

博士論文

実数型直交変換における Sign-only Synthesis に関する研究

九州工業大学大学院工学研究科電気工学専攻

楊 智梅

2007年2月

# 目次

第1章 序論	2
第2章 Sign-only Synthesis	5
2.1 緒言	5
2.2 Phase-only Synthesis	6
2.3 Phase-only Synthesis の特徴	11
2.4 Sign-only Synthesis	14
2.5 種々の Sign-only Synthesis	17
2.5.1 離散コサイン変換	17
2.5.2 ウォルシュ・アダマール変換	22
2.5.3 ハートレー変換	25
2.6 Sign-only Synthesis と Phase-only Synthesis の比較	27
2.6.1 SOI と POI	27
2.6.2 SOS と POS の相互相関値と局所分散値	32
2.7 結言	36

<b>第 3 章 Sign-only Syntheis の特徴</b>	<b>37</b>
3.1 緒言	37
3.2 各エッジ・モデルにおける Sign-only Synthesis の波形	37
3.2.1 ステップ・エッジ	41
3.2.2 ランプ・エッジ	43
3.2.3 ピーク・エッジ	45
3.2.4 ルーフ・エッジ	47
3.2.5 エッジの位置とノイズの関係	49
3.3 画像の Sign-only Syntheis	50
3.4 Sign-only Syntheis のノイズの低減	53
3.4.1 重畳型 SOS (Superimposed SOS : S-SOS)	53
3.4.2 局所的 SOS	59
3.5 結言	65
<b>第 4 章 Sign-only Synthesis (SOS) の応用</b>	<b>66</b>
4.1 緒言	66
4.2 ぼけ画像のシャープニング	67
4.2.1 ラプラシアン	67
4.2.2 アンシャープ・マスキング	71
4.2.3 エッジ検出	73

	iii
4.2.4 画像劣化のモデル化 . . . . .	75
4.2.5 Sign-only Synthesis を用いたシャープニング . . . . .	80
4.2.6 シミュレーション . . . . .	86
4.3 結論 . . . . .	93
<b>第5章 結論</b>	<b>94</b>
<b>参考文献</b>	<b>96</b>
<b>謝辞</b>	<b>99</b>
<b>研究業績</b>	<b>I</b>

## 目 次

2.1	原画像 (福岡ドーム)	9
2.2	POS (福岡ドーム)	9
2.3	原画像 (植物の葉)	10
2.4	POS (植物の葉)	10
2.5	九州工業大学の校章	12
2.6	人物	13
2.7	原画像 (福岡ドーム)	20
2.8	DCT の SOS (福岡ドーム)	20
2.9	原画像 (植物の葉)	21
2.10	DCT の SOS (植物の葉)	21
2.11	ウォルシュ・アダマール変換の SOS(福岡ドーム)	24
2.12	ウォルシュ・アダマール変換の SOS(植物の葉)	24
2.13	ハートレー変換の SOS(福岡ドーム)	26
2.14	ハートレー変換の SOS(植物の葉)	26
2.15	POI (九州工業大学の校章)	28

2.16 DCT の SOI (九州工業大学の校章) . . . . .	28
2.17 ウォルシュ・アダマール変換の SOI (九州工業大学の校章) . . . . .	29
2.18 ハートレー変換の SOI (九州工業大学の校章) . . . . .	29
2.19 POI (人物) . . . . .	30
2.20 DCT の SOI (人物) . . . . .	30
2.21 ウォルシュ・アダマール変換の SOI (人物) . . . . .	31
2.22 ハートレー変換の SOI (人物) . . . . .	31
2.23 POS と SOS の局所分散値の比較 (福岡ドーム) . . . . .	34
2.24 POS と SOS の局所分散値の比較 (植物の葉) . . . . .	35
3.1 ステップ・エッジ . . . . .	39
3.2 ランプ・エッジ . . . . .	39
3.3 ピーク・エッジ . . . . .	40
3.4 ルーフ・エッジ . . . . .	40
3.5 エッジが信号の中心の場合 . . . . .	41
3.6 左に 3 ピクセルシフトした結果 . . . . .	42
3.7 左に 6 ピクセルシフトした結果 . . . . .	42
3.8 エッジが信号の中心の場合 . . . . .	43
3.9 左に 3 ピクセルシフトした結果 . . . . .	44
3.10 左に 6 ピクセルシフトした結果 . . . . .	44

3.11 エッジが信号の中心の場合 . . . . .	45
3.12 左に3ピクセルシフトした結果 . . . . .	46
3.13 左に6ピクセルシフトした結果 . . . . .	46
3.14 エッジが信号の中心の場合 . . . . .	47
3.15 左に3ピクセルシフトした結果 . . . . .	48
3.16 左に6ピクセルシフトした結果 . . . . .	48
3.17 原画像 (女性) . . . . .	51
3.18 SOS 画像 (女性) . . . . .	51
3.19 原画像 (花) . . . . .	51
3.20 SOS 画像 (花) . . . . .	51
3.21 原画像 (男性) . . . . .	52
3.22 SOS 画像 (男性) . . . . .	52
3.23 原画像 (静物) . . . . .	52
3.24 SOS 画像 (静物) . . . . .	52
3.25 シフト量と平坦部およびエッジ部の局所分散値 . . . . .	54
3.26 重畳型 SOS の原理 . . . . .	55
3.27 人物 . . . . .	57
3.28 植物の葉 . . . . .	58
3.29 局所的 SOS の原理 . . . . .	60
3.30 局所的処理結果 (人物) . . . . .	62

3.31 局所的処理結果 (植物の葉) . . . . .	64
4.1 ラプラシアン処理結果 (人物) . . . . .	69
4.2 ラプラシアン処理結果 (植物の葉) . . . . .	70
4.3 アンシャープマスキング (人物) . . . . .	72
4.4 アンシャープマスキング (植物の葉) . . . . .	72
4.5 カーシュ・マスク . . . . .	73
4.6 エッジ検出画像 (人物) . . . . .	74
4.7 エッジ検出画像 (植物の葉) . . . . .	74
4.8 原画像 (福岡ドーム) . . . . .	76
4.9 劣化画像 (福岡ドーム : $\sigma = 0.3$ ) . . . . .	77
4.10 劣化画像 (福岡ドーム : $\sigma = 0.5$ ) . . . . .	78
4.11 劣化画像 (福岡ドーム : $\sigma = 0.9$ ) . . . . .	79
4.12 ぼけ画像のラプラシアン画像 ( $\sigma = 0.5$ ) . . . . .	81
4.13 ぼけ画像の重畳型 SOS 画像 ( $\sigma = 0.5$ ) . . . . .	81
4.14 標準偏差を揃える原理 . . . . .	82
4.15 $\alpha\beta$ の特性曲線 . . . . .	84
4.16 $\alpha$ の値 (平坦部の重み) . . . . .	85
4.17 $\beta$ の値 (エッジ部の重み) . . . . .	85
4.18 福岡ドーム ( $\sigma = 0.3$ ) . . . . .	87



4.19 福岡ド-△ ( $\sigma = 0.5$ ) . . . . .	88
4.20 福岡ド-△ ( $\sigma = 0.9$ ) . . . . .	89
4.21 花 ( $\sigma = 0.3$ ) . . . . .	90
4.22 花 ( $\sigma = 0.5$ ) . . . . .	91
4.23 花 ( $\sigma = 0.9$ ) . . . . .	92

## 略語一覧

POS	(Phase-only Synthesis): 位相のみの逆変換
POI	(Phase-only Image) : 位相のみの逆変換に絶対値をとった画像
SOS	(Sign-only Synthesis): 符号のみの逆変換
SOI	(Sign-only Image): 符号のみの逆変換に絶対値をとった画像
DCT	(Discrete cosine transform): 離散コサイン変換
S-SOS	(Superimposed Sign-only Synthesis): 重畳型 SOS
L-SOS	(Local Sign-only Synthesis): 局所的 SOS
PSF	(Point Spread Function): 点広がり関数
SNR	(Signal-to-Noise Ratio): 信号対雑音比

# あらまし

本論文では，実数型直交変換の Sign-only Synthesis (SOS) を提案し，その特徴やノイズの削減方法について考察する．また SOS の応用の一つとして，ぼけ画像のシャープニング法を提案する．フーリエ変換において振幅をすべて一定とし，位相のみで逆変換を行う手法は Phase-only Synthesis (POS) と呼ばれている．本研究で提案する SOS は，実数型直交変換の符号のみの逆変換のことである．実数型直交変換の変換係数の符号は，フーリエ変換において位相が  $0$  または  $\pi$  の時と等価であると考えられる．

画像に対して SOS を行った場合，平坦部でランダムなノイズが発生する．本研究で提案する重畳型 SOS (Superimposed SOS) は SOS 画像の平坦部で発生するランダムなノイズを効果的に削減できることがわかった．さらに SOS の応用の一つとして，ぼけ画像の新しいシャープニング法を提案した．ぼけ画像のシャープニング法としてはラブラシアンを用いたアンシャープマスキングが一般的であるが，本研究では，ラブラシアンと SOS の長所をそれぞれ生かした新しいアンシャープマスキング法を提案する．

多くのシミュレーションの結果から，重畳型 SOS が平坦部でのノイズを劇的に削減できることが分かった．また，新しいシャープニング法は従来法よりも効果的であることが分かった．

# 第1章 序論

本論文では，実数型直交変換における符号のみの逆変換，すなわち Sign-only Synthesis (SOS) について述べる．

フーリエ変換は信号解析など工学，理学の広い分野で利用されている重要な手法の一つである．1次元信号にフーリエ変換を行うことによって，時間波形がどのような周波数成分から構成されているかを調べることができる．

画像にフーリエ変換を行うと，空間的な濃度分布が空間周波数スペクトルに分解される．この空間周波数スペクトルを振幅スペクトルと位相スペクトルに分けて考えた場合，振幅スペクトルは画像の明暗すなわち濃度に関する情報を，位相スペクトルはエッジや輪郭に関する情報を持っていることが知られている [1]．画像に実数型の直交変換を行った場合も，フーリエ変換と同様に空間的な濃度分布が変換係数に分解される．このとき，フーリエ変換の空間周波数スペクトルと直交変換の変換係数を対応させて考えると，フーリエ変換の振幅スペクトルは直交変換の変換係数の振幅に，位相スペクトルは符号に対応させることができる．

位相情報は画像解析にとっては重要な役割を果たすことを知られている．位相スペクトルを用いたテクスチャ解析，視覚信号の検出と識別など様々な分野で活躍してい

る．フーリエ変換の位相項のみを用いて逆変換を行うこと，すなわち位相のみの逆変換は Phase-only Synthesis (POS) と呼ばれている．POS は信号の高周波成分を強調するため，画像のエッジや輪郭線を強調・抽出できる手法として医療の分野 (X線写真，乳ガン検診等) などで用いられている [2] ．

本研究では，フーリエ変換における位相のみの逆変換 (POS) を基礎として，実数型の直交変換における符号のみの逆変換 (SOS) を提案する．POS は複素数計算が必要であるが，SOS は実数入力に対して実数の変換係数が得られるため，実数計算のみで行えるという特徴を持つ．実数型の直交変換には様々なものがあるが，本論文では代表的なものについてのみ述べる．特に画像圧縮などでもよく用いられている離散コサイン変換 (DCT) は，入力信号を偶対称にしたフーリエ変換と等価であるため，POS と同様な結果を高速に得ることができると考えられる．このような性質から，本研究では実数型直交変換として DCT を用いることにする．

第2章では，POS と SOS の原理と特徴を述べ，それらの比較を行う．POS と SOS を比較することによって，SOS は POS と同様な性質を持っていることを示す．また，種々の直交変換における SOS の性質を調べ，計算速度やノイズの発生量などから離散コサイン変換が実数型直交変換の中でもベストな手法であることを示す．

第3章では，SOS の特徴をエッジ・モデルを用いて考察する．ここでは，代表的なエッジ・モデルについてラプラシアンと SOS の波形を示し比較している．さらに画像に対して SOS を行った場合に平坦部で発生するノイズの削減法について提案する．本研究で提案する「重畳型 SOS (Superimposed SOS)」は，SOS 画像の平坦部で発生す

るランダムなノイズを効果的に削減できる．

第4章では，SOSの応用として，ぼけ画像の新しいシャープニング法を提案する．SOSは画像のエッジ部や輪郭部を強調するため，ぼけ画像のシャープニングに効果的であると考えられる．ぼけ画像のシャープニング法としてはラプラシアンを用いたアンシャープマスキングが一般的であるが，本研究では，ラプラシアンとSOSの長所をそれぞれ生かした新しいアンシャープマスキング法を提案する．

第5章はまとめであり，本研究のオリジナリティと今後の問題点を述べる．

## 第2章 Sign-only Synthesis

### 2.1 緒言

入力信号がどのような周波数成分から構成されているかを調べることは、時間波形などの1次元信号の処理・解析において重要な手段となっている。2次元信号である画像情報に対しても、濃淡情報の空間的な広がりに着目して空間周波数という概念を導入し、入力画像がどのような空間周波数成分から構成されているかを調べたり、空間周波数領域で種々の処理を施したりすることが行われる。

フーリエ変換は信号解析の分野でよく用いられる重要な手法であり、画像にフーリエ変換を行うことによって、濃淡情報は  $x$  および  $y$  方向の空間周波数を表す無数の正弦波に分解される。この分解された正弦波は空間周波数スペクトルと呼ばれる。

画像のフーリエ変換において空間周波数スペクトルは、振幅スペクトルと位相スペクトルに分解でき、振幅スペクトルは画像の明暗すなわち濃度に関する情報を持ち、位相スペクトルは画像にとって不可欠な位置情報を持っていることが知られている [3] [4] [5]。

位相スペクトルは重要な情報であるため画像解析において様々な分野で利用されている。例えばテクスチャの解析などである [6]。特に位相のみの相関 (Phase-only Cor-

relation: POC [7] [8]) は, 位相情報が点や線の位置情報を持つという事から, 並進シフトの検出や指紋認証などに利用されている. また, 位相のみの逆変換 (Phase-only Synthesis:POS [2] [9] [10]) は, 対象物の位置, テクスチャ, エッジなどの特徴を強調するため X 線写真の解析や乳ガン検診など医療分野で多く利用されている.

フーリエ変換は複素数の直交変換であるが, 実数型の直交変換の場合, フーリエ変換の振幅スペクトルと位相スペクトルは, 変換係数の振幅項と符号項 (等価位相項) で表される. 本研究では Phase-only Synthesis に基づいて実数型直交変換における符号のみの逆変換である Sign-only Synthesis (SOS) を提案する.

本章では POS と SOS の原理と特徴を述べ, それらの比較を行う.

## 2.2 Phase-only Synthesis

Phase-only Synthesis(POS) はフーリエ変換によって得られた空間周波数スペクトルにおいて振幅スペクトルをすべて一定とし, その位相スペクトルのみで逆変換を行うことである.

従来から, 信号の重要な特徴の多くはフーリエ変換の位相に表れることが知られている. 特に, 一定の振幅またはアンサンブル平均振幅と, 信号の位相を合成することによって行われる POS は原信号の持つ特徴を多く含んでいることが知られている [3] [4] [5].

信号と POS との間の類似性を言及した最初の文献の一つ [9] は X 線の結晶学の分野である.



デジタル画像における離散フーリエ変換は次の式で表される。

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j\frac{2\pi}{N}(ux+vy)} = |F(u, v)| e^{j\theta(u, v)} \quad (2.1)$$

ここで  $u, v$  はフーリエスペクトル領域での空間周波数変数であり  $u = 1/x, v = 1/y$  である。  $|F(u, v)|$  と  $\theta(u, v)$  はそれぞれフーリエスペクトル  $F(u, v)$  の振幅と位相であり、振幅スペクトルと位相スペクトルと呼ばれている。

振幅スペクトル情報あるいは Magnitude-only Synthesis (MOS [2]) は次の式で表される。

$$F_M(u, v) = |F(u, v)| \quad (2.2)$$

また、Phase-only Synthesis (POS) は次のように表すことができる [2]。

$$F_P(u, v) = M(u, v) e^{j\theta(u, v)} \quad (2.3)$$

ここで、振幅関数  $M(u, v)$  は一定の値とする。

また、位相項を1ビットの情報とすると位相関数 (Phase function) は次の式で表される。

$$Q[\theta(u, v)] = \begin{cases} 0 & \text{if } |\theta(u, v)| \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2.4)$$

以上のことから POS を2次元逆フーリエ変換の形で書くと次の式となる。

$$f_{POS}(x, y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} F_{POS}(u, v) e^{j\frac{2\pi}{N}(ux+vy)} \quad (2.5)$$

ここで,

$$F_{POS}(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{if } |\theta(u, v)| \leq \frac{\pi}{2} \\ -1 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.6)$$

である.

