

修士論文  
平成 27 年度

研究題目  
エッジ成分の非線形変換による  
画像超解像の研究

学生証番号 258186

氏名 海見 智幸

提出日 平成 28 年 1 月 15 日

指導教員 蚊野 浩

京都産業大学  
先端情報学研究科

## 要約

映像機器の高画素化が進んでおり、元画像よりも画素数が多いディスプレイに画像を表示することがある。例えば、 $1920 \times 1080$  画素のフルハイビジョン映像を  $4000 \times 2000$  画素の 4K テレビに表示するような場合である。このとき、映像を単純に拡大すると、画像にぼけが発生してしまうため、ぼけが発生しないように画像を拡大することのできる画像超解像と呼ばれる技術が研究されている。本論文では、リアルタイムに処理することのできる、非線形な信号処理に基づく超解像処理に焦点を当て、エッジを空間的に圧縮することによりエッジを急峻にする新たな超解像手法を提案した。提案手法を、従来の鮮鋭化技術であるアンシャープマスキング、及び非線形超解像として知られる合志の方法と結果を比較した。

提案手法は、まず、画像からハイパスフィルタ処理で高周波成分を抽出する。また、エッジ抽出処理によってエッジ画素を抽出する。そして、エッジ画素位置を中心として、抽出した高周波成分に非線形関数を演算することで、高周波成分を強調し、元画像に加算する。この処理の過程で、元画像に存在しない、より高い周波数成分が発生する。

各手法の結果を比較するために、テスト画像に縮小拡大を施し、高周波成分を除去した画像を用意した。それに対してそれぞれの超解像処理を施した。各手法の違いを明確にするため、実画像の視覚的な面と周波数成分との 2 つの観点で結果を比較した。その結果、提案手法によって、元画像に存在しない高周波成分が生成されること、合志の方法と同程度のエッジ強調を図れることが確認できた。

## 目次

|                             |     |    |
|-----------------------------|-----|----|
| 1 章 序論                      | ．．． | 1  |
| 2 章 画像の拡大・鮮鋭化・画像超解像に関する従来技術 | ．．． | 3  |
| 2.1 画像の拡大                   | ．．． | 3  |
| 2.2 画像の鮮鋭化                  | ．．． | 4  |
| 2.3 画像超解像の従来技術              | ．．． | 7  |
| 2.3.1 画素値の局所的な相関を利用した方法     | ．．． | 7  |
| 2.3.2 学習ベース超解像              | ．．． | 7  |
| 2.3.3 複数画像からの超解像            | ．．． | 8  |
| 3 章 エッジ成分の非線形変換による画像超解像     | ．．． | 10 |
| 3.1 合志の方法                   | ．．． | 10 |
| 3.2 提案手法の考え方                | ．．． | 12 |
| 3.3 提案手法の概要                 | ．．． | 14 |
| 4 章 提案手法の実装と実験              | ．．． | 16 |
| 4.1 提案手法の実装                 | ．．． | 16 |
| 4.2 実験結果                    | ．．． | 17 |
| 4.3 考察                      | ．．． | 21 |
| 5 章 結論                      | ．．． | 23 |
| 参考文献                        | ．．． | 24 |
| 謝辞                          | ．．． | 25 |

## 1章 序論

近年、映像機器の高画素化が急速に進んでいる。デジタル放送で視聴する映像の解像度は、最高でも  $1,920 \times 1,080$  画素である。それに対して、最近では  $4,000 \times 2,000$  画素前後の 4K テレビと呼ばれるものが販売されている。そのため、映像の画素数を縦横それぞれ 2 倍、総数で 4 倍に増やす必要がある。この時、単純に画像を拡大すると、画像にぼけが発生してしまう。このような問題を改善するために、単なる画像拡大ではなく、元画像に存在しない高周波成分を加えながら、画像全体として滑らかに拡大することのできる画像超解像と呼ばれる技術が研究され、実用化されている。

画像超解像は、簡単に言えば画像の拡大であるが、単に画像を引き延ばして拡大する最近隣補間やバイリニア補間、バイキュービック補間といった画像拡大技術は、超解像としては分類されない。超解像の定義としては、「ナイキスト周波数より高い周波数成分を発生する技術」[1] が考えられる。そして、その高周波成分は、元画像の画質や見かけの印象をよりよく向上させるものである必要がある。

画像超解像の従来技術を大きく分類すると、1枚の低解像度画像だけからそれを高画素化する「学習ベース超解像」と、複数の低解像度画像を合成することで高画素化する「複数画像からの超解像」の 2 つがある。学習ベース超解像は、事前に大量の画像を解析し、低解像度画像に対応するもっともらしい高解像度画像を推定するモデルを学習する。そして、未知の低解像度画像が与えられた場合に、学習したモデルを用いて、低解像度画像を近似する高解像度画像を生成する手法である。複数画像からの超解像は、一つの原シーンを、少しずつ異なる標本化位置でサンプリングした多数の低解像度画像を用い、それらに画像復元的な処理を施すことで高解像度画像を生成する手法である。

学習ベースの手法であれ、複数画像からの手法であれ、これらの従来手法はデジタル映像（動画像）の超解像に利用することが難しい。学習ベースの手法は計算コストが大きい。そのため、現在の技術では、リアルタイムに処理することができない。複数画像からの超解像は、静止画を対象とする場合にはある程度の効果はあるが、動画像の処理には向いていない。

現在、超解像機能を備えたデジタルテレビやデジタルカメラが多数販売されている。合志は、これらの機器における超解像処理に疑問を呈している。特に、超解像処理を備えたテレビ受像機の性能は不十分である、としている。合志は、

非線形な信号処理に基づく，計算コストの少ない超解像処理を提案した．それは，元画像を従来手法で画像拡大したのち，その信号中の高周波成分を抽出し，それを3乗して原信号に加算する，という単純なものである．これによって，元画像に存在しない高周波成分を生成し，かつ，自然で滑らかな画像の拡大を実現した．

本研究は，合志の手法をヒントにして考案したものである．基本的なアイデアは，画像を拡大した時に生じるエッジのなまりを空間的に圧縮することで，エッジを急峻にする．これによって，元画像に存在しない高周波成分を生成し，自然な高解像度画像を作り出す．以下，2章では画像の拡大，鮮鋭化，超解像に関する従来技術を述べる．3章では提案手法として，計算コストの少ない，非線形変換による画像超解像について述べる．4章では，本研究の実装方法，実験結果を示し，提案手法と従来技術，合志の手法とを比較し考察する．5章では，本研究の成果，今後の発展，課題について述べる．

## 2章 画像の拡大・鮮鋭化・画像超解像に関する従来技術

### 2.1 画像の拡大

デジタル画像の拡大あるいは高画素化は，結局，画素と画素の間の中間的な位置に新たな画素を生成することである．通常，これは標本化定理に基づいて行われる．厳密に標本化定理を適用すると，図 2.1 の手順になる．

