値

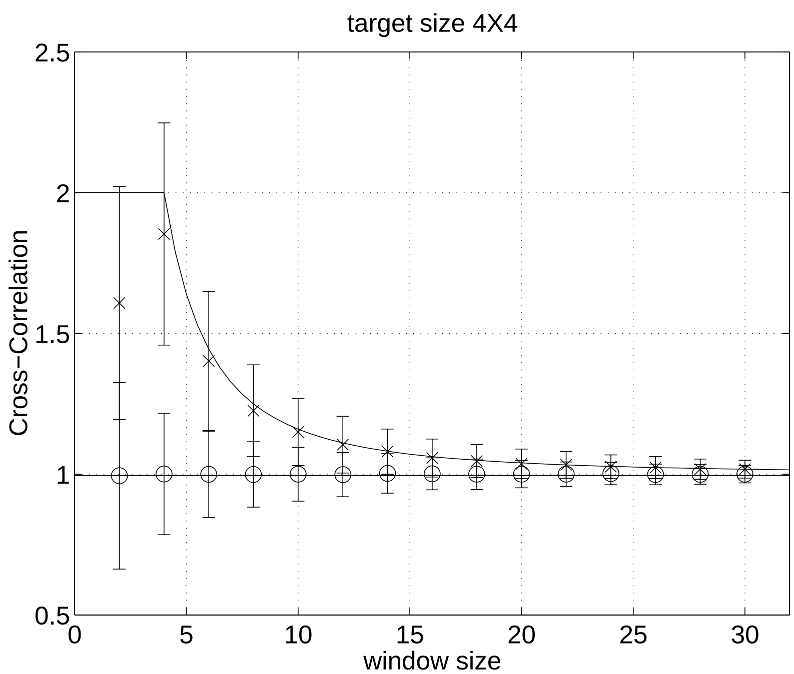


図 4.10: ターゲットサイズ 4×4 の相関値

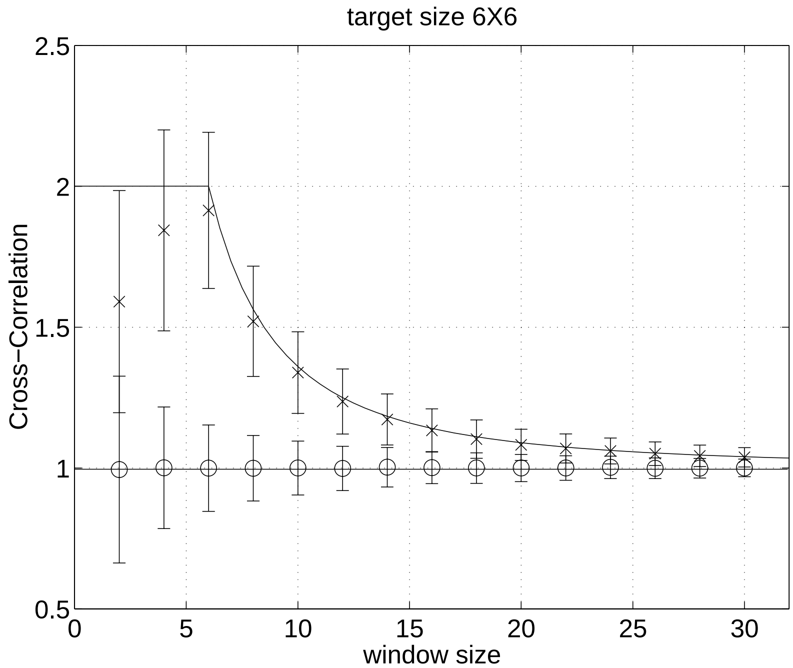


図 4.11: ターゲットサイズ 6×6 の相関値

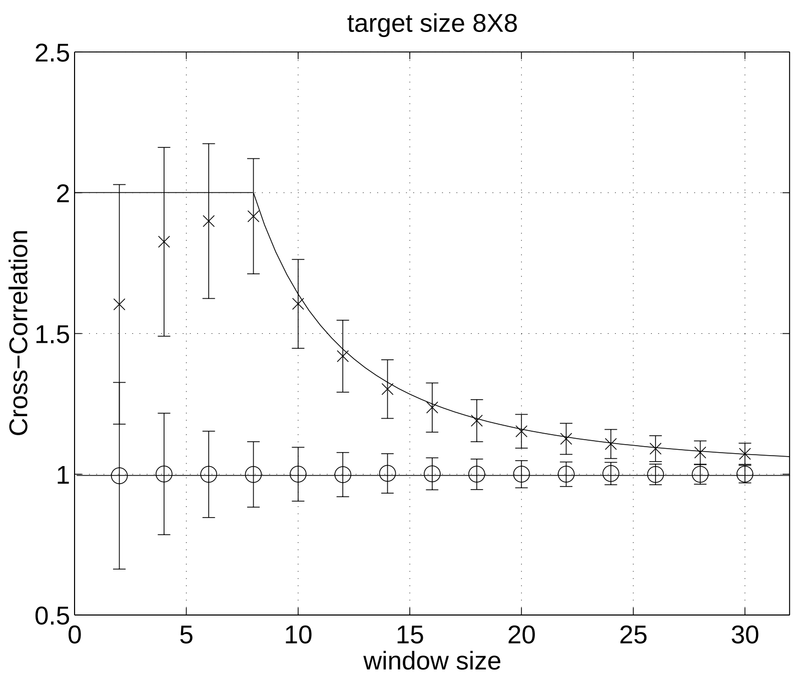


図 4.12: ターゲットサイズ 8×8 の相関値

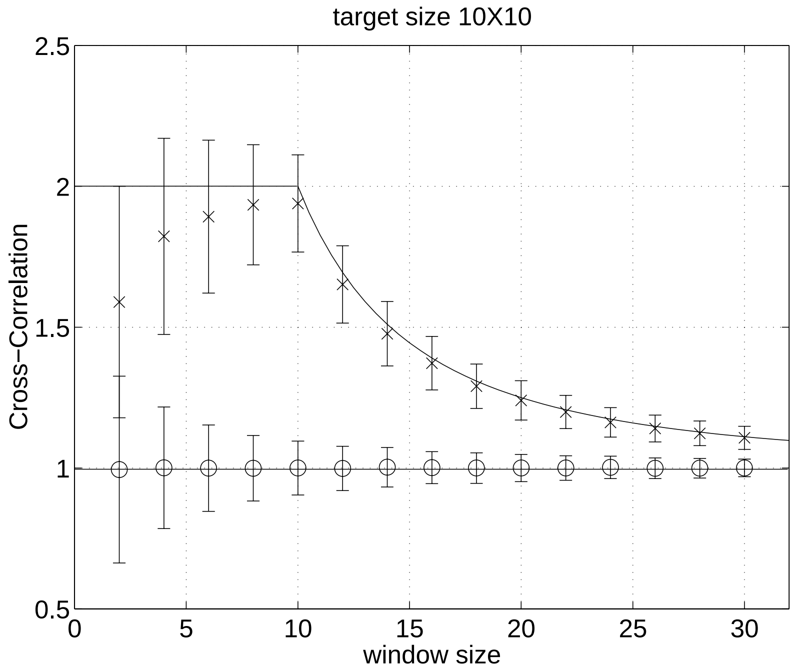


図 4.13: ターゲットサイズ 10×10 の相関値

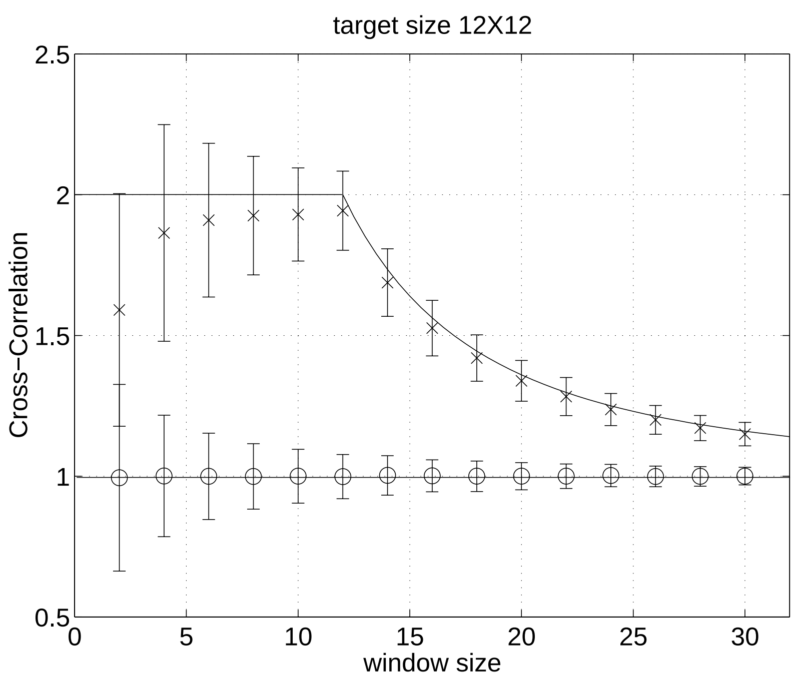


図 4.14: ターゲットサイズ 12×12 の相関値

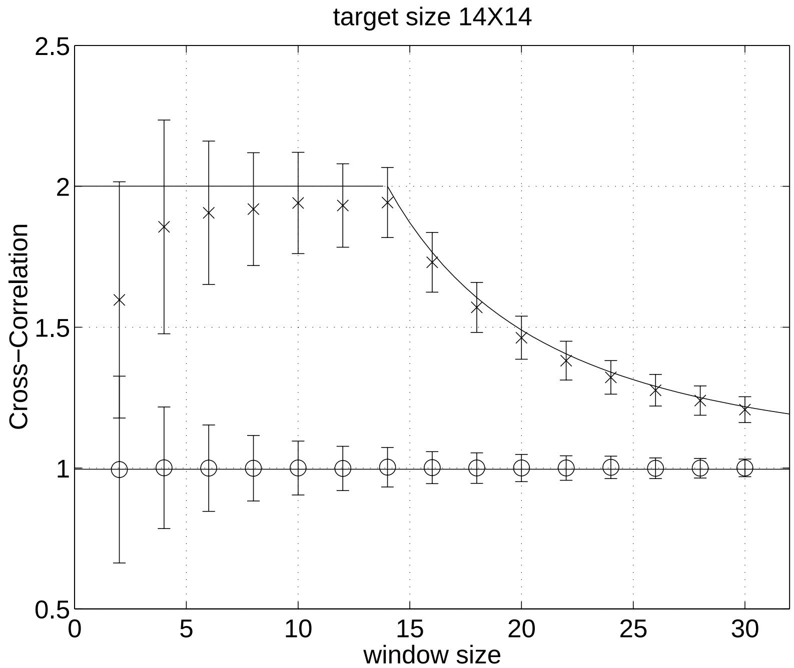


図 4.15: ターゲットサイズ 14×14 の相関値

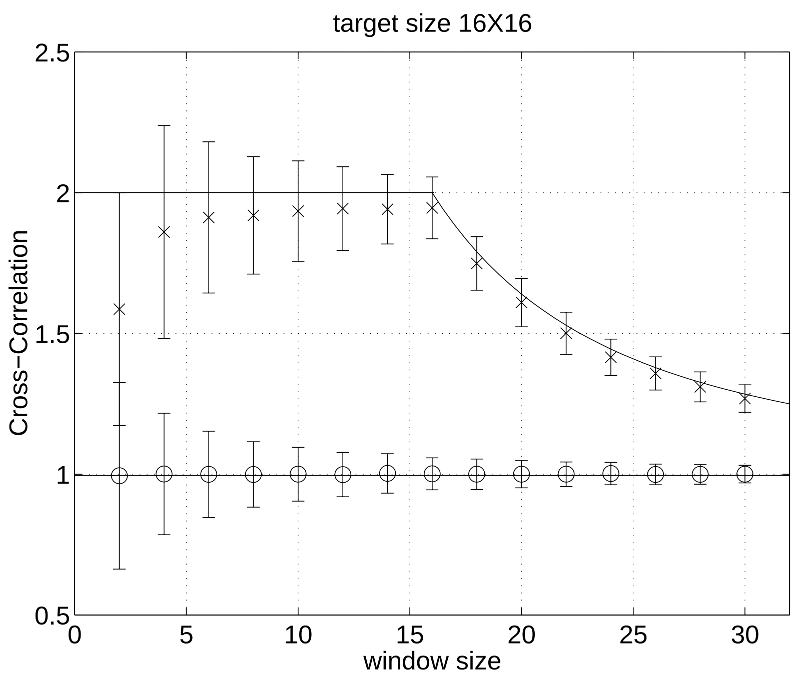


図 4.16: ターゲットサイズ 16×16 の相関値

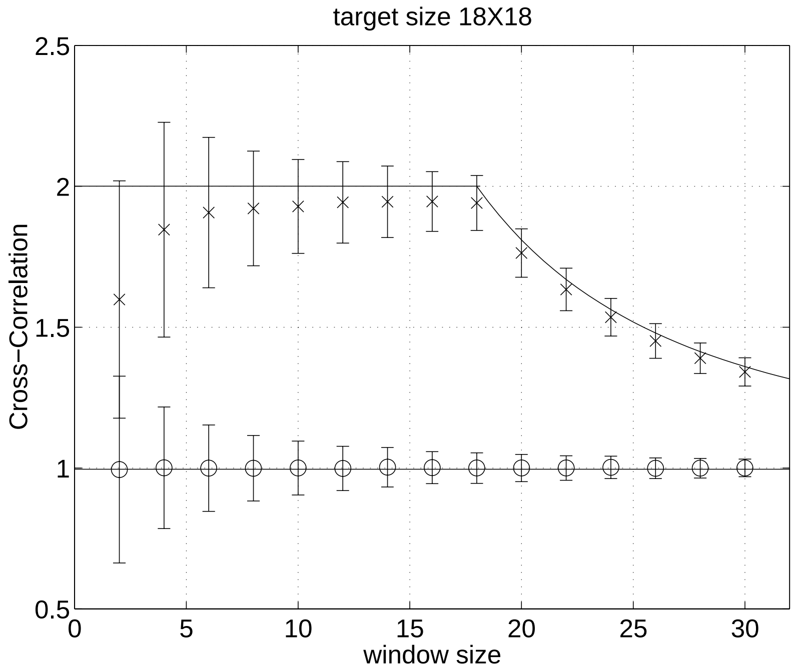


図 4.17: ターゲットサイズ 18 × 18 の相関値

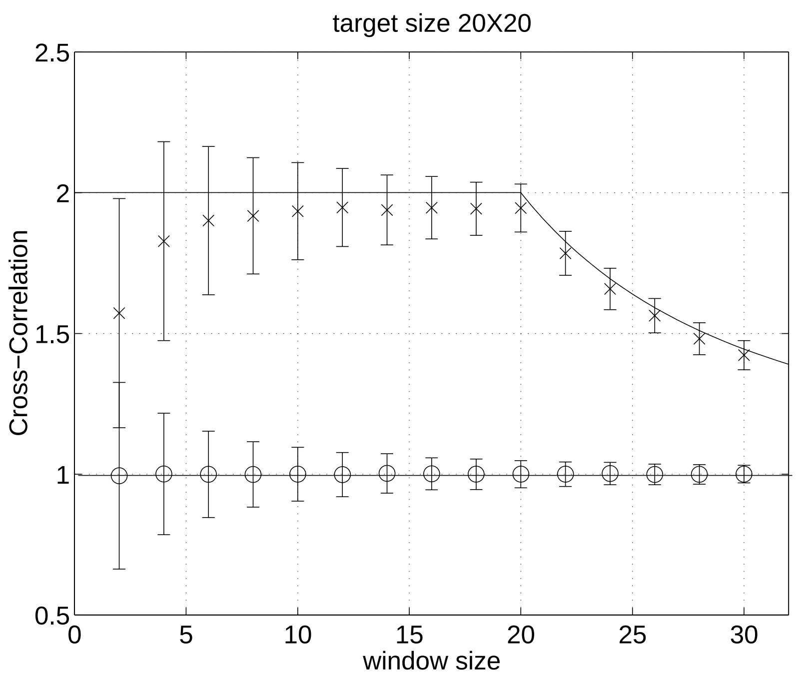


図 4.18: ターゲットサイズ 20 × 20 の相関値

4.3 相関画像の 2 値化における閾値の設定

4.3.1 方法

前節で、たとえ moving window サイズとターゲットサイズが等しく、高い相関値を得ても moving window サイズが小さくなるにつれてノイズが多くなるという結果が得た。そこで、それぞれのターゲット（moving window）サイズにおけるノイズを視覚的に示し、ノイズが無くなりターゲットのみが残る n の値を求める。

