

等高線情報を用いたエコーイメージの生成†

柳原 圭雄†† 田中 稔††
田村 進一†† 田中 幸吉††

筆者らは、デジタル・コンピュータによるレーダ・シミュレータの開発を行った。本システムの入力データは、地形図より抽出された等高線を xyz 座標の点列で表現した等高線情報である。システムは、オペレータが指示したレーダ位置で得られるレーダ像を等高線情報より求め、それを表示する。本方法の概略は、ある方位に存在する等高線よりエコーの有無を調べてその方位におけるエコー像を求めることを全方位に対して行うものである。この結果、本システムでは、従来のレーダ・シミュレータでは明確には得られなかったレーダの位置移動に伴った像の変化を表示することができる。

1. まえがき

レーダ (radio detection and ranging)¹⁾ は電波を用いて物標 (対象物) の方位と距離を測定する装置である。本論文では船舶用レーダについて考える。このレーダでの方位の基準の取り方には、船首方向に定める相対方位指示方式と真北を基準とする真方位指示方式がある。いずれの場合にも自船を中心とした周囲のエコーイメージが得られる。

レーダで用いる電波はきわめて短い時間だけ輻射されるパルス波であり、このパルス波が繰り返し放射される。CRT では、パルス波の放射ごとにその輝点为中心から外縁まで移動する。これを掃引と呼ぶ。レーダの表示の方法をある方位について以下に説明する。パルス波を放射すると同時に掃引を行い、掃引の間に物標よりの反射波があればその反射波の強度に応じた輝度変調を行うことによりその物標の位置が CRT 面上に表示される。この操作を、パルス波を放射するアンテナの方向と掃引の方向を同期して回転させながら行えば、全方位に対するエコーイメージが得られる。

レーダの性能を表す言葉に、方位分解能と距離分解能がある。方位分解能は角度で表し、レーダ位置から等距離にある 2 個の物標でおのおのの方位の差がその角度以下である場合、これらの物標は個々別々にではなくつながった像として表示される。これはアンテナのもつ指向特性により定まる。距離分解能は距離で表し、同一方向にある 2 個の物標がその距離以下に接近

している場合、これらの物標は個々別々にではなくつながった像として表示される。これはパルス波の幅により定まる。

現在ある模擬エコーイメージを表示する船舶用レーダ・シミュレータは、フィルム面上に記録された模擬像を FSS (Flying Spot Scanner) で読み取り、その電気信号を CRT 面上に表示するものである。そのためレーダの位置を変えても同じ像を平行移動させた像しか得られない。

本論文で提案する船舶用レーダ・シミュレータは、等高線の点列をもとにレーダ位置ごとにエコーイメージに対応するエコーテーブルを作成してその内容を表示する方式を用いて、レーダ位置の移動によるエコーイメージの変化を表示できる。

2. ハードウェアおよびソフトウェア構成

図 1 にハードウェア構成を示す。ミニコンピュータ CEC 555 H は FSS とリンクされており、ここで地形図より等高線情報が入力される。CEC 555 H からミニコンピュータ PANAFACOMU-300 を介して中型計算機 FACOM 230-45/S ヘデータが送られる。F 230-45/S でデータの前処理と変換およびエコーテーブルの生成と表示が行われる。レーダ位置は表示に先だってライトペンを用いて入力される。

図 2 にソフトウェア構成を示す。FSS より入力された等高線図に 2 値化および細線化を行い、点の追跡により等高線の点列を作成する。その点列に高度情報を付け加えて高度ごとに整理する。サンプル間隔 (画素間隔) は実地形上では約 28 m に、高さ方向では 25 m におのおの対応している。

† Generation of Radar Echo Images from a Contour Map by YOSHIO YANAGIHARA, MINORU TANAKA, SHINICHI TAMURA and KOKICHI TANAKA (Department of Information Science, Faculty of Engineering Science, Osaka University).