**Step1:** 元画像の各標本化位置に二次元 sinc 関数を当てはめる．これは，画素値をピークとし，標本化周波数の 1/2 を周期とする sinc 関数である．  
**Step2:** 全ての sinc 関数を加算することで アナログ画像を再構成する．  
**Step3:** 生成したアナログ画像をより高密度に再標本化することで，画像を高画素化（拡大）する．

図 2.1 標本化定理に基づく画像の拡大

この手順を，一次元信号の場合について，図的に示したものが図 2.2 である．この図で赤丸が標本化点，色付きの曲線がそれぞれの標本化点に当てはめた sinc 関数，黒線が全ての sinc 関数を加算することで再構成したアナログ信号である．一旦，アナログ信号を得ることができれば，いくらでも細かく再標本化することが可能である．

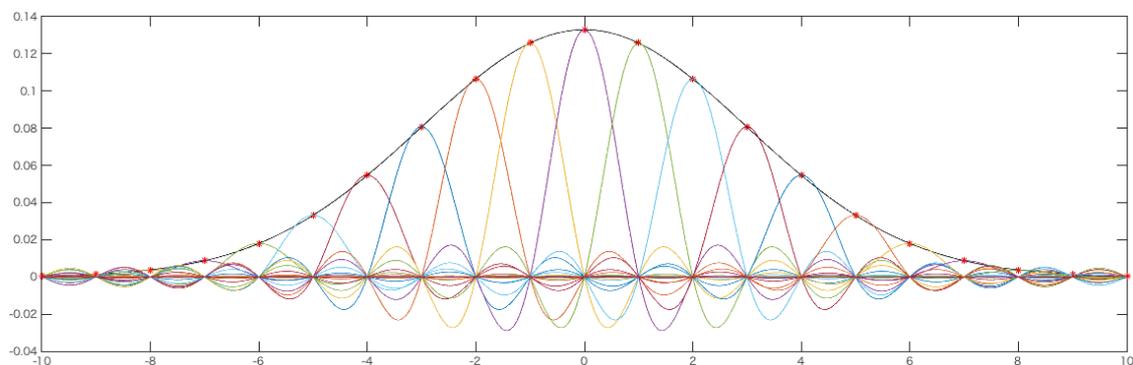


図 2.2 標本化定理に基づくデジタル信号の補間

標本化定理に基づく方法には，次の性質がある．

- ① デジタル信号の元になったアナログ信号を忠実に再現する．従って，それをどれほど高密度に再標本化しても，元信号にない高周波成分を生成することはできない．
- ② 厳密に標本化定理を適用すると，十分な長さの sinc 関数を多数足し合わせる必要がある．したがって，計算量が大きくなる．

実際の画像拡大では，上の方法を近似した計算を用いる．それらが，最近隣

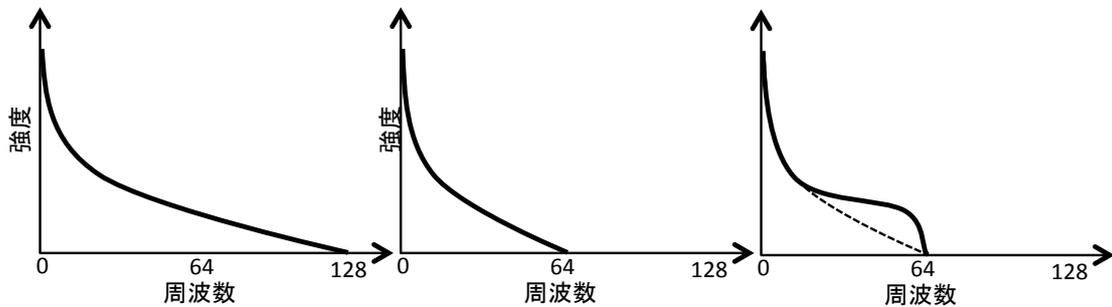
補間, バイリニア補間, バイキュービック補間, Lanczos 3次補間, などの画像補間技術である.

## 2.2 画像の鮮鋭化

一般に, 画像を拡大すると画像がぼけた感じになる. その理由は, 高画素化したことで, 表現可能な周波数帯域が広がったのに対し, 実際の拡大画像は低周波数側にだけ周波数成分が存在し, 高周波成分が存在しないからである. 例えば,  $256 \times 256$  画素の画像における最高周波数成分は, 隣接する画素ごとに白黒の濃淡が変化する絵柄であり, 画面全体で 128 周期になる. この高周波成分を  $512 \times 512$  画素に拡大しても, 画面全体で 128 周期であることに変わりはない. 一方,  $512 \times 512$  画素の画像で表現可能な最高周波成分は 256 周期である. 従って, 拡大した画像には 257~512 周期の周波数成分が存在しない. これは当然のことであるが, 単純な拡大画像はこの性質があるため, 画像を拡大すると, かならずぼけが生じる. 図 2.3(a)の左は  $256 \times 256$  画素の元画像, 中央はこれを  $1/2$  に縮小した後,  $256 \times 256$  画素に拡大した画像である. 中央の画像は左の画像と同じ画素数であるがぼけが見られる. その理由は,  $1/2$  に縮小した時に高周波成分が失われ, 拡大しても, それを補うことができないからである.



(a) 元画像 (左), 縮小拡大によるぼけ画像 (中央), その鮮鋭化 (右)



(b) それぞれの画像に対する周波数成分の概要

図 2.3 元画像と縮小拡大によってぼけた画像, およびそれを鮮鋭化した画像

写真画像を鮮鋭化する方法として, アンシャープマスキングがよく知られている. これは, 元画像 ( $I$ ) から元画像を平滑化した画像 ( $I_{\text{blur}}$ ) を減算し ( $I - I_{\text{blur}}$ ), これを定数倍して元画像に加える ( $I + \alpha (I - I_{\text{blur}})$ ) 手法である. これによって, 画像のエッジ部にオーバーシュートとアンダーシュートが加わり, 鮮鋭化されたように見える. 図 2.3(a)右は, 中央のぼけた画像にアンシャープマスク処理を施した画像である.

図 2.4 にアンシャープマスク処理のブロック図を示す. 入力画像からそれを平滑化した画像を減算する処理は, 低周波成分を除去することになるのでハイパスフィルタである. したがって, アンシャープマスキングは, 入力画像にそのハイパスフィルタ画像を加算することに該当する. つまり, 高周波成分を強調することになる.