$f_{POS}(x, y)$  に対して, 振幅と位相をそれぞれ  $|f_{POS}(x, y)|$  と  $\theta(x, y)$  とすれば  $f_{POS}(x, y)$  は次のように表すことができる.

$$f_{POS}(x, y) = |f_{POS}(x, y)| e^{j\theta(x, y)} \quad (2.7)$$

ここで,  $|f_{POS}(x, y)|$  は POS に対して Phase-only Image(POI) と呼ぶ [2].

POS の定義式 (2.5) を見ると, フーリエスペクトルでの低い空間周波数の位相は 0 位相か 0 に近い位相であり, その一方で高い空間周波数の位相は  $\pm \frac{\pi}{2}$  の近傍の位相であることがわかる.

図 2.1 ~ 2.4 に原画像と POS を行った処理結果を示す. POS の画像を見ると, 原画像の多くの重要な特徴の中でも輪郭情報や対象物の位置に関する特徴が POS 画像で保存されていることがわかる.

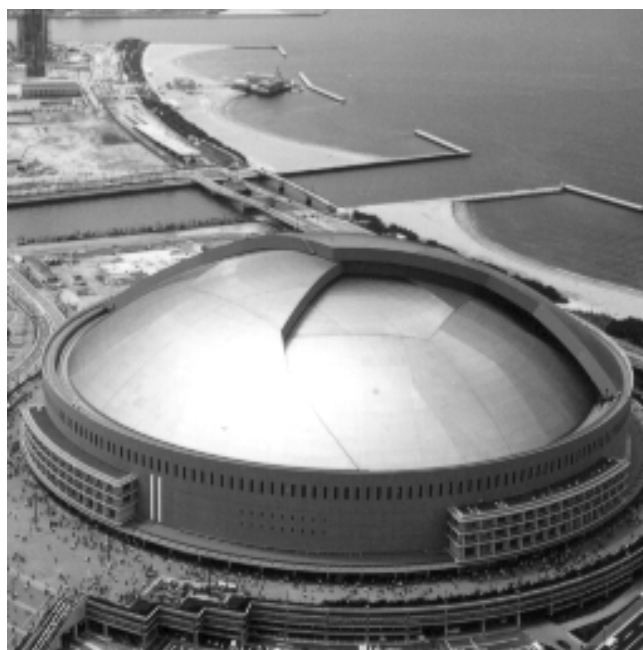


図 2.1: 原画像 (福岡ドーム)

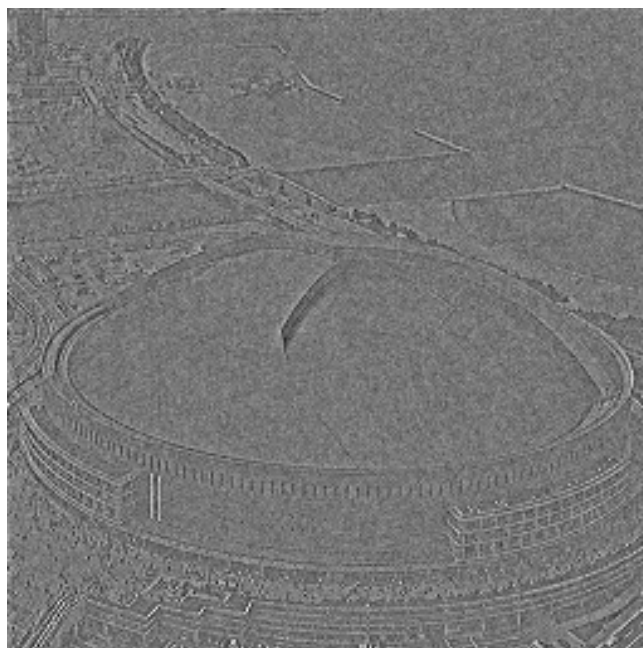


図 2.2: POS (福岡ドーム)



図 2.3: 原画像 (植物の葉)

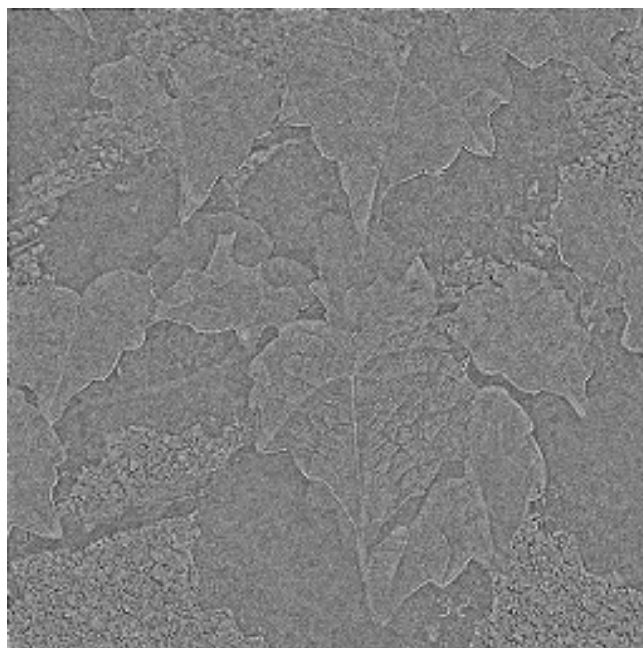


図 2.4: POS (植物の葉)

## 2.3 Phase-only Synthesis の特徴

Phase-only Synthesis(POS) についてまとめる前に, Phase-only Image(POI) を用いて POS がどのような特徴を持っているかについて検証する.

POI は前節で説明したように位相のみの逆変換を行った信号に対して絶対値をとった画像である.

図 2.5 ~ 2.6 に POI の例を示す. これらの画像は  $256 \times 256$  ピクセルの濃淡画像にしきい値処理を行い, 得られた二値画像に対して POI を行ったものである. POI によって原画像のテクスチャ, 輪郭線や細かいエッジなどが抽出されていることがわかる. これは POS が高周波成分を強調し, それによって画像の輪郭部分が強調されるためである. また, POS は原画像の多くの重要な特徴 (テクスチャ特徴や形に関する特徴など) を持っているため, 原画像と多くの類似点を持っていることがわかる.

また, POS によって作成された画像は, 原画像の微分値に似た画像となることが知られており, 理論的にもほとんど原画像の一階微分または二階微分となることが示されている [5].

このような特徴から POS は原画像の特定の性質を強調するため, 画像の内容に関する解析や認識などを行う処理に利用することができると考えられる.



(a) 原画像



(b) 二値画像



(c) POI

図 2.5: 九州工業大学の校章



(a) 原画像



(b) 二値画像



(c) POI

图 2.6: 人物

## 2.4 Sign-only Synthesis

これまで述べたように，フーリエ変換は画像を空間周波数成分に分解することができるが，離散コサイン変換（DCT）などの実数型の直交変換によっても画像を変換係数という周波数成分に分解することができる．この変換係数を振幅と符号に分けて考えた場合，フーリエ変換の振幅スペクトルや位相スペクトルと同様な性質を持っていると考えられる．

本研究ではフーリエ変換における Phase-only Synthesis を基礎として，実数型直交変換における Sign-only Synthesis(SOS) [11] [12] を提案する．SOS は変換係数の振幅をすべて一定とし，符号の情報のみで逆変換を行うことである．

ここでは実数型直交変換の中でも代表的なものであり，画像圧縮などでよく用いられている離散コサイン変換（DCT）を用いて SOS を説明する．

DCT は，二次元対称性のフーリエ変換に相当することから，

$$f(i, j) \xrightarrow{DCT} D(m, n) \quad (2.8)$$

と書くと， $D(m, n)$  は実数の DCT 係数となる．ここで

$$D(m, n) = |D(m, n)| e^{j\theta_D(m, n)} \quad (2.9)$$

とおくと，DCT の等価位相  $\theta_D(m, n)$  および等価位相項  $e^{j\theta_D(m, n)}$  は次のように表される．

$$\theta_D(m, n) = \begin{cases} 0 & 0 \leq D(m, n) \\ \pi & 0 > D(m, n) \end{cases} \quad (2.10)$$

$$e^{j\theta_D(m, n)} = \begin{cases} 1 & 0 \leq D(m, n) \\ -1 & 0 > D(m, n) \end{cases} \quad (2.11)$$



この等価位相項のみで逆 DCT を行うと

$$\phi(i, j) \xleftarrow[\text{逆 DCT}]{} e^{j\theta_D(m, n)} \quad (2.12)$$

となる。ここで、 $\phi(i, j)$  は振幅  $|D(m, n)|$  の値をすべて 1 とおいて逆 DCT を行ったもので、Sign-only Synthesis(SOS) と呼ぶ。

また、 $\phi(i, j)$  において振幅を  $|\phi(i, j)|$ 、位相を  $\theta_\phi(i, j)$  とすれば、 $\phi(i, j)$  は次のように表すことができる。

$$\phi(i, j) = |\phi(i, j)| e^{j\theta_\phi(i, j)} \quad (2.13)$$

ここで、 $|\phi(i, j)|$  は POI に対して SOS における Sign-only Image(SOI) と呼ぶものである。

以上のことから実数型直交変換の SOS は次のように一般化することができる。

画像  $f(m, n)$  に対して、順変換および逆変換を次のように表す。

$$F(u, v) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) g(m, n, u, v) \quad (2.14)$$

$$f(m, n) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) h(m, n, u, v) \quad (2.15)$$

ここで、 $g(m, n, u, v)$  と  $h(m, n, u, v)$  がそれぞれ順変換、逆変換の変換核 (transformation kernel) とよばれ、画像  $f(m, n)$  によらない関数である。

変換核が次のように  $m, u$  の関数と  $n, v$  の関数の積で表されるとき、この変換は分離可能な変換と呼ばれる。

$$g(m, n, u, v) = g_1(m, u) g_2(n, v) \quad (2.16)$$

分離可能な変換核による変換は，画像  $f(m, n)$  の各行，各列にそった1次元変換によって求められる．

$$\tilde{f}(m, v) = \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) g_2(n, v) \quad (2.17)$$

$$F(u, v) = \sum_{m=0}^{M-1} \tilde{f}(m, v) g_1(m, u) \quad (2.18)$$

この関係は逆変換においても同様に成り立つ．

変換核が分離可能なとき，式(2.17)，(2.18)で示される変換式は行列を用いて次のように表すことができる．

$$\mathbf{F} = \mathbf{A} \mathbf{f} \mathbf{B}^t \quad (2.19)$$

ここで， $\mathbf{f}$  は画像， $\mathbf{F}$  は変換係数， $\mathbf{A}$ ， $\mathbf{B}$  は変換行列である．変換行列  $\mathbf{A}$ ， $\mathbf{B}$  が正則行列の時，逆行列  $\mathbf{A}^{-1}$ ， $\mathbf{B}^{-1}$  が存在し，逆変換は，

$$\mathbf{f} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{F} [\mathbf{B}^{-1}]^t \quad (2.20)$$

として求められる．変換行列の要素が実数を持ち， $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^t$ ， $\mathbf{B}^{-1} = \mathbf{B}^t$  が成り立つならば，変換行列は直交行列とよばれ，直交行列を用いた変換は直交変換と呼ばれる．

本研究の Sign-only Synthesis は式(2.20)の逆変換において変換係数  $\mathbf{F}$  の要素を1または-1とするものであり，次式で定義される．

$$\mathbf{F} = \mathbf{A} \mathbf{f} \mathbf{B}^t \quad (2.21)$$

$$\mathbf{f}' = \mathbf{A}^t \mathbf{F}' \mathbf{B}$$

ここで,

$$F' = \begin{cases} 1 & F \geq 0 \\ -1 & F < 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

である.

## 2.5 種々の Sign-only Synthesis

実数型直交変換では実数入力に対して実数の変換係数が得られる. 離散フーリエ変換 (discrete Fourier transform: DFT) [1] [13] では複素数計算が必要であるが, 実数型直交変換では実数計算のみですむという利点がある.

実数型直交変換には多くの変換があるが, ここでは代表的な実数型直交変換の Sign-only Synthesis をいくつか示す.

### 2.5.1 離散コサイン変換

離散コサイン変換 (discrete cosine transform: DCT) [1] [13] [14] は  $\cos$  関数を変換基底に用いた直交変換である.

$N$  標本点の 1 次元信号  $f(m)$  ( $m = 0, 1, \dots, N - 1$ ) に対する DCT は,  $f(m)$  を対称的に折り返し, 標本点を標本間隔の  $1/2$  だけずらした  $2N$  標本点の信号に対する離散フー

リ工変換と等価である．すなわち

$$\begin{aligned}
 F(u) &= \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{m=-N}^{N-1} f(m) \exp \left\{ -j2\pi \frac{(m+1/2)u}{2N} \right\} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{m=0}^{N-1} f(m) \left[ \exp \left\{ j2\pi \frac{(m+1/2)u}{2N} \right\} + \exp \left\{ -j2\pi \frac{(m+1/2)u}{2N} \right\} \right] \\
 &= \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{m=0}^{N-1} f(m) \cos \left\{ \frac{(2m+1)u}{2N} \pi \right\}
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

となる．式(2.23)では，係数として  $\sqrt{2/N}$  がかかっているが， $u=0$  の場合には  $1/\sqrt{N}$  とする必要がある．この点を考慮すると， $f(m)$  に対する DCT および逆 DCT (IDCT) は次の式(2.24)で与えられる．

$$\begin{aligned}
 \text{DCT} : F(u) &= \sqrt{\frac{2}{N}} C(u) \sum_{m=0}^{N-1} f(m) \cos \left[ \frac{(2m+1)u}{2N} \pi \right] \\
 \text{IDCT} : f(m) &= \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{u=0}^{N-1} C(u) F(u) \cos \left[ \frac{(2m+1)u}{2N} \pi \right]
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

ただし，

$$C(u) = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & (u=0) \\ 1 & (u \neq 0) \end{cases} \tag{2.25}$$

である．また， $N \times N$  ピクセルの画像に対する 2次元 DCT，2次元 IDCT は次の式で

与えられる .

$$F(u, v) = \frac{2}{N} C(u) C(v) \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) \cos \left[ \frac{(2m+1)u}{2N} \pi \right] \cos \left[ \frac{(2n+1)v}{2N} \pi \right]$$

$$f(m, n) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} C(u) C(v) F(u, v) \cos \left[ \frac{(2m+1)u}{2N} \pi \right] \cos \left[ \frac{(2n+1)v}{2N} \pi \right]$$
(2.26)

ただし ,

$$C(w) = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & (w = 0) \\ 1 & (w \neq 0) \end{cases}$$
(2.27)

である . 以上から , 式 (2.26) の Sign-only Synthesis は次式で定義される [15] [16] [17] .

$$g(m, n) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} C(u) C(v) e^{j\theta_{uv}} \cos \left[ \frac{(2m+1)u}{2N} \pi \right] \cos \left[ \frac{(2n+1)v}{2N} \pi \right]$$
(2.28)

ここで ,

$$\theta_{uv} = \begin{cases} 0 & F(u, v) \geq 0 \\ \pi & F(u, v) < 0 \end{cases}$$
(2.29)

である .

図 2.7 ~ 2.10 に DCT による SOS の結果を示す .

