二重像からの画像分離再構成法

正会員 近 藤 浩[†]Image Separation and Reconstruction Method from
a Double ExposureHiroshi Kondo[†]

Abstract : A new method to separate and reconstruct the images in a double exposure is presented. First, the relationship is derived between the Fourier phase and the energy density spectrum of the first of two images in a double exposure film frame. By using this relationship, the phase of the first image can then be reconstructed in terms of its relevant energy density spectra. The two images can be completely separated once the density spectra of both are known. Simulation examples show that image separation and reconstruction can be successfully completed using this method.

1. ま え が き

信号のフーリエ変換表示においては、その振幅と位相の項は共に同程度の情報を担っているものと思われる。しかしながら、画像再構成に対しては、位相項の方が、振幅よりもより重要な情報を含んでいることが指摘されている¹⁾²⁾。例えば、振幅をすべて一定値とし、位相項のみを保存したものの逆変換像は原画像の情報をかなり忠実に再現するが、振幅のみを保存し、すべての周波数成分を零位相と置いたものの逆変換像は原画像と全く異なった、一見無意味な画像となる。このように、フーリエ変換を使った画像復元や再構成の問題では、原信号の位相をできるだけ精度良く得ることが重要となる。

一般に、振幅成分と位相成分は独立であり特殊な条件（例えば因果関数等）が成立しない限り一方から他

方を導くことはできない。しかしながら、観測画像が二重像となっている場合、振幅と位相はある関係式で結ばれる。本論では、まずこの関係式を導き、これにより希望する画像のフーリエ位相を振幅から得る。この場合、振幅は既知とされるが、振幅と等価なパワースペクトル(厳密にはサンプルスペクトル)を既知として問題を解く。実際の応用に対しては、例えば、胸部X線写真から軟部組織だけを分離したり、流れ写真(この場合、非正則な結像系の応答関数をもってもよい)の処理、ゴースト画像の処理等を考察しており、前者の場合、必要なパワースペクトルを得るのに胸部X線写真の“プロトタイプ像”を保存する必要があるが、後者の場合は、パワースペクトルも劣化観測画像から得る方法を採用しているため、事前に振幅に関する情報も不要である。本論はこれら応用に対する一般的基礎を与えるものである。

1989年8月10日受付, 1989年11月6日再受付

1989年10月14日, 電気関係学会九州支部連合大会で発表

キーワード: 画像分離, 位相, スペクトル, 二重像

[†] 九州工業大学 工学部 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1, TEL 093-871-1981)

[†] Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology (1-1, Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu 804, Japan)

2. 観測画像モデル

異種の画像が重なって写っている、いわゆる二重像のモデルを考える。実際には二重露出写真とか、対象物とその背景、等の画像分離問題に相当する。記述の簡単化のために観測モデルはすべて離散表現する。

$$g(i, j) = f_1(i, j) + af_2(i, j) \quad (1)$$

(a : 任意正実定数)

ここに $g(i, j)$ は観測画像、 $f_1(i, j)$, $f_2(i, j)$ は異なった原画像を表す。

この場合、 $f_1(i, j)$, $f_2(i, j)$ は任意であり、 $f_1(i, j)$ を対象画像、 $f_2(i, j)$ をランダムな雑音としてもよい。 a は任意の正実定数であるが、再構成画像を出力する際に輝度の正規化を行うことを考慮すると $af_2(i, j)$ を単に $f_2(i, j)$ としても何ら差し支えない。しかしながら、ゴースト画像や流れ写真の処理に対する本論文の応用では a が大きな意味をもつようになるので、ここでは観測モデルを(1)式として解析を行っている。

前提条件として $f_1(i, j)$ と $f_2(i, j)$ のパワースペクトルは既知とし、それぞれを $\Phi_{f1}(\omega_1, \omega_2)$, $\Phi_{f2}(\omega_1, \omega_2)$ とする。すなわち、本論文での問題は観測画像 $g(i, j)$ が受け取られて、 $f_1(i, j)$ と $f_2(i, j)$ を分離することである。(1)式において $f_1(i, j)$ と $f_2(i, j)$ は共に劣化のない画像としているが、このことは必ずしも必要条件ではなく、結像系が線形時不変形でその点拡がり関数が既知であれば、これにより $f_1(i, j)$ や $f_2(i, j)$ が劣化を受けて $g(i, j)$ が構成されるモデルとしても、以下の議論は本質的に成り立つ。