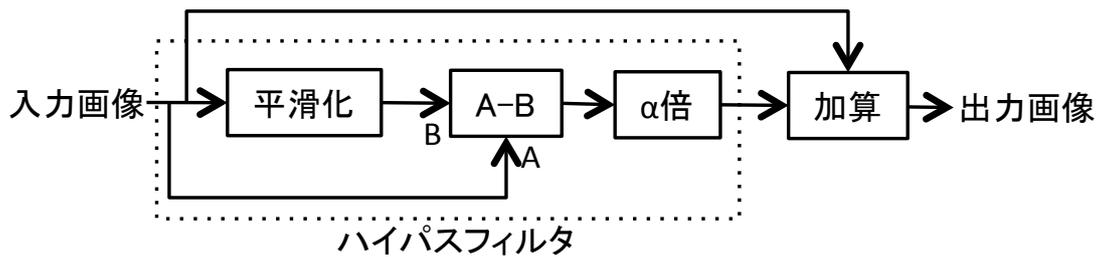


図 2.4 アンシャープマスク処理のブロック図

図 2.3(b)は、画像の拡大によるぼけとアンシャープマスクによる鮮鋭化の効果  
を、周波数領域で説明したものである、 $256 \times 256$  画素の元画像には 128 周期ま  
での周波数成分が含まれている。1/2 縮小の後 2 倍に拡大した画像に含まれる最  
高周波数成分は 64 周期である。したがってぼけて見える。アンシャープマスクキ  
ングによる鮮鋭化は、周波数領域で見ると、高周波成分を増幅することである。  
図 2.3(a)中央の画像にアンシャープマスクングすると、せいぜい 64 周期に近い  
周波数成分が強められることになる。したがって、鮮鋭化されたように見える  
が、処理前の画像に存在しない高周波成分は増えていない。

画像のぼけは、高周波成分が失われる現象である。画像を縮小した場合には  
高周波成分が無くなる。したがって、それを拡大した画像には高周波成分が存  
在しない。一方、同じようにぼけて見える画像であっても、高周波成分が弱ま  
っているだけ、という場合もある。例えば、図 2.5 右は、左の元画像をガウス平  
滑化した画像である。中央の画像よりもぼけているように見えるが、高周波成  
分は残っている。このような場合には、ウィナーフィルタなどによる画像復元  
を用いることで、ほぼ、元画像に戻すことができる。

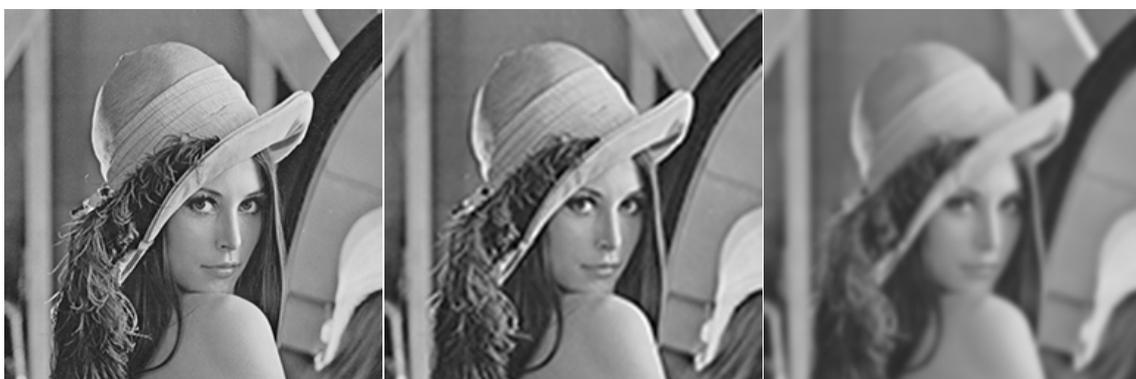


図 2.5 元画像 (左), 縮小拡大によるぼけ画像 (中央), ガウス平滑化画像 (右)

## 2.3 画像超解像の従来技術

### 2.3.1 画素値の局所的な相関を利用した方法

簡単のためにデジタル画像を2倍に拡大する場合について説明する。図 2.6 の灰色の四角は元画像の画素。それ以外の四角は、画像を縦横 2 倍に拡大するために補間しなければならない画素であるとする。例えば赤色画素の画素値を決めるとき、バイリニア補間を用いれば近隣 4 画素 (a,b,c,d) の平均になる。あるいは、バイキュービック補間を用いれば、近隣 16 画素の加重平均になる。

古典的な画像超解像手法として、画像の局所的な相関を利用する方法がある。これは画像の性質を考慮した発見的な手法である。例えば、a と d の画素値の差が b と c の画素値の差よりも小さければこの局所的な領域では a から d の方向に画素値の相関が高いと考える。そのように仮定すれば、赤色画素の値の推定値は  $(a+d)/2$  が妥当である。これは非常に単純な仮定であるが、もう少し広い  $4 \times 4$  画素の局所的な領域の画素分布を考慮した方法が[2]に記述されている。

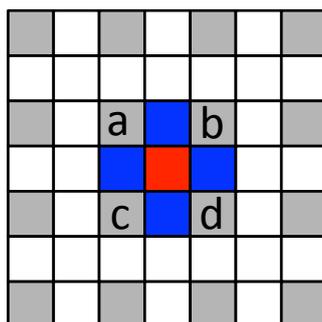


図 2.6 デジタル画像の 2 倍拡大

[2]に記述されている方法 (FCBI (Fast Curvature Based Interpolation)法) を追試・検証したが、それほどの改善は確認できなかった。局所的な相関を利用した画素値の補間は、適用対象の画像の性質と補間式のモデルが合致したときには、ある程度の効果が見られるが、汎用的な手法ではないと考えられる。

### 2.3.2 学習ベース超解像

1 枚の低解像度画像を高画素化し、かつ、元画像に存在しない高周波成分を生成可能な手法が提案されている。これらの多くは学習ベースの超解像処理、あるいは事例ベースの超解像とよばれるものである。図 2.7 に学習ベース超解像の考え方を示す。まず、事前に多くの写真画像を用いて  $5 \times 5$  画素程度の低解像度画像パッチと  $11 \times 11$  画素程度の高解像度画像パッチの対応関係を学習する。次

いで、1枚の低解像度画像を超解像処理する段階では、画像全体を5×5画素程度のパッチに分解する。分解されたパッチを、事前に学習したルールにしたがって高画素化する。最後に、高画素化されたパッチを合成し、高解像度画像を生成する。