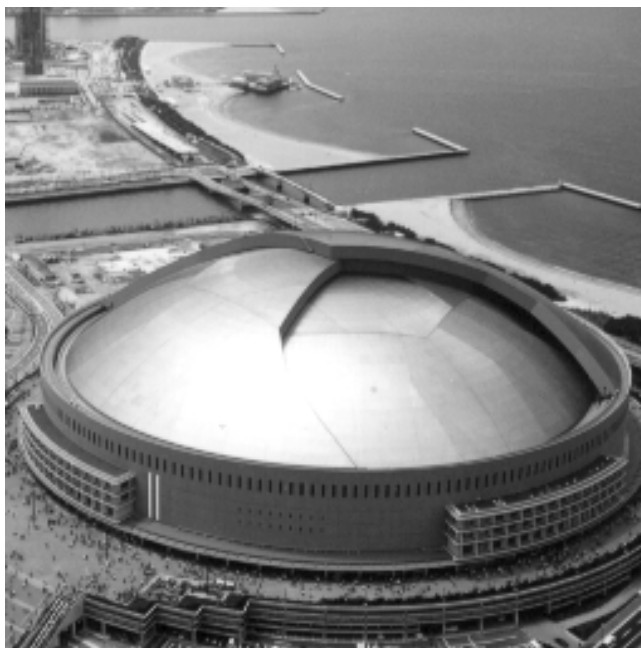


図 2.7: 原画像 (福岡ドーム)

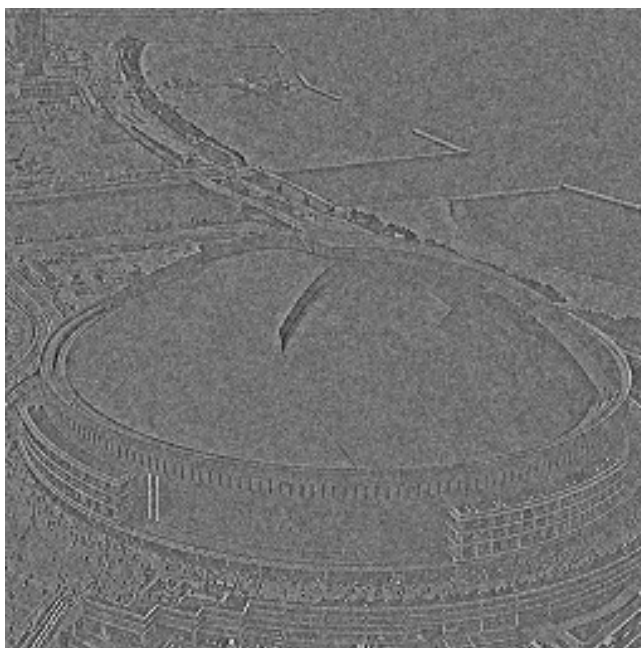


図 2.8: DCT の SOS (福岡ドーム)



図 2.9: 原画像 (植物の葉)

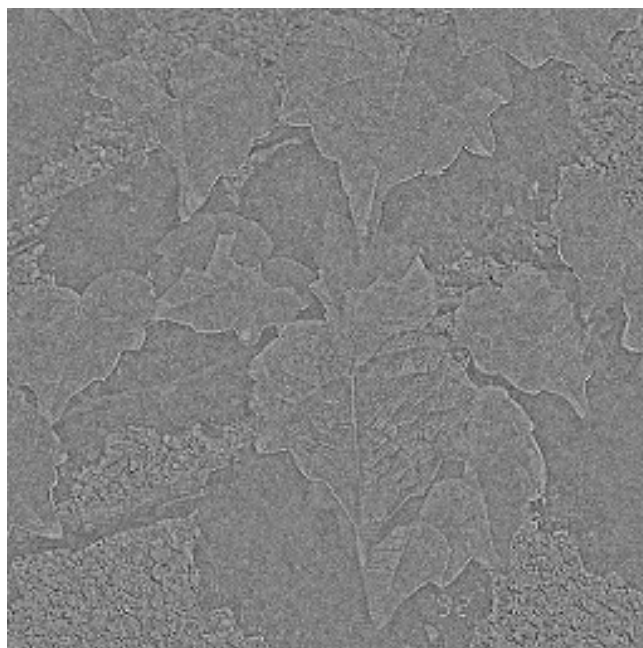


図 2.10: DCT の SOS (植物の葉)

### 2.5.2 ウォルシュ・アダマール変換

DFT では変換行列の要素は複素数，DCT ではその要素は実数となっていた．

ウォルシュ・アダマール変換（Walsh-Hadamard transform: WHT） [1] [13] [14] は，変換核要素として 1 と  $-1$  だけをもつアダマール行列を用いた直交変換である．DFT や DCT と異なり乗算が不要であり，加減算だけで計算できるという特徴がある．

アダマール行列としては，アダマール順序のもの  $H_h$  とウォルシュ順序のもの  $H_w$  が有名である．ここではアダマール順序のものを示す． $H_h$  は次式で定義される．

$$\begin{aligned}
 H_h^{(2)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \\
 H_h^{(2n)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} H_h^{(n)} & H_h^{(n)} \\ H_h^{(n)} & -H_h^{(n)} \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

よって，ウォルシュ・アダマール変換の順変換と逆変換は次式となる．

$$[G_{mn}] = [H_M] [F_{mn}] [H_N] \tag{2.31}$$

$$[F_{mn}] = [H_M] [G_{mn}] [H_N] \tag{2.32}$$



以上から，ウォルシュ・アダマール変換の Sign-only Synthesis は次式で定義される [15] [16] [17] .

$$[F'_{mn}] = [H_M] [Z_{mn}] [H_N] \quad (2.33)$$

ここで，

$$Z_{mn} = \begin{cases} 1 & Y_{mn} \geq 0 \\ -1 & Y_{mn} < 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

である .

図 2.11 ~ 2.12 にウォルシュ・アダマール変換による SOS の結果を示す .



図 2.11: ウォルシュ・アダマール変換の SOS(福岡ドーム)

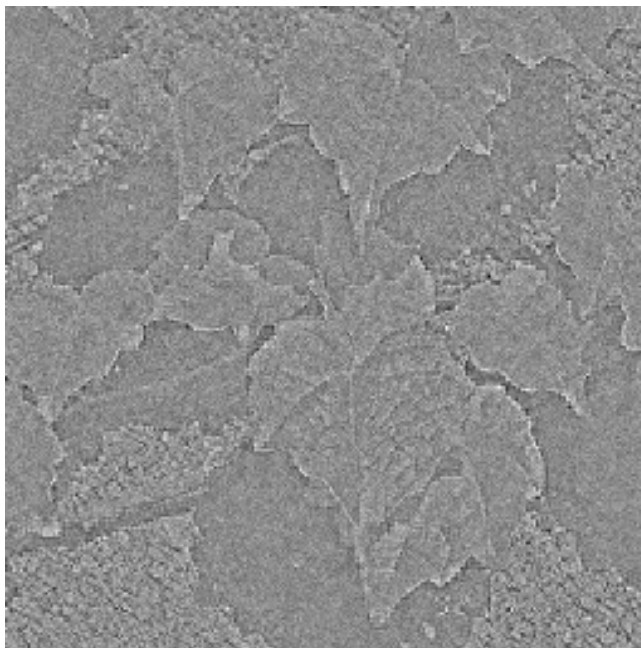


図 2.12: ウォルシュ・アダマール変換の SOS(植物の葉)

## 2.5.3 ハートレー変換

画像  $f(m, n)$  のハートレー変換 (Hartley transform: HLT) とその逆変換は次のように与えられる [1] .

$$F(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) \operatorname{cas} \left( \frac{2\pi mu}{M} + \frac{2\pi nv}{N} \right) \quad (2.35)$$

$$f(m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \operatorname{cas} \left( \frac{2\pi mu}{M} + \frac{2\pi nv}{N} \right) \quad (2.36)$$

ここで,  $\operatorname{cas}(\theta) = \cos(\theta) + \sin(\theta)$  である.  $\operatorname{cas}$  は *cosine - and - sine* を意味している.

画像の離散フーリエ変換をその実部  $R(u, v)$  と虚部  $I(u, v)$  を用いて  $R(u, v) + jI(u, v)$  と表すとき, その HLT は  $\{R(u, v) - I(u, v)\} / \sqrt{MN}$  と与えられる.

以上から, ハートレー変換の Sign-only Synthesis は次式で定義される.

$$g(m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} e^{j\theta_{uv}} \operatorname{cas} \left( \frac{2\pi mu}{M} + \frac{2\pi nv}{N} \right) \quad (2.37)$$

ここで,

$$\theta_{uv} = \begin{cases} 0 & F(u, v) \geq 0 \\ \pi & F(u, v) < 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

である.

図 2.13 ~ 2.14 にハートレー変換による SOS の結果を示す.

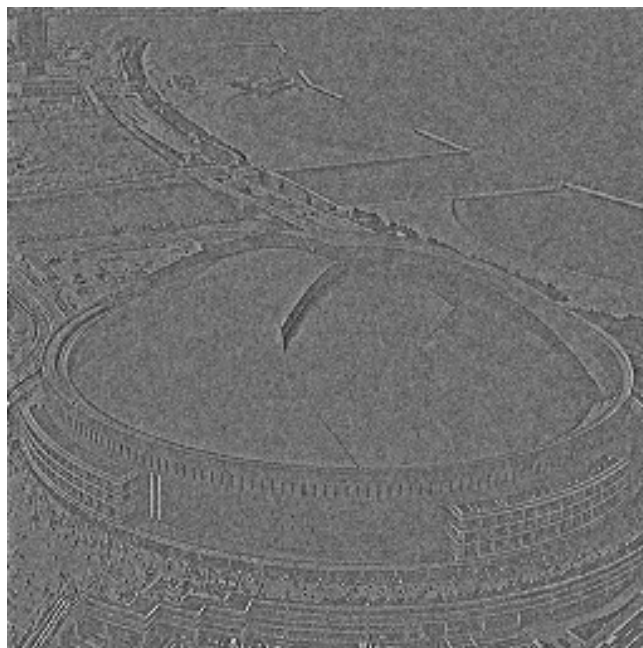


図 2.13: ハートレー変換の SOS(福岡ドーム)

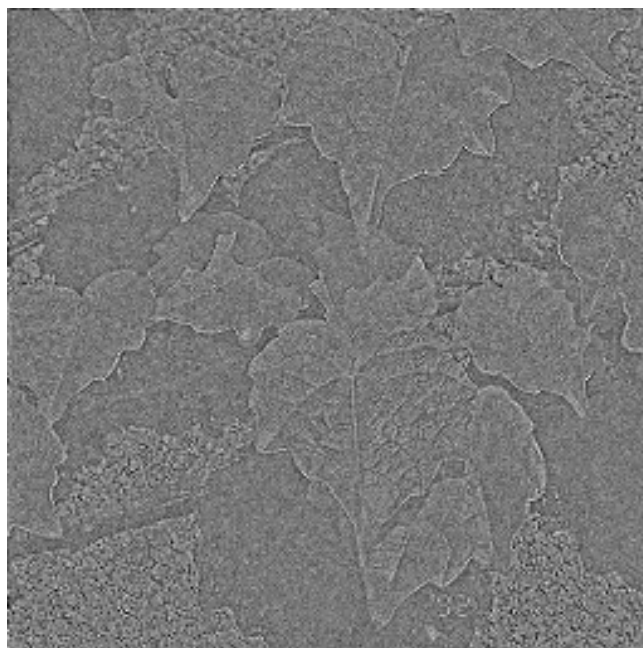


図 2.14: ハートレー変換の SOS(植物の葉)

## 2.6 Sign-only Synthesis と Phase-only Synthesis の比較

2.3 で述べたようにフーリエ変換における Phase-only Synthesis(POS) は一種のハイパスフィルターであるため、画像データに用いると高周波成分に含まれる (エッジや輪郭) 情報が強調される。

実数型直交変換の変換係数の符号は、フーリエ変換の位相が  $0$  または  $\pi$  の時と等価であると考えられ、よって実数型直交変換の Sign-only Synthesis(SOS) は POS と同様に高い周波数領域を強調すると考えられる。

### 2.6.1 SOI と POI

図 2.15 ~ 2.22 に Sign-only Image(SOI) と Phase-only Image(POI) の例を示す。

図 2.15 ~ 2.22 を見ると原画像からの特徴抽出の程度が若干異なるが、SOI も POI と同様に原画像の輪郭部や細かいエッジを抽出していることがわかる。DCT とハートレー変換の SOI はほとんど POI と同じ結果をなっているのに対し、アダマール変換の SOI はノイズが多い画像となっている。これはアダマール変換の変換核が矩形波であるため、信号に基底関数をあてはめる際に高周波成分まで信号と基底関数の誤差が波及していくためであると考えられる。以上のことから SOI も POI と同様に画像の高周波成分を強調することがわかる。



図 2.15: POI (九州工業大学の校章)



図 2.16: DCT の SOI (九州工業大学の校章)



図 2.17: ウォルシュ・アダマール変換の SOI (九州工業大学の校章)



図 2.18: ハートレー変換の SOI (九州工業大学の校章)



図 2.19: POI (人物)



図 2.20: DCT の SOI (人物)





図 2.21: ウォルシュ・アダマール変換の SOI (人物)



図 2.22: ハートレー変換の SOI (人物)

## 2.6.2 SOS と POS の相互相関値と局所分散値

ここでは，Sign-only Synthesis(SOS) と Phase-only Synthesis(POS) の特徴を比較するため，SOS と POS における相互相関値と局所的な分散値の比較を行う．相互相関値によって SOS と POS の類似度を調べることができ，局所的な分散値を求めることにより，画像の輪郭部やエッジ部の強調の程度や平坦部におけるノイズの大きさを比較することができる．表 2.1 に POS と SOS の相互相関値を示す．

表 2.1: POS と SOS の相互相関値

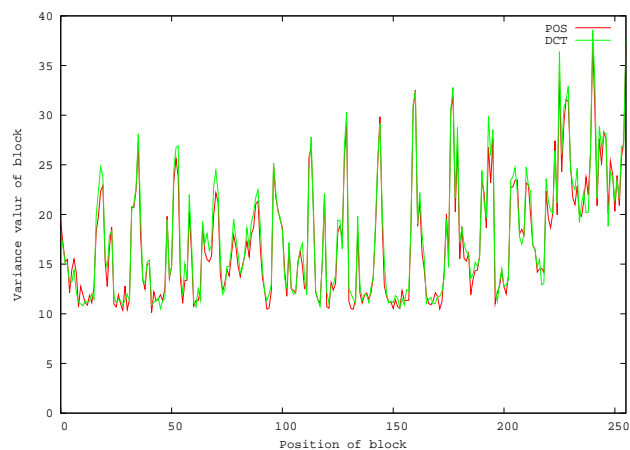
直交変換	DCT	WHT	HLT
画像			
福岡ドーム	0.720	0.633	0.900
植物の葉	0.709	0.572	0.900
人物	0.718	0.609	0.900
花	0.720	0.618	0.899

表 2.1 から，ハートレー変換，DCT，アダマール変換の順に相互相関値が高いことが分かる．これは直交変換の変換核がフーリエ変換に似ていることを示しており，前述したようにハートレー変換は変換係数がフーリエ変換の実数部と虚数部から求められる事からも分かる．

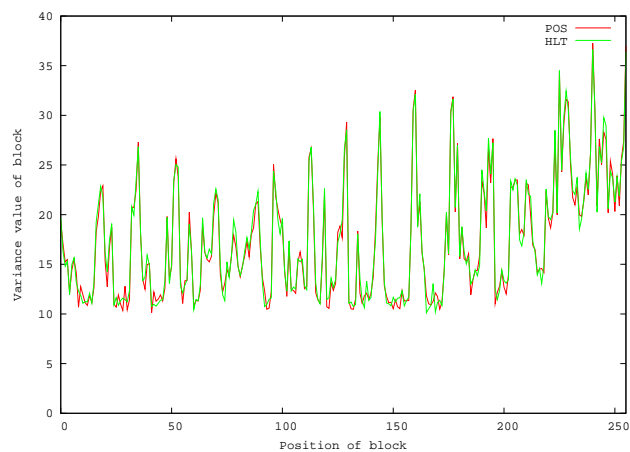
図 2.23 ~ 2.24 は原画像に対して SOS と POS を行ったときの局所領域 (16 × 16 ピク

セル)の分散値をグラフ化したものである。ここで、グラフの横軸は局所領域の位置であり、縦軸は局所分散値である。これらの結果を見ると、SOSとPOSはほとんど同じようなグラフとなっていることがわかる。

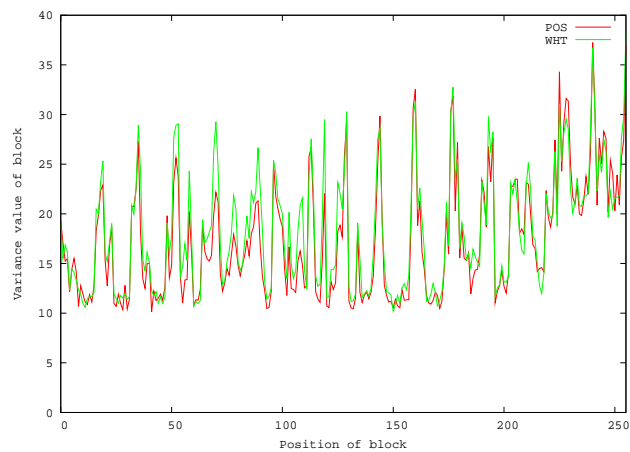
以上のことからSOSはPOSと同様の性質を持っていることが分かった。また、ハートレー変換、DCT、アダマール変換の順にPOSと似ていることが分かった。