†† 大阪大学基礎工学部情報工学科

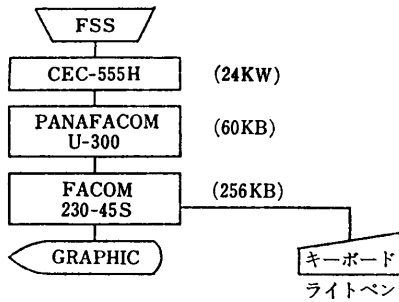


図1 ハードウェア構成
Fig. 1 Block diagram of hardware system.

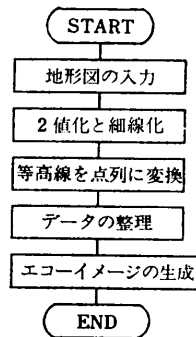


図2 ソフトウェア構成
Fig. 2 Block diagram of software system.

3. 等高線情報の抽出と整理

レーダ・シミュレータで用いる地形情報（等高線データ）を作成する方法について簡単に述べる。国土地理院の5万分の1の地形図から等高線情報の抽出を行う。等高線に沿って墨入れを行い、それをフィルムに撮影したものをFSSより入力している。このとき、実地形上で南北方向約6.7km、東西方向約9kmを、 240×320 の画素で標本化している。この画像を8近傍連結の手法を用いて細線化を行う。

次に、同じ等高線である点を一連の点列で表す。点の追跡は次のように二つの場合に分けて行う。

(1) 画面エッジ上に端点がある場合、画面エッジを探索し端点を見つけてその点より点列を追跡していく。

(2) 等高線が閉じており画面内にある場合、画面の原点からラスタ走査を行い、追跡されていない点があればその点を出発点として点列を追跡する。閉じていることを考慮に入れて点列の最後にその点列の出発点とその次の点を付け加える。一つの等高線の追跡が終了すれば、その点列の出発点の次の点から再びラ

スタ走査を続ける。

このようにして得たデータは、 xy 直交座標で表された座標点列である。次に、各座標点列に対する高度情報を付加し、これらを高さの順に並べ換える。結果として得られる等高線データは次のような形をしている。

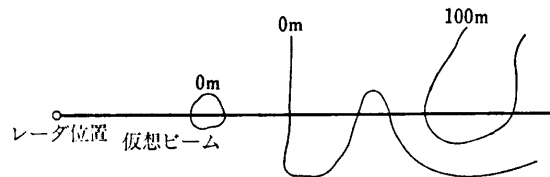
$(z_1 S_{11} S_{12} \dots S_{1n_1} z_2 S_{21} \dots z_m S_{m1} S_{m2} \dots S_{mn_m})$
ただし、

$$S_{ij} = (x_{ij1}, y_{ij1})(x_{ij2}, y_{ij2}) \dots (x_{ijk_{ij}}, y_{ijk_{ij}}),$$

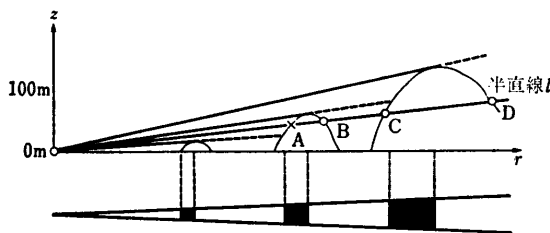
m は異なる高さの数、 z_i は高さを示す数値（25倍すれば高度となる）、 n_i は高さ z_i の等高線の数、 S_{ij} は高さ z_i の j 番目の等高線点列、 k_{ij} は点列 S_{ij} に含まれる点の数、を表す。

4. エコーイメージの生成

エコーイメージの生成の考え方を図3をもとに説明する。図3(a)は上方より見た地形を表す。この図においてある仮想ビームを考え、このビームに沿って得られる断面（同(b)）を考える。このときの輪郭線の凹凸がエコーの有無に関与する。すなわち、レーダ位置からの半直線 l を考えると、半直線 l は輪郭線と複数の点A~Dで交わるがこのうち最も近い点Aからエコーが生じる。垂直な四半平面上のこのような半直線群でレーダビームを表すと、各半直線上でのエコーの生ずる点が求まりそれらの点の集合としてそのビームの方向のエコーイメージが得られる。本システムでは仮想ビームの水平方向の広がりを1度として水平面に



(a) 仮想ビーム



(b) 断面とそのエコー

(半直線 l 上の点 A, B, C, D のうち A からエコーが生じる。)

図3 仮想ビームによる断面とそのエコー

Fig. 3 Vertical section by a imaginary beam and echo image.