3. 位相-振幅関係式

対象画像を $f_1(i, j)$ とし、そのフーリエ変換位相を関連した量のフーリエ振幅、等価的にパワースペクトルで表す位相-振幅関係式を導く。(1)式から、

$$af_2(i, j) = g(i, j) - f_1(i, j) \quad (2)$$

となり、この両辺の自己相関関数をとると、

$$a^2 R_{f2}(i, j) = R_g(i, j) - R_{gf1}(i, j) - R_{f1g}(i, j) + R_{f1}(i, j) \quad (3)$$

を得る。ここに R_{f1} , R_g , R_{f2} はそれぞれ $f_1(i, j)$, $g(i, j)$, $f_2(i, j)$ の自己相関関数であり、 R_{gf1} , R_{f1g} は $g(i, j)$ と $f_1(i, j)$ の相互相関関数で、 $R_{gf1}(i, j) = R_{f1g}(-i, -j)$ である。ただし、ここでは相関関数を

$$R_{f2}(i, j) = \sum_{l, m} f_2(l, m) f_2(l-i, m-j) \quad (4)$$

で定義する。(3)式の両辺のフーリエ変換から、

$$a^2 \Phi_{f2}(\omega_1, \omega_2) = \Phi_g(\omega_1, \omega_2) - \Phi_{gf1}(\omega_1, \omega_2)$$

$$- \Phi_{f1g}(\omega_1, \omega_2) + \Phi_{f1}(\omega_1, \omega_2) \quad (5)$$

が得られ。実際には (ω_1, ω_2) は $(e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2})$ と書くべきであるが、記述の簡単化のためこの表記を用いることにする。 $\Phi_{f1}(\omega_1, \omega_2)$, $\Phi_{f2}(\omega_1, \omega_2)$, $\Phi_g(\omega_1, \omega_2)$ はそれぞれ $f_1(i, j)$, $f_2(i, j)$, $g(i, j)$ のパワースペクトル (またはサンプルスペクトル) であり、 $\Phi_{gf1}(\omega_1, \omega_2)$, $\Phi_{f1g}(\omega_1, \omega_2)$ は $g(i, j)$ と $f_1(i, j)$ のクロススペクトルである。

さて、 $\theta_{gf1}(\omega_1, \omega_2)$ を $g(i, j)$ と $f_1(i, j)$ のクロススペクトルの位相とすると、

$$\begin{aligned} \Phi_{gf1}(\omega_1, \omega_2) &= \sqrt{\Phi_g(\omega_1, \omega_2) \cdot \Phi_{f1}(\omega_1, \omega_2)} \\ &\quad \cdot \exp\{j\theta_{gf1}(\omega_1, \omega_2)\} \\ \Phi_{f1g}(\omega_1, \omega_2) &= \sqrt{\Phi_g(\omega_1, \omega_2) \cdot \Phi_{f1}(\omega_1, \omega_2)} \\ &\quad \cdot \exp\{-j\theta_{gf1}(\omega_1, \omega_2)\} \end{aligned} \quad (6)$$

と書ける。(6)式を(5)式に代入し、整理すると、

$$\begin{aligned} \cos \theta_{gf1}(\omega_1, \omega_2) &= \\ &\frac{\Phi_g(\omega_1, \omega_2) + \Phi_{f1}(\omega_1, \omega_2) - a^2 \Phi_{f2}(\omega_1, \omega_2)}{2\sqrt{\Phi_g(\omega_1, \omega_2) \Phi_{f1}(\omega_1, \omega_2)}} \end{aligned} \quad (7)$$

を得る。また、 $\theta_g(\omega_1, \omega_2)$ を $g(i, j)$ のフーリエ変換位相、 $\theta_{f1}(\omega_1, \omega_2)$ を $f_1(i, j)$ のフーリエ変換位相とすると $\theta_{gf1}(\omega_1, \omega_2)$ は定義より、

$$\theta_{gf1}(\omega_1, \omega_2) = \theta_g(\omega_1, \omega_2) - \theta_{f1}(\omega_1, \omega_2) \quad (8)$$

であるから(7)式は次のように変形できる。

$$\begin{aligned} \theta_{f1}(\omega_1, \omega_2) &= \theta_g(\omega_1, \omega_2) \\ &- \cos^{-1} \frac{\Phi_g(\omega_1, \omega_2) + \Phi_{f1}(\omega_1, \omega_2) - a^2 \Phi_{f2}(\omega_1, \omega_2)}{2\sqrt{\Phi_g(\omega_1, \omega_2) \Phi_{f1}(\omega_1, \omega_2)}} \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式の導出に際しては何ら推定値、近似値を用いていない。したがって、この式は観測画像が二重像であるとき、1つの原画像のフーリエ変換位相と関連したパワースペクトルの間に成立する唯一の関係式となっている。