(a) DCT



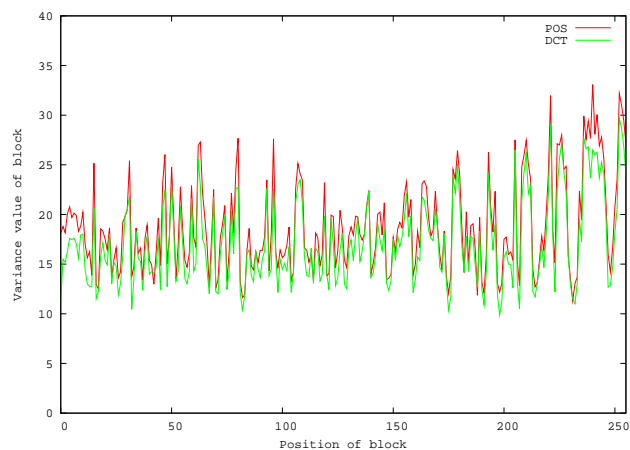
(b) ハートレー変換



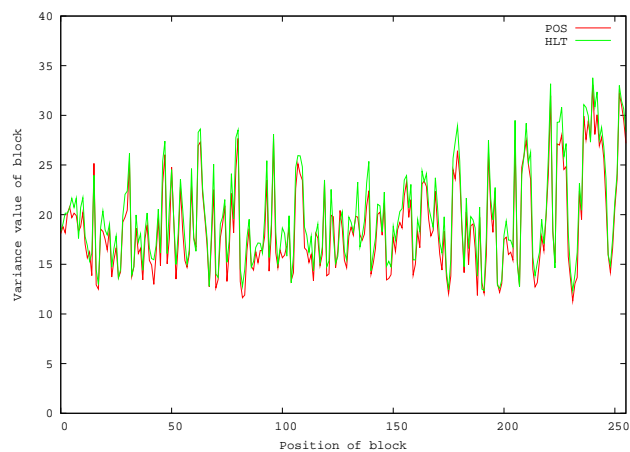
(b) ウォルシュ・アダマール変換

図 2.23: POS と SOS の局所分散値の比較 (福岡ドーム)

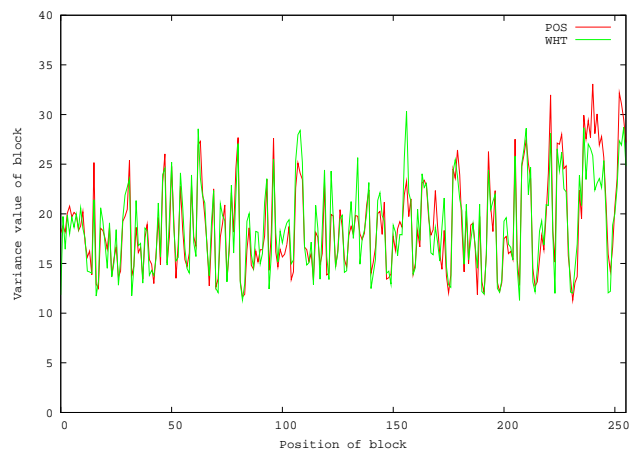
局所領域サイズ: 16 × 16 ピクセル



(a) DCT



(b) ハートレー変換



(b) ウォルシュ・アダマール変換

図 2.24: POS と SOS の局所分散値の比較 (植物の葉)

局所領域サイズ: 16 × 16 ピクセル

## 2.7 結言

本章では，フーリエ変換の Phase-only Synthesis(POS) と実数型直交変換の Sign-only Synthesis(SOS) について説明した．さらに POS と SOS の特徴や類似性について示した．SOS は POS と同様に，画像の高周波成分を強調し，輪郭線やエッジを強調することが分かった．

実数型の直交変換は種々あるが，以後本研究では POS に比較的近い性質を持ち，計算速度の速い離散コサイン変換を用いて説明を行うことにする．

## 第3章 Sign-only Synthesisの特徴

### 3.1 緒言

本章では Sign-only Synthesis(SOS) の特徴について述べる。第2章で述べたように、SOS は信号の高周波成分を強調する特徴がある。ここでは種々のエッジ・モデルにおいて SOS の出力波形がどのようになるのかを示すとともに、種々の画像に対する SOS 画像を示す。さらに SOS 画像において高周波成分が強調されることによって発生するノイズの削減方法について提案する。

### 3.2 各エッジ・モデルにおける Sign-only Synthesis の波形

第2章で Sign-only Synthesis(SOS) は信号の高周波成分を強調するため、画像においては対象物の輪郭部（エッジ部）が強調されることを述べた。ここでは種々のエッジ・モデルにおいて SOS がどのような信号を出力するかを考察する。

一般的にエッジは濃度の急激な空間的变化と定義されるが、そうした変化を引き起こす原因としては次のようなものが考えられる。

- (1) 異なる対象物が隣接している（対象物の境界）

- (2) 対象表面の光の反射特性が変化している（表面の模様）
- (3) 対象表面の3次元的傾きや奥行きが変化している（3次元形状）
- (4) 照明光の強度や方向が変化している（影）

濃度の空間的变化パターンは，その変化の原因が(1)～(4)のいずれであるかによって異なったものとなる．ここではいくつかの典型的な濃度の空間的变化パターンをエッジのモデルとして想定し(図3.1～3.4)，それらのエッジモデルに対してSOSの出力波形とラプラシアンの波形を示す．ラプラシアンは信号(画像)のエッジを抽出する場合によく用いられており，SOSがエッジをどのように抽出しているのかをラプラシアンと比較する．ラプラシアンについては4章で詳しく述べる．



