GMS 雲画像の船舶へのデジタル伝送に関する基礎的研究

山下 晃司*・安田 明生*

Basic Research on Digital Transmission of
GMS Images to Ship

Kohji YAMASHITA and Akio YASUDA

Abstract

In order to analyze weather conditions, it is useful to get GMS images with a high brightness resolution. As the data volume is very large, the data compression is indispensable to transmit them to ships and/or save them. The authors propose an effective approach for lossless compression of them. The gradation level of each pixel is predicted from that of ones around the pixel by means of a linear predictor in the first stage. The prediction errors are converted again into residue sequence by means of two-dimensional nonlinear predictor in the second stage. The residue sequence is coded by Huffman method in the final stage. The GMS data is suppressed to so small as 32% by this method. It is found that the GMS data can be transmitted in 93s by the transmission line of WEFAX (weather facsimile).

1. まえがき

東経 140 度の静止衛星軌道に位置する気象衛星 GMS は、VISSR (可視赤外回転放射計) によって地球表面を撮影し、これをデジタル信号に変換して 1 時間毎に地上に送信している。VISSR 赤外画像は、その輝度分解能が 256 階調であり、300K 付近では 0.5°C の温度分解能を持つ。可視画像は 64 階調であり、0~95% の範囲の反射率が量子化されている。可視と赤外の画像 (雲画像と呼ぶ) からは広大な領域の雲の分布や時間的変化、海面温度などが把握できる。また、これらの解析からは風ベクトルや海流をも知ることができる⁽¹⁾。種々の気象情報をほぼリアルタイム得ることができ、気象状況の視覚的な把握も容易になるので、航行する船舶において雲画像を受信することは特に有用である。

VISSR 画像を直接受信することは一般に困難であるが、これをもとに小規模利用局用として作られた WEFAX (Weather Facsimile) 雲画像は、衛星を介して地上に配信されており、航行中の船舶でも受信が可能である⁽²⁾。しかしながら、WEFAX 雲画像は帯域制限されたアナログ信号で伝送されているので、輝度変化の激しい雲領域では受信画像の輝度に誤差を生じる場合がある⁽³⁾。また、赤外画像の輝度分解能も 64 階調と低いので、詳細な解析を必要とする風ベクトルや海流の推定には適さない。受信環境の悪化に伴って受信画像が著しく劣化する⁽⁴⁾こと、一画像を伝送するのに 200 秒以上の時間を必要とすることも利用に際して問題となる。

輝度分解能の高い GMS 雲画像をデジタル伝送することができれば、WEFAX 雲画像の持つ問題点は解消できる。その実現のために解決すべき第一の課題は、雲画像を構成する膨大なデータを符号化によって圧縮することである。画像符号化については既に多くの研究がなされており、国際的な標準も勧告されている⁽⁵⁾が、GMS 雲画像のデータ圧縮に適切な符号化方式やその符号化パラメータは明らかにされていない。

* 正会員 東京商船大学 (〒135 東京都江東区越中島 2-1-6)

本論文は、輝度分解能 256 階調の GMS 雲画像を船舶へデジタル伝送することを目的とし、雲画像データを効率よく圧縮できる符号化方式を提案する。更に、符号化された雲画像を現行の WEFAX 信号回線を用いてデジタル伝送する場合の伝送時間を試算する。

2. 雲画像の性質とデータ圧縮の原理

本章は、考察の対象とする雲画像の性質を明らかにすると共に、これに基づいてデータ量を圧縮する符号化の原理を概説する。

図 1 は、本論文で船舶への伝送および蓄積の対象とした雲画像の一例である。この雲画像は気象協会から提供される赤外雲画像であり、表示領域と図法(メルカトル図法)を示すために、図では緯線・経線と海岸線を重ねて示してある。各画素の輝度は 8bit (256 階調) で表され、1536 行×1536 列の 2,359,296 画素から構成されている。図から、雲画像は輝度の空間的な変化が緩やかであり、隣接する画素は似通った輝度を持つことが分かる。図 2 は、図 1 に示した雲画像の 2 次元自己相関関数である。水平方向、垂直方向、および右下がりと左下がりの対角線方向に離れた画素の自己相関を同図に重ねて示す。水平方向の相関が特に高いが、いずれの方向にある画素に対しても輝度の相関は著しく高いことが図から分かる。

2 画素離れた位置での相関係数は、どの方向でも 0.97 以上である。従って、任意の画素の輝度はその周辺にある画素の輝度から小さい誤差で容易に予測できる。このことは、各画素の持つ輝度の情報量が小さいこと、即ち、空間的な冗長度が大きいことを示している。予測の例として、水平方向に隣接する画素を考える。注目する画素の輝度を X 、その左隣的位置にある画素の輝度を X_0 とする。 X_0 をそのまま X の予測値 $\hat{X}$ とすると、予測誤差 e は $e = X - \hat{X}$ となる。この値が小さいほど、精度良く予測できていることになる。図 3(a) は雲画像の輝度の分布を、同図(b) は輝度の予測誤差の分布をそれぞれ示す。図から、雲画像の輝度が 20 から 225 階調の広い範囲に分布しているのに対して、輝度の予測誤差は 0 を中心とした極めて狭い範囲に集中していることが分かる。誤差は $-10 \sim 10$ の範囲に全体の 90% 以上が含まれているので、高々 5bit で予測誤差のほとんどを表すことができる。従って、雲画像をそのまま 8bit/画素で伝送するよりも、基準となる画素の輝度と予測誤差だけを伝送し、受信側で順次輝度を復元した方が少ないデータ量で雲画像を伝送できると考えられる。予測誤差の範囲は $-255 \sim 255$ なので、受信側で雲画像を完全に再現するためには一画素当たり 9bit が必要になる。しかしながら、予測誤差が 0 付近に集中することを利用して頻度の高い誤差レベルに短いビット数の符号を割り当てれば、雲画像の伝送に必要な全ビット数は著しく減少する。図 4 は、図 3(b) の予測誤差に発生頻度に応じた符号を割り当てた一例である。

図 1 赤外雲画像の一例

図 2 赤外雲画像の二次元自己相関関数

図3 赤外雲画像の輝度分布(a)と輝度の予測誤差分布(b)

一般に、画像の符号化によるデータ圧縮は、2種類の操作を組み合わせて行う。まず、画像データを冗長度の小さいデータ系列に変換し、次に、このデータ系列の統計的性質に応じた効率の良い符号を割り当てることで全データ量が小さくなるようにする。前者の操作は系列変換と呼ばれ、後者の操作はエントロピー符号化と呼ばれる⁶⁾。この概念を示したのが、図5である。上述の例では、画像データの予測誤差への変換が系列変換に相当し、発生頻度の高い誤差レベルに対する短い符号の割り当てがエントロピー符号化に相当する。系列変換では、例で示した予測方式や画像データを直交関数に展開してその係数を変換データ系列とするものなど、種々の方式が研究されている。その何れが対象画像のデータ圧縮に有効かを知るには、冗長度を定量的に把握する必要がある。データ系列の冗長度はエントロピーで評価され、これは以下のように定義される。各画素が0から $K-1$ の K 種のレベルを取ることができ、画像の統計的性質が場所によって変化しないものとする。このとき、エントロピー H は、

$$H = - \sum_{i=0}^{K-1} P_i \cdot \log_2 P_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表される。ここで、 P_i はレベル i の画素の出現確率である。いかなる符号を割り当てても、データ系列の平均符号長はエントロピー以下にはならないことが知られている⁶⁾。従って、エントロピーのより小さいデータ系列を得る系列変換方式を見い出すことがデータ圧縮のための符号化では重要となる。

図4 予測誤差レベルに対する符号割当の一例

図5 画像符号化の概念的ブロック図

3. 雲画像の符号化によるデータ圧縮

雲画像の符号化は、復号化したときに完全に元の画像を再現できる可逆符号化でなければならない。本章は、雲画像のデータ量を効率良く圧縮する新たな可逆符号化方式を提案し、実験でその有効性を確認する。

3.1 符号化方式

可逆符号化には種々の方式があるが、カラー静止画像符号化の国際標準となっているのは JPEG (Joint Photographic Coding Experts Group) の Spatial 方式である。Spatial 方式では、周辺にある単数または複数の画素の輝度から注目する画素の予測値を求め、注目画素値から予測値を引いた輝度の予測誤差を変換データ系列にする予測変換が用いられている。このときの予測に用いる画素の配置と予測演算式を図6に示す。

図中に示した7種類の予測演算式のうち、①は前値予測と呼ばれる一次元の予測方式であり、②は平面予測と呼ばれる二次元の予測方式である。Spatial 方式のエントロピー符号化には、ハフマン符号が用いられている。オプションとして算術符号も使用が可能である⁶⁾。

雲画像の符号化に Spatial 方式をそのまま適用することもできるが、同方式が汎用であるため、圧縮率は必ずしも高くはない。また、雲画像ではテレビ画像の様な瞬時的な符号化・復号化は必要としないので、符号化・復号化における演算回数が増加しても、伝送時間や蓄積データ量を小さくできる圧縮率の高い方式が望ましい。そこで、本論文では2段階の予測変換を行う可逆符号化方式を提案する。

図7は、提案符号化方式のアルゴリズムを示す。この方式では、まず、画像データに線形予測を適用してその予測誤差をデータとする変換データ系列を得る。次に、予測誤差系列に対して更に非線形予測を適用し、誤差の予測誤差をデータとする最終的な変換データ系列を得る。これをハフマン符号を用いて符号化し、雲画像の符号系列を得る。図8は、線形予測に際して参照する画素の配置と順番を示す。注目画素の輝度を X 、予測に用いる参照画素数を N とするとき、 X の予測値は予測値 $\hat{X}$ は、次式で与える。

$$\hat{X} = \sum_{i=0}^{N-1} C_i \cdot X_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

図7 輝度の予測誤差に非線形予測を適用した雲画像符号化のアルゴリズム

< 予測演算式 >

$$\textcircled{1} \hat{X} = X_0$$

$$\hat{X} = X_1$$

$$\hat{X} = X_2$$

$$\textcircled{2} \hat{X} = X_0 + X_1 - X_2 \quad X: \text{注目画素}$$

$$\hat{X} = X_0 + ((X_1 - X_2) / 2)$$

$$\hat{X} = X_1 + ((X_0 - X_2) / 2)$$

$$\hat{X} = (X_0 + X_1) / 2$$

図6 Spatial 方式の予測変換における参照画素数の配置と予測演算式

図8 輝度の線形予測に用いる参照画素の配置

図9 線形予測誤差の非線形予測に用いる参照画素の配置

ここで、 C_i は各画素の輝度に対する重みであり、予測係数と呼ばれる。予測誤差 e は、

$$e = X - \hat{X} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表される。(2) 式の予測係数 C_i は、 e の平均値を 0 と仮定し、 e の二乗和が最も小さくなるように決定する。輝度の線形予測では、対象とする画像によって参照画素の適切な個数 N は異なることが予想される。雲画像に適切な N の値は次節で検討する。また、画像は位置によってその統計的性質が異なるので、予測誤差を最小にする予測係数 C_i もまた位置によって変化する。そこで、雲画像を画素数の等しい正方形の領域に分割し、各々の領域ごとに、予測誤差の二乗和で最小になるように予測係数を決定する。このときの領域分割数についても次節で検討する。

提案の方式では、上述の線形予測で得られた輝度の線形予測誤差を、周辺位置の線形予測誤差から更に予測する。この予測誤差が空間的に規則性を持つ場合は、その性質に応じて誤差を最小にする予測演算式を規定することができる。しかしながら、線形予測誤差の空間的規則性は現時点では明らかでない。一般に、予測誤差は空間的に不規則な値を取るので、ここでは単純な非線形関数を用いて輝度の線形予測誤差を予測する。図 9 は、輝度の線形予測誤差を非線形予測する場合の画素の配置を示す。非線形な予測演算式としては、誤差の予測値を $\hat{e}$ とし、以下の 2 通りを検討する。

- 1) 一次元非線形予測

$$\hat{e} = D_0 + D_1 \cdot e_0 + D_2 \cdot e_0^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

- 2) 二次元非線形予測

$$\begin{aligned} \hat{e} = & D_0 + D_1 \cdot e_0 + D_2 \cdot e_0^2 \\ & + D_3 \cdot e_1 + D_4 \cdot e_1^2 + D_5 \cdot e_0 \cdot e_1 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 D_i は予測係数である。輝度の線形予測と同様に、非線形予測誤差の平均を 0 と仮定し、これの二乗和が最小になるように D_i を決定する。線形予測誤差もまた画像中の位置によってその統計的性質が異なるので、誤差の非線形予測においても予測係数は位置によって適切な値が異なると予想される。線形予測の場合と同様に、複数の領域に分割したときの最適な分割数については次節で検討する。

3.2 実験結果と考察

実験に用いた雲画像は、図 1 と同様な 10 枚の赤外雲画像であり、その撮影日時は 1993 年 1 月 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 日および 18 日の正午である。雲画像を構成する 1536×1536 画素のうち、中心に位置する 1500×1500 画素の領域を考察の対象とした。

図 10 は、輝度の線形予測における参照画素数と予測誤差系列のエントロピーの関係を示す。図の横軸は参照画素数であり、縦軸はエントロピーである。図中のポイントは、10 枚の赤外画像におけるエントロピーの平均値であり、4 通りの領域分割数をパラメータとしている。2 章で述べたように、エントロピー

図 10 輝度の線形予測におけるエントロピーの参照画素数依存性

図 11 輝度の線形予測におけるエントロピーの領域分割数依存性

は符号化における平均符号長の理論的限界を表している。線形予測による符号化では、復号に際して各々の分割領域ごとに予測係数を知る必要がある。それ故、全予測係数の記録に必要なビット数の一画素当たりの平均値をエントロピーに加えたものが平均符号長の理論的限界となる。ここでは、雲画像の各予測係数を単純に 20bit で表すものとし、エントロピーを次式のように再定義して用いている。

$$\text{エントロピー} : H' = H + \frac{\text{予測係数の総数} \times 20}{\text{全画素数}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

なお、予測係数の総数は、予測係数の個数(参照画素数)と領域分割数の積である。雲画像を複数の領域に分割しない場合は、エントロピーは参照画素数の増加に伴って著しく減少すること、参照画素数が 4 以上ではほとんど変化しないことが図から分かる。また、雲画像を領域分割した場合は、参照画素数の増加につれてエントロピーは減少し続けるが、参照画素数 5 以上ではその減少の程度は極めて緩やかになることが分かる。これらのことから、雲画像における輝度の線形予測では、画像を複数の領域に分割して、参照画素数を 5 に選べば良いことが分かる。領域分割数に対するエントロピーの変化を詳しく示したのが図 11 である。図の横軸と縦軸はそれぞれの領域分割数と再定義したエントロピーであり、4 通りの参照画素数をパラメータとしている。図から、分割数の増加につれてエントロピーは減少するが、分割数 25 以上ではほとんど変化しないことが分かる。従って、領域の分割数は 25 が適当であると判定できる。

図 12 は、線形予測誤差を非線形予測した場合の予測誤差系列のエントロピーを示す。図の横軸は領域分割数であり、縦軸はエントロピーである。図中の●印は一次元の非線形予測を適用した場合の雲画像 10 枚の平均エントロピーであり、○印は二次元予測のそれである。なお、線形予測および非線形予測における予測係数の記録に必要なビット数を考慮し、エントロピーは(6)式から求めている。このときの予測係数の総数は、(2)式と(4)及び(5)式から、一次元の場合が $5 \times 25 + 3 \times 25 = 200$ であり、二次元の場合は $5 \times 25 + 6 \times 25 = 275$ である。図から、領域分割数の増加に伴ってエントロピーは減少する傾向があるものの、減少の程度は極めて小さいこと、分割数によらず二次元非線形予測を用いた方が一次元の場合よりエントロピーが小さくなること、などが分かる。この結果から、輝度の線形予測誤差は二次元で非線形予測し、領域分割数は輝度の線形予測と同じ 25 とする。図 13 は、各々の雲画像における各種予測方式における変換系列のエントロピーを示したもので、横軸は雲画像の番号である。図中の●印は輝度の線形予測だけを行った予測誤差系列のエントロピーであり、○印はさらに予測誤差の非線形予測(二次元)を行って得たデータ系列のそれである。比較のために、JPEG の予測演算式を用いた場合のエントロピーを同時に示す。雲画像によって変換データ系列のエントロピーは異なるものの、いずれの画像においても輝度の線

図 12 輝度の線形予測誤差に非線形予測を適用した場合のエントロピーと領域分割数の関係

図 13 各種系列変換方式における赤外雲画像のエントロピー

形予測誤差を二次元非線形予測する本論文で提案した方式で得た変換データ系列のエントロピーが最も小さいことが図から分かる。提案方式による変換系列のエントロピーが2.5程度であることから、一画素8bitで表された雲画像は符号化によって一画素当たり平均2.5bit程度にまでデータ量を減少させることが可能であると判定できる。以上のようにして得られた雲画像の変換データ系列をハフマン符号化した結果を表1に示す。但し、ここでは圧縮率を次式で定義している。

$$(\text{圧縮率}) = \frac{\text{符号化後の全データ量}}{\text{符号化前のデータ量}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

表の一行目は雲画像を直接ハフマン符号化した場合であり、二列目はデータ圧縮ツールとして多用されているLHAを用いた場合の圧縮結果である。提案方式による符号化が最も高圧縮率であり、雲画像のデータ量は31.98%に削減されている。JPEGのSpatial方式では圧縮率が40.1%なので、提案方式はSpatial方式のデータ量を更に20%削減できている。なお、ハフマン符号は符号化のためのテーブルが必要である。また、雲画像の画素数が有限であることから、平均符号長の理論的限界まではデータ量を減少できていない。しかしながら、その損失は全データ量の高々0.7%以下である。

4. WEFAX 回線による雲画像の伝送

本章では、現在 WEFAX を伝送するのに使用されている通信回線を用いて符号化された雲画像を伝送する場合の伝送時間を試算する。

WEFAX 雲画像は、以下のように伝送されている。まず、雲画像は0~1.68kHzのビデオ帯域を持つ一次元の電圧波形に変換され、この波形で2.4kHzの副搬送波がAM変調される。さらに、このAM変調波で1691MHzの主搬送波がFM変調され、260kHz帯域を持つ WEFAX 信号として GMS 経由で伝送されている¹⁾。

この信号回線を用いて、符号化された雲画像をデジタル伝送する場合を考える。ここでは、2相位相変調(BPSK)方式でデジタル信号を伝送し、同期検波方式で信号を復調するものとする。このときの符号誤り率 P_e は、

$$P_e = (1/2) \operatorname{Erfc}(\sqrt{C/N}) \quad \dots\dots\dots(8)$$

で表される。ここで、 C は搬送波電力であり、 N は雑音電力である。また、 $\operatorname{Erfc}(x) = \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ である。一方、受信時の1bit当たりの電力 E_b と雑音電力密度 N_0 の比は、CN比との関係で次式で表される。

$$E_b/N_0 = \frac{C}{N} \cdot \frac{Bw}{f_b} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 Bw は雑音帯域幅であり、 f_b は伝送ビットレートである。図14は、BPSK信号を同期検波したときの E_b/N_0 と符号誤り率の関係を示している²⁾。

WEFAX 信号の帯域幅は、 $Bw = 260\text{kHz}$ である。一例として、受信CN比が5dB、伝送ビットレートが $f_b = 130\text{kb/s}$ の場合を考える。 E_b/N_0 は上記の送受信条件と(9)式から、8dBとなる。このときの符号誤り率は、図14から約 10^{-4} である³⁾ことが分かる。上記の条件下では、一画素当たりの符号長が平均2.558bitに

表1 各種方式における赤外雲画像の符号化結果

	エントロピー	圧縮率
ハフマン符号化	6.7393	83.65
L H A		49.80
JPEG①	3.1814	40.13
JPEG②	3.1894	40.18
提案方式	2.5046	31.98

図14 BPSK 同期検波方式の符号誤り率特性

符号化された雲画像は、3909画素に一画素の割合で誤差を生じることになる。しかしながら、誤り訂正符号として符号化率1/2で拘束長7のたたみ込み符号を用い、8値軟判定ヴィタビ復号した場合は、符号誤り率が 10^{-8} 以下⁹⁾となる。雲画像16.5枚に対して1画素の誤りとなり、輝度の誤りはほとんど無視できる。誤り訂正符号を用いたときの情報伝送レートは65kbit/sである。32%に圧縮された雲画像(各画素8bit, 1536×1536画素)は93秒で伝送できる。現行のWEFAXでは、CN比5dBで受信した雲画像の輝度分解能が8階調程度⁴⁾であり、一画像の伝送時間は200秒以上である。符号化した後デジタル伝送することにより、256階調の輝度分解能を保った雲画像をWEFAXの1/2以下の時間で伝送することができる。

直径75cmのパラボラアンテナとNF=1.8dBのダウンコンバータを用いた筆者らの実船実験では、仰角30°以上の領域でCN比5dB以上のWEFAX信号が受信できている⁹⁾。仰角30°の領域は、サハリンからニュージーランドを含む広大な領域であり、符号化およびデジタル伝送により雲画像の実用利用海域は著しく広がる。

5. むすび

本論文は、高い輝度分解能を持つ雲画像の船舶への伝送および蓄積を目的とし、雲画像の符号化とそのデジタル伝送における伝送時間を検討した。雲画像データを効率よく圧縮する符号化方式として、画素の輝度をまず線形予測し、その誤差に対して更に非線形予測を適用した予測誤差系列を求めた後、これをハフマン符号化する新たな方式を提案した。メルカトル図法で表された各画素256階調の雲画像を用いた実験の結果、参照画素数5、領域分割数25の線形予測の予測誤差に二次元非線形予測を適用することで、雲画像のデータ量を32%に減少できた。また、符号化された雲画像を現行のWEFAX信号回線を用いてデジタル伝送した場合、受信CN比5dB以上の海域に、輝度分解能256階調で1536×1536画素の雲画像を93秒で伝送できることが分かった。

なお、本論文は雲画像符号化において線形予測誤差に非線形予測を適用することでデータ圧縮率の向上が可能であることを示したが、最適な非線形予測演算式を見い出すには至っていない。線形予測誤差の統計的性質を明らかにし、これに基づく精度の良い非線形予測演算式を見いだすことが今後の課題となる。また、現行のWEFAX信号回線を用いて雲画像をデジタル伝送する場合の伝送時間と受信可能海域の目安を与えたが、実船実験によりこれを確認することも今後の課題である。

参 考 文 献

- (1) 気象衛星センター：気象衛星資料利用の手引き，昭和63年3月
- (2) 千葉 元，安田明生他：簡易型自動追尾アンテナによる船舶上での静止気象衛星画像の受信，日本航海学会論文集第82号，pp.129-137，平成2年3月
- (3) 阮 祖達，安田明生，山下晃司：気象衛星「ひまわり」WEFAX受信画像の輝度分解能の評価，日本航海学会論文集第88号，pp.251-258，平成5年3月
- (4) 戸 友新，安田明生，山下晃司：気象衛星画像の高画質受信とその評価，日本航海学会論文集第87号，pp.227-234，平成4年9月
- (5) 安田 浩：マルチメディア符号化の国際標準，丸善，平成3年6月
- (6) 島原 博：画像情報圧縮，オーム社，pp.141-162，平成3年8月
- (7) 宮内一洋，野坂邦史：デジタル衛星通信，産業図書，pp.38-54，昭和60年8月
- (8) 佐藤敏雄：海事衛星通信入門，電子情報通信学会，pp.165-168，昭和61年7月

質 疑 応 答

長岡 栄(電子航法研究所)：JPEG①とJPEG②の違いは何でしょうか。

山下晃司：注目する画素の輝度を予測するとき、JPEG①は左側に隣接する画素の輝度をそのまま予測値とします。これに対して、JPEG②は周辺にある3つの画素の輝度を用いて平面を構成し、その平面の注目画素の位置に対応する値を輝度の予測値とします。一般的な自然画では、①より②の方式の方が予測誤差が小さくなります。