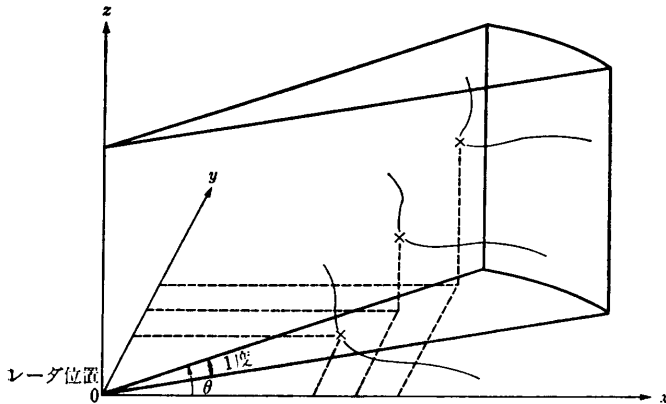


図4 処理図形単位
(×印は等高線上の点を示す.)

Fig. 4 Process unit for creation of Echo Table.

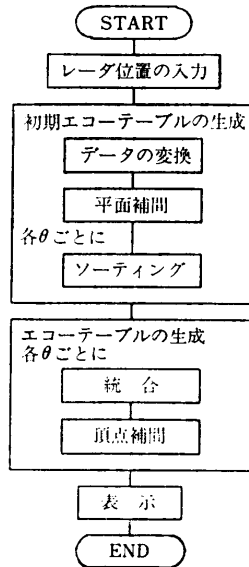


図5 処理フロー

Fig. 5 Block diagram of process.

対し 360 個のサブイメージを構成している。

仮想ビームを表す処理単位図形を図4に示す。この図形は、底面が中心角1度の扇形で高さが無限大の立体である。この立体に含まれるサンプル点に対し、後の節で述べるエコーの有無を調べる操作を適用する。このとき次のような問題がある。サンプル点が画素単位であるために起こるすり抜け現象と、島および山の頂点を示すサンプル点がないことによるエコーの誤表示である。そこで、後節で述べる平面補間と頂点補間を行い、これらの点を設決した。

図5に処理フローを示す。レーダ位置が入力されるごとに、上記の点を考慮しながら等高線データを表示

に適した $r\theta z$ 座標系で表現して表示する。

初期エコーテーブルは、レーダ位置を中心とした $r\theta z$ 円筒座標系で表された等高線上の点を格納するテーブルである。エコーテーブルは、初期エコーテーブルを用いて表示するためのテーブルである。ともに 360 個の 1 度ごとの配列をもっている。

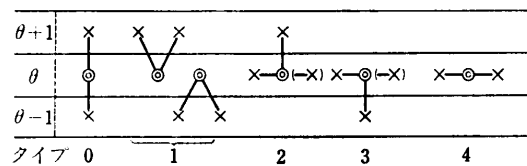
4.1 節では、等高線データを $r\theta z$ 円筒座標系上の点に変換した後に初期エコーテーブルを得る手順について述べる。4.2 節では、初期エコーテーブルを表示に適した形式に変換してエコーテーブルを得る手順について述べる。

4.1 初期エコーテーブルの生成

xyz 直交座標系の点 (x, y, z) を、レーダ位置 $(x_0, y_0, 0)$ を中心とする $r\theta z$ 円筒座標系の点 (r, θ, z) に式(1)を用いて変換する。以下の処理では画素間隔を単位長とする。

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$$

$$\theta = \begin{cases} \left[\frac{180}{\pi} \cdot \cos^{-1} \frac{x-x_0}{r} \right] + 1 & \text{if } y-y_0 \geq 0 \\ \left[\frac{180}{\pi} \cdot \left(2\pi - \cos^{-1} \frac{x-x_0}{r} \right) \right] + 1 & \text{if } y-y_0 < 0 \end{cases} \quad (1)$$



◎: 等高線上の点, ×: 点◎に連結した点

図6 五つのタイプ

Fig. 6 Connectivity-types of contour points.