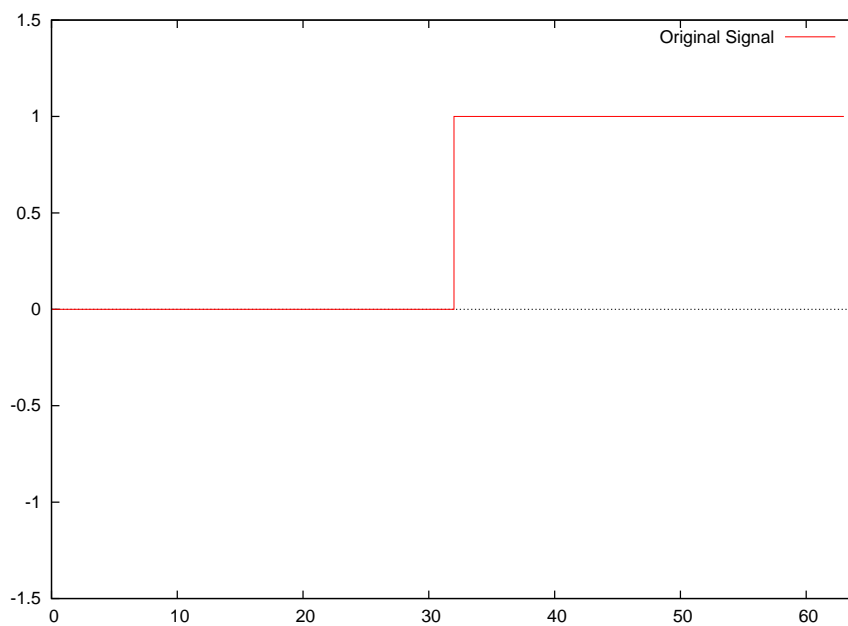


図 3.1: ステップ・エッジ

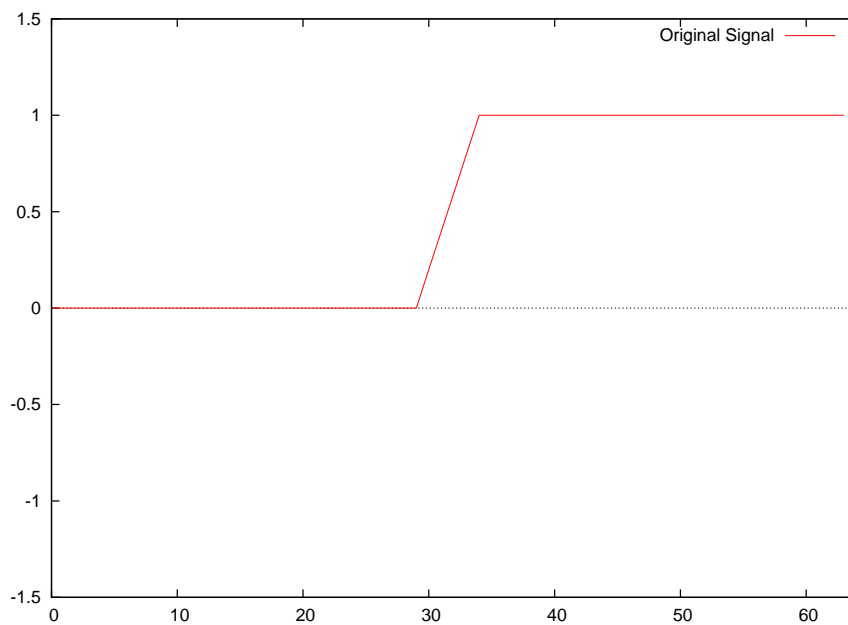


図 3.2: ランプ・エッジ

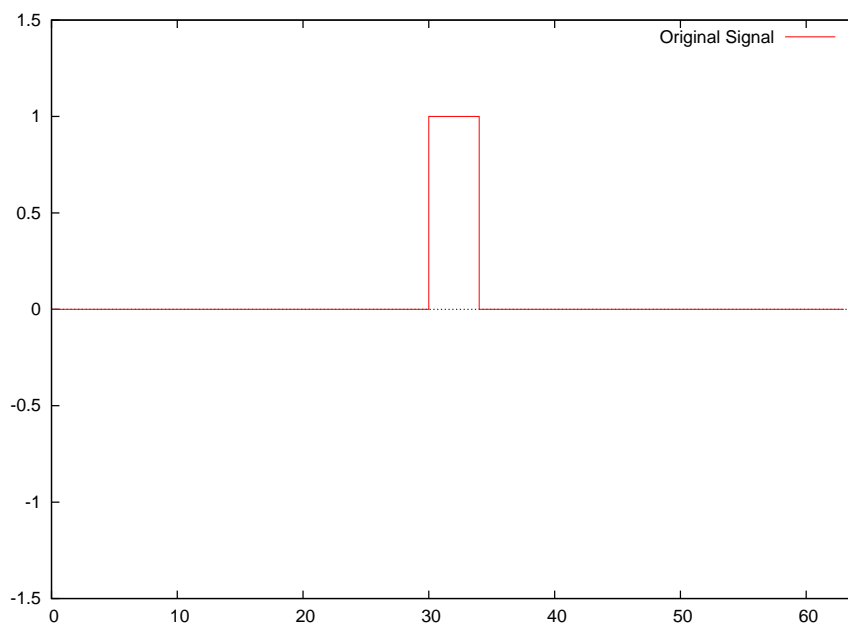


図 3.3: ピーク・エッジ

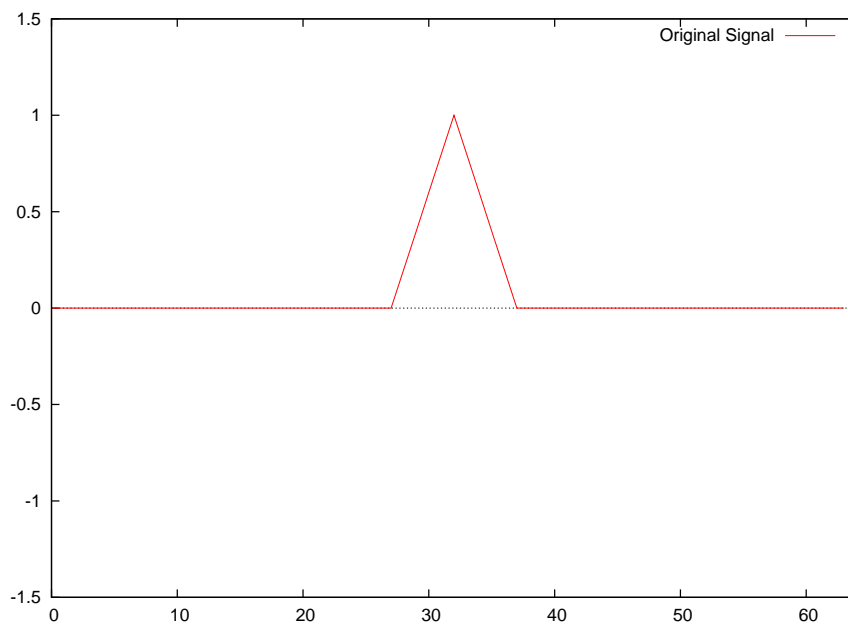


図 3.4: ルーフ・エッジ

### 3.2.1 ステップ・エッジ

ステップ・エッジは理想的なエッジであり，次節に示すランプ・エッジはこれがぼけたものである．画像として観測される濃度変化は，これらに雑音が加わったものとなる．

図 3.5 にステップ・エッジに対して SOS を行った結果を示す．

図 3.6 ~ 3.7 は図 3.5 のステップ・エッジを左に 3 または 6 ピクセルシフトした場合の SOS の結果である．

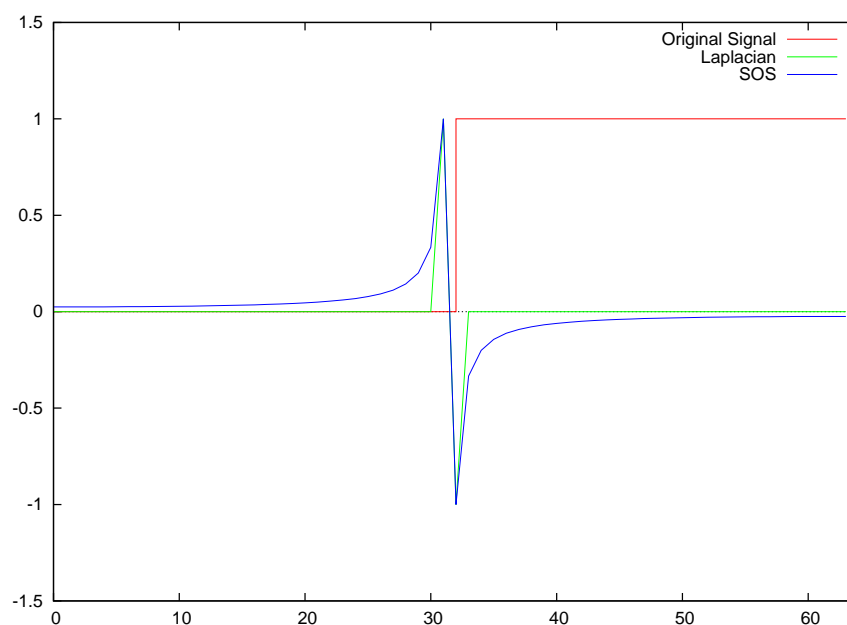


図 3.5: エッジが信号の中心の場合

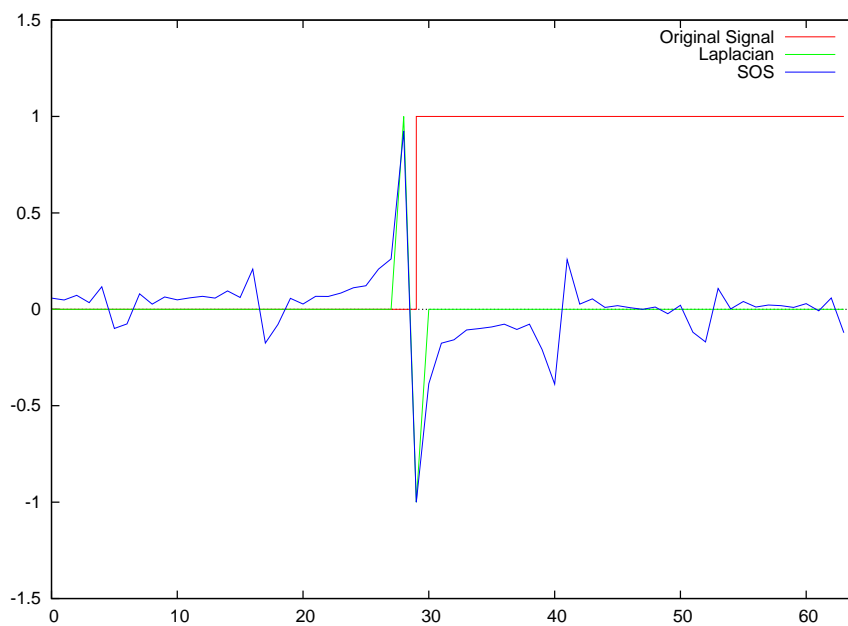


図 3.6: 左に 3 ピクセルシフトした結果

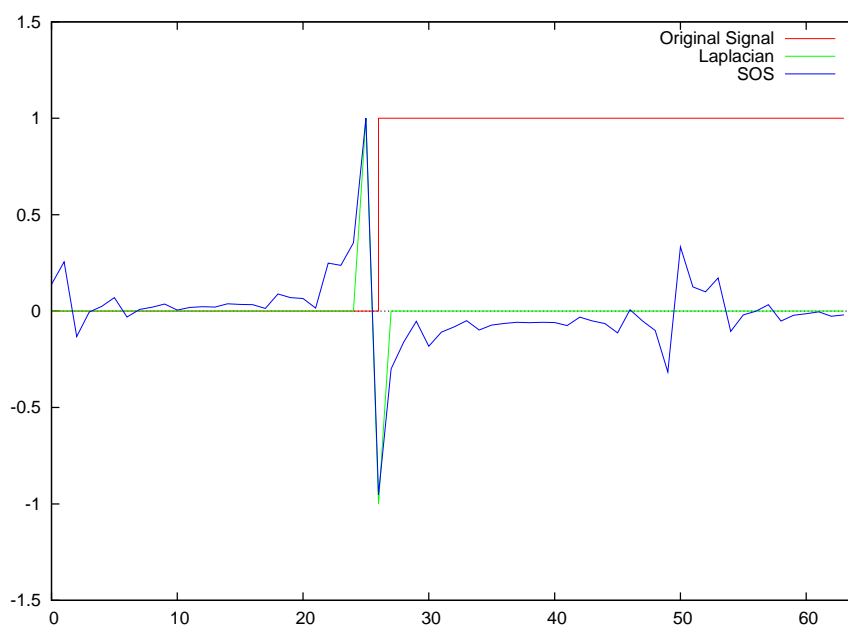


図 3.7: 左に 6 ピクセルシフトした結果

### 3.2.2 ランプ・エッジ

図 3.8 にランプ・エッジに対して SOS を行った結果を示す。

図 3.9 ~ 3.10 は図 3.8 のランプ・エッジを左に 3 または 6 ピクセルシフトした場合の SOS の結果である。

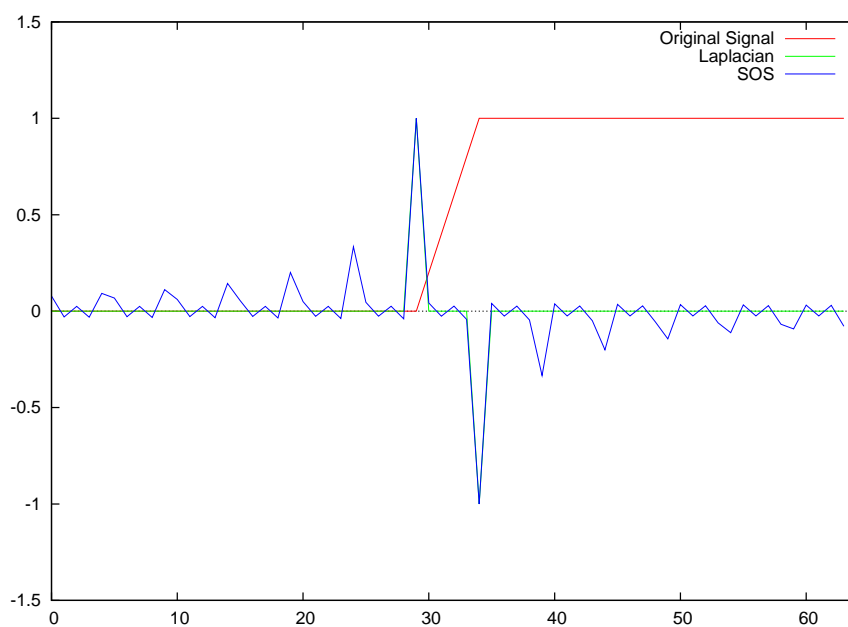


図 3.8: エッジが信号の中心の場合

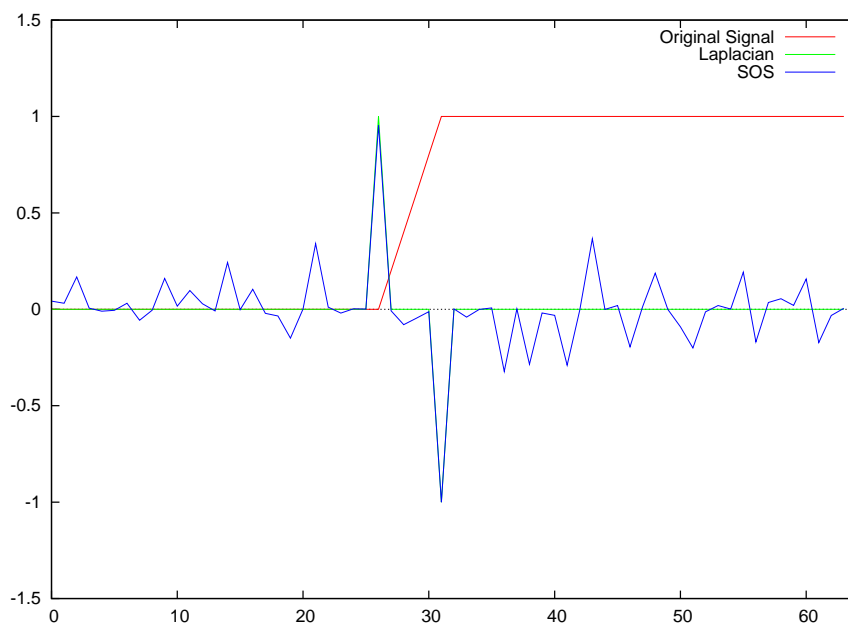


図 3.9: 左に 3 ピクセルシフトした結果

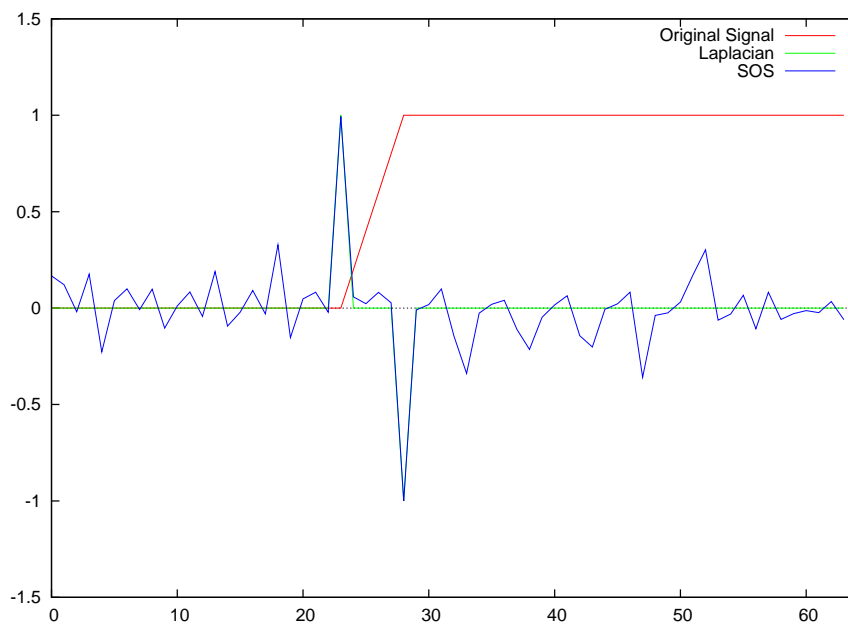


図 3.10: 左に 6 ピクセルシフトした結果

### 3.2.3 ピーク・エッジ

ピーク・エッジは幅の狭い線をモデル化したものである。ただし、線の幅が大きくなると、山や谷は2本の平行なステップ・エッジの組として表されることになる。

図 3.11 にピーク・エッジに対して SOS を行った結果を示す。

図 3.12 ~ 3.13 は図 3.11 のピーク・エッジを左に 3 または 6 ピクセルシフトした場合の SOS の結果である。

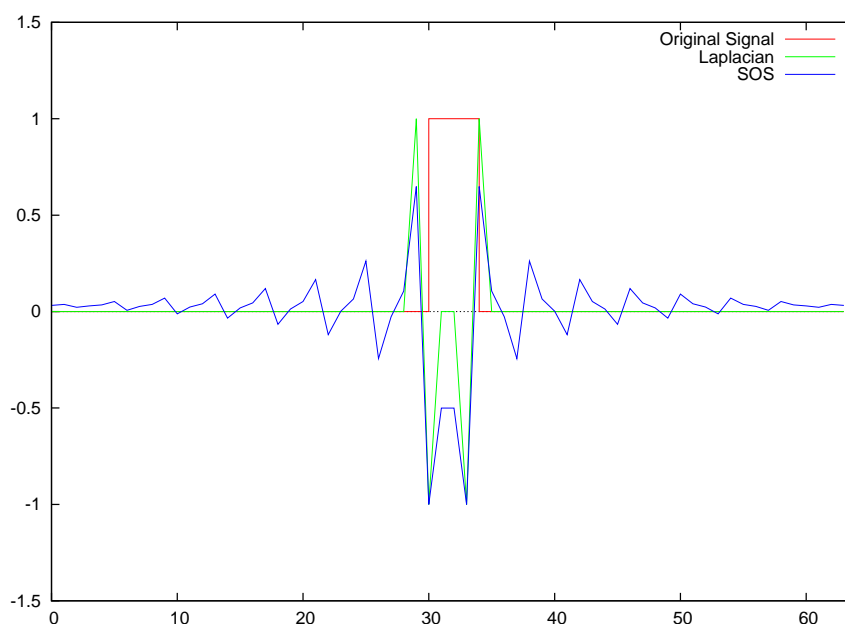


図 3.11: エッジが信号の中心の場合

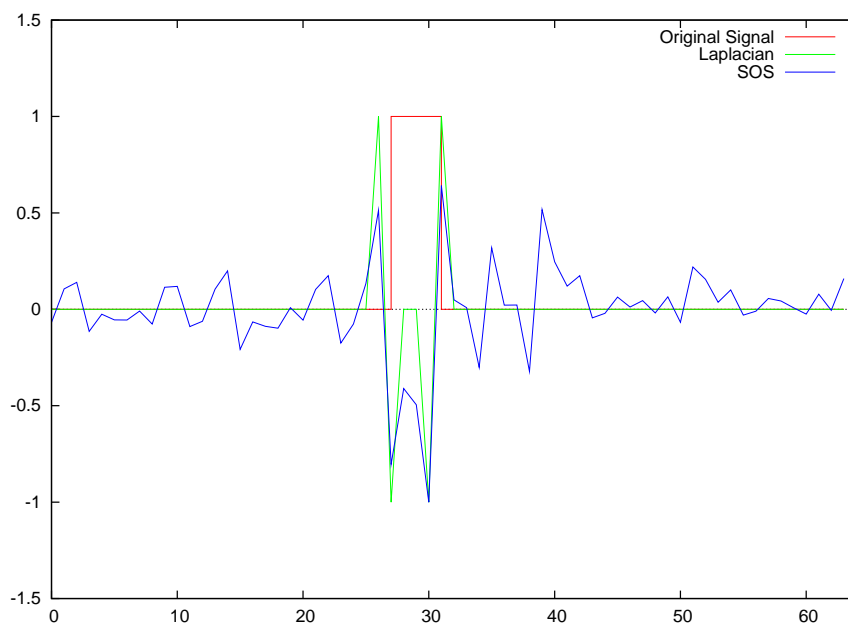


図 3.12: 左に 3 ピクセルシフトした結果

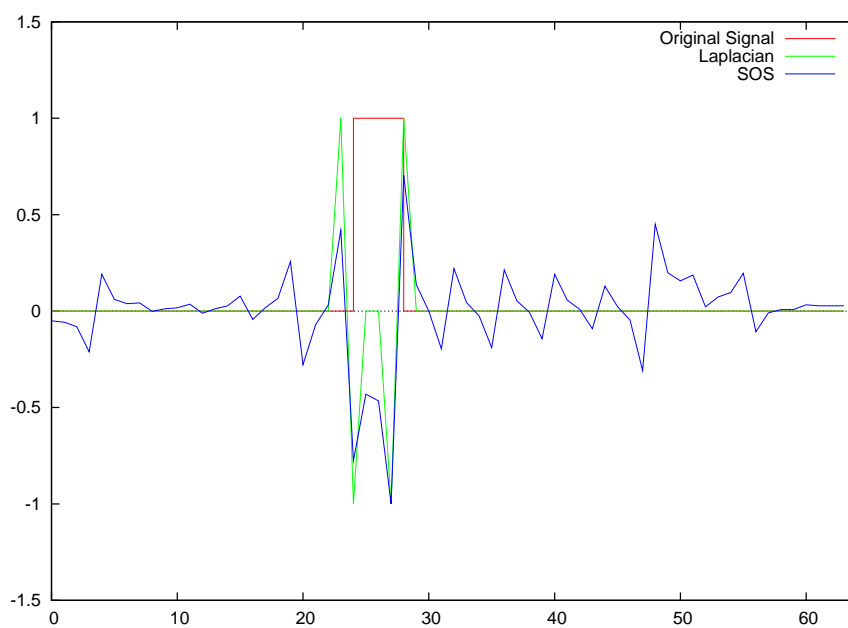


図 3.13: 左に 6 ピクセルシフトした結果



### 3.2.4 ルーフ・エッジ

ルーフ・エッジは前節のピーク・エッジがぼけたものと考えることができる。

図 3.14 にルーフ・エッジに対して SOS を行った結果を示す。

図 3.15 ~ 3.16 は図 3.14 のルーフ・エッジを左に 3 または 6 ピクセルシフトした場合の SOS の結果である。

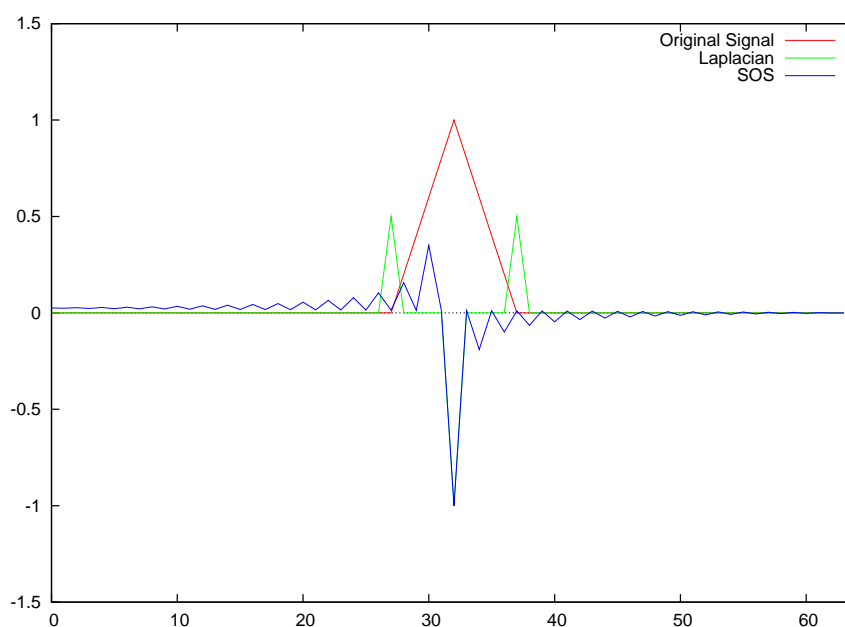


図 3.14: エッジが信号の中心の場合

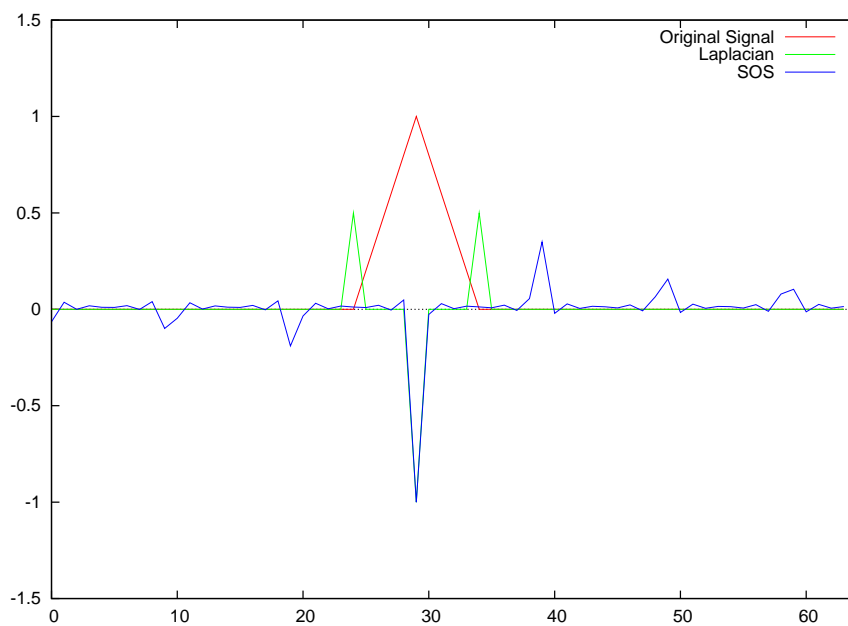


図 3.15: 左に 3 ピクセルシフトした結果

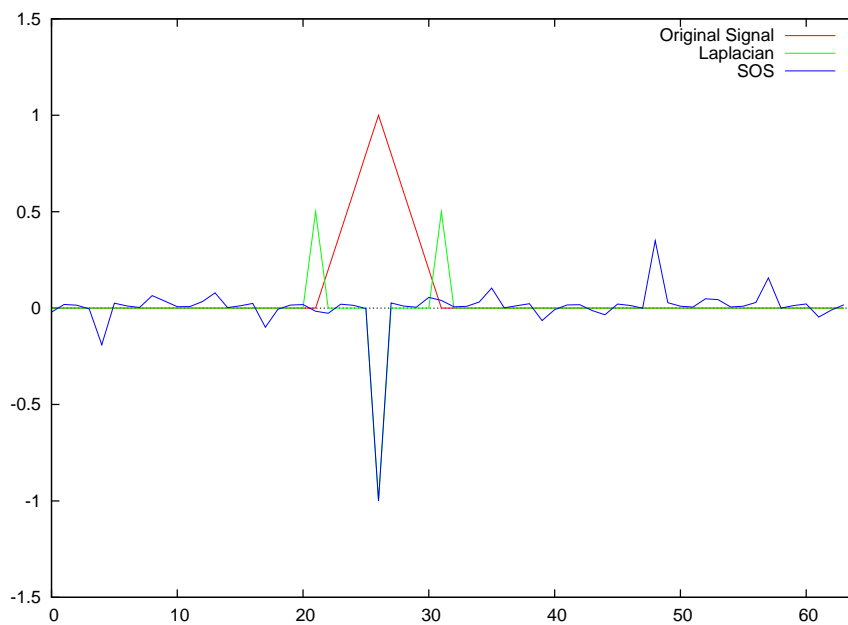


図 3.16: 左に 6 ピクセルシフトした結果

### 3.2.5 エッジの位置とノイズの関係

3.2.1 ~ 3.2.4 で示したように，エッジが信号の中心にある場合は SOS 波形にノイズが少なく，エッジが信号の中心からずれると SOS 波形にノイズが増えることが分かった。

これは，信号の波形を DCT 変換核の基底関数で再構成をしやすいかどうかで考えることができる．信号の波形が DCT 変換核の基底関数に近い図 3.5 のような場合は，SOS 波形にほとんどノイズがなく，ラプラシアン of the waveform に近くなっている．また，このときの DCT 係数を調べると奇数高調波のみ値を持ち，偶数高調波の係数は 0 になっている．これに対し，図 3.6, 3.7 のようにエッジの中心がシフトされた場合は，偶数高調波にも値があることが分かった．これは，エッジが信号の中心からずれたため，信号を奇数高調波のみで再構成をすることができなくなり偶数高調波が必要になったためである．SOS は変換係数の符号のみで逆変換を行うものであるから，変換係数に小さな値があっても強調され SOS 波形に現れる．一般的に DCT 係数は低周波成分の値が大きく，高周波成分の値は小さいため，高周波成分の係数値が少しでも変化すると SOS 波形に対する影響も大きい．これが SOS 波形のノイズの原因であると考えられる，

また，図 3.11 のように信号の波形が DCT の基底関数で再構成しにくい場合は，エッジが信号の中心からシフトしていなくても SOS 波形に大きなノイズが発生している．この場合は，信号を再構成するために多くの基底関数が必要となり，その組み合わせに係数値が必要となるためであると考えられる．