ターゲットサイズ 2×2 から 20×20 ピクセルのシミュレーションルック画像を生成し、最も高い相関値を得るためにターゲットと同サイズの moving window で相関画像をつくり、2 値化画像を生成した。

閾値を 4 段階に設定し、$n = 1$ から $n = 4$ までについて求めた。それぞれの閾値を表 4.1 に示し相関画像と各閾値ごとの 2 値化の結果を図 4.19 から図 4.28 に示す。

4.3.2 結果

図 4.19 から図 4.28 のどのターゲット（moving window）サイズにおいても n の値を大きくするとノイズは減少した。

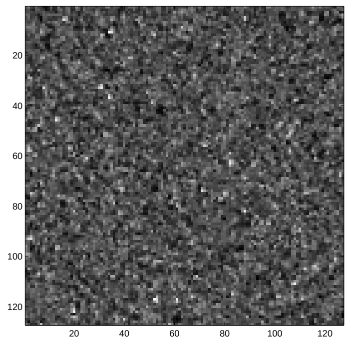
図 4.19 の 2×2 ピクセルのターゲットサイズの場合 $n = 4$ の 2 値化画像でノイズが多く残っているが、ターゲットが失われてしまった。図 4.20 の 4×4 ピクセルのターゲットサイズでは $n = 4$ となっても閾値が高いにもかかわらずノイズが多く残り、ターゲットを特定することは難しい。図 4.21 の 6×6 ピクセルや図 4.22 の 8×8 ピクセルのターゲットでは $n = 4$ になるとだいぶノイズが抑えられているが、ターゲット部分以外にも少量のノイズが残っている。図 4.23 と図 4.24 の 10×10、12×12 ピクセルのターゲットサイズでは、$n = 3$ のときノイズは残っているがターゲットが大きく検出され、$n = 4$ のときにはノイズは抑えられターゲットのみが検出された。図 4.25 から図 4.27 のターゲットサイズ 14×14 から 18×18 ピクセルの場合、$n = 2$ でノイズは無くなりターゲットが検出されている。図 4.28 の 20×20 になると $n = 1$ でノイズはなくなっている。

2×2 と 4×4 のターゲットサイズでは $n = 4$ の場合でもノイズが多く残っている。表 4.1 より 2×2 と 4×4 の最大値は 2 より大きく離れている。これはターゲットの相関値ではなく、moving window が小さいためばらつきが大きくなったノイズ部分の相関値である。相関画像の最大値がノイズ部分の相関値なので閾値をいくら大きくしたとしてもターゲットを検出することはできない。

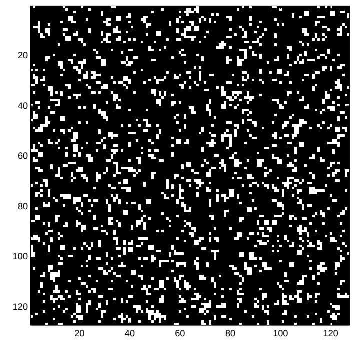
ターゲットサイズ 6×6 から 12×12 ピクセルの場合は $n = 4$ のときがノイズは無くなり、$n = 4$ が最適な閾値と言える。14×14 から 20×20 ピクセルのターゲットの場合は $n = 2$ のときにノイズは抑えられている。閾値を大きくすると逆にターゲットのピクセルが減少してしまうので $n = 2$ が最適である。

表 4.1: 各ターゲット（moving window）サイズにおける閾値

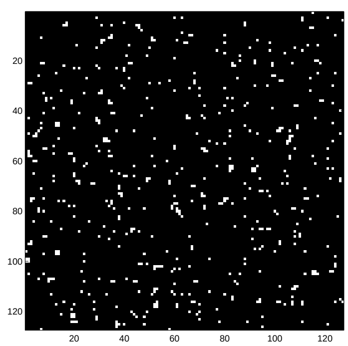
	mean	std	max	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
2×2	0.9964	0.3411	2.9975	1.3375	1.6786	2.0197	2.3608
4×4	1.0012	0.2193	2.3160	1.2205	1.4398	1.6592	1.8785
6×6	0.9994	0.1473	1.7296	1.1467	1.2939	1.4412	1.5884
8×8	1.0020	0.1260	1.6561	1.1280	1.2541	1.3801	1.5062
10×10	0.9997	0.1120	2.1649	1.1117	1.2237	1.3357	1.4477
12×12	1.0083	0.1025	1.9471	1.1107	1.2132	1.3157	1.4181
14×14	1.0158	0.1098	2.1070	1.1256	1.2355	1.3453	1.4551
16×16	1.0231	0.1120	1.9166	1.1351	1.2471	1.3591	1.4710
18×18	1.0156	0.1093	1.9229	1.1249	1.2342	1.3436	1.4529
20×20	1.0332	0.1015	1.8321	1.1347	1.2362	1.3377	1.4391



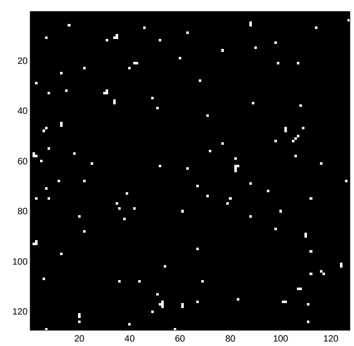
(a) 相関画像



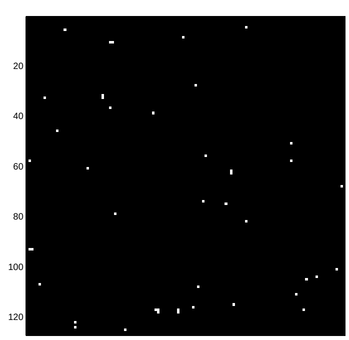
(b) n=1



(c) n=2

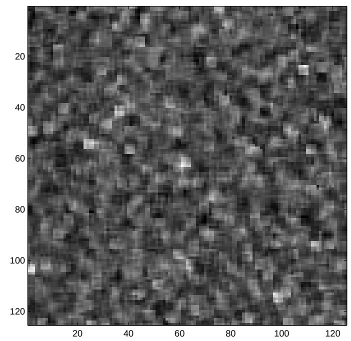


(d) n=3

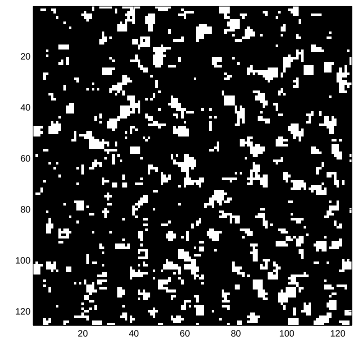


(e) n=4

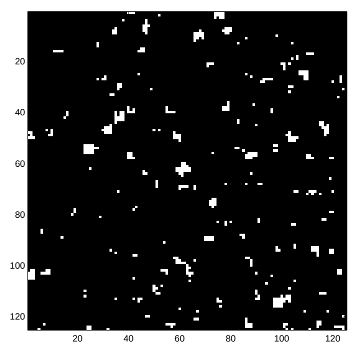
図 4.19: 2×2 ピクセルのターゲット（moving window）サイズに対する相関画像 2 値化の結果



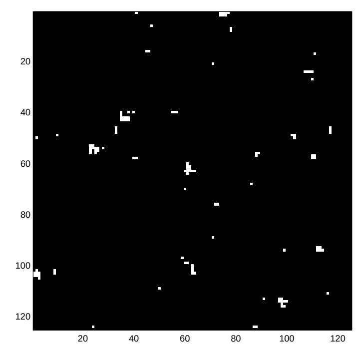
(a) 相関画像



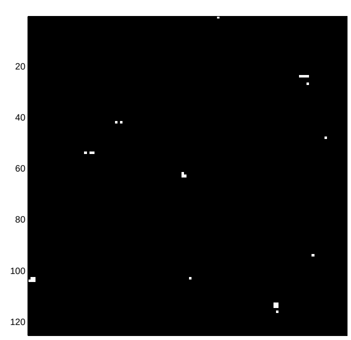
(b) n=1



(c) n=2

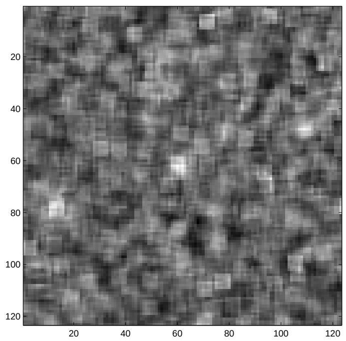


(d) n=3

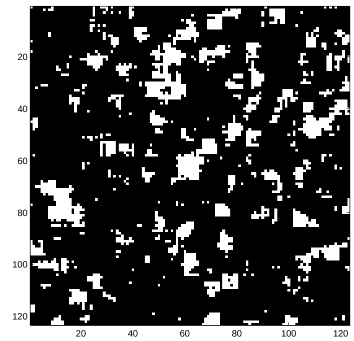


(e) n=4

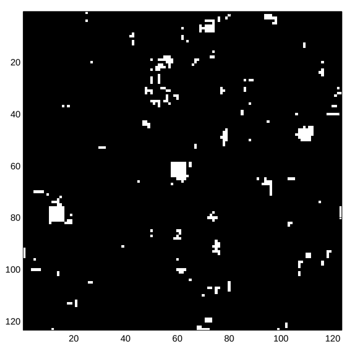
図 4.20: 4×4 ピクセルのターゲット（moving window）サイズに対する相関画像 2 値化の結果



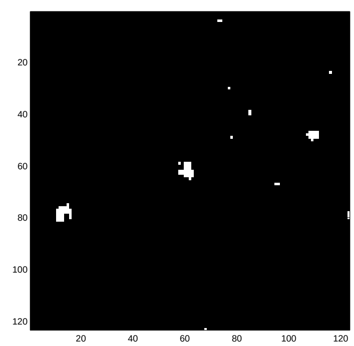
(a) 相関画像



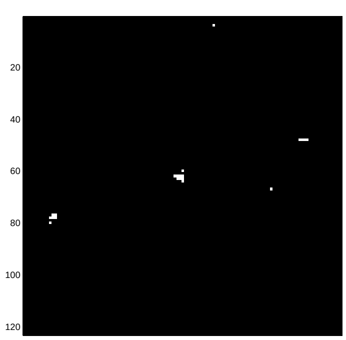
(b) n=1



(c) n=2

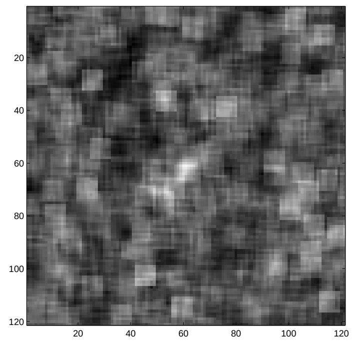


(d) n=3

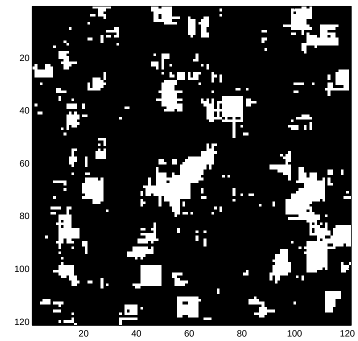


(e) n=4

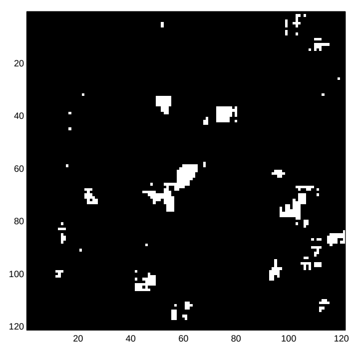
図 4.21: 6×6 ピクセルのターゲット（moving window）サイズに対する相関画像 2 値化の結果