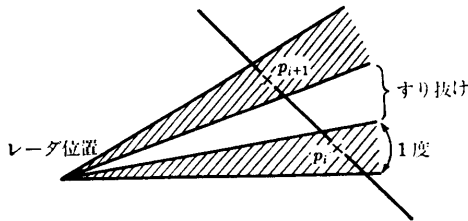
このときに前後の点の情報を用いて図6に示すような五つのタイプに分類して (r, θ, z, T) で表す (T : タイプ名)。レーダイメージ上では、タイプ0は等高線が続くことを、タイプ1は等高線が切れることをおのおの意味する。この変換の結果 (r, z, T) を初期エコーテーブルの角 θ に対応する配列の要素として格納する。

ここで、すり抜け現象(図7)が問題となる。これは xy 平面では連結した点であっても $r\theta$ 平面に変換したときに連結性が保存されないために生じる。これを解決するために、連結した2点の間に点の補間を行い、その点を配列に格納する。2点をおのおの $(r_i,$

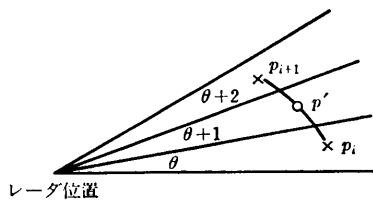
$\theta_i, z, T_i), (r_j, \theta_j, z, T_j) (m=\theta_j-\theta_i>1)$ とすると、配列 θ_i+K に格納する点 (θ, r, z, T) を次のような線形補間で求める。

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \theta_i + K \\ r &= r_i + (r_j - r_i) \times \frac{K}{m} \\ T &= 0 \\ (1 \leq K \leq m-1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$m=2$ の場合を図8と図9に示す。 p' が p_i と p_{i+1} の間に補間される。この後に各 θ ごとに r の昇順に並べ換える。



×: 等高線上の点, 図: エコーがあることを示す。
 図7 すり抜け現象
 Fig. 7 Case of missing echo.



×: 元の点, ○: 補間された点
 図8 水平面での補間
 Fig. 8 Interpolation of additional points.

1	
{	⋮
θ	$P_i(r_i, Z, T_i)$
$\theta+1$	$P'(r_i+r_j)/2, Z, 0$ (補間された点)
$\theta+2$	$P_{i+1}(r_j, Z, T_j)$
}	⋮
360	

図9 補間された点を含むエコーテーブル
 Fig. 9 Example of Echo Table.
 (Case of including additional points)

こうして得られた初期エコーテーブルは、地形図の等高線のみをレーダ位置を中心に1度ごとに放射状スキャンによってFSSより読み取った等高線の位置情報と、さらに高度情報を付け加えたものに対応する。

4.2 エコーテーブルの生成

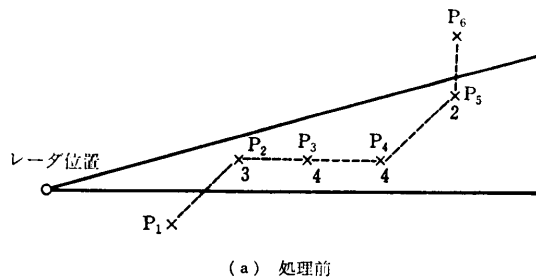
初期エコーテーブルに対し、各 θ ごとに等高度連結点の削除と頂点補間を行いエコーテーブルを生成する。

テーブル内のタイプが4の点は、レーダイメージ生成の際に冗長であるのでテーブルより取り除く。その後、同一 θ 内の昇順に並んでいる点 $p_i (1 \leq i \leq m)$ について、先頭から調べていき同じ高さの2点 p_i および p_{i+1} に対して以下のことを行う。