以上のことから，ここで示したような単純なエッジであれば，SOS に発生するノイ

ズをある程度推定することが可能であると考えられるが、画像のように複雑なエッジを持つ場合は、SOS 波形に発生するノイズはほとんどランダムであると考えられ、それを推定することは難しいと考えられる。

そこで、本研究では次節以降で述べる手法によって画像における SOS のノイズを削減する。

### 3.3 画像の Sign-only Synthesis

第2章で画像の Sign-only Synthesis(SOS) の例をいくつか示したが、ここではさらにいろいろな特徴を持つ画像に対して SOS を行った結果を図 3.17 ~ 3.24 に示す。各処理結果において現画像の輪郭部が強調され線画のようにになっていることが分かる。しかし平坦部ではノイズが発生している。原画像において強いエッジがあるものや画像全体にエッジがあるものの方がエッジを抽出しやすいことが分かる。



図 3.17: 原画像 (女性)



図 3.18: SOS 画像 (女性)



図 3.19: 原画像 (花)

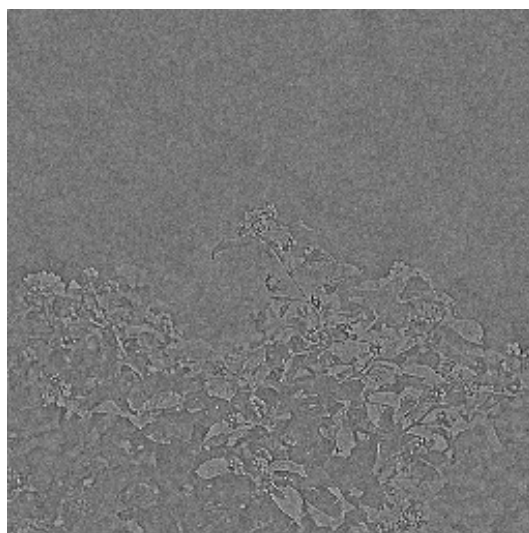


図 3.20: SOS 画像 (花)



図 3.21: 原画像 (男性)



図 3.22: SOS 画像 (男性)



図 3.23: 原画像 (静物)

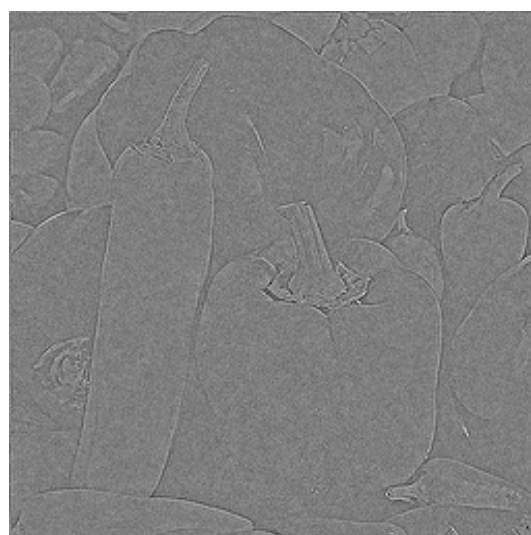


図 3.24: SOS 画像 (静物)

### 3.4 Sign-only Synthesis のノイズの低減

前節で示したように Sign-only Synthesis(SOS) の画像は高周波成分が強調されることによって平坦部でノイズが発生する。SOS のノイズは対象とする画像の内容(対象物)やエッジの位置によっても左右されるため、その発生具合はほとんどランダムであると考えてよい。

本研究では SOS の平坦部でのノイズを削減するために次の二つの手法を提案する。

#### 3.4.1 重畳型 SOS (Superimposed SOS : S-SOS)

SOS に発生するノイズはランダムに現れる。したがって原画像  $f(x, y)$  を上下左右にシフトした画像  $f_{ij}(x, y)$  の SOS のノイズは、シフトする前のノイズと異なっていると考えることができる。そこで本研究では原画像をシフトした画像に対して SOS を行い、それらの平均値を取ることによって平坦部でのノイズを削減する。これを本研究では重畳型 SOS(Superposition SOS) と呼ぶ。図 3.26 に重畳型 SOS の原理を示す。上下左右へのシフト量を  $N$  ピクセルとし、シフトした位置での SOS 画像を  $S_{ij}$  とすると、重畳型 SOS は次の式で表される。

$$S_s(x, y) = \frac{1}{(2N+1)^2} \sum_{i=-N}^N \sum_{j=-N}^N S_{ij}(x, y) \quad (3.1)$$

ここでシフト量とノイズの削減量の関係を知るために、画像のエッジ部と平坦部での局所分散値を図 3.25 に示す。

図 3.25 のグラフで示した局所分散値は複数の画像において求めた平均値である。

このグラフにおいて，平坦部の局所分散値が小さいほど平坦部のノイズが少ないと考えることが出来る．逆にエッジ部の局所分散値は大きいほどエッジが強調されていると考えられる．

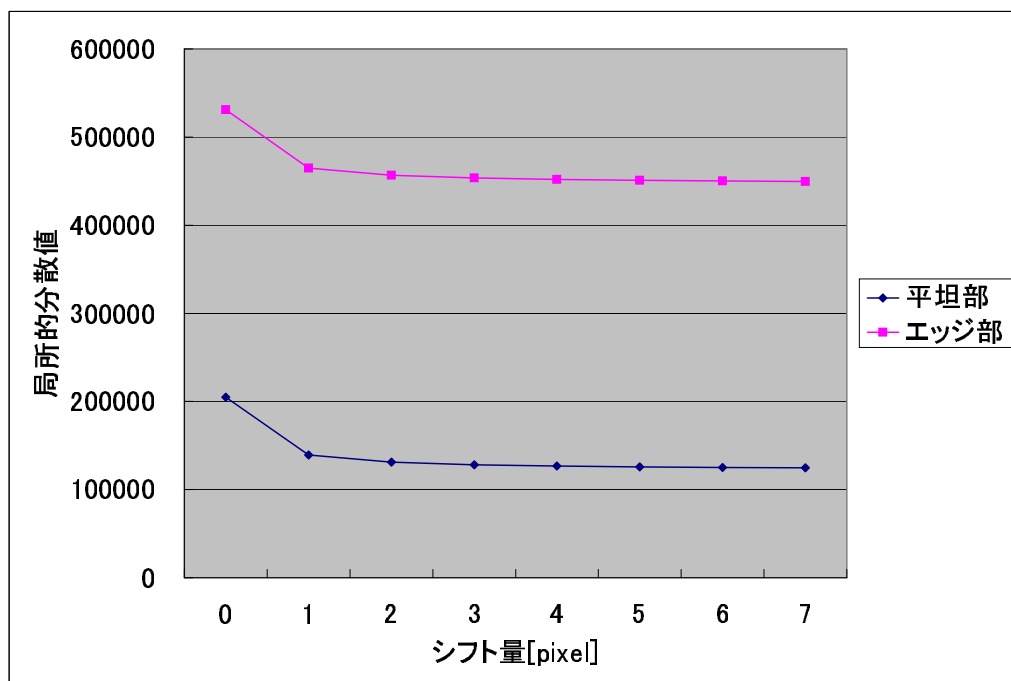


図 3.25: シフト量と平坦部およびエッジ部の局所分散値

図 3.25 を見ると，2 ピクセル以上シフトを行っても 1 ピクセルシフトした場合と局所分散値がほとんど変わらないことが分かった．よって重畳型 SOS におけるシフト量は 1 ピクセルで十分であると考えられる．シフト量が 1 ピクセルであればシフトを行うことによる処理時間の増加も少ないため，実用的な処理速度を実現できる．よって重畳型 SOS はノイズの削減方法として非常に効果的であると考えられる．



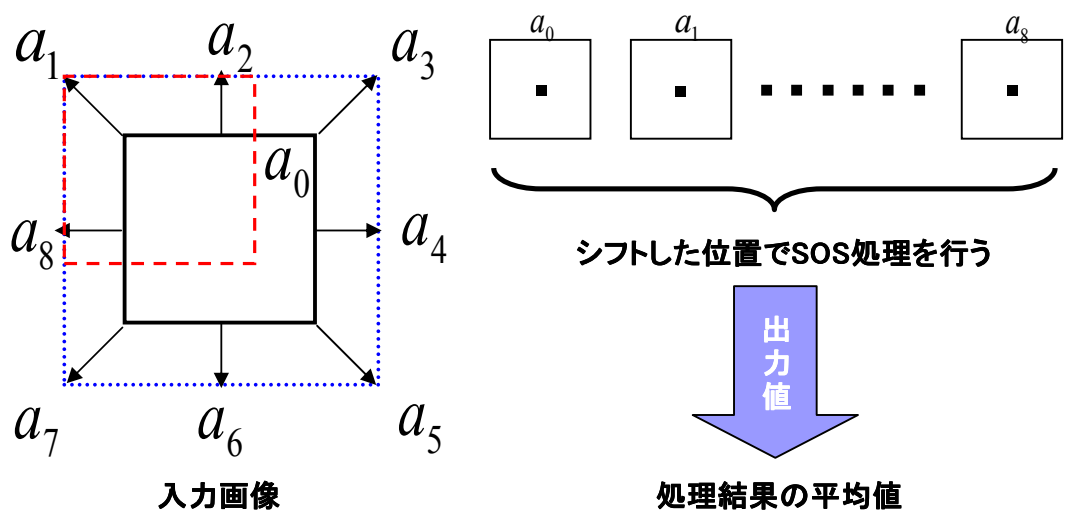


図 3.26: 重畳型 SOS の原理

図 3.27 ~ 3.28 に通常の SOS と重畳型 SOS の処理結果を示す。

画像の輪郭部やエッジ部は強調されたままであるのに対して，平坦部ではノイズが削減されていることがわかる．また図 3.25 のグラフではエッジ部の分散値は小さくなっているが，図 3.27(b) と図 3.28(b) を見ると平坦部のノイズが削減されたため，通常の SOS よりエッジが強くはっきりと現れていることが分かる．

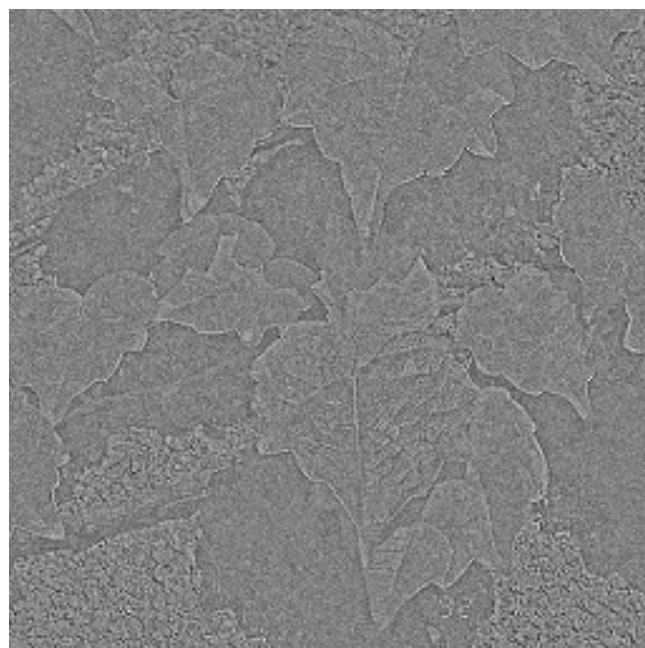


(a) 通常の SOS の処理結果

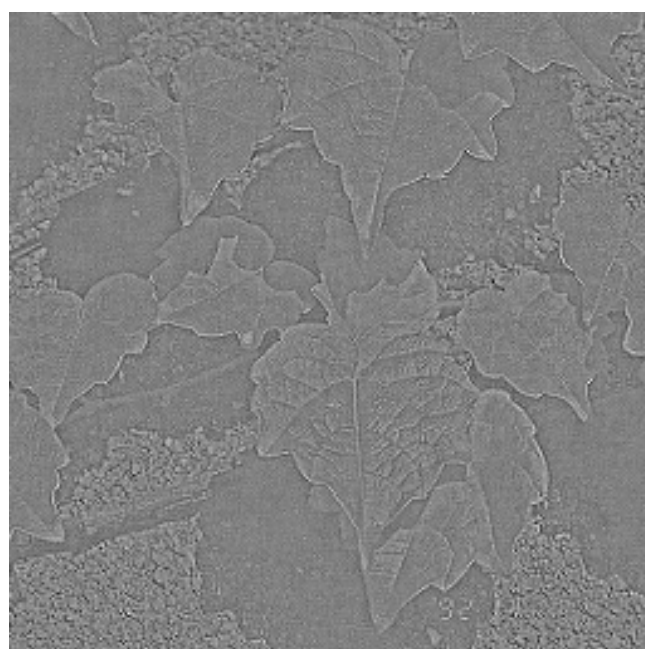


(b) 重畳型 SOS の処理結果

図 3.27: 人物



(a) 通常の SOS の処理結果



(b) 重畳型 SOS の処理結果

図 3.28: 植物の葉

### 3.4.2 局所的 SOS

前節で述べた重畳型 SOS は、SOS の平坦部でのノイズを削減する手法として効果的であったが、画像全体の周波数特性のみを考慮し、画像の局所的な周波数特性は考慮していない。そこで本研究では、画像の局所的な周波数特性を考慮しながら SOS のノイズを削減する局所的 SOS を提案する。