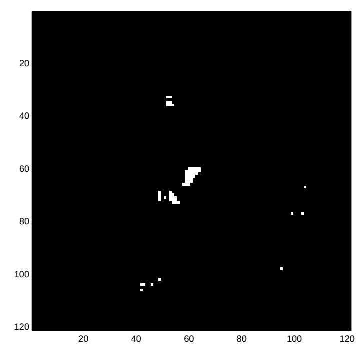
(a) 相関画像



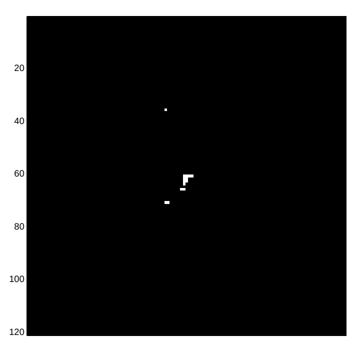
(b) n=1



(c) n=2

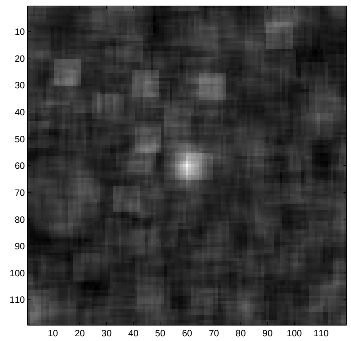


(d) n=3

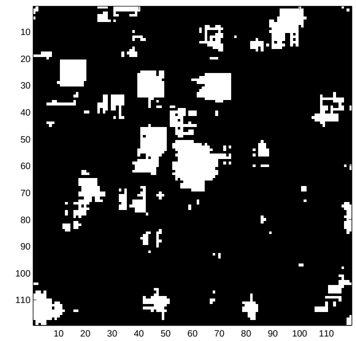


(e) n=4

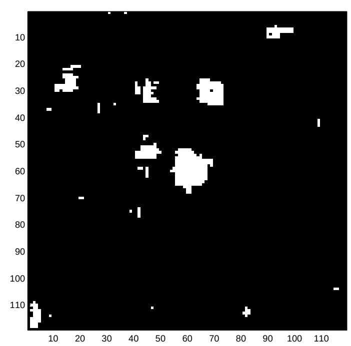
図 4.22: 8×8 ピクセルのターゲット（moving window）サイズに対する相関画像 2 値化の結果



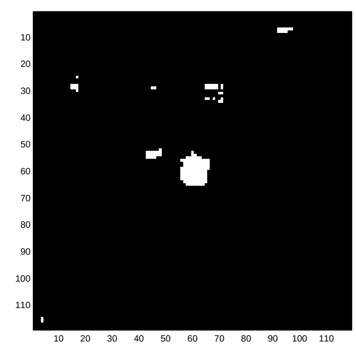
(a) 相関画像



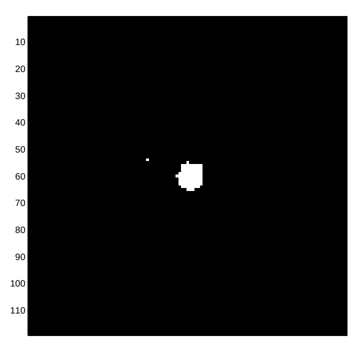
(b) n=1



(c) n=2

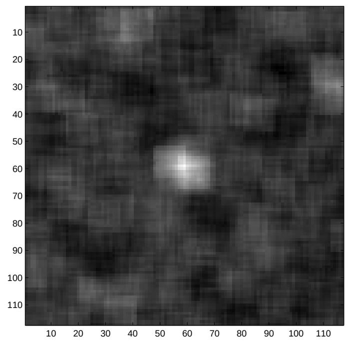


(d) n=3

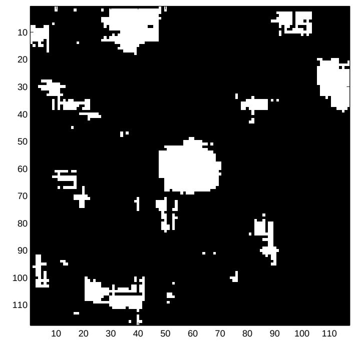


(e) n=4

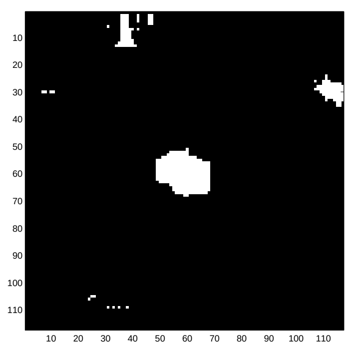
図 4.23: 10×10 ピクセルのターゲット（moving window）サイズに対する相関画像 2 値化の結果



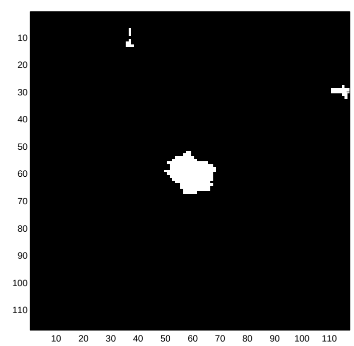
(a) 相関画像



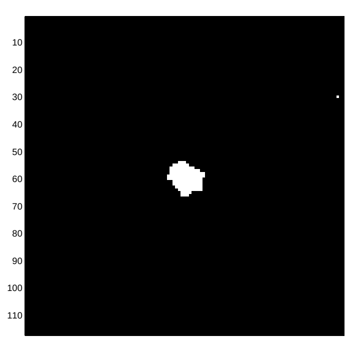
(b) n=1



(c) n=2

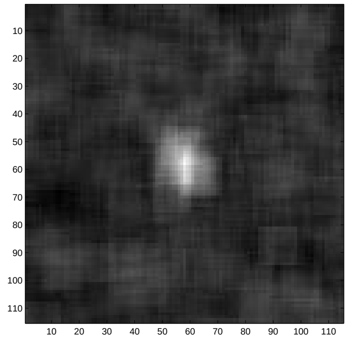


(d) n=3

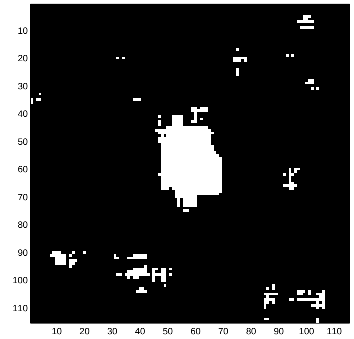


(e) n=4

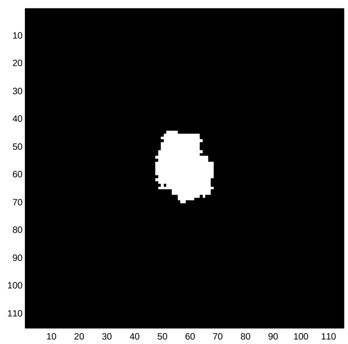
図 4.24: 12 × 12 ピクセルのターゲット（moving window）サイズに対する相関画像 2 値化の結果



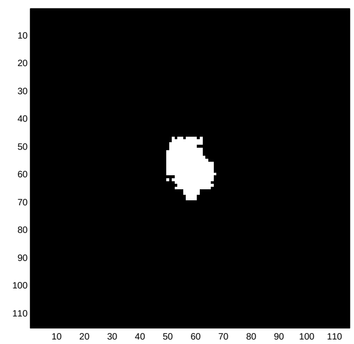
(a) 相関画像



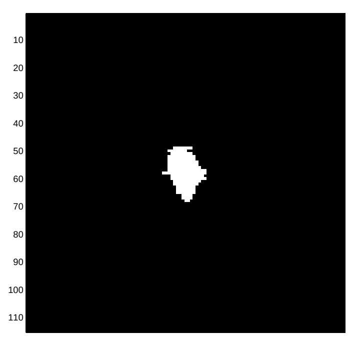
(b) n=1



(c) n=2

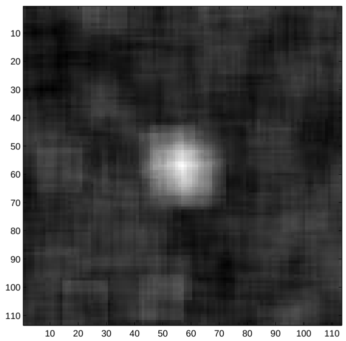


(d) n=3

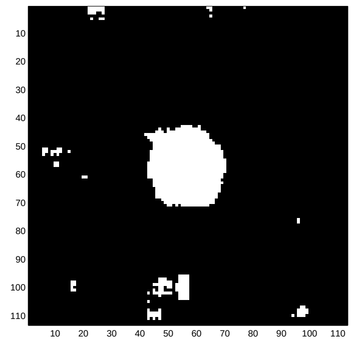


(e) n=4

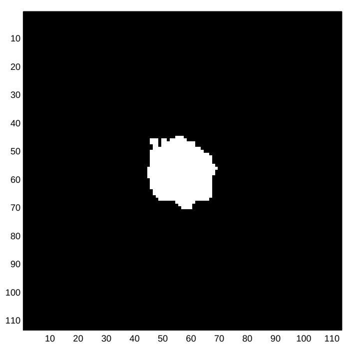
図 4.25: 14×14 ピクセルのターゲット（moving window）サイズに対する相関画像 2 値化の結果



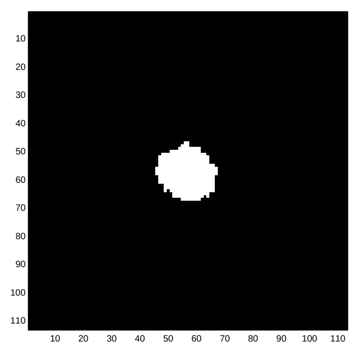
(a) 相関画像



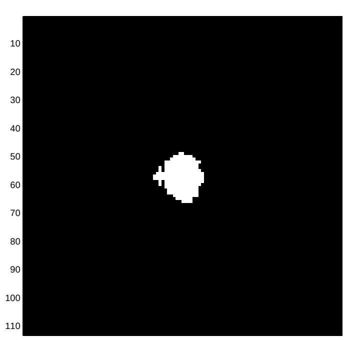
(b) n=1



(c) n=2

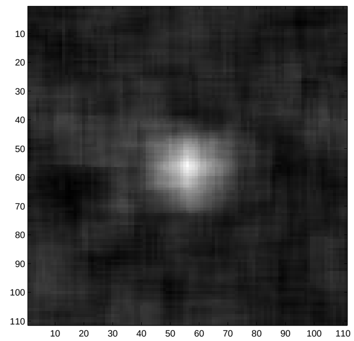


(d) n=3

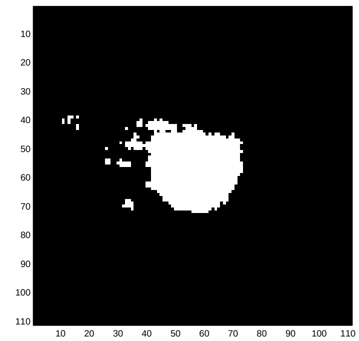


(e) n=4

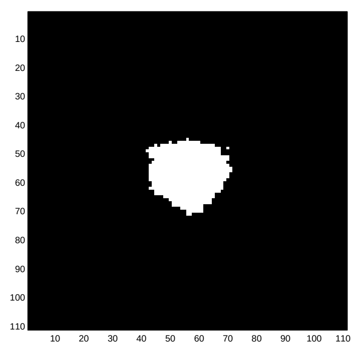
図 4.26: 16 × 16 ピクセルのターゲット（moving window）サイズに対する相関画像 2 値化の結果



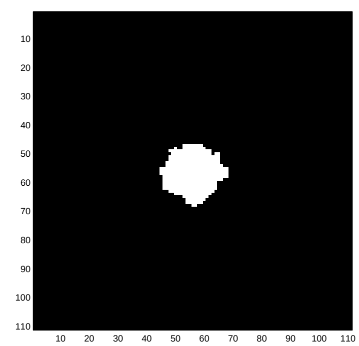
(a) 相関画像



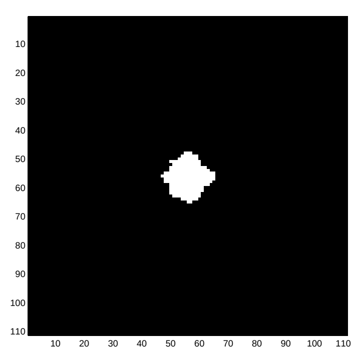
(b) n=1



(c) n=2

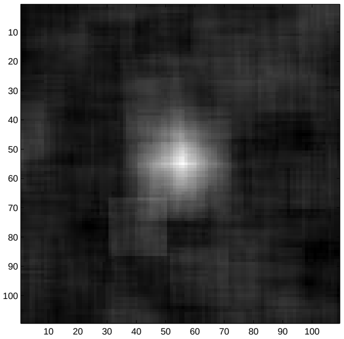


(d) n=3

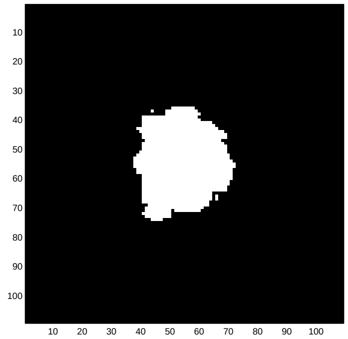


(e) n=4

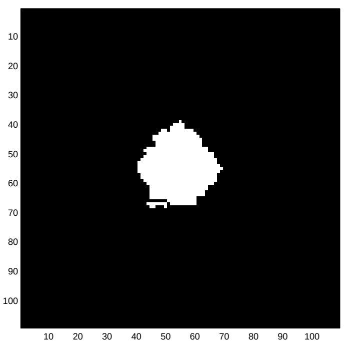
図 4.27: 18×18 ピクセルのターゲット（moving window）サイズに対する相関画像 2 値化の結果



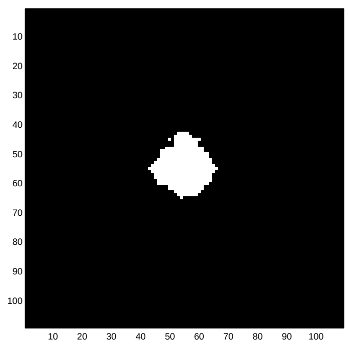
(a) 相関画像



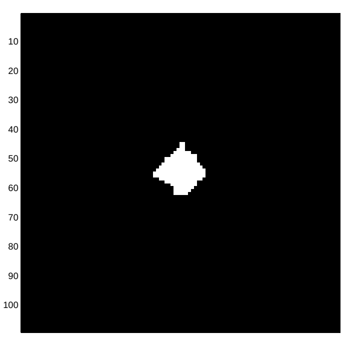
(b) n=1



(c) n=2



(d) n=3



(e) n=4

図 4.28: 20×20 ピクセルのターゲット（moving window）サイズに対する相関画像 2 値化の結果

第5章　Radarsat 画像への応用

5.1　Radarsat の概要

Radarsat は 1995 年 11 月 4 日にアメリカの協力を受けてカナダが打ち上げた SAR 専用衛星である。打ち上げ当初の目的は主にカナダ領北極海を中心とした船舶航行支援のために流氷の分布を観測することであったが、現在では Radarsat データは森林や地下資源、環境汚染、漁業権の確保など幅広い応用分野での研究に利用されている。Radarsat の最大の特徴はマイクロ波ビームを 5 種類の観測モードに変えることができることで、目的に応じて分解能や観測幅、入射角などを選択できる。特に世界初の試みである観測幅 $500km$ の ScanSAR Mode は災害観測や広い地域の同時観測、変化の早い海洋観測などに期待されている。5 種類のモードについては表 5.1 に示す。