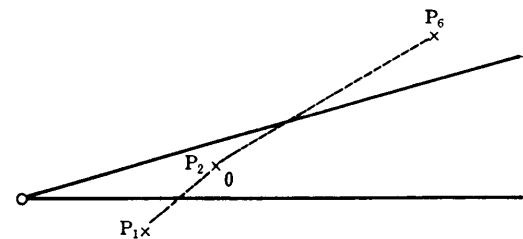
- (1) p_i のタイプと p_{i+1} のタイプがともに2または3の場合、その2点のタイプをともに0に換える。
- (2) p_i のタイプが2で p_{i+1} のタイプが3または p_i のタイプが3で p_{i+1} のタイプが2の場合、 p_i のタイプを0とし、点 p_{i+1} を配列より取り除く。
- (3) 上記以外は操作を行わない。

これは、同じ高さの並んだ2点 p_i と p_{i+1} のタイプがおおの2と3または3と2のとき、その2点を含む等高線はその仮想ビームを横切っているのでエコー生成に冗長な点 p_{i+1} を取り除く処理である。図10に動作例を示す。ここで点 p_3, p_4, p_5 が取り除かれる。

次に、同一 θ 内の昇順に並んでいる点 $p_i (1 \leq i \leq m)$

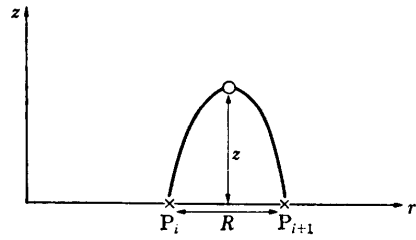


(a) 処理前

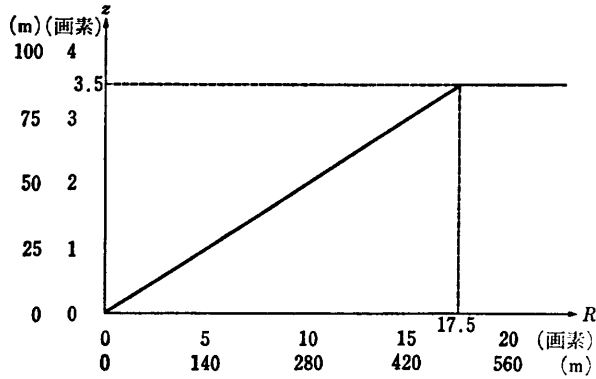


(b) 処理後

図10 連結点の除去。×はサンプル点を表し、×の右下の数字はその点のもつタイプを示す。
 Fig. 10 Deletion of connecting points existing in the same direction.



(a) 頂点の補間。○: 補間点, ×: サンプル点



(b) 高さの推定

図 11 頂点の補間と高さの推定

Fig. 11 Interpolation of a vertex-point and estimation of its height.

について、同じ高さの連続する2点 p_i と p_{i+1} に対して、前にある点の情報と p_i のタイプを用いて2点の間に予想される形が上に凸であると判断される場合、その間に対応する頂点を補間する。2点 p_1 と p_2 が同じ高さで p_1 のタイプが0である場合、明らかに頂点を補間する必要がある。同じ高さの2点 $p_i(r_i, Z, T_i)$ と $p_{i+1}(r_{i+1}, Z, T_{i+1})$ の間に頂点を補間する場合、式(3)を用いて点 (r, z', T) を挿入する(図11)。

図11(a)で2点 p_i と p_{i+1} の間に点 p' を補間する際、 p' の高さ z を r_i と r_{i+1} の差 R の同(b)に示す関係として求める。

$$\left. \begin{aligned} r &= (r_i + r_{i+1})/2 \\ z' &= \begin{cases} Z + R/5 & \text{if } R < 17.5 \\ Z + 3.5 & \text{if } R \geq 17.5 \end{cases} \\ T &= 1 \\ (R &= r_{i+1} - r_i) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