図 3.29 に局所的 SOS の原理を示す。局所的 SOS は画像上の各点を中心とした局所領域に対して前述の重畳型 SOS を適用したものである。

図 3.31 ~ 3.30 に局所的 SOS を行った結果を示す。

局所的 SOS において局所領域のサイズを小さくすると画像の細かなエッジや輪郭が強調される。逆に局所領域のサイズを大きくすると、ある程度の大きさを持つ対象物のエッジや輪郭が強調されていることがわかる。このとき局所領域のサイズは利用者が必要とする情報や処理の目的によって自由に設定することができる。

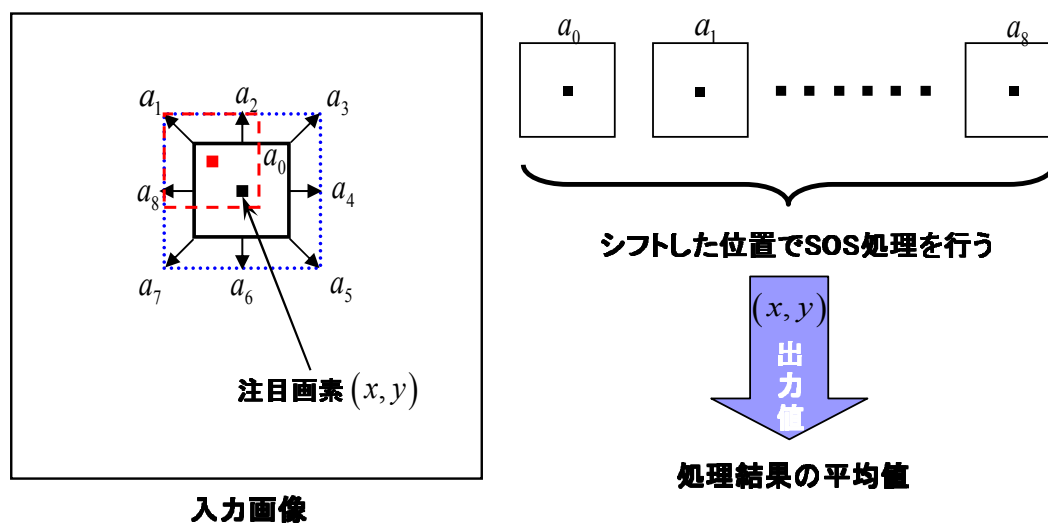
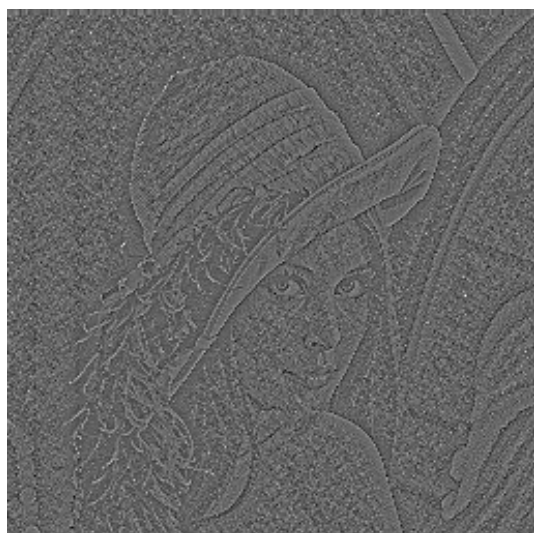


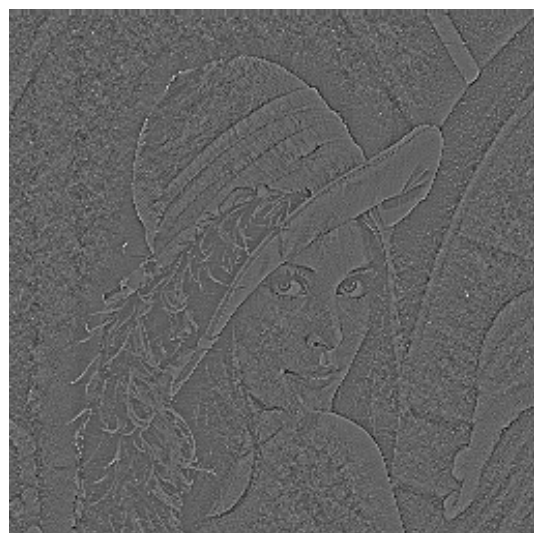
図 3.29: 局所的 SOS の原理



(a) 画像全体 (通常) の SOS



(b) 局所的 SOS の処理結果  
(局所領域  $8 \times 8$  ピクセル)



(c) 局所的 SOS の処理結果  
(局所領域  $16 \times 16$  ピクセル)



(d) 局所的 SOS の処理結果  
(局所領域  $32 \times 32$  ピクセル)



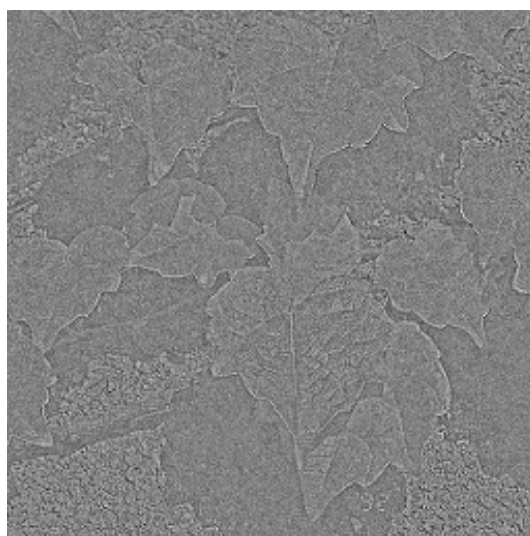
(e) 局所的 SOS の処理結果  
(局所領域  $64 \times 64$  ピクセル)



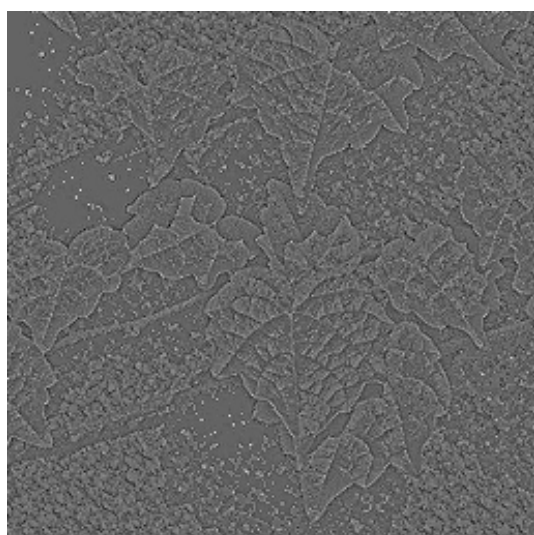
(f) 局所的 SOS の処理結果  
(局所領域  $128 \times 128$  ピクセル)

図 3.30: 局所的処理結果 (人物)

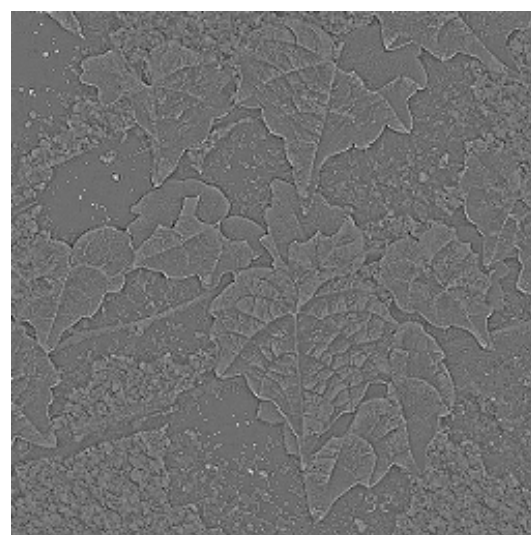




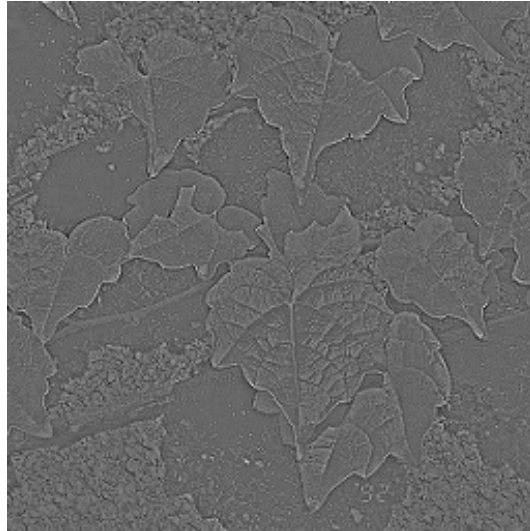
(a) 画像全体 (通常) の SOS



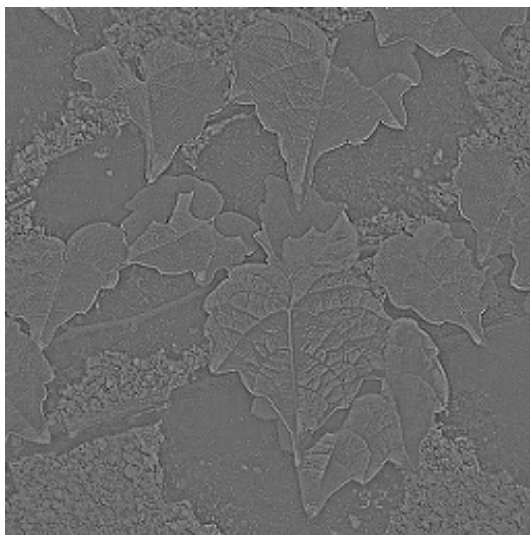
(b) 局所的 SOS の処理結果  
(局所領域  $8 \times 8$  ピクセル)



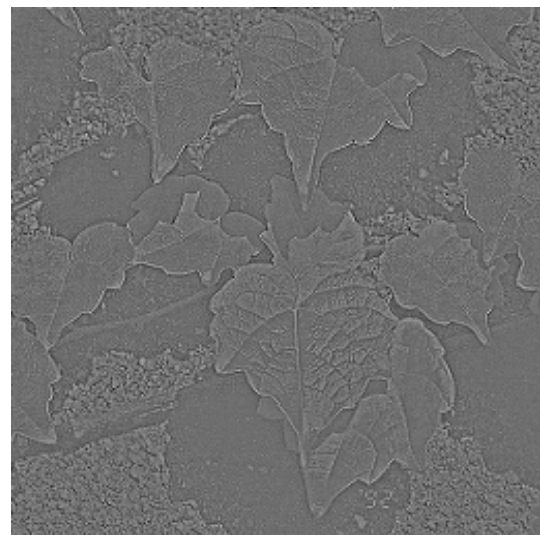
(c) 局所的 SOS の処理結果  
(局所領域  $16 \times 16$  ピクセル)



(d) 局所的 SOS の処理結果  
(局所領域  $32 \times 32$  ピクセル)



(e) 局所的 SOS の処理結果  
(局所領域  $64 \times 64$  ピクセル)



(f) 局所的 SOS の処理結果  
(局所領域  $128 \times 128$  ピクセル)

図 3.31: 局所的処理結果 (植物の葉)

### 3.5 結言

本章では、種々のエッジ・モデルにおける Sign-only Synthesis(SOS) の出力特性について考察した。各エッジ・モデルにおいて、信号が基底関数に似ているかどうかで SOS の出力波形にノイズが発生する場合とほとんど発生しない場合があることがわかった。さらに SOS の平坦部のノイズを削減する手法について重畳型 SOS(S-SOS) と局所的 SOS を提案した。特に S-SOS はわずか1ピクセルシフトした画像を重ね合わせることによって平坦部に発生するランダムなノイズを劇的に削減することができた。

## 第4章 Sign-only Synthesis (SOS) の 応用

### 4.1 緒言

本章では Sign-only Synthesis(SOS) の応用について示す。

画像に含まれる情報を人間にとって見やすくするための方法として、画像に含まれるぼけ成分を除去し、画像をくっきりと鮮明なものに変換する画像の鮮鋭化 (sharpening) が考えられる [18]。

ぼけ画像では低い空間周波数に比べて高い空間周波数が弱められることによって画像がぼやけ、濃度が急激に変化する部分 (エッジ) に影響が現れる。したがって、デジタル画像の鮮鋭化は空間周波数の高周波成分を強調すればよい。

前述したように SOS は信号の高周波成分を強調するという特徴を持つことから、本研究では、ぼけ画像の鮮鋭化法として一般的に用いられているラプラシアンを用いたアンシャープマスキング法を改良し、ラプラシアンと Sign-only Synthesis を合成した新しいアンシャープマスキング法を提案する。

## 4.2 ぼけ画像のシャープニング

### 4.2.1 ラプラシアン

アナログ画像を関数  $f(x, y)$  として記述すると、画像中の濃度の空間的变化をあらわす最も基本的な方法として、関数  $f(x, y)$  の微分がある。最もよく使われるものは次式で定義されるラプラシアン (Laplacian)  $\nabla^2 f(x, y)$  である [13]。

$$\nabla^2 f(x, y) \equiv \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial y^2} \quad (4.1)$$

デジタル画像を対象にラプラシアンを計算するには、 $x, y$  方向の偏微分をどのように計算するかが問題となる。2次の偏微分は1次の偏微分の偏微分であるので、そのデジタル近似を求めるには、差分の差分を計算すればよい。 $x$  方向の2次の偏微分のデジタル近似  $\nabla_x^2 f(x, y)$  は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} \nabla_x^2 f(x, y) &\equiv \Delta_x f(x + 1/2, y) - \Delta_x f(x - 1/2, y) \\ &= \{f(x + 1, y) - f(x, y)\} - \{f(x, y) - f(x - 1, y)\} \\ &= f(x + 1, y) - 2f(x, y) + f(x - 1, y) \end{aligned} \quad (4.2)$$

同様に、 $y$  方向の2次の偏微分のデジタル近似  $\nabla_y^2 f(x, y)$  は以下のように定義される。

$$\nabla_y^2 f(x, y) \equiv f(x, y + 1) - 2f(x, y) + f(x, y - 1) \quad (4.3)$$

式 (4.1) に式 (4.2) , 式 (4.3) を代入することによって , デジタル画像に対するラプラシアン  $\nabla^2 f(x, y)$  は次のように定義される .

$$\begin{aligned}\nabla^2 f(x, y) &\equiv \Delta_x^2 f(x, y) + \Delta_y^2 f(x, y) \\ &= f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) - 4f(x, y)\end{aligned}\tag{4.4}$$

よって , ラプラシアン・オペレータは

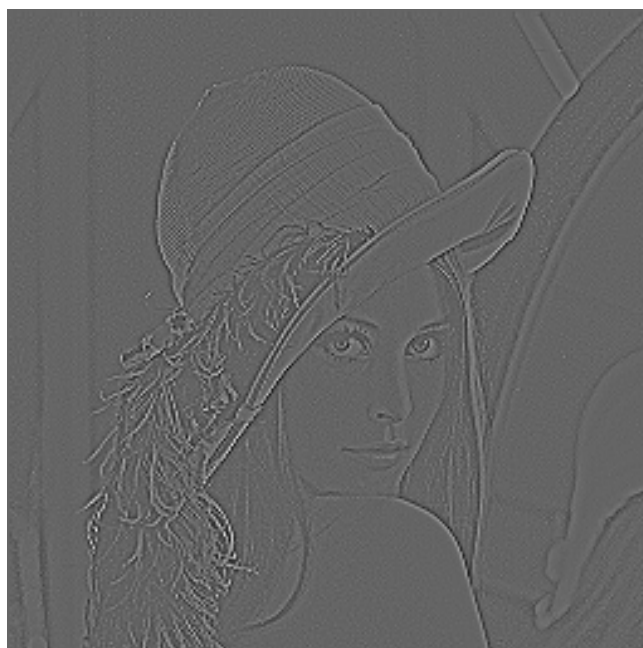
$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}\tag{4.5}$$

となる .