4. 位相の一意決定

計算機による実際の計算では $\cos \theta$ の定義域は、 $-\pi$ から π までの区間である。しかるに $\cos^{-1}\{X\}$ の値域はその区間で $\pm$ の2値をとるから(9)式は、この区間で2価関数となる。したがって、 $\theta_{f1}(\omega_1, \omega_2)$ を一意に決定する方法が必要となる。以下にこの決定法を述べる。

まず、(9)式における $\cos^{-1}\{\cdot\}$ の負値を $\theta_{gf1}^-(\omega_1, \omega_2)$ 、正値を $\theta_{gf1}^+(\omega_1, \omega_2)$ とし、それらに対応して $\theta_{f1}(\omega_1, \omega_2)$ の値および $f_1(i, j)$ のフーリエ変換をそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} \theta_{-f_1}(\omega_1, \omega_2) &= \theta_g(\omega_1, \omega_2) - \theta_{-g f_1}(\omega_1, \omega_2) \\ \theta_{+f_1}(\omega_1, \omega_2) &= \theta_g(\omega_1, \omega_2) - \theta_{+g f_1}(\omega_1, \omega_2) \end{aligned} \right\} (10)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{-1}(\omega_1, \omega_2) &= \sqrt{\Phi_{f_1}(\omega_1, \omega_2)} \exp\{j\theta_{-f_1}(\omega_1, \omega_2)\} \\ F_{+1}(\omega_1, \omega_2) &= \sqrt{\Phi_{f_1}(\omega_1, \omega_2)} \exp\{j\theta_{+f_1}(\omega_1, \omega_2)\} \end{aligned} \right\} (11)$$

と定義する。 $F_1^*(\omega_1, \omega_2)$ を $F_1(\omega_1, \omega_2)$ の複素共役とし、 $G(\omega_1, \omega_2)$ 、 $F_2(\omega_1, \omega_2)$ をそれぞれ $g(i, j)$ 、 $f_2(i, j)$ のフーリエ変換とすると、

$$\begin{aligned} &|F_1^*(\omega_1, \omega_2) \cdot G(\omega_1, \omega_2) - \Phi_{f_1}(\omega_1, \omega_2)|^2 \\ &= |\Phi_{f_1}(\omega_1, \omega_2) \{ \exp\{j(\theta_{f_1}(\omega_1, \omega_2) - \theta_{\bar{f}_1}(\omega_1, \omega_2))\} - 1 \} + F_1^*(\omega_1, \omega_2) \cdot a F_2(\omega_1, \omega_2) |^2 \end{aligned} (12)$$

が成り立つ。今、ここで $\theta_{\bar{f}_1}(\omega_1, \omega_2)$ を真値とすると、

$$F_{\bar{1}}(\omega_1, \omega_2) = F_1(\omega_1, \omega_2) (13)$$

である。

$$\begin{aligned} &|F_1^*(\omega_1, \omega_2) \cdot a F_2(\omega_1, \omega_2)|^2 \\ &= a^2 \Phi_{f_1}(\omega_1, \omega_2) \Phi_{f_2}(\omega_1, \omega_2) \end{aligned} (14)$$

なる関係を使用して、

$$\begin{aligned} &|F_1^*(\omega_1, \omega_2) G(\omega_1, \omega_2) - \Phi_{f_1}(\omega_1, \omega_2)|^2 \\ &= a^2 \Phi_{f_1}(\omega_1, \omega_2) \Phi_{f_2}(\omega_1, \omega_2) \end{aligned} (15)$$

を得る。しかし偽位相である $\theta_{\bar{f}_1}(\omega_1, \omega_2)$ では、

$$\begin{aligned} &|F_1^*(\omega_1, \omega_2) G(\omega_1, \omega_2) - \Phi_{f_1}(\omega_1, \omega_2)|^2 \\ &= 2 \Phi_{f_1}^2(\omega_1, \omega_2) [1 - \cos\{2\theta_{g f_1}(\omega_1, \omega_2)\}] \\ &\quad + a^2 \Phi_{f_1}(\omega_1, \omega_2) \Phi_{f_2}(\omega_1, \omega_2) \\ &\quad + 2\sqrt{2} \Phi_{f_1}(\omega_1, \omega_2) \sqrt{1 - \cos 2\theta_{g f_1}(\omega_1, \omega_2)} \\ &\quad \times \text{Real}\{\exp(j\theta_p) \cdot F_1^+(\omega_1, \omega_2) \cdot a F_2^*(\omega_1, \omega_2)\} \end{aligned} (16)$$