高度約 $793km$ ～ 約 $821km$ で地球の自転に対して直角な極軌道を飛行し、回帰日数は 24 日である。マイクロ波は C バンド (周波数 : $5.3GHz$、波長 : $5.7m$) で HH 偏波を使用している。HH 偏波とは進行方向に対して電場が水平に振動するマイクロ波が照射され対象物から散乱される水平偏波のみを受信するシステムのことである。

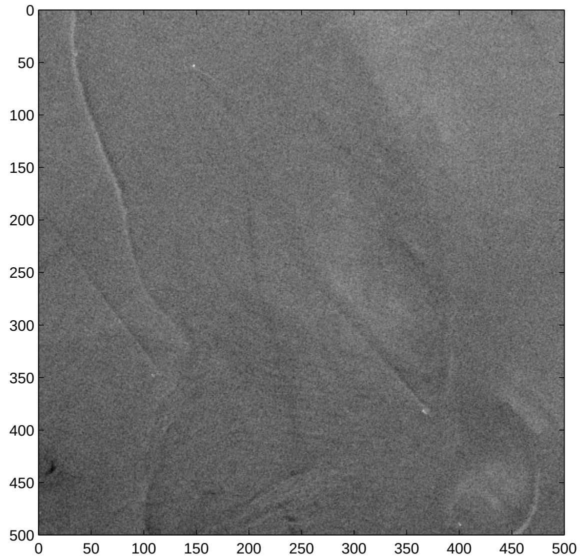
表 5.1: Radarsat の 5 つの観測モード

観測モード	観測幅 (km)	入射角	分解能 (m)	ルック数
ScanSAR(W) Mode	510	$20 \sim 49°$	100×100	$4 \sim 8$ look
ScanSAR(N) Mode	305	$20 \sim 40°$	50×50	$2 \sim 4$ look
Wide Beam (1) Mode	165	$20 \sim 31°$	48×28	4 look
Wide Beam (2) Mode	150	$31 \sim 39°$	32×28	4 look
Standard Mode	100	$20 \sim 49°$	25×28	4 look
Fine Resolution Mode	45	$37 \sim 48°$	11×9	1 look
Extended(H) Mode	75	$50 \sim 60°$	22×28	4 look
Extended(L) Mode	170	$10 \sim 23°$	63×28	4 look

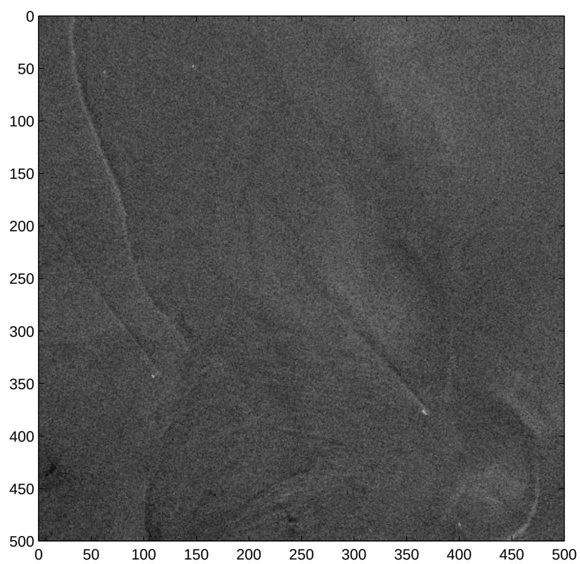
5.2　使用データ

本研究では 1998 年 10 月 29 日に Radarsat によって観測された三重県熊野灘沖の海洋のデータを使用する。Standard Mode で観測されたデータで、2 ルックでスプリットルック処理を行い中心周波数が $-200Hz$ と $200Hz$、バンド幅が $543.705Hz$ で処理されたルック 1 画像とルック 2 画像を生成した。図 5.1 の (a) がルック 1、(b) がルック 2 の画像である。図 5.1 の上から

下の方向がアジマス方向、右から左がレンジ方向で、画像のサイズは約 $25km \times 25km$ である。



(a) Look 1 画像



(b) Look 2 画像

図 5.1: 熊野灘沖の Radarsat 画像

5.2.1 Radarsat 画像への適用

本手法を Radarsat 画像に適用させた。図 5.1 のルック 1、ルック 2 画像にサイズ 10×10 ピクセルの moving window を使って相関画像をつくり、閾値 $n = 4$ で 2 値化した。また、閾値 $n = 4$ ではノイズが多かったため $n = 5$ の場合でも 2 値化を行った。相関画像の平均値は 1.0002、標準偏差 0.0106 で最大値は 1.1977 であった。スレッシュホールドの閾値は $n = 4$ のとき 1.0427、$n = 5$ のときで 1.0533 あった。観測範囲が広いため、相関画像を図 5.2 の様に 4 分割し、それぞれ scene-A、scene-B、scene-C、scene-D とする（図 5.3 から図 5.6）。さらに相関画像を 2 値化した結果を図 5.7 から図 5.10 に示す。なお、4 分割したルック画像は付録 I に記す。

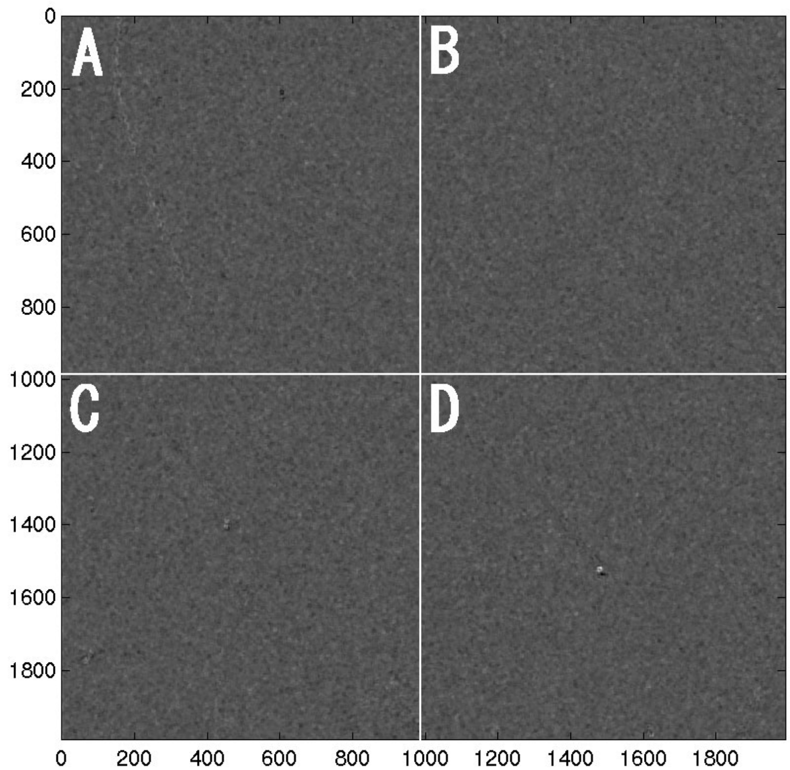


図 5.2: 4 分割した相関画像

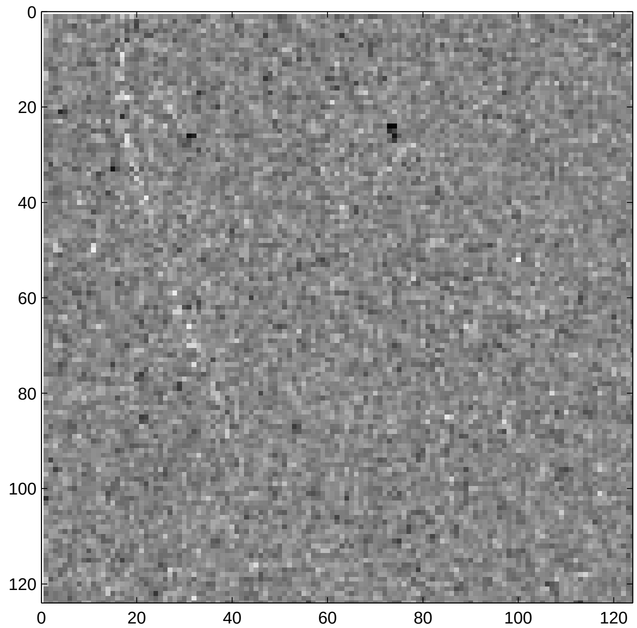


図 5.3: scene-A の相関画像

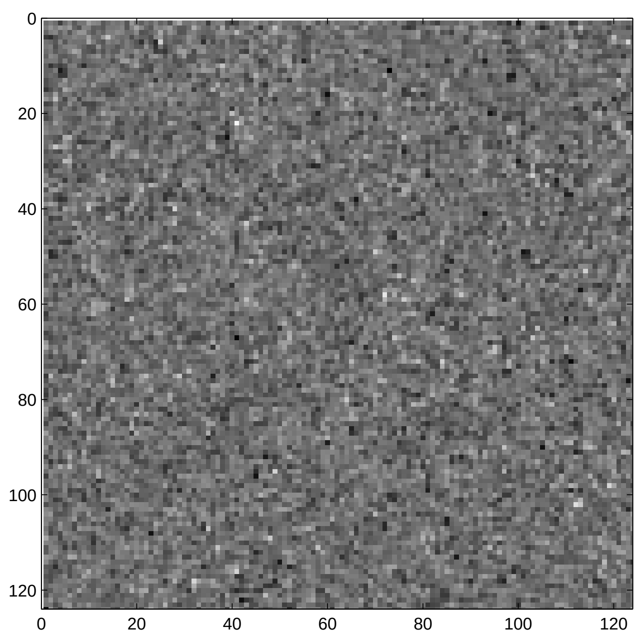


図 5.4: scene-B の相関画像

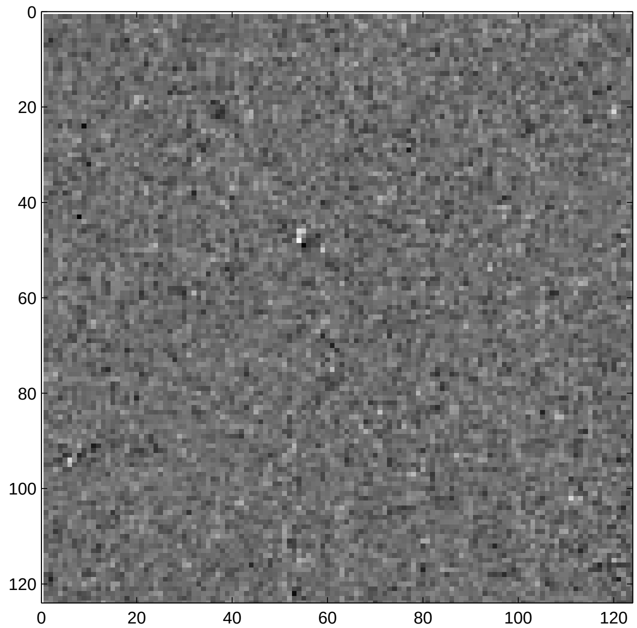


図 5.5: scene-C の相関画像

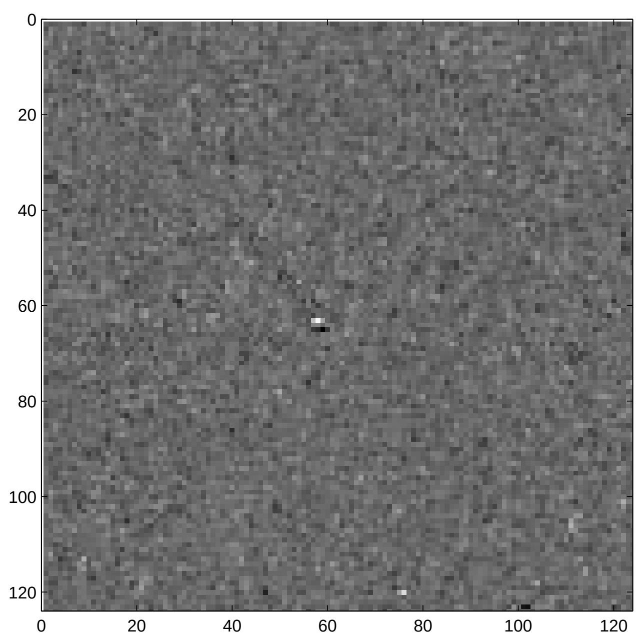
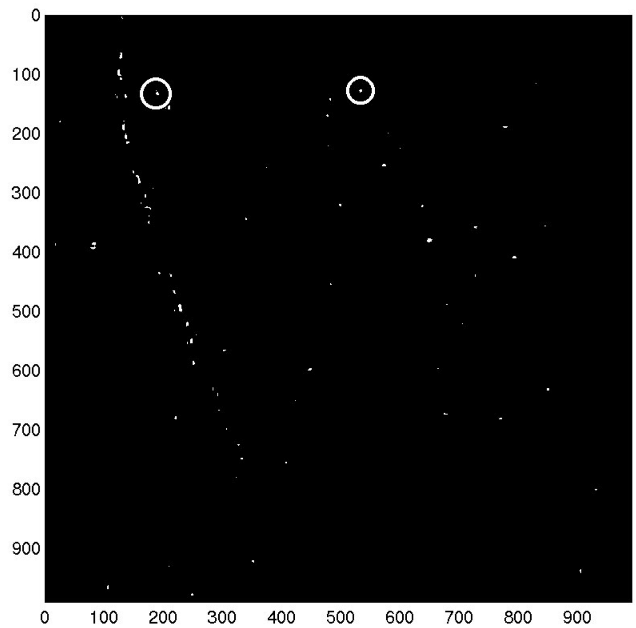
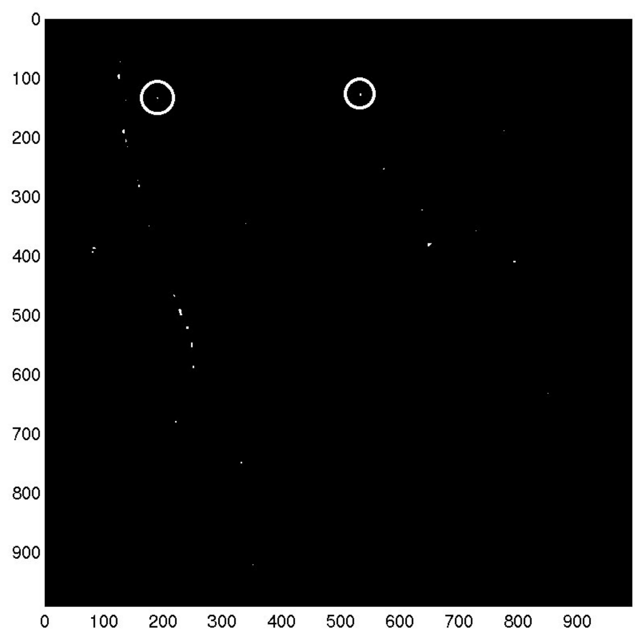