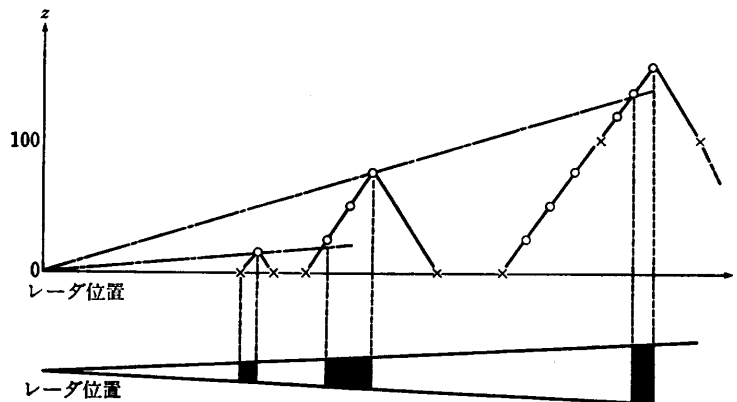
次に、高度に対して補間を行う。xy 平面上で約 28m ごとにサンプルしているのに対し、現在の前処理の結果では主等高線 (100m ごとの等高線) のみを抽出しており、z 方向に対して 100m ごとのサンプルとなっているので、連続した2点の z 方向の差が 25m を越えないように点を補間する。同一 θ 内の高度の違う連続した2点 $p_i(r_i, z_i, T_i)$ と $p_{i+1}(r_{i+1}, z_{i+1}, T_{i+1})$ に対して $z_{i+1} > z_i$ のとき、それらの間に式(4)のように線形補間を行い点 (r_j', z_j', T_j') を補間する。ただし、 $z_{i+1} \leq z_i$ のときは遠方の点が手前の点と比べて低いか等しい高さでありエコーイメージの生成に使用されないので補間を行わない。

$$\left. \begin{aligned} r_j' &= r_i + (r_{i+1} - r_i) \times \frac{j}{K+1} \\ z_j' &= z_i + (z_{i+1} - z_i) \times \frac{j}{K+1} \\ T_j' &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで

$$j = 1, \dots, K$$

$$K = \begin{cases} 1 & \text{if } 1 < z_{i+1} - z_i \leq 2 \\ 2 & \text{if } 2 < z_{i+1} - z_i \leq 3 \\ 3 & \text{if } 3 < z_{i+1} - z_i \leq 4 \end{cases}$$



×: サンプル点, ○: 補間点, ■: エコーのある部分

図 12 ある方位 θ における表示の例

Fig. 12 Illustration of displaying echo image in a direction θ

4.3 エコーイメージの生成

エコーイメージは、エコーテーブルの各 θ ごとに以下の操作を行い生成される。各 θ に r の昇順で格納されている点を $(r_i, z_i, T_i)(1 \leq i \leq m)$ とする。

- (1) $i \neq m$ で $\varphi_M(i) < z_i/r_i$ のとき,
 - (イ) $T_i=1$ または $\varphi_M(i+1) > z_{i+1}/r_{i+1}$ のとき, 区間 $[R_i, R_i+0.5]$ にエコー有とする。
 - (ロ) それら以外のとき, 区間 $[R_i, R_{i+1}]$ にエコー有とする。
- (2) $i=m$ で $\varphi_M(i) < z_i/r_i$ のとき,

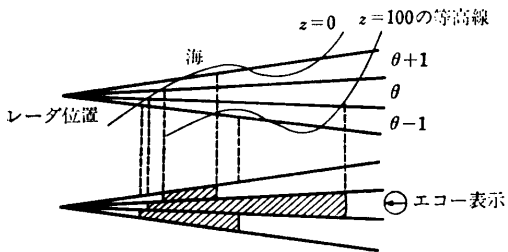


図 13 ⊖のエコーの原因
Fig. 13 Cause of echo image marked by an arrow.