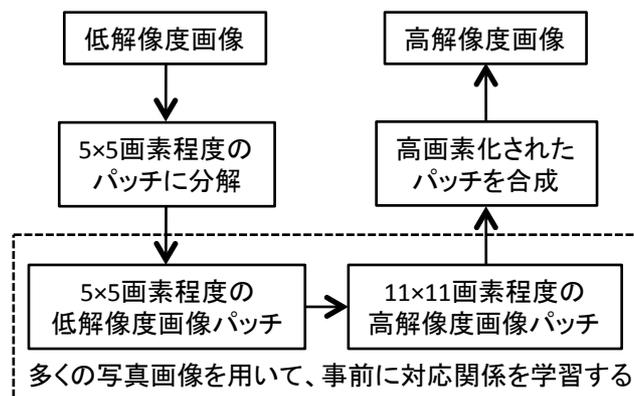


図 2.7 学習ベース超解像

この手法は計算コストが高く、テレビ映像に対するリアルタイムでの処理は難しい。

### 2.3.3 複数画像からの超解像

未知の高解像度画像を  $\mathbf{X}$ 、ある観察条件  $i$  で  $\mathbf{X}$  を低解像度化した画像を  $\mathbf{Y}_i$  とする。ここで、 $i$  は異なる観察条件に付与する番号で、低解像度画像を  $N$  個生成するとき  $i = 1 \sim N$  である。観察条件  $i$  において  $\mathbf{X}$  から  $\mathbf{Y}_i$  を生成する作用素を  $A_i$  とすると、 $\mathbf{Y}_i = A_i(\mathbf{X})$  ( $i = 1 \sim N$ ) のように記述することができる。 $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}_i$  を、それぞれの全画素を一次元化した縦ベクトルで表し、 $A_i$  を、縦ベクトル  $\mathbf{X}$  を縦ベクトル  $\mathbf{Y}_i$  に変換する行列として表現すると、 $\mathbf{Y}_i = A_i \mathbf{X}$  ( $i = 1 \sim N$ ) のように行列演算によって表現できる。通常、 $A_i$  は観察位置の変換、高解像度画像の平滑化、高解像度画像の低解像度化、の3つの変換の合成を表す行列である。

複数画像からの超解像処理は、低解像度画像を生成するプロセスをこのように定式化し、実際に観察された  $N$  個の低解像度画像  $\mathbf{Y}_i$  と、低解像度画像の生成プロセス  $A_i$  を既知として、高解像度画像  $\mathbf{X}$  を推定する手法である。再構成型の超解像処理とよぶ場合もある。

図 2.8 は複数画像からの超解像処理を説明する図である。図上の左は4枚の低解像度画像、右は4枚の低解像度画像を合成した高解像度画像である。低解像度画像はいずれも粗い画像であり、高解像度画像はより高精細な画像になっ

ている。これがどのように合成されているかを示すのが、その下の図である。4枚の低解像度画像は、高解像度画像上では上下左右に1画素ずれていることがわかる。この例は最も簡単な例である。一般に、低解像度画像はお互いにサブピクセル精度で移動・回転しており、また、ぼけを含んでいるので、再構成の処理はより複雑になる。

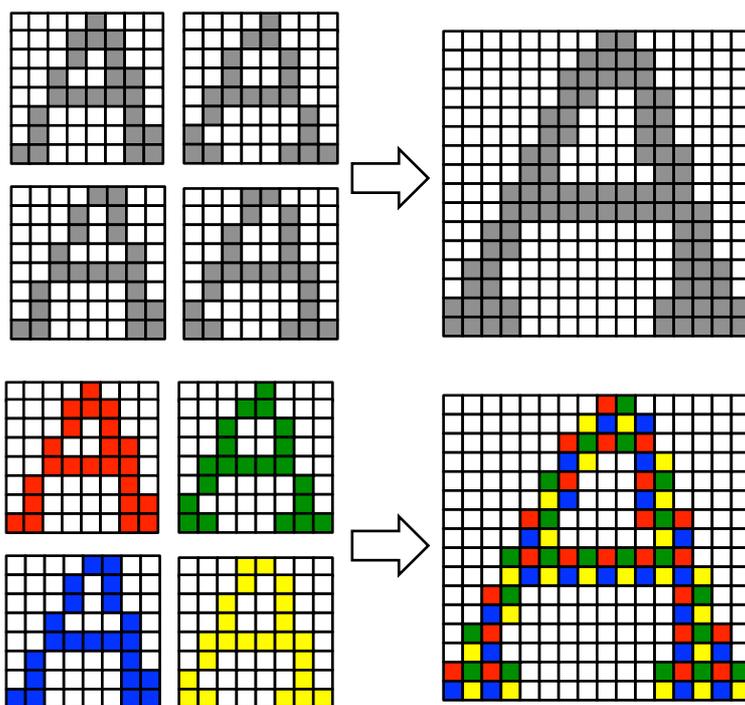


図 2.8 複数画像からの超解像処理の説明

この手法は静止画に対しては効果がある。しかし、静止画を撮影するための画像センサの画素数は、ディスプレイの解像度に対して十分に大きいため、実用的に利用する場面は少ない。動画像に適用する場合、連続する数フレームを合成することになる。この手法が有効に機能するためには、それぞれのフレーム画に高周波成分の折り返し（エイリアス）が含まれている必要がある。しかし、動画像のフレーム画には折り返し成分が含まれないため、複数画像からの超解像は有効に機能しないと考えられる。

### 3章 エッジ成分の非線形変換による画像超解像

#### 3.1 合志の方法

図 3.1 に合志の方法のブロック図を示す[3]. まず, 入力画像からハイパスフィルタによって高周波成分を抽出する. これを 3 乗した後, 信号の振幅に制限を加え, 最後に入力画像と加算する. 合志の方法はアンシャープマスキングと類似している. 違いはハイパスフィルタの出力を 3 乗し, それにリミッタをかけていることである. リミッタはアンシャープマスキングでも一般的な処理であるから, 3 乗することだけが違いである.



図 3.1 合志の方法のブロック図

あるエッジ信号に合志の方法とアンシャープマスキングを適用して比較した結果を図 3.2 に示す. 処理後の信号を見ると, エッジが始まる位置(エッジ左端)とエッジ中央, およびエッジが終了する位置(エッジ右端)の 3 箇所で信号が変化し, 強調されている. 比較を容易にするために, エッジ中央での変化後の信号が一致するように両者のゲインを調整した. 合志の方法とアンシャープマスキングを比較すると, 高周波成分の強さによって強調の度合いが異なることがわかる. すなわち, 高周波成分の強度が強い箇所では合志の方法の方が, より強く強調する. 高周波成分の強度が弱い箇所では, 合志の方法の方が, 強調の度合いが小さい.

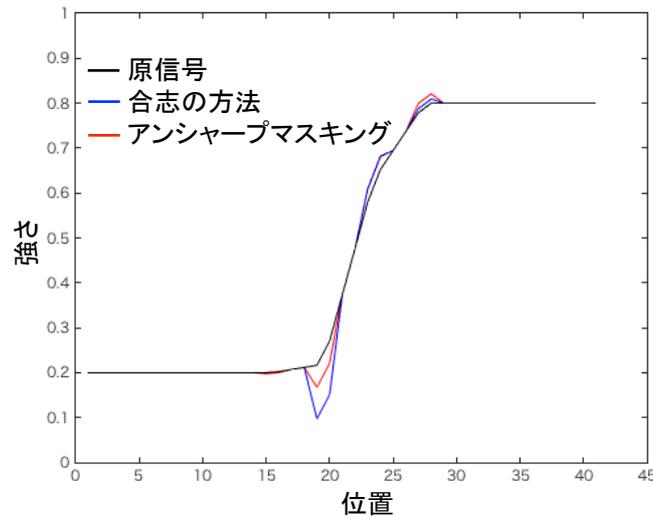


図 3.2 エッジ信号におけるアンシャープマスキングとの比較

結局，合志の方法は，アンシャープマスキングと類似の処理であって，高周波成分の強調をその成分の強さの 3 乗に比例して行う方法である．三角関数の 3 倍角公式（式(3.1)）から，交流成分を 3 乗すると，その 3 倍の周波数成分が発生する．したがって，合志の方法では，元画像に存在しない高周波成分が発生する．通常アンシャープマスキングでは，元画像に存在しない高周波成分は発生しない．

$$\begin{aligned} \sin^3 \theta &= -\frac{1}{4}\sin 3\theta + \frac{3}{4}\sin \theta \\ \cos^3 \theta &= \frac{1}{4}\cos 3\theta - \frac{3}{4}\cos \theta \end{aligned} \quad \dots (3.1)$$