図 5.6: scene-D の相関画像

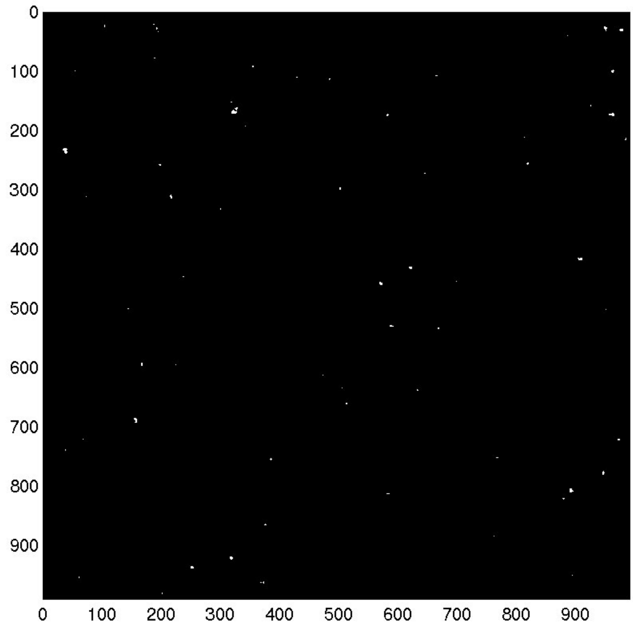


(a) 閾値 $n = 4$ の場合

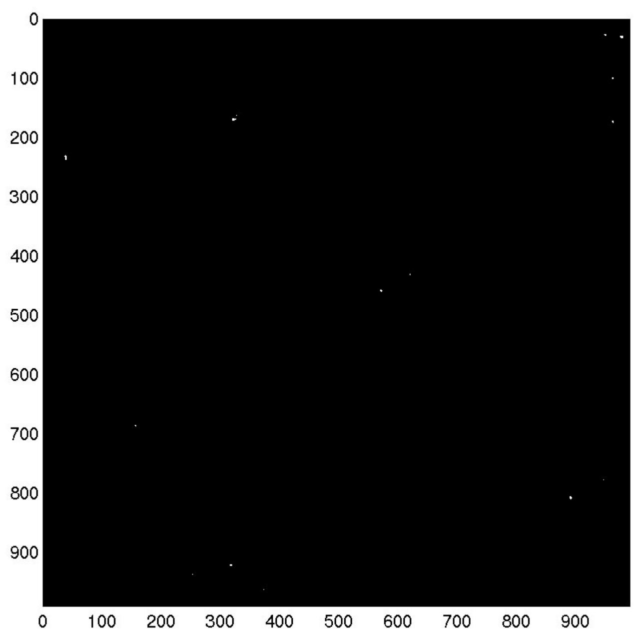


(b) 閾値 $n = 5$ の場合

図 5.7: scene-A の 2 値化画像

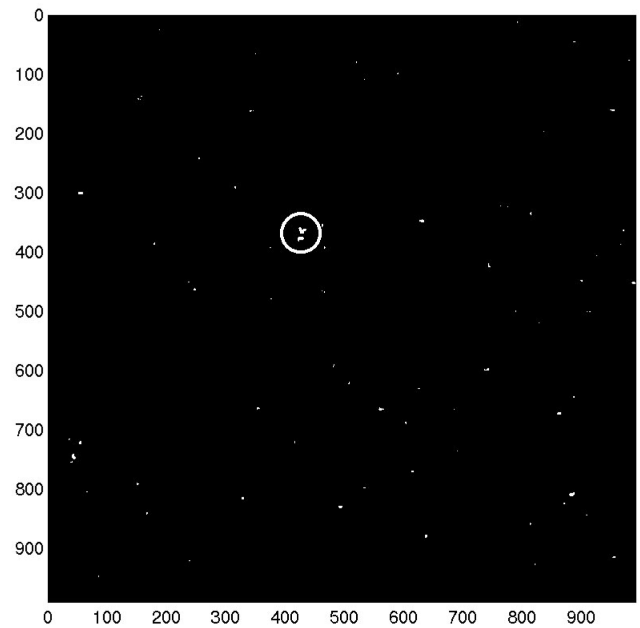


(a) 閾値 $n = 4$ の場合

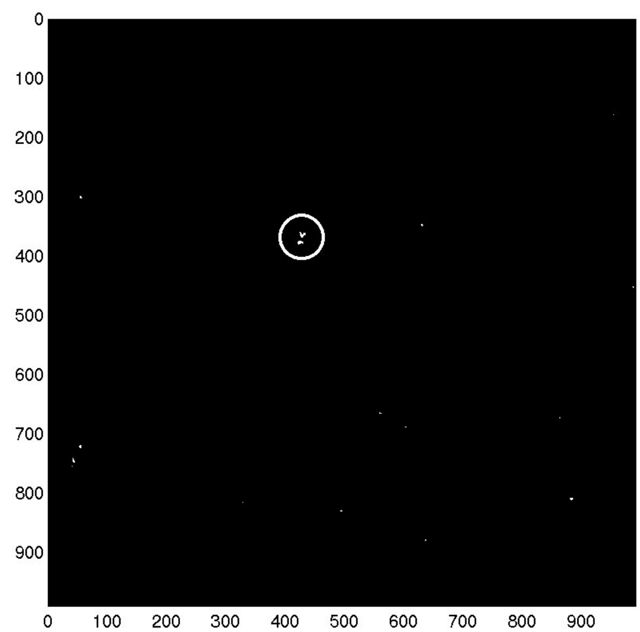


(b) 閾値 $n = 5$ の場合

図 5.8: scene-B の 2 値化画像

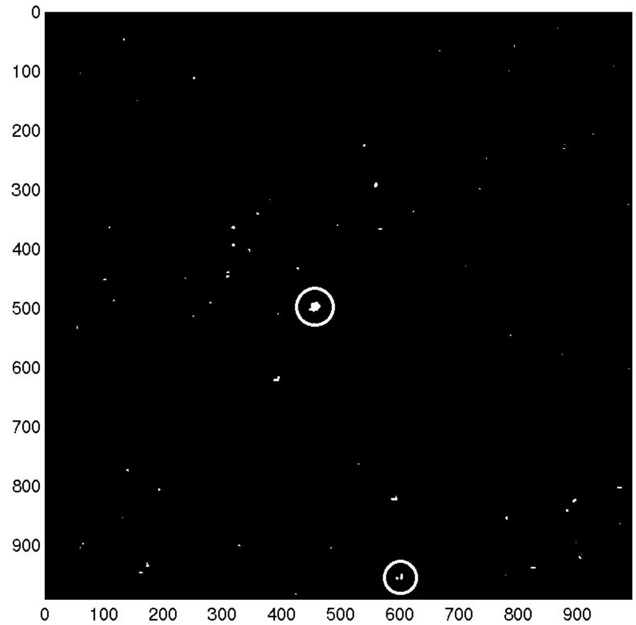


(a) 閾値 $n = 4$ の場合

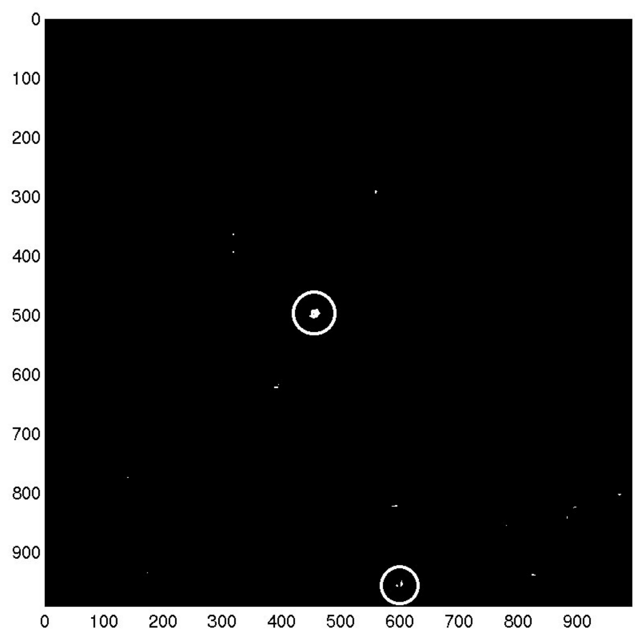


(b) 閾値 $n = 5$ の場合

図 5.9: scene-C の 2 値化画像



(a) 閾値 $n = 4$ の場合



(b) 閾値 $n = 5$ の場合

図 5.10: scene-D の 2 値化画像

図 5.1 のルック画像で強度の高い船舶画像は、図 5.7 から図 5.10 の 2 値化した画像でも検出（○印）することができた。また、潮目や航跡、目視で確認した船舶以外の場所でも高い相関値が得られた。これらの高い相関値を持つ画像から船舶画像を抽出することは今後の研究課題となっている。

5.3 船舶画像の強度を低下させた画像への本手法の適用

Radarsat 画像の船舶画像の強度を低下させ、目視で確認が困難な船舶画像を生成し、本手法を適用した。相関画像を 2 値化し、閾値ごとの検出結果を示す。

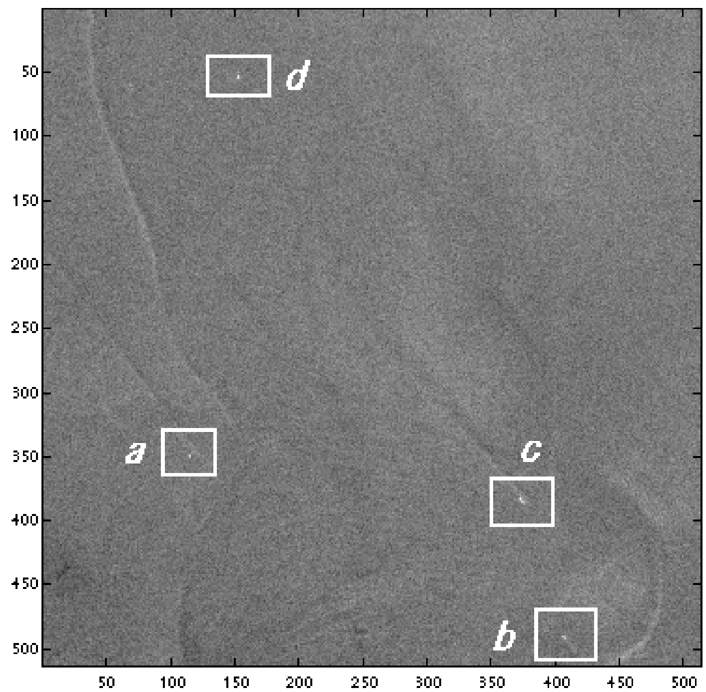


図 5.11: 切り出す船舶画像の位置

a、b、c、d の場所の船舶をそれぞれ ship-a、ship-b、ship-c、ship-d として小サイズの画像として切り出した。小サイズに切り出された船舶画像に以下に述べる減少法を使って船舶画像の強度を低下させた。船舶画像強度の減少法は、

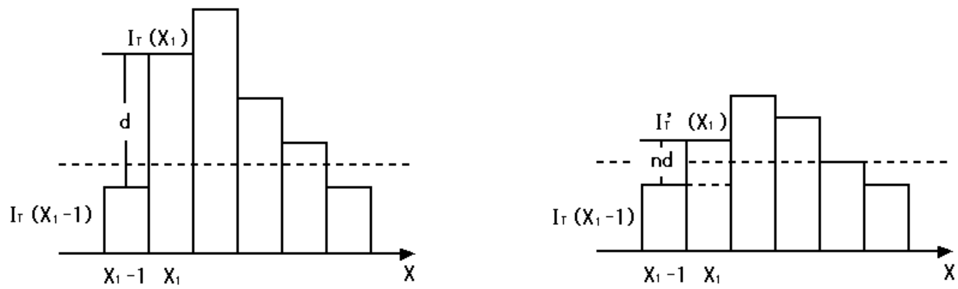
1. 図 5.12 に示すように閾値（画像の平均値に標準偏差を加えた値）以上となった最初の強度値 $I_T(X_1)$ から 1 ピクセル前の強度値 $I_T(X_1-1)$ を引き、その差を d とする。

2. 強度差 d に減少定数 $n:(0<n<1)$ をかける。

3. X_1 における新たな強度値を $I'_T(X_1)=I_T(X_1-1)+nd$ とする。

4. ターゲット全体に同様の手順を行いターゲットの強度を減少させる。

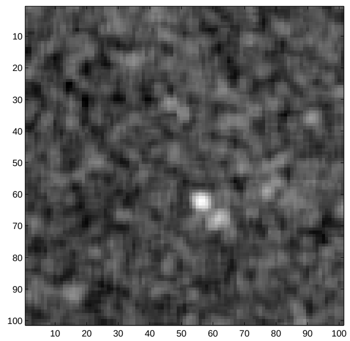
5. n の値をターゲットが目視で確認が困難となるまで変化させる。



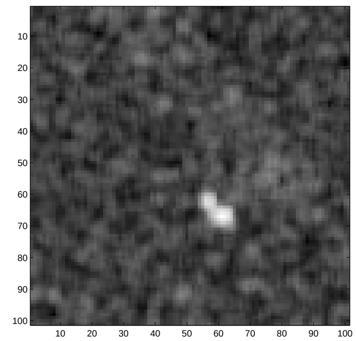
(a) ターゲット減少前　　(b) ターゲット減少後

図 5.12: ターゲット強度の減少法

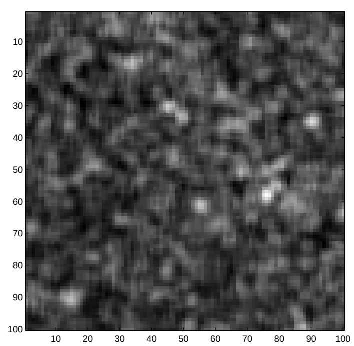
次に示す図 5.13 から図 5.16 までの (a)、(b) が強度を低下させる前の船舶画像で、(c)、(d) がノイズと同レベルまで船舶の画像強度を低下させた画像である。(c) と (d) の画像から目視で船舶を確認することは困難であることがわかるであろう。



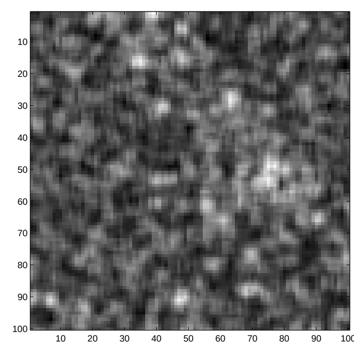
(a)



(b)