- (イ) $T_i=1$ のとき, 区間 $[R_i, R_i+0.5]$ にエコー有とする。
 - (ロ) $T_i \neq 1$ のとき, 区間 $[R_i, R_{i+1}]$ にエコー有とする。
 - (3) 上記以外はエコー無とする。
- ここで,

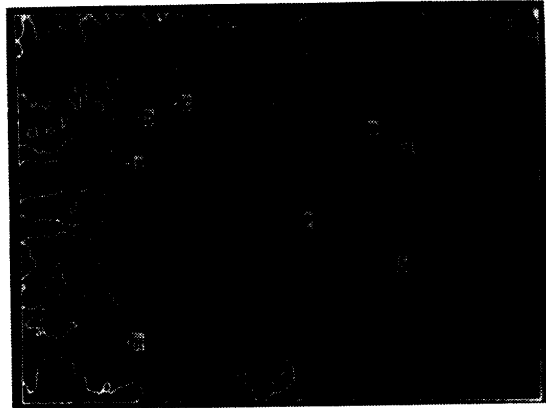
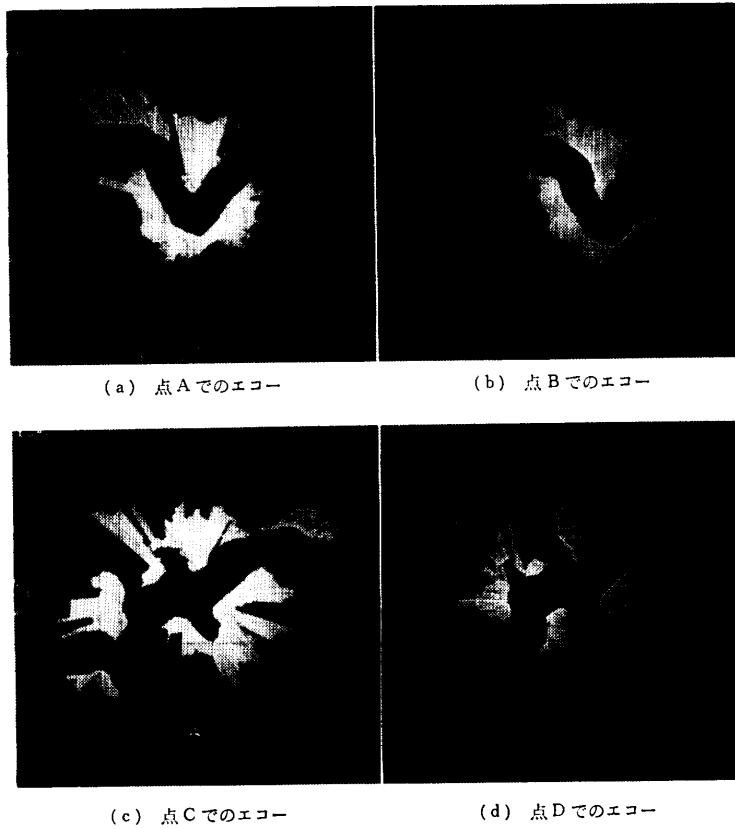


図 14 実験で用いた等高線図
Fig. 14 Contour lines used for the experiments.



(a) 点Aでのエコー (b) 点Bでのエコー
(c) 点Cでのエコー (d) 点Dでのエコー

図 15 図 14 上の各点 (A-H) でのエコー
Fig. 15 Echo images at each point (A-H) on Fig. 14.

$\phi_M(j) = \max \{z_l/r_l \mid 1 \leq l \leq j-1\}$,
 $\phi_M(0)$ を負, $R_i = \sqrt{r_i^2 + z_i^2}$ とする. 表示の例を図 12
 に示す.

5. 結果および検討

シミュレート実験を行った写真を図 14, 15 に載せる. 用いた地図は国土地理院の 5 万分の 1 の地形図 (播州赤穂) である. ビームの到達距離を 100 画素 (約 2.8 km) とした.

図 15(c)~(e) は, 同じ湾の異なる 3 か所のレーダ位置における像をおのおの表している.

図 15(g) に示した一のエコーは, 等高線の間に沿ってビームがある場合である (図 13 で, θ 方向のビームがその場合である). この問題は θ 方向に対しても補間を行うか, あるいは, 地表面の傾斜がゆるやかなものと判断してその部分の表示を暗くする操作によって解決できる.