図 3.3 に合志の方法のエッジ強調の仕組みを示す．ここで，横軸は周波数成分の強度であり，縦軸はその成分に対する強調度合いとする． $-1 < x < 1$ においては，3 乗の結果は元の値よりも小さくなり，それ以外では元の値以上となる．従って，アンシャープマスキングと比較すると，合志の方法は，周波数成分が強い場合には，その強さに従ってより強調され，周波数成分が弱い場合には，強調の度合いが小さいことになる．

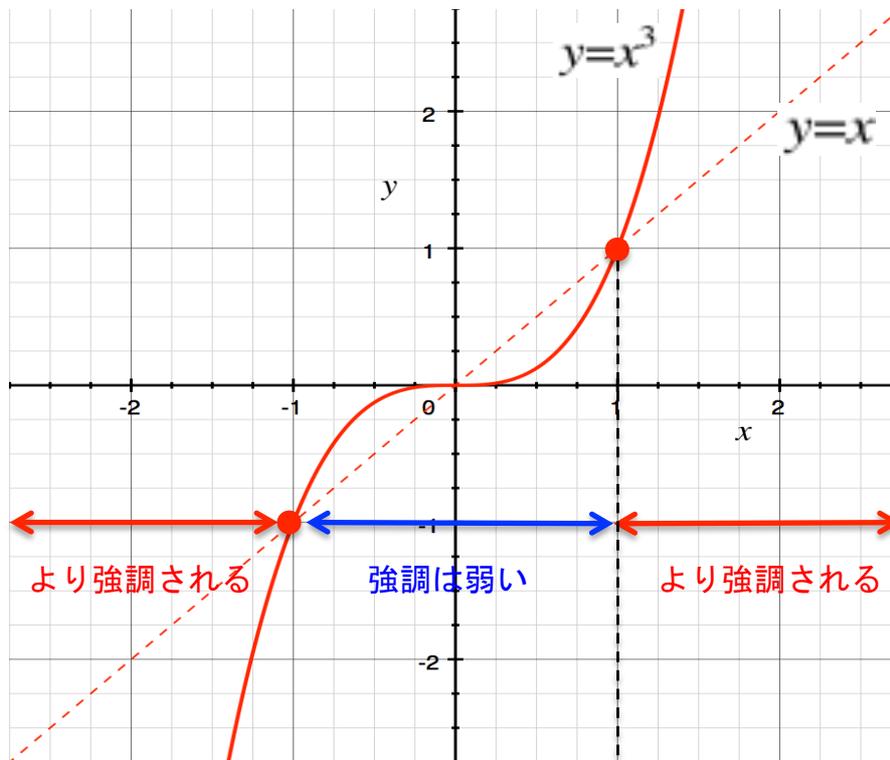


図 3.3 合志の方法のエッジの強調度合い

### 3.2 提案手法の考え方

図 3.4 にステップエッジ ( $x$ ) とブラーエッジ ( $x\_blur$ ) を示す。ブラーエッジを鮮鋭化する手法としてアンシャープマスクがある。これは、ブラーエッジをさらに平滑化し (図の  $x\_blur2$ )、 $x\_blur - x\_blur2$  という信号 (アンシャープマスク) を生成する。そして、アンシャープマスクをもとのブラーエッジに加算することで、鮮鋭化したエッジを生成するものである。鮮鋭化した信号はもとの信号よりも変化が急峻になっているので、シャープなエッジであるような印象を与える。しかし、この方法だけでは、もとのステップエッジを再現することはできない。

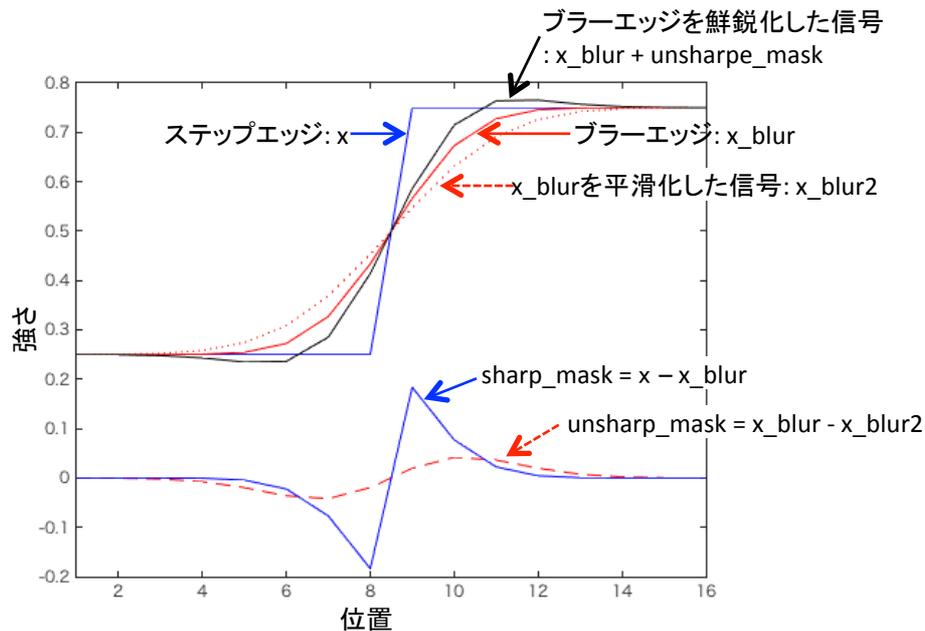


図 3.4 ステップエッジとブラーエッジ

ステップエッジとブラーエッジの差信号  $x - x\_blur$  をシャープマスクと呼ぶことにする。シャープマスクを推定することができれば、これをブラーエッジに加算することでステップエッジを再現することが可能である。シャープマスク  $x - x\_blur$  とアンシャープマスク  $x\_blur - x\_blur2$  を比較すると、アンシャープマスク信号の振幅を高めて、ピーク位置を近づけることでシャープマスクを近似できることがわかる。シャープマスクとアンシャープマスクの位置ごとの比をプロットすると図 3.5 を得る。したがって、アンシャープマスクの信号列に図 3.5 の信号列を、位置ごとに乗算すればシャープマスクを得ることができる。実際には図 3.5 の信号を直接得ることはできないので、これを近似する関数を用いることが考えられる。図 3.5 の関数はガウス分布に似ているので、適当なガウス分布を用いることが一つの方法である。ただし、分布の中央はアンシャープマスクのゼロクロスと一致させ、シャープマスクの値もゼロにする必要がある。したがって、図 3.5 の関数は中央でゼロになっていることが望ましい。したがって、アンシャープマスクからシャープマスクを推定するための非線形変換は図 3.6 のようになる。