となり明らかに(15)式と異なる。ここに、

$$\theta_p = \tan^{-1} \frac{-\sin 2\theta_{g f_1}(\omega_1, \omega_2)}{\cos 2\theta_{g f_1}(\omega_1, \omega_2) - 1} (17)$$

である。(15)、(16)式から位相の一意決定が可能となる。

手順は次のとおりである。

① (15)、(16)式の左辺を計算する。

② それらの値からそれぞれ(15)式右辺を差し引き、その絶対値の小さい方に対応する $\theta_{\bar{f}_1}(\omega_1, \omega_2)$ (または、 $\theta_{\bar{f}_1}(\omega_1, \omega_2)$) を正しい位相として選ぶ。この時、例えば、 $\theta_{\bar{f}_1}(\omega_1, \omega_2)$ が選ばれたならば、 $F_{\bar{1}}(\omega_1, \omega_2)$ が $f_1(i, j)$ のスペクトルとなる。

以上は定数 a が既知の場合についてであったが、未知の場合は次の手順が必要となる。まず、 a が正実定数であることと(15)式を利用して、

$$a^2 = \frac{|F_1^*(\omega_1, \omega_2) \cdot G(\omega_1, \omega_2) - \Phi_{f_1}(\omega_1, \omega_2)|^2}{\Phi_{f_1}(\omega_1, \omega_2) \Phi_{f_2}(\omega_1, \omega_2)} (18)$$

を定義する。このうちのどちらかが正しい a の値で

ある。次に $\omega'_1 \neq \omega_1$ 、 $\omega'_2 \neq \omega_2$ として $|F_1^*(\omega'_1, \omega'_2) G(\omega'_1, \omega'_2) - \Phi_{f_1}(\omega'_1, \omega'_2)|^2$ を計算し、これらの値と(18)式で求めた a^2 を使った $a^2 \Phi_{f_1}(\omega'_1, \omega'_2) \Phi_{f_2}(\omega'_1, \omega'_2)$ の値を比較する。これらの組合せのうち必ず1つが正しい等式となるはずである。そのときの a の値を正しい値とする。この場合、偶然に等式が成立する場合も考えられるから、もう一点異なる空間周波数 (ω'_1 、 ω'_2) をとり、確かめるとより正確となる。これにより a が求まり、前述の①、②の手順を繰り返してすべての (ω_1, ω_2) に対する $\theta_{f_1}(\omega_1, \omega_2)$ 、 $F_1(\omega_1, \omega_2)$ を決定する。

5. シミュレーション

写真1 は二重露出写真で、女性の顔写真と建物とが重なっている例である。この場合、(1)式における $f_1(i, j)$ を女性の顔写真とし、 $f_2(i, j)$ を建物とする。定数 a は $1/\sqrt{2}$ に選んであるが、シミュレーションはこれを未知として処理している。**写真2** および**写真3** は本論による処理結果であり、分離された画像である。ほぼ完全に分離されており、そのSN比は写真2が47.30 dB、写真3が45.68 dBであった。 a の推定値は0.707であり、ほぼ真の値に近い値である。**写真4** は f_1 をぼけ画像、 f_2 をランダムノイズとした場合であり、SN比は23.63 dBの画像である。 a は1としている。**写真5** は分離した f_1 のぼけ画像を逆フィルタ操作により復元した画像でSN比は35.21 dBである。この場合、逆フィルタが特異性を示さないように選んであるが、ランダムノイズとの分離に多少の誤差があると、復元画像にはこの誤差が増強されて現れ、前例ほどのSN比が得られないものと思われる。これらすべての画像は出力時に濃淡レベルを正規化してある。なお、写真1～3は512×512画素の画像であり、写真4、5は256×256画素の画像である。

写真1 二重露出写真
Double exposure image.

6. む す び

二重像等の劣化画像において、目的とする信号のフーリエ変換位相と関連した信号の振幅間に成立する関係式を導出した。さらに、この関係式を利用して二重像の分離シミュレーションを行い、充分満足できる結果を得た。本方法は加算的な2つの信号であれば適用可能であり、実際の応用の基礎を与えるものである。現在、本論の応用として放射線画像における対象物とその背景の分離、ゴースト画像の処理、流れ写真からの復元を検討中であり、いくつかの好結果も得られている。例えば、放射線画像では疾患部を精度良く見るために、胸部X線像の軟部組織だけを取り出すコンピュータドラジオグラフィ(CR)を用いたエネルギー差分撮影技術が開発されているが、処理時間がやや長いことと、コストが高い欠点があった。CRにより処理された撮影像をもとに、あらかじめプロトタイプスペクトル振幅を求めておけば、本論の方法を用いた繰り返し手法を採用することで、肋骨部と軟部組織だけの像分離が可能となる。読込まれたプロトタイプスペクトル振幅は、スケールファクタと濃度値パラメータを変化させるだけで殆んどの胸部X線像に対して使用でき、実用性は高いものと思われる。また、ゴースト画像や流れ写真の場合は劣化画像から必要なパワースペクトルも推定する方法を開発しており、事前情報としてこれらを必要とすることなく処理が可能である。さらにこの時、結像系が非正則なインパルス応答関数をもつ場合でさえ、処理が可能となる長所を有している。