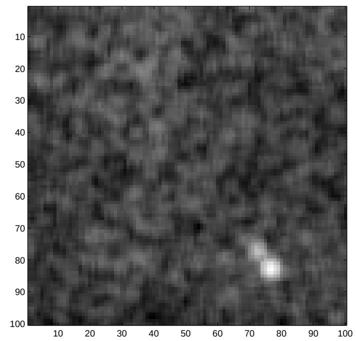


(c)

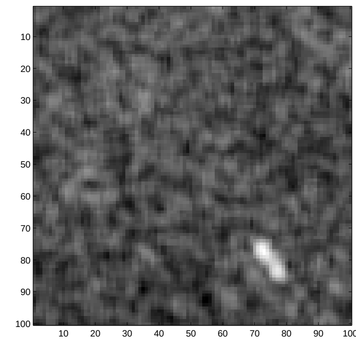


(d)

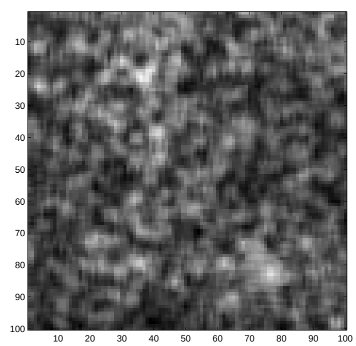
図 5.13: ship-a のスプリットルック画像 (a、b) と船舶画像の強度をノイズレベルまで低下させた画像 (c、d)



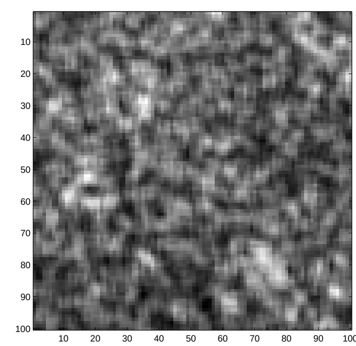
(a)



(b)

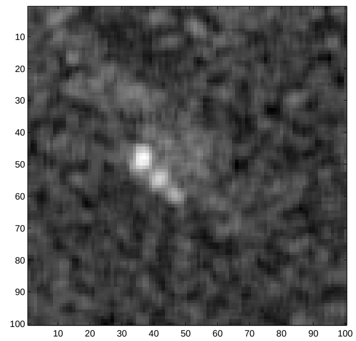


(c)

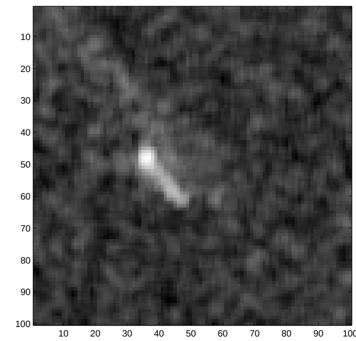


(d)

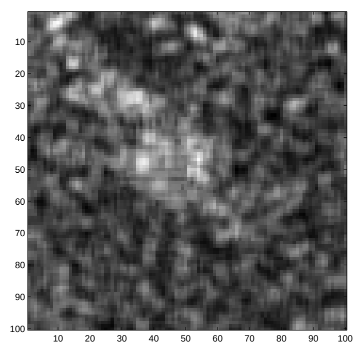
図 5.14: ship-b のスプリットルック画像 (a、b) と船舶画像の強度をノイズレベルまで低下させた画像 (c、d)



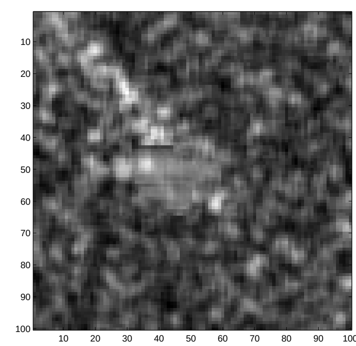
(a)



(b)

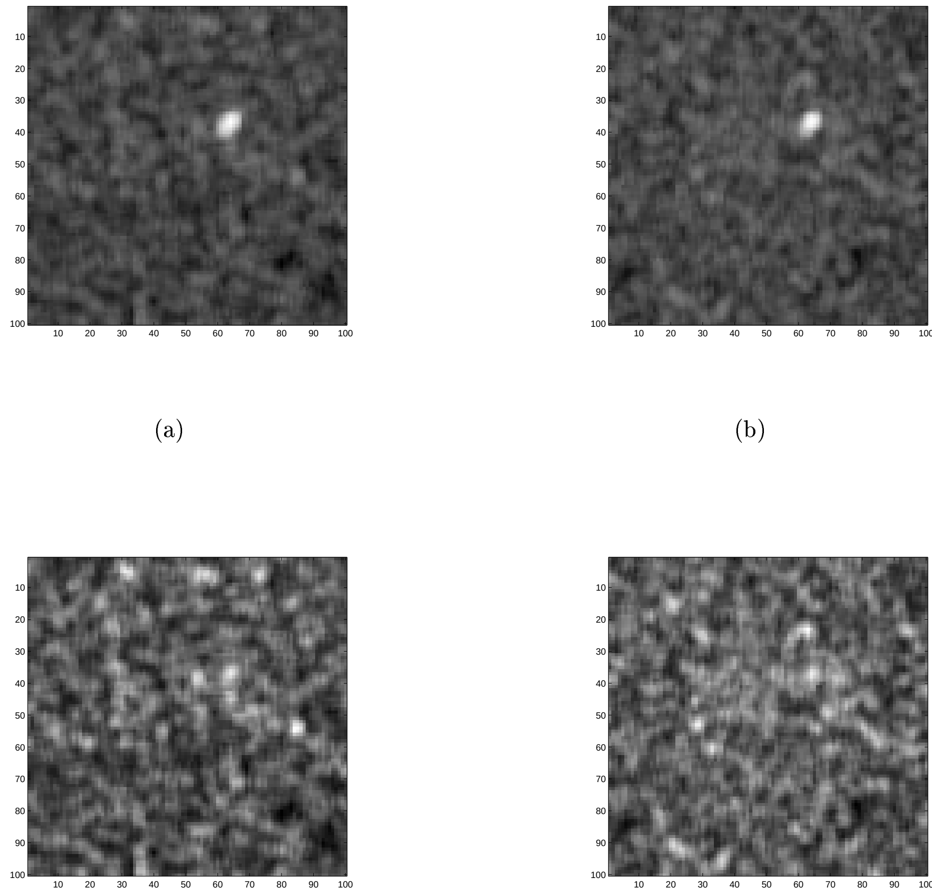


(c)



(d)

図 5.15: ship-c のスプリットルック画像 (a、b) と船舶画像の強度をノイズレベルまで低下させた画像 (c、d)

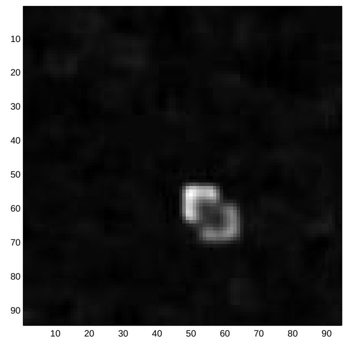


(a) (b)

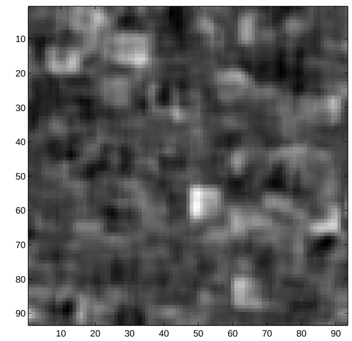
(c) (d)

図 5.16: ship-d のスプリットルック画像 (a、b) と船舶画像の強度をノイズレベルまで低下させた画像 (c、d)

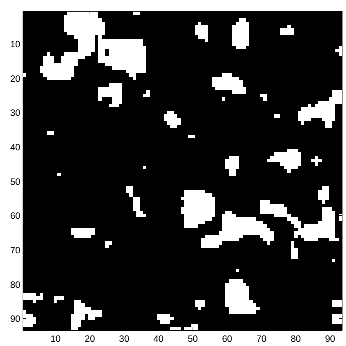
強度を低下させた各画像に 8×8 ピクセルの moving window で相互相関をとり相関画像を生成し、$n = 1$ から $n = 4$ までの閾値で相関画像を 2 値化した。閾値の詳細は表 5.2 に示してある。本手法適用の結果を図 5.17 から図 5.20 に示す。(a) は船舶強度の低下前の相関画像、(b) は強度の低下後の相関画像となっている。また、(c) から (f) には閾値 $n = 1$、$n = 2$、$n = 3$、$n = 4$ のときの相関画像 2 値化の結果を示す。