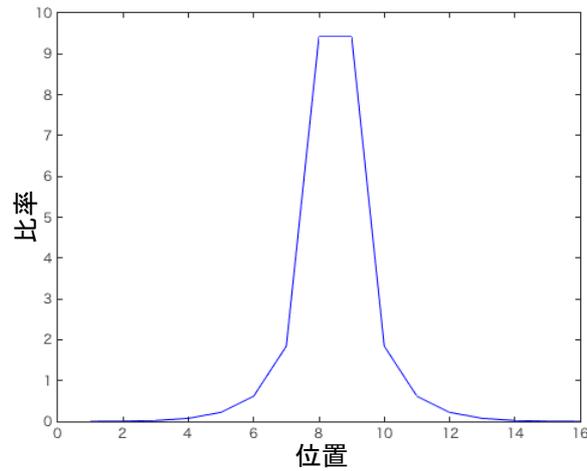


図 3.5 シャープマスクとアンシャープマスクの比率

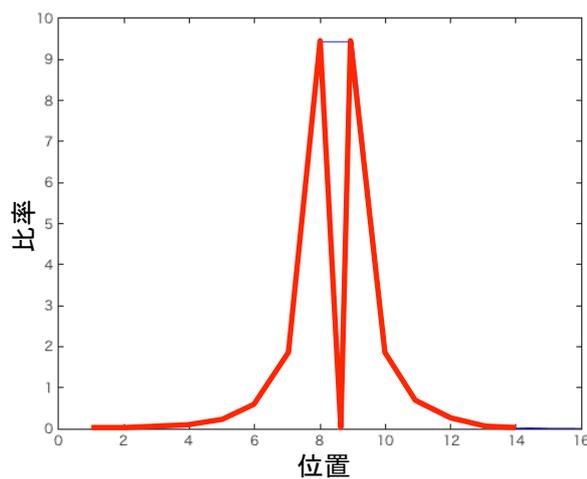


図 3.6 アンシャープマスクからシャープマスクを推定するための非線形変換

### 3.3 提案手法の概要

提案手法の処理手順は図 3.7 のようになる。まず、ブラーエッジからそれを平滑化した信号を減算することでアンシャープマスクを生成する。アンシャープマスクに、あらかじめ用意した非線形な加重を位置合わせして乗算する。ここでの位置合わせは、アンシャープマスクのゼロクロス为非線形加重の中央と合わせる処理である。これによってシャープマスクを生成する。シャープマスクはステップエッジとブラーエッジの差信号を近似する信号である。最後にシャープマスクとブラーエッジを加算することで、シャープなエッジを得る。

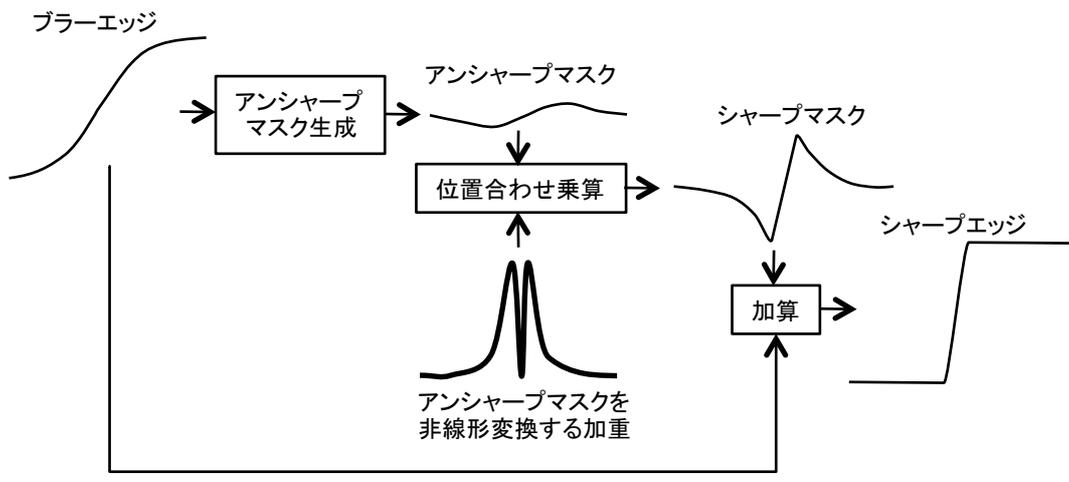


図 3.7 提案手法の処理手順

図 3.7 は一次元信号で説明したが, 実際の処理で用いる非線形変換の加重は 2 次元分布する加重である.

## 4 章 提案手法の実装と実験

### 4.1 提案手法の実装

提案手法の実装，実験は MATLAB を使用した．実験準備として， $512 \times 512$  画素の画像を，一旦  $256 \times 256$  画素に縮小して，それを Lanczos3 次で再び  $512 \times 512$  画素に拡大する．超解像を施すのは，この縮小拡大を行った後の画像に対してである．こうするのは，超解像の定義であるナイキスト周波数を超える周波数成分が生成されるか否かを判断するために，高周波成分を除去するためである．その画像に対して，鮮鋭化の従来手法であるアンシャープマスキングに加え，合志の方法による超解像，提案手法による超解像の 3 つの方法で処理を加えて結果を比較する．

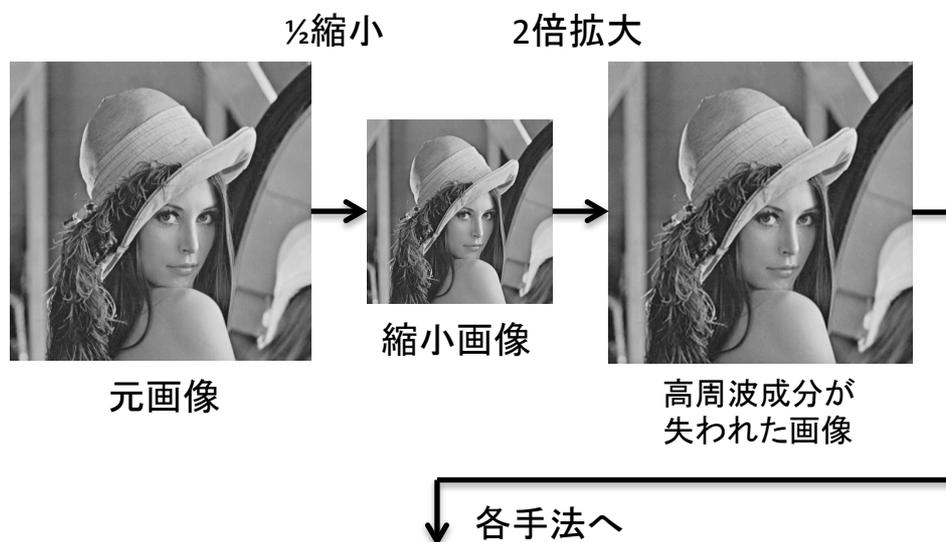


図 4.1 実験準備

次に，提案手法の実装について図 4.2 に示す．まず，高周波成分が失われた画像（以後これを元画像と記す．）に対してラプラシアンフィルタを施し，高周波成分を取り出す．また，Sobel フィルタによりエッジ検出を行い，2 値画像を生成する．次に，2 値画像が 1，つまり輪郭上に位置する画素位置に対して，ラプラシアンフィルタ処理後の画像からその周辺画素を取り出し，前述の非線形変換加重と掛け合わせ，その結果を保持する．輪郭上の全画素に対してこの処理を行い，最後に，その結果を元画像に足し合わせる．