図 4.1 と図 4.2 にラプラシアン画像の例を示す .



(a) 原画像

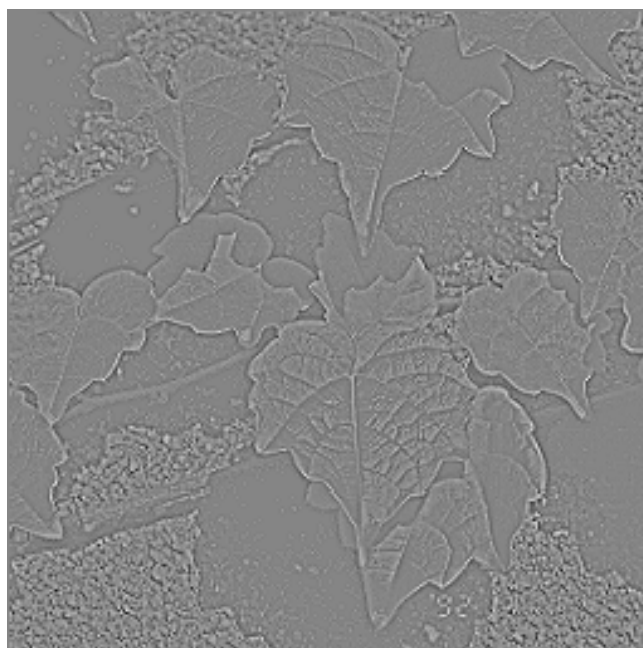


(b) ラプラシアン画像

図 4.1: ラプラシアン処理結果 (人物)



(a) 原画像



(b) ラプラシアン画像

図 4.2: ラプラシアン処理結果 (植物の葉)



### 4.2.2 アンシャープ・マスクング

アンシャープマスクング [19] とは原画像からそのラプラシアン画像を減算する方法である。すなわち，

$$g(x, y) = f(x, y) - \nabla^2 f(x, y) \quad (4.6)$$

で計算することができる。これはぼけ画像に対して頻繁に使われる画像鮮鋭化手法である。しかし，この手法は雑音成分も同時に強調してしまうという欠点がある。

そこで，式 (4.6) が画図全体を均一に強調するのに対して式 (4.7) のように画像データ  $h(x, y)$  によってアンシャープマスクングの程度を部分的にコントロールする選択的画像鮮鋭化 [20] が行われる。

$$g(x, y) = f(x, y) - h(x, y) \nabla^2 f(x, y) \quad (4.7)$$

ここで， $h(x, y)$  としては，原画像  $f(x, y)$  に対するエッジ検出オペレータの出力画像などが使われる。

図 4.3, 4.4 に  $h(x, y) = 1$  としてアンシャープマスクングを行った結果を示す。原画像 (図 4.1(a), 4.2(a)) と比べてエッジが強調されていることがわかる。



図 4.3: アンシャープマスキング (人物)



図 4.4: アンシャープマスキング (植物の葉)

### 4.2.3 エッジ検出

エッジ検出には様々な手法がある [21] が、本研究ではカーシュ (Kirsch) のマスク [22] と呼ばれている最妥当ではめ法を用いる。

この手法は、図 4.5 に示す方向の異なったエッジを表す 8 つのマスクをそれぞれ加重マトリクスとみなして空間フィルタリングを行い、最も大きな値を出力するマスクを選び、そのマスクが表すエッジの方向と空間フィルタリングで求めた値をエッジにおける濃度変化値として出力する。

図 4.6, 4.7 にカーシュのマスクを用いた線検出オペレータの出力画像を示す。図 4.6, 4.7 から原画像でエッジの強いところは白く現れ (出力値が大きい)、エッジの弱いところは黒く (出力値が小さい) になっていることがわかる。

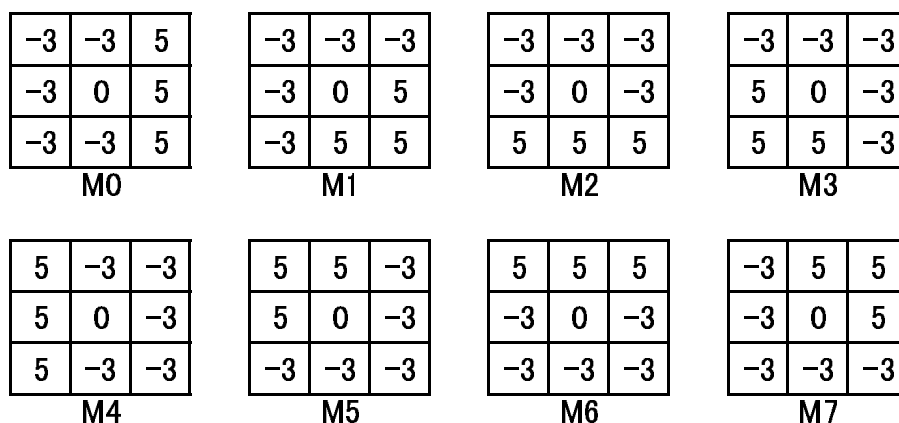


図 4.5: カーシュ・マスク

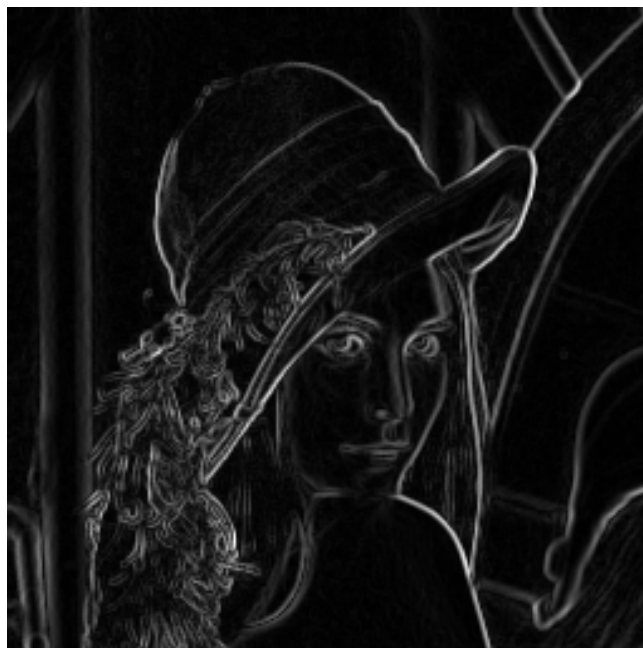


図 4.6: エッジ検出画像 (人物)

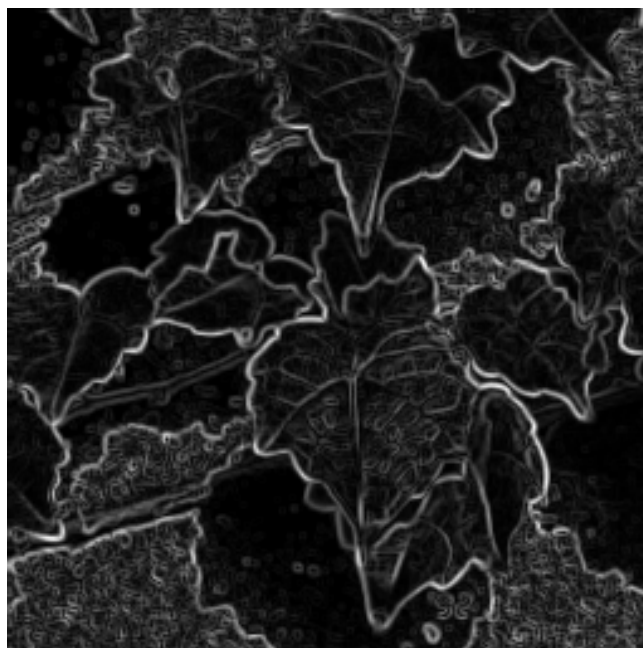


図 4.7: エッジ検出画像 (植物の葉)

#### 4.2.4 画像劣化のモデル化

本研究では，ぼけ画像のシャープニングの効果を検証するため，簡単な画像劣化モデルを構築して実験画像を作成し，提案した手法と従来法との比較を行う．

一般に，位置に不変な画質劣化モデルは，次のような式で表現される．

$$g(x, y) = \iint h(x - \alpha, y - \beta) f(\alpha, \beta) d\alpha d\beta + n(x, y) \quad (4.8)$$

ここで， $f(x, y)$  は画質劣化のない理想的な画像， $g(x, y)$  は劣化した画像， $n(x, y)$  は雑音を表す．関数  $h(x, y)$  は，点広がり関数 (point spread function) と呼ばれ，画質劣化の性質を表す．

いま，雑音がないと仮定すると式 (4.8) は

$$g(x, y) = \iint h(x - \alpha, y - \beta) f(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (4.9)$$

となる．この式の右辺は，関数  $f(x, y)$  と  $h(x, y)$  の畳込みであり，フーリエ変換を行うと

$$G(u, v) = H(u, v) F(u, v) \quad (4.10)$$

となる．本研究では，点広がり関数  $h(x, y)$  として標準偏差  $\sigma$  のガウス関数 (式 (4.11)) を用いることにする [23]．ぼけの強さはガウス関数の標準偏差を変えることによって調節することができる．

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (4.11)$$

図 4.9 ~ 4.11 に、劣化画像の例を示す。標準偏差  $\sigma$  の値を変えることによって画像の劣化（ぼけ）の程度が変化していることがわかる。

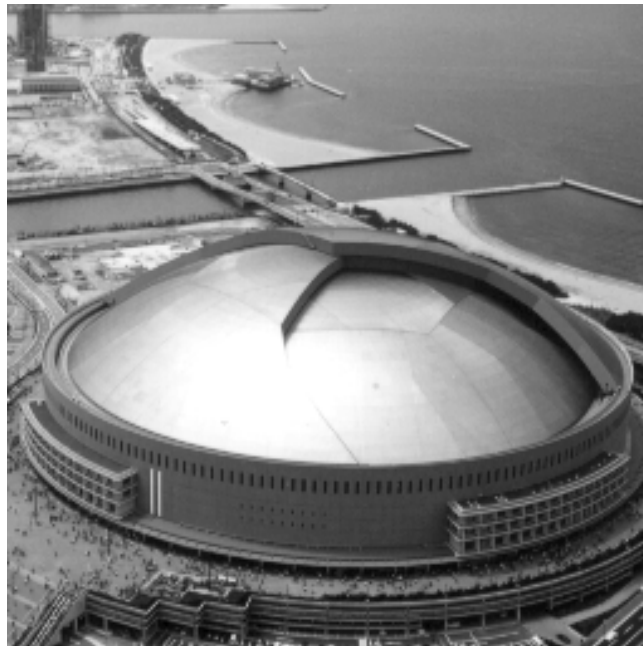
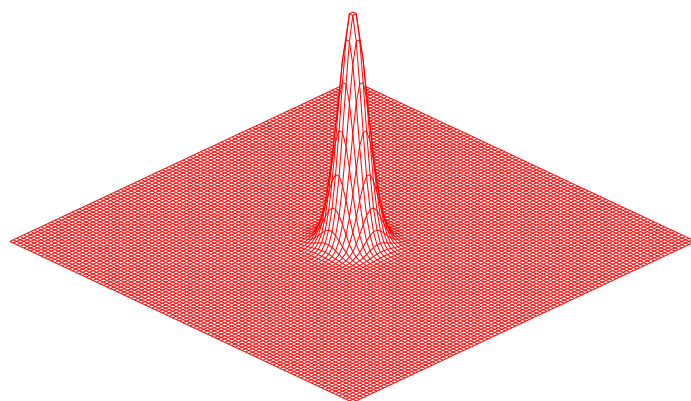
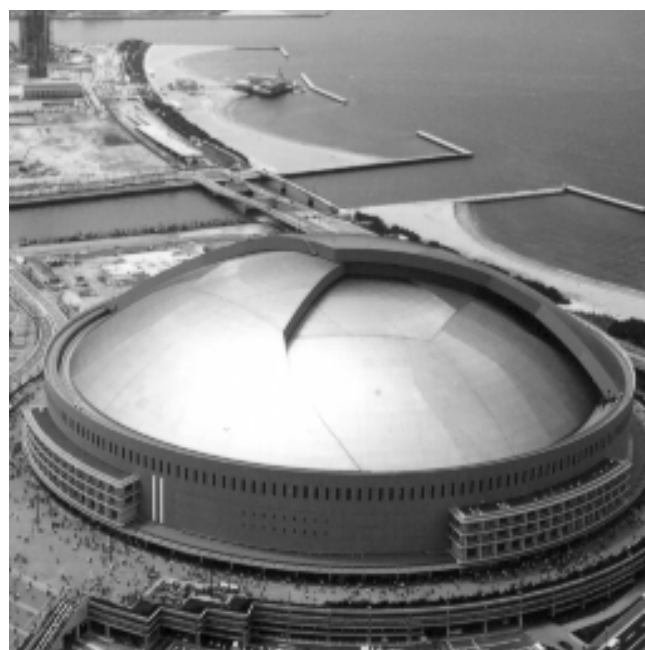


図 4.8: 原画像（福岡ドーム）

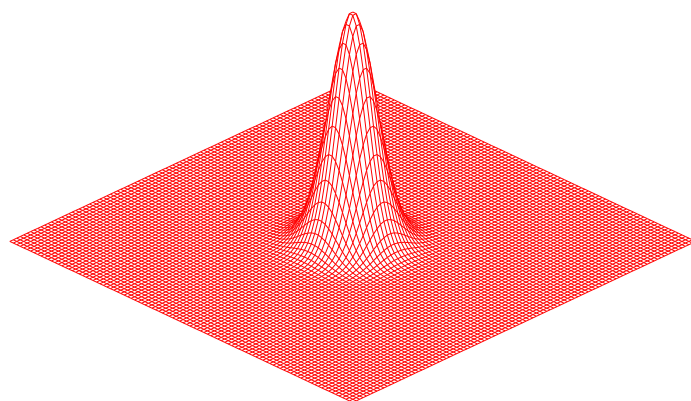


(a) ガウス関数

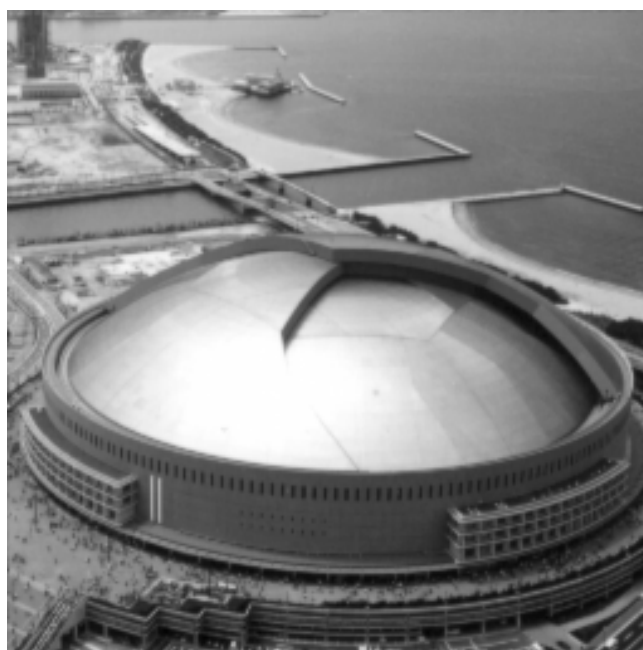


(b) ぼけ画像

図 4.9: 劣化画像 (福岡ドーム :  $\sigma = 0.3$ )



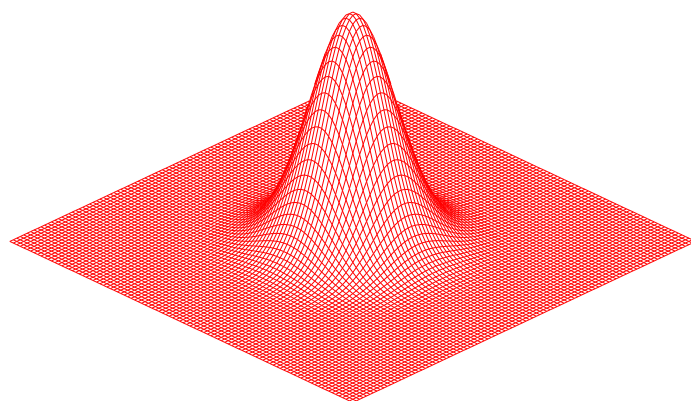
(a) ガウス関数