表示における方位と距離の精度について述べる. エコーテーブルを 1 度ごとに生成しているので, 方位の精度は 1 度に対応する. $\sqrt{2}$ 画素より離れた 2 点は

すべて区別されているので, 距離の精度は $\sqrt{2}$ 画素 (約 40 m) に対応する.

6. あとがき

xyz 直交座標点列の形で表した等高線情報を, レーダの表示に適した形である $r\theta z$ 円筒座標系に変換してエコーイメージを生成・表示するシステムを提案した. 本シミュレートシステムは数個のマイコンで構成できるようなものを念頭に置いているため, (i) 入力データ量の圧縮, (ii) 処理アルゴリズムの簡略化を考慮した. すなわち, (i) に対しては等高線座標点列を用い, (ii) に対してはエコーテーブルを導入することにより, すべての処理をテーブルの上で実行するようにした.

シミュレータとしてさらに改良すべき点は, エコー強度に応じた CRT 輝度の変調である. エコーテーブル内の情報から地表面の傾斜角を求めることは可能であり, それに応じた輝度変調を施すことでこの改良は行える. その他の点は, 海面反射等による不要波の模擬, 他船の存在などを示すエコーの模擬などであ

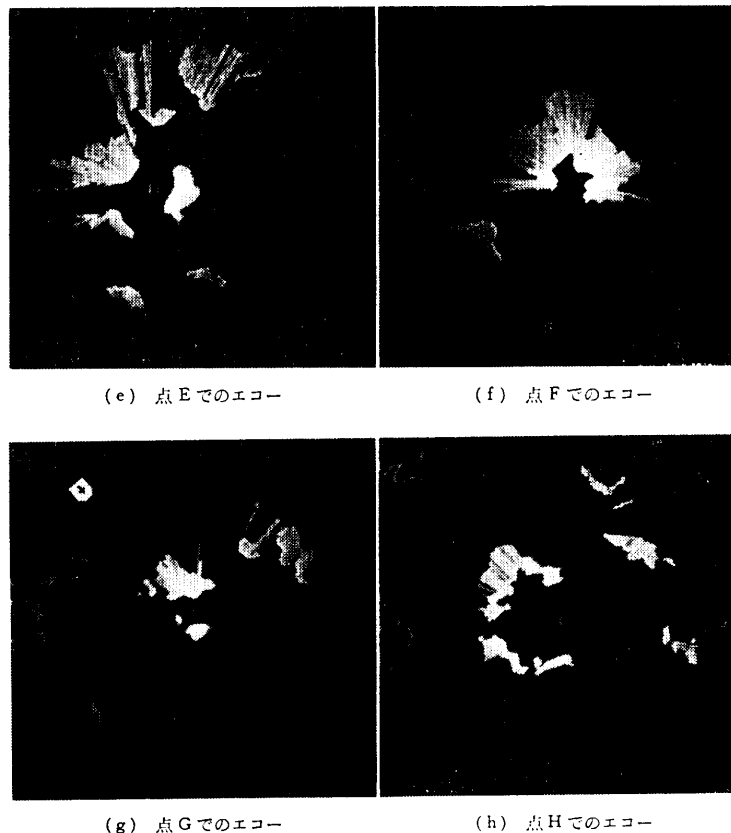


図 15 図 14 上の各点 (A-H) でのエコー (続き)
 Fig. 15 Echo images at each point (A-H) on Fig. 14. (Continued)

る。

謝辞 本研究を行うにあたり、有益なご助言を下さった、海技大学校笠原包道教授、ならびに、古野電機吉田百亮博士に感謝いたします。

参 考 文 献

1) 笠原包道：レーダ航法，pp. 1-16，海文堂，東京

(1977).

2) 西谷芳雄(編)：内海レーダ航海図，海技大学校奨学財団，兵庫(1966).

3) 大橋由昌，小野 誠：レーダエコーシミュレータの試作実験，宇宙航行エレクトロニクス研究会，SANE 79-27，電子通信学会(1979).

(昭和56年11月19日受付)

(昭和57年5月19日採録)