提案手法におけるパラメータには，Sobel フィルタによるエッジ検出の閾値，非線形変換加重の行列サイズ，加重を近似する際に用いるガウス分布の分散，

最後に加算する際の定数倍  $\alpha$  (エッジ強度とする.) がある. エッジ検出の閾値については, あらかじめ画像背景に輪郭線が現れない程度に設定している.

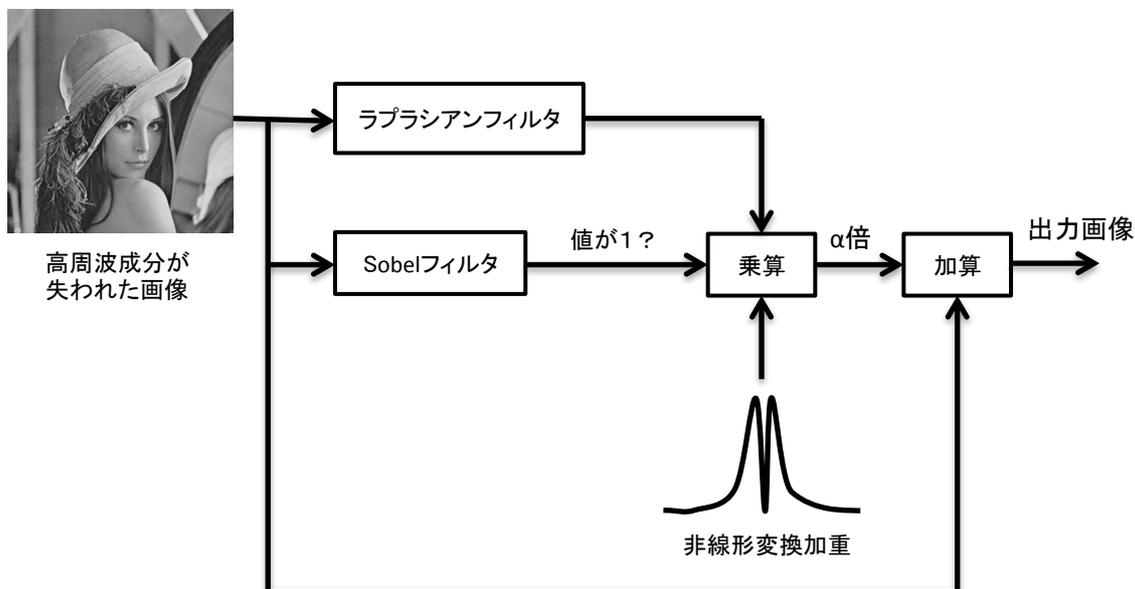


図 4.2 提案手法の処理手順

## 4.2 実験結果

実験に用いた元画像を図 4.3 に示す. 実験結果として, アンシャープマスキング, 合志の方法による超解像, 提案手法による超解像の 3 つの手法による出力結果を, 図 4.4, 図 4.5, 図 4.6 にそれぞれ示す. この際の提案手法のパラメータは, 非線形変換加重の行列サイズを 9, 分布の分散を 2.0, エッジ強度を 1.5 とした.



図 4.3 元画像



図 4.4 アンシャープマスキングによる出力結果



図 4.5 合志の方法による出力結果



図 4.6 提案手法による出力結果

また、各画像に対して 2 次元 FFT を施した結果を図 4.7 に示す。

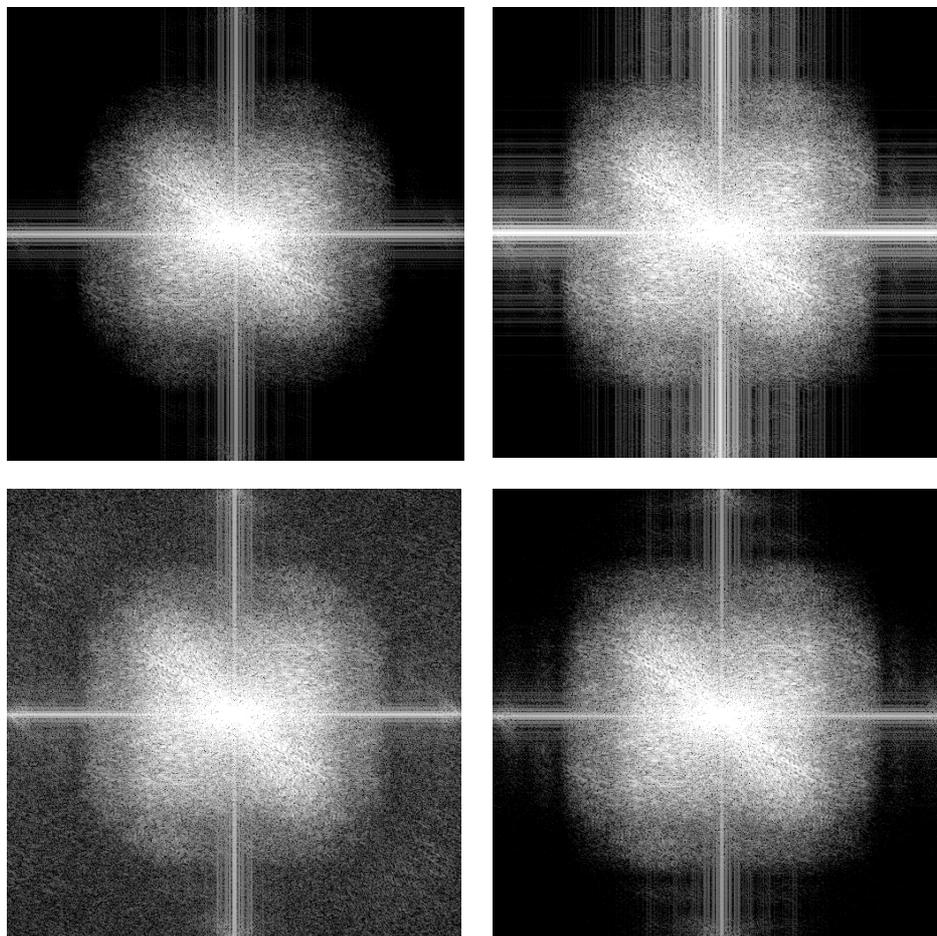


図 4.7 2 次元 FFT の結果  
元画像 (左上), アンシャープマスキング (右上)  
合志の方法 (左下), 提案手法 (右下)

また、元画像にない高周波成分が生成されているか否かを明確にするために、元画像に対して 2 次元 FFT を施し、円形状のローパスフィルタに通した後、2 次元逆 FFT を施した。その画像を用いて処理した後の 2 次元 FFT の各結果を図 4.8 に示す。図 4.8 中の左上の画像上にある赤円は実際に使用したローパスフィルタの範囲を示している。このとき、円の半径は 150 とし、その範囲外の成分は完全にカットしている。このフィルタリングにおいては、実画像に復元した際に、見かけ上変化が分からない程度のカット率に設定している。

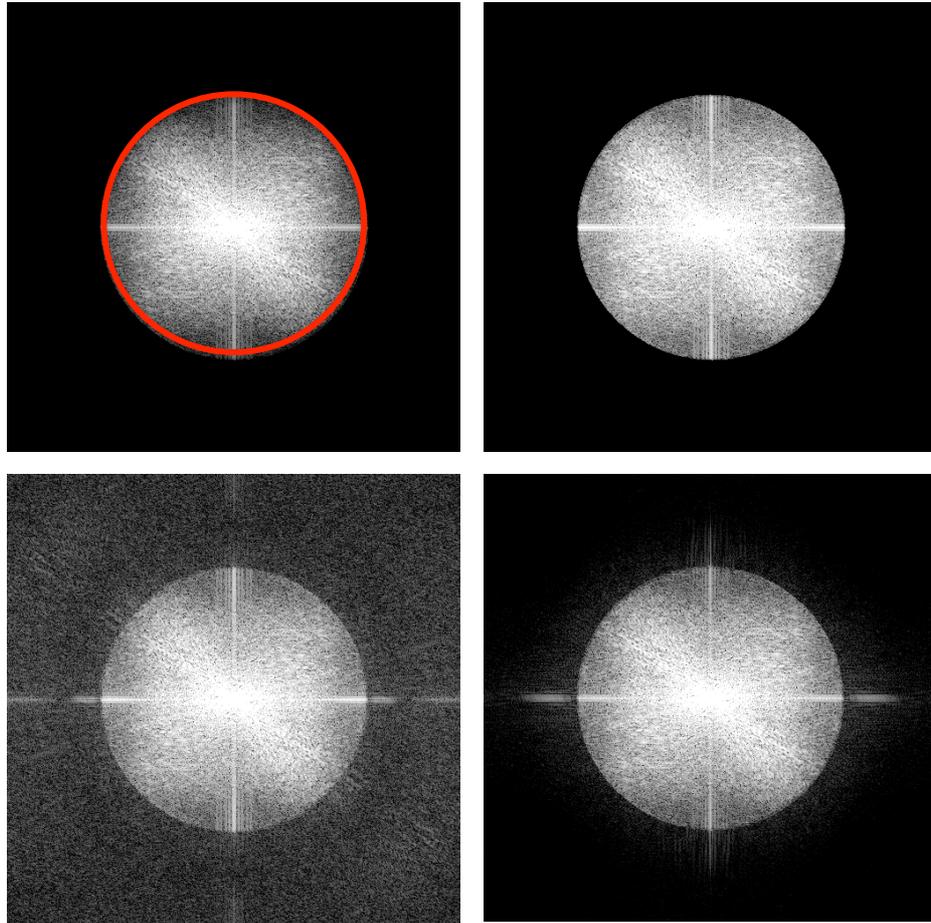


図 4.8 高周波除去時の 2 次元 FFT の結果  
元画像 (左上), アンシャープマスキング (右上)  
合志の方法 (左下), 提案手法 (右下)

### 4.3 考察

本研究の実験結果を比較するときの観点としては、視覚的に良くなっているか否か、高周波成分が増えているか否か、の 2 点がある。

はじめに、視覚的な面について考察する。提案手法については、アンシャープマスキングと比較すると、背景や肌に現れるノイズが少なく、かつエッジの強調もより良くなされている。合志の方法と比較しても、平面はノイズがより少なく滑らかであり、エッジの強調も同程度になされている印象を受ける。

次に、周波数成分について考察する。図 4.8 右上のアンシャープマスキングの FFT 結果を見ると、使用した円形のローパスフィルタの内側のみが強調され、

それより外側の周波数帯には、元画像に存在しない高周波成分は生成されていないことが分かる。その一方、合志の方法については、多量の高周波成分が生成されており、提案手法についても、比較的僅かではあるが高周波成分が生成されていることが確認できる。

最後に、提案手法実装の際のパラメータに関して考察する。非線形変換加重の行列サイズを大きくすると、ノイズの軽減に繋がることが確認できた。しかし、行列サイズが大きすぎると、計算コストが増大するため、非線形超解像のメリットが少なくなる可能性がある。また、加重分布の分散を大きくすると、非線形変換加重の行列要素として、比較的大きな値をとることになり、結果的にエッジがより強調されることが確認できた。しかし、提案手法の根本であるエッジ圧縮を考慮すると、出来るだけ小さな分散、または、画像の拡大率に応じた値に設定すべきだと思われる。

これら 2 つのパラメータは、どちらかを決めると、もう一方の最適値が自動的に決定されるべきであると考えられるが、執筆時点では、2 つのパラメータ間の関係を明確にすることは出来なかった。

## 5章 結論

本研究では、非線形変換による超解像処理である合志の方法をヒントに、エッジを圧縮し急峻にする新たな超解像手法を実装し、アンシャープマスキング及び合志の方法と比較を行った。

その結果、提案手法によって、元画像に存在しない高周波成分が生成されること、合志の方法と同程度のエッジ強調を図れることが確認できた。

今後の展開としては、高周波成分が生成されること、精度の高いエッジ強調を持つことから、新たな1つの超解像技術として使用されることが期待される。

今後の課題としては、提案手法のパフォーマンスを最大限に発揮するために、どのようなパラメータ調整を行うべきかを明確にする必要がある。また、リアルタイム処理が可能なほど計算コストが少ないか否か計測することも今後の課題である。

## 参考文献

- [1] 合志 清一, 「最新 超解像アルゴリズムの研究」, Interface, CQ 出版社, 2015 年 6 月号, pp.82-90.
- [2] 延原 肇 他, 「超解像処理アルゴリズム入門」, Interface, CQ 出版社, 2015 年 6 月号, pp.28-38.
- [3] Seiichi GOHSHI, A New Processing Method For Video -Reproduce the Frequency Spectrum Exceeding the Nyquist Frequency-, 47-52.

## 謝辞

本研究に際して、最後まで親切丁寧にご指導頂いた蚊野浩教授に深謝致します。同様に、以前の指導教官であった岡田憲志元教授に深謝致します。また、精神面で応援頂き、生活面で援助頂いた家族に深謝致します。