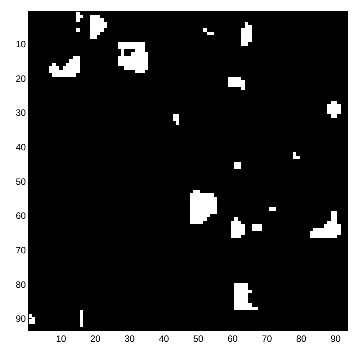
(a) 船舶強度の低下前の相関画像



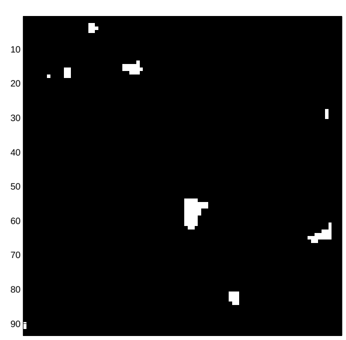
(b) 船舶強度の低下後の相関画像



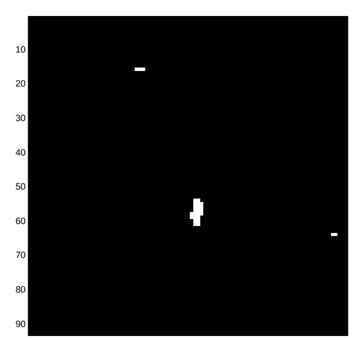
(c) n=1



(d) n=2

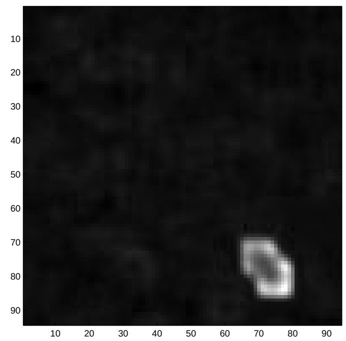


(e) n=3

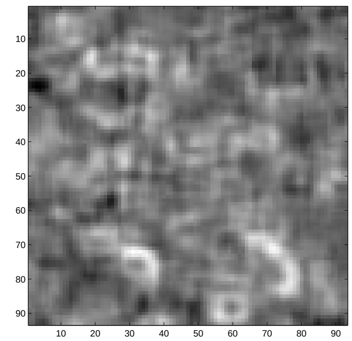


(f) n=4

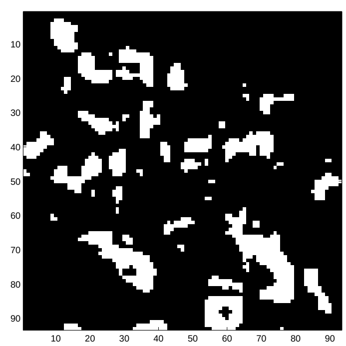
図 5.17: 強度を低下させた ship-a の相関画像 2 値化の結果



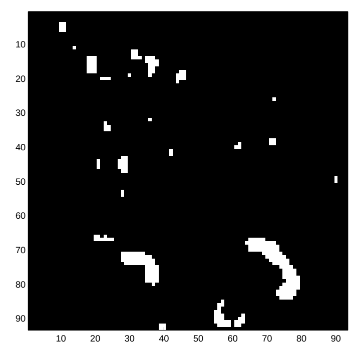
(a) 船舶強度の低下前の相関画像



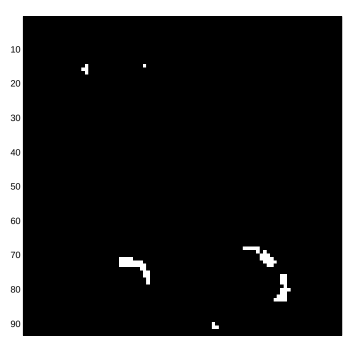
(b) 船舶強度の低下後の相関画像



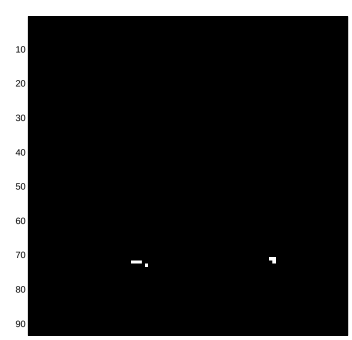
(c) n=1



(d) n=2

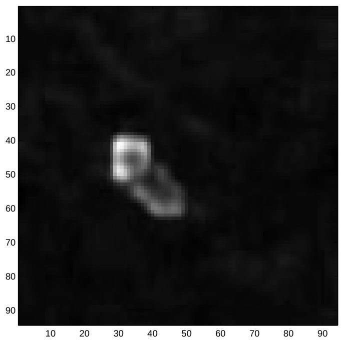


(e) n=3

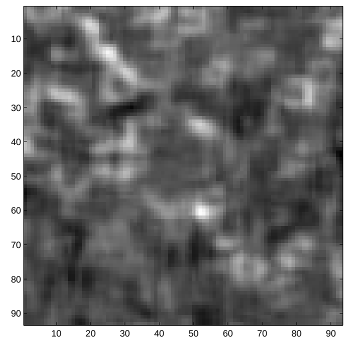


(f) n=4

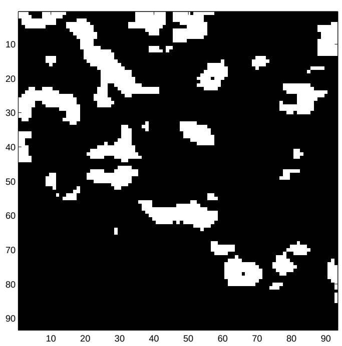
図 5.18: 強度を低下させた ship-b の相関画像 2 値化の結果



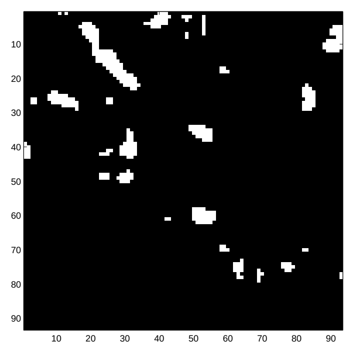
(a) 船舶強度の低下前の相関画像



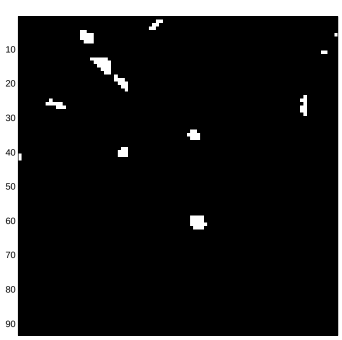
(b) 船舶強度の低下後の相関画像



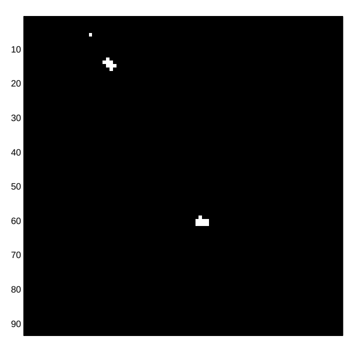
(c) n=1



(d) n=2

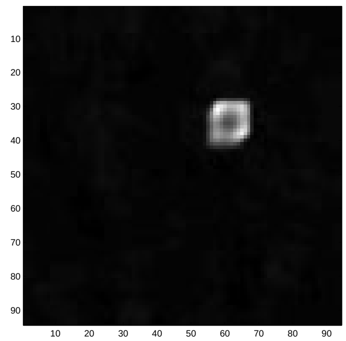


(e) n=3

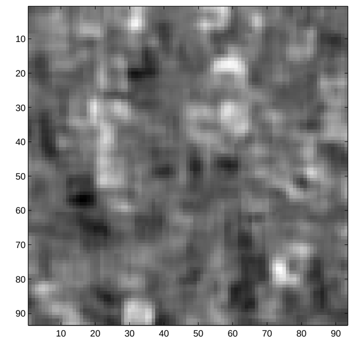


(f) n=4

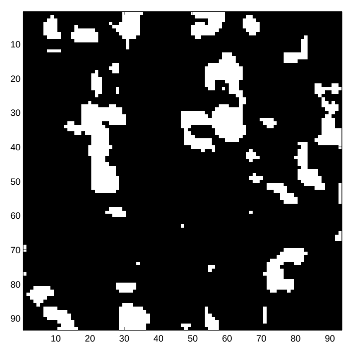
図 5.19: 強度を低下させた ship-c の相関画像 2 値化の結果



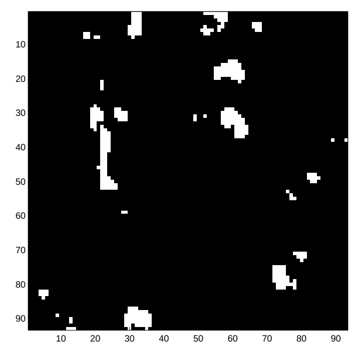
(a) 船舶強度の低下前の相関画像



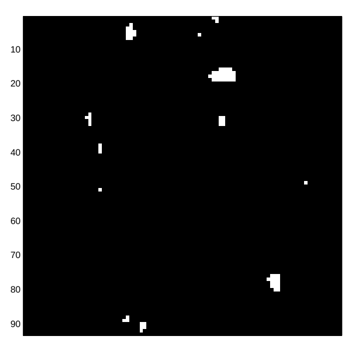
(b) 船舶強度の低下後の相関画像



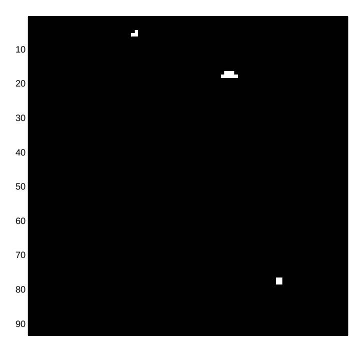
(c) n=1



(d) n=2



(e) n=3



(f) n=4

図 5.20: 強度を低下させた ship-d の相関画像 2 値化の結果

図 5.17 の ship-a の場合、閾値を上げるにつれてノイズは減少し、$n = 4$ のとき画像の中心あたりで他のノイズに比べて大きなサイズの船舶が抽出された。図 5.18 の ship-b は $n = 3$ の時点で大きなサイズの高い相関値をもつ区域が 2 つ残っている。右側は船舶だがもう一方は高い相関値ではあるがノイズなのか船舶なのかは確認できていない。図 5.19 の ship-c では、$n = 3$ で船舶があった位置には小さな高相関区域が確認できるが、ノイズも多く含まれている。$n = 4$ になるとターゲットは失われ船舶を抽出することはできなかった。図 5.20 の ship-d も同様に $n = 4$ のときに船舶は失われてしまった。

表 5.2: 強度を減少させた船舶画像の相関画像に用いた閾値の結果

	mean	std	最大値	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$
ship-a	1.0062	0.0123	1.0750	1.0185	1.0307	1.0430	1.0533
ship-b	1.0046	0.0120	1.0488	1.0148	1.0250	1.0352	1.0454
ship-d	1.0070	0.0133	1.0764	1.0023	1.0335	1.0468	1.0601
ship-c	1.0054	0.0121	1.0596	1.0175	1.0296	1.0417	1.0538

第6章　結論

本研究ではスプリットルック画像の相関特性を利用し、それらの相互相関から船舶画像を検出する手法のシミュレーションを行い、検出可能なターゲットサイズと最適な moving window のサイズを求めた。さらに、実際の Radarsat 画像を使い船舶の検出を試みた。得られた結果を以下に示す。

1. シミュレーションではノイズと同レベルの強度を持つターゲットを含むスプリットルック画像からターゲットを検出することができた。

2. 2×2 から 20×20 ピクセルの各ターゲットサイズについて moving window サイズを変化させ相関値を求めたところ、両者のサイズが等しくなったとき最も高い相関値が得られた。

3. ノイズ部分の相関値は moving window サイズが小さくなるほどばらつきが大きくなりターゲットの検出精度を低下させる。

4. 相関画像の 2 値化のための最適な閾値はノイズが無くなりターゲットのみが残る値である。ターゲットの相関値よりノイズの相関値が大きい場合は検出はできない。

5. Radarsat の船舶画像に本手法を適用したところ船舶画像強度が高い場合、潮目なども含まれていたが船舶を抽出することができた。

6. 船舶画像の強度をノイズと同レベルまで減少させた画像に本手法を適用したところ、相関値が低くノイズも含んでいたが船舶を抽出することができた。

シミュレーションの結果より、本検出法でノイズと同レベルの画像強度を持つターゲットの検出が実践的に可能であることがわかった。相関画像のノイズを抑えるには約 10×10 ピクセル以上の moving window サイズが必要で、moving window サイズがターゲットと同サイズの場合、相関値が最も高くなる。よって、約 10×10 ピクセル以上のターゲットであれば検出可能であるという結果が得られた。

実際の Radarsat 画像に本手法を適用させた場合、ルック画像で強度の高い船舶や潮目などは確認することができたが、それ以外に検出された高い相関値は船舶なのかノイズなのか確認はできていない。しかし、船舶画像の強度を低下させた場合の検出では少量のノイズを含む場合もあるが検出することができた。

今後の展開として、目視で検出困難な実際の画像への本手法の適用と実測海上データ (Sea-truth) との比較、強度値の大きい砕波や波浪、潮目などの画像がある場合での、船舶画像の抽出があげられる。

付 録A　レンジ圧縮

ここでは式（2.6）の点拡張関数（レンジ方向）導出法の詳細を示す。

$$
\begin{aligned}
E_R(\tau') &= \int_{-\infty}^{\infty} E_s(\tau+\tau')E_r(\tau)d\tau \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} E_0 \exp\left(i\alpha\left(\tau+\tau'-2R_0/c\right)^2\right) rect(\tau/\tau_0)\exp(-i\alpha\tau^2)d\tau \\
&= E_0\exp\left(i\alpha\left(\tau'-2R_0/c\right)^2\right)\int_{-\infty}^{\infty} rect(\tau/\tau_0)\exp\left(i2\alpha\left(\tau'-2R_0/c\right)\tau\right)d\tau \\
&= E_0\exp\left(i\alpha\left(\tau'-2R_0/c\right)^2\right)\int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} \exp\left(i2\alpha\left(\tau'-2R_0/c\right)\tau\right)d\tau \\
&= E_0\exp\left(i\alpha\left(\tau'-2R_0/c\right)^2\right)\left[\frac{1}{i2\alpha(\tau'-2R_0/c)}\exp\left(i2\alpha\left(\tau'-2R_0/c\right)\tau\right)\right]_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} \\
&= \frac{E_0\exp\left(i\alpha\left(\tau'-2R_0/c\right)^2\right)}{\alpha(\tau'-2R_0/c)}\left(\frac{\exp\left(i\alpha\left(\tau'-2R_0/c\right)\tau_0\right)-\exp\left(-i\alpha\left(\tau'-2R_0/c\right)\tau_0\right)}{2i}\right) \\
&= E_0\tau_0\exp\left(i\alpha\left(\tau'-2R_0/c\right)^2\right)\frac{\sin\left(\alpha\tau_0\left(\tau'-2R_0/c\right)\right)}{\alpha\tau_0(\tau'-2R_0/c)} \\
&= E_0\tau_0\exp\left(i\alpha\left(\tau'-2R_0/c\right)^2\right) sinc\left(\alpha\tau_0\left(\tau'-2R_0/c\right)\right) \qquad \text{(A.1)}
\end{aligned}
$$

付 録B　アジマス圧縮

ここでは式（2.17）に表したアジマス方向の点拡張関数導出法の詳細を示す。

$$
\begin{aligned}
E_A(t') &= \int_{-\infty}^{\infty} E_s(t+t')E_r(t)dt \\
&= E_0 \exp(-i2kR_0) \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-i\beta\left(t+t'\right)^2\right) rect(t/T_A)\exp(i\beta t^2)dt \\
&= E_0 \exp(-i2kR_0)\exp(-i\beta t'^2)\int_{-\infty}^{\infty} rect(t/T_A)\exp(-i2\beta t' t)dt \\
&= E_0 \exp(-i2kR_0)\exp(-i\beta t'^2)\int_{-T_A/2}^{T_A/2} \exp(-i2\beta t' t)dt \\
&= E_0 \exp(-i2kR_0)\exp(-i\beta t'^2)\left[-\frac{1}{i2\beta t'}\exp(-i2\beta t' t)\right]_{-T_A/2}^{T_A/2} \\
&= \frac{E_0 \exp(-i2kR_0)\exp(-i\beta t'^2)}{\beta t'}\left(\frac{-\exp(-i\beta t' T_A)+\exp(i\beta t' T_A)}{2i}\right) \\
&= E_0 T_A \exp(-i2kR_0)\exp(-i\beta t'^2)\frac{\sin(\beta T_A t')}{\beta T_A t'} \\
&= E_0 T_A \exp(-i2kR_0)\exp(-i\beta t'^2) sinc(\beta T_A t') \\
&= E_0' \exp(-i2kR_0)\exp(-i\beta t'^2) sinc(\beta T_A t')
\end{aligned}
\tag{B.1}
$$

付 録C　スプリットルック処理

ここでは式（2.26）のスプリットルック処理での点拡張関数の導出法を示す。

$$
\begin{aligned}
E_R^{(n)}(t') &= \int_{-\infty}^{\infty} E_s(t+t') E_r^{(n)}(t) dt \\
&= E_0' \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-i\beta \left(t+t'\right)^2\right) rect\left((t-T_A) / (T_A/N)\right) \exp(i\beta t^2) dt \\
&= E_0' \exp(-i\beta t'^2) \int_{-\infty}^{\infty} rect\left((t-T_A) / (T_A/N)\right) \exp(-i2\beta t' t) dt \\
&= E_0' \exp(-i\beta t'^2) \int_{-T_A/(2N)+T_n}^{T_A/(2N)+T_n} \exp(-i2\beta t' t) dt \\
&= E_0' \exp(-i\beta t'^2) \left[-\frac{1}{i2\beta t'} \exp(-i2\beta t' t)\right]_{-T_A/(2N)+T_n}^{T_A/(2N)+T_n} \\
&= \frac{E_0' \exp(-i\beta t'^2)}{i2\beta t'} \Big(-\exp\left(-i2\beta t' \left(\frac{T_A}{2N} + T_n\right)\right) + \exp\left(-i2\beta t' \left(-\frac{T_A}{2N} + T_n\right)\right) \Big) \\
&= \frac{E_0' \exp(-i\beta t'^2) \exp(-i2\beta T_n t')}{\beta t'} \left(\frac{-\exp\left(-i\beta t' T_A/N\right) + \exp\left(i\beta t' T_A/N\right)}{2i} \right) \\
&= E_0' (T_A/N) \exp(-i\beta t'^2) \exp(-i2\beta T_n t') \frac{\sin\left(\beta T_A t'/N\right)}{\beta T_A t'/N} \\
&= E_0' (T_A/N) \exp(-i\beta t'^2) \exp(-i2\beta T_n t') sinc\left(\frac{\beta T_A}{N} t'\right) \\
&= E_0'' \exp(-i\beta t'^2) \exp(-i2\beta T_n t') sinc\left(\frac{\beta T_A}{N} t'\right) \qquad \text{(C.1)}
\end{aligned}
$$

付 録D　自己相関関数

相関とは複数の関数がどのくらい似ているかを計る尺度である。自己相関関数（Auto-Correlation Function: ACF）は同一の関数の相関を示し、ランダムな関数の場合、空間的 (又は時間的) な平均形状や相関距離を求めるときに使われる。関数 $g(x)$ の ACF は

$$C_{gg}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)\, g^*(x+x')dx \tag{D.1}$$

と定義する。ここで $*$ は関数 $g(x)$ の複素共役を示す。ランダムな関数の自己相関のモデルを図 D.1 に示す。$x'=0$ のとき最も相関値が高く移動量が多くなるにつれて相関値が低くなっていく。自己相関関数の幅は「相関距離（又は時間)」と呼ばれ、ランダムな変化の平均幅 (又は時間) の指標となる。

実際に自己相関を計算するときには式（D.1）の積分を行うには演算時間がかかるので、空間（又は時間）領域でフーリエ変換を使い周波数領域で計算される。

$$\begin{aligned} C_{gg} &= FT^{-}\{FT\{g\}\cdot FT\{g\}^*\} \\ &= g \oplus g^* \end{aligned} \tag{D.2}$$

関数 g のフーリエ変換 G を算出し、G の複素共役 G^* ををかけた関数 GG^* を逆フーリエ変換すれば g の自己相関関数を求めることができる。相互相関関数（Cross-Correlation Function: CCF）は異なる二つの関数で行い、相関度は 2 関数の相似性を表す指標となる。

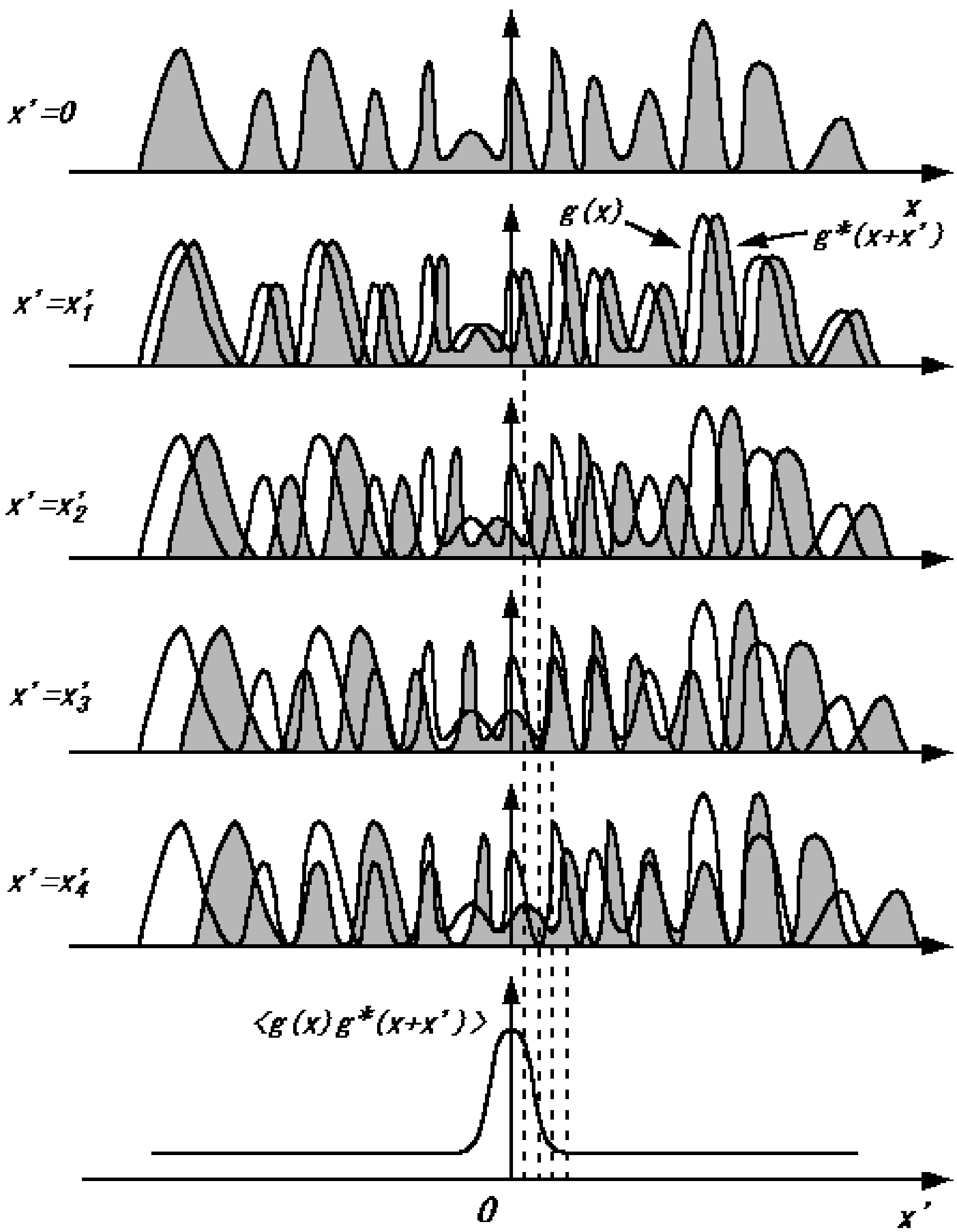


図 D.1: ランダムな関数の自己相関関数

付 録E　アンサンブル平均

アンサンブル平均（ensemble mean）は自己相関関数と同様にノイズを含む画像の解析に使われる。アンサンブル平均はサンプル平均のサンプル数を無限大にしたもので、不確かさの無い理想的な平均値と言える。

ランダムに変化する信号 $g(x)$ について考える。限られた区間 $[-x_0/2, x_0/2]$ の平均は

$$\langle g \rangle_S = \frac{1}{x_0}\int_{-x_0/2}^{x_0/2} g(x)dx \tag{E.1}$$

である。また離散的な信号の場合、サンプル数 M の平均は

$$\langle g \rangle_S = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} g(x_j) \tag{E.2}$$

となる。このような有限のサンプル数で行う平均をサンプル平均（sample mean）と言う。サンプル平均のサンプル数またはサンプル区間を無限大に大きくするとアンサンブル平均となる。

$$\langle g \rangle = \lim_{x_0\to\infty}\frac{1}{x_0}\int_{-x_0/2}^{x_0/2} g(x)dx \tag{E.3}$$

$$\langle g \rangle = \lim_{M\to\infty}\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} g(x_j) \tag{E.4}$$

また、信号 $g(x)$ の自己相関関数（式 D.1）は次式のアンサンブル平均で定義される。

$$\begin{aligned} C_{gg}(x') &= \langle g(x)g^*(x+x')\rangle \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} g(x)g^*(x+x')dx \end{aligned} \tag{E.5}$$

付 録F　シミュレーション用ルック画像の生成プログラム

```
%following have to be an even number!
n=128; %size of scene
m=20; %number of scatterers
l=2; %size of target
tmag=1; %magnitude of target

%make random phases
ran1=rand(n,n,m)*2*pi;
ran2=rand(n,n,m)*2*pi;
ran3=rand(l,l,m)*2*pi;

%make random complex value
complexran1=exp(i*ran1);
complexran2=exp(i*ran2);
complexran3=exp(i*ran3);

%clear unused variables
clear ran1 ran2 ran3

%sum scatterers
sumcomplex1=sum(complexran1,3);
sumcomplex2=sum(complexran2,3);
sumcomplex3=sum(complexran3,3)*tmag;

%clear unused variables
clear complexran1 complexran2 complexran3

%add target
targ_begin=(n/2)-(l/2)+1;
targ_end=targ_begin+l-1;

targ_sum_complex1=sumcomplex1; %temporary
targ_sum_complex1(targ_begin:targ_end, targ_begin:targ_end) = sumcomplex3;
```

```
targ_sum_complex2=sumcomplex2; %temporary
targ_sum_complex2(targ_begin:targ_end, targ_begin:targ_end) = sumcomplex3;


%clear unused variables
clear sumcomplex1 sumcomplex2 sumcomplex3

%get intensity
targ_intensity1 = abs(targ_sum_complex1).^2;
targ_intensity2 = abs(targ_sum_complex2).^2;
```

付 録G　moving windowで相関画像を生成するプログラム

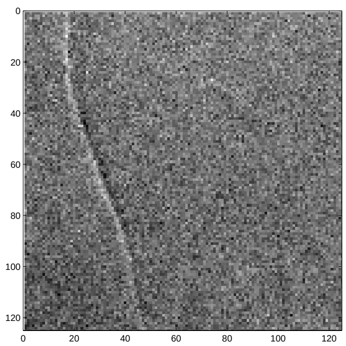
```
%following have to be an even number!
n=128; %size of scene
ws=10; %moving window size

win1=zeros(ws,ws);
win2=zeros(ws,ws);

output=zeros((n-ws+1),(n-ws+1));


for mwy=1:(n-ws+1)

 for mwx=1:(n-ws+1)

  %moving window position
  xstart=mwx;
  xend=mwx+ws-1;
  ystart=mwy;
  yend=mwy+ws-1;


  win1=targ_intensity1(ystart:yend,xstart:xend); %I1
  win2=targ_intensity2(ystart:yend,xstart:xend); %I2

  % cross correlation
  f1=fft2(win1);
  f2=fft2(win2);
  xc=(1/ws)^2*ifft2(f1.*conj(f2));
  xc=abs(xc);

  % mean
  i1=mean2(win1);
```

```
  i2=mean2(win2);

  ccf=xc/(i1*i2); %Cross-Correlation Function

  output(mwy,mwx)=ccf(1,1); %Cross-Correlation value

 end
end

% make image
figure
clf
imagesc(output)
axis square
title(['cross-correlation image',' W-size ',num2str(ws)])
colormap(gray)
```

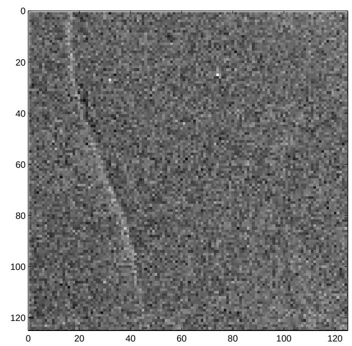
付 録H　相関画像を2値化するプログラム

```
% do thresh hold

thresh_number=2; %value of n

ccimean=mean2(output); %mean of Cross-Correlation image
ccistd=std2(output);   %std of Cross-Correlation image
th_hold=ccimean+(ccistd*thresh_number); %thresh hold value

threshout=output>th_hold; %do thresh hold

% make image
figure
clf
imagesc(shout)
axis square
title([' Thresh-hold X',num2str(thresh_val)])
colormap(gray)
```

付 録I　4分割したルック画像

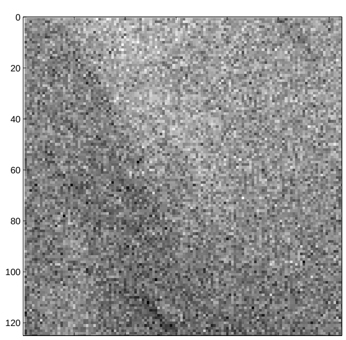


(a) Look 1 画像

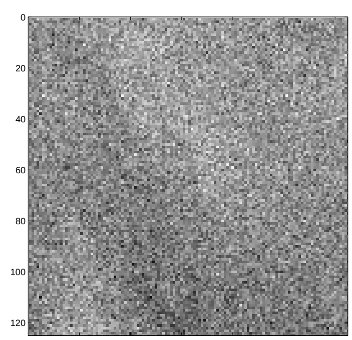


(b) Look 2 画像

図 I.1: ルック画像を分割した scene-A

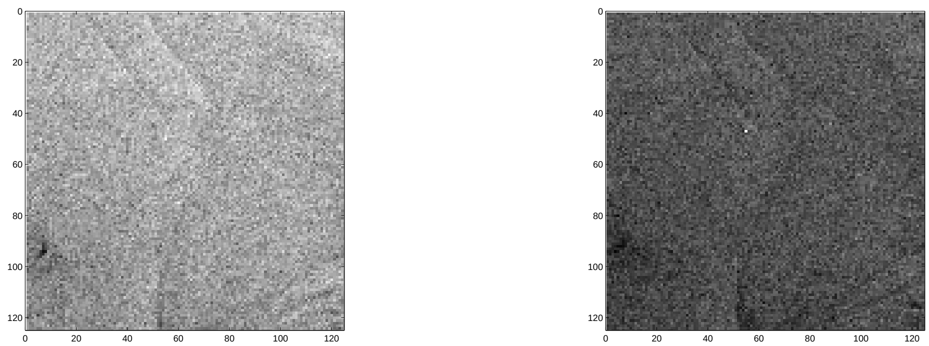


(a) Look 1 画像



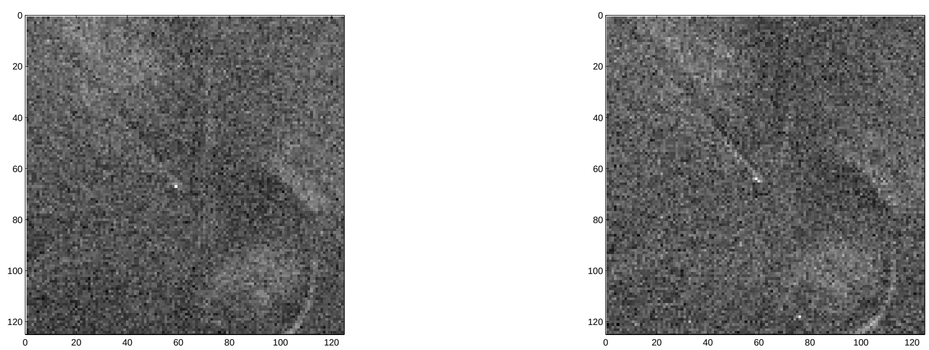
(b) Look 2 画像

図 I.2: ルック画像を分割した scene-B



(a) Look 1 画像　　(b) Look 2 画像

図 I.3: ルック画像を分割した scene-C



(a) Look 1 画像　　(b) Look 2 画像

図 I.4: ルック画像を分割した scene-D

謝辞

本研究は高知工科大学物質・環境システム工学科の大内和夫教授のご指導のもとで行いました。本研究を進めるにあたり、実験、データの解析及びこの論文作成に際し、ご指導ならびにご助言をいただいた大内和夫教授に厚くお礼を申し上げ、ここに謝意を表します。

本研究における実験やプログラミング、論文作成に際して高知工科大学物質・環境システム工学科の特別研究員 Glen Davidson 博士にはさまざまなご助言をいただき、深く感謝します。

また、高知工科大学大学院工学研究科 玉木慎祐氏、高知工科大学物質・環境システム工学大内研究室の 4 年生の諸氏に多大なご協力を賜り、厚くお礼申し上げます。

本研究で使用した Radarsat データは、カナダ宇宙局（Canadian Space Agency: CSA）の所有であり、Radarsat International 社の許可を得て、リモートセンシング技術センターを通じて三菱重工業株式会社システム技術開発センターとの共同研究で購入しました。信号（生）データの知的所有権はすべて CSA にあります。

本論文の Radarsat 画像データは上記の生データから高知工科大学で映像化しました。

参考文献

[1] J.C.Dainty (ed), *Laser Speckle and Related Phenomena*, (New York : Springer), 1975.

[2] K.Ouchi and R.E.Burge, “Speckle cross-correlation function in multilook SAR images of moving discrete scatteres,” *Int.J.Remote Sens.*, vol.12, pp.1933-1946, 1991.

[3] 宅原雅人、大内和夫、高見勲、森村弘一、熊野信太郎, “SAR スプリットルック画像を利用したシークラッタ中の船舶検出方,” *Proc. SAR Workshop 2001*, (社) 資源協会地球科学技術推進機構, 東京, pp.83-86,2001.

[4] (財) 資源観測解析センター, 合成開口レーダ (SAR), (財) 資源観測解析センター,1992.

[5] 土屋清, リモートセンシング概論, 朝倉書店, 1990.

[6] 日本リモートセンシング研究会, 図解リモートセンシング, (社) 日本測量協会, 1992.

[7] (財) 資源観測解析センター, リモートセンシング用語辞典, (財) 資源観測解析センター, 1996.

[8] 矢口英暢、大内和夫, “スプリットルック SAR 画像の相互相関を用いた船舶検出のシミュレーション,” (社) 日本リモートセンシン学会第 31 回学術講演会論文集, pp.113-116, 2001.

[9] 大内和夫, 合成開口レーダの基礎, （出版予定）, 2002.