最後に、この研究と発表の機会を与えていただいた故九工大教授 大重力先生に感謝の意を表し、謹んで哀悼の意を表します。なお、本研究は(財)放送文化基金の援助のもとで行われました。

【参 考 文 献】

- 1) A. V. Oppenheim and J. S. Lim: "The Importance of Phase in Signals", Proc. IEEE 69, pp. 529-541 (1981)
- 2) A. V. Oppenheim, M. H. Hayes and L. S. Lim: "Iterative Procedures for Signal Reconstruction from Fourier Transform Phase" Optical Engineering, 21, 1, pp. 122-127 (1982)

こんどう
近藤 浩 昭和50年、九州工業大学工学部大学院修士課程修了。同年、九州工業大学工学部電子工学科助手。昭和63年、同大学電気工学科講師、デジタル信号処理、特に画像復元、画質評価、画像変換に関する研究に従事。工学博士。正会員。

写真 2
分離画像 1.
Reconstructed
image 1.

写真 3
分離画像 2
Reconstructed
image 2.

写真 4
ぼけとノイズによる劣化画像
Image degraded
by blurring and
additive noise.

写真 5
復元画像
Restored
image.

二重像からの画像分離再構成法

近藤 浩

二重像からそれぞれの画像を分離，再構成する新しい方法を示す．観測画像が二重像となっており，各々の原画像パワースペクトルと1つの原画像フーリエ変換位相との間に成立する唯一の関係式を導く．これにより得られた位相から画像再構成を行い，二重像の分離を行う．シミュレーション例は，二重像の分離が完全に行われることを示している．

テレビジョン学会誌 Vol. 44, No. 3, pp. 301~304 (1990)

光ディスクによる手話生成システム

河合秀夫，田村進一，岡崎耕三

我々は，健聴者と聴覚障害者との会話の困難さを知り，以前にパソコンと音声認識装置等を利用した手話生成システムを試作した．このシステムは，フロッピーディスクに手話および指文字パターンが2値のイラストとして格納されており，音声入力によりこれをアニメーション風に表示させるものである．しかし，この表示方法では，感情の表現が困難，口話が併用できない，見慣れない表示方法のため抵抗がある等の欠点が指摘された．そこで，本システムでは，光ディスクを利用して実映像として手話を表示させることにした．これにより，上記欠点がある程度は解決できたと考える．この際，1台の光ディスクプレーヤのみを使用するシステムでは次画面検索中に映像のときれが生じる．そのため，2台の光ディスクプレーヤを交互に運転して，このときれを解消した．本論文では，この光ディスクを使用したシステムの構成，動作原理，結果の検討等について述べる．

テレビジョン学会誌 Vol. 44, No. 3, pp. 305~311 (1990)

スプラディック E 層によるテレビ帯混信波の簡易除去装置

阿良田洋雄，山崎 滋，南 圭，片桐 隆，鈴木鋭司

近年，近隣諸外国の FM 放送波やテレビ放送波が Es 層と呼ばれる電離層により異常伝搬し，日本のテレビ放送波に混信することにより起こるスプラディック E 層 (Es 層) 混信が問題になっている．本論文は，この混信の簡易な除去装置について述べたものである．

本論文では，①まず，テレビ信号の DSB 伝送領域をフィルタにより分割し，SSB 受信して混信波を除去するスプリットナイキスト受信方式と SSB 受信方式を提案する．次に，SSB 伝送領域の混信波を除去するために周波数可変ノッチフィルタ除去方式を提案する．②また，混信波を検出・測定する方法として，上記のスプリットナイキスト受信あるいは SSB 受信したテレビ信号の垂直帰線期間の1ラインを AD 変換したのち，高速フーリエ変換 (FFT) を用いて混信波周波数とレベルを検出測定する方法を提案する．さらに，除去装置の試作と野外実験を行い本装置が混信に対して有効であることを確認した．

テレビジョン学会誌 Vol. 44, No. 3, pp. 312~320 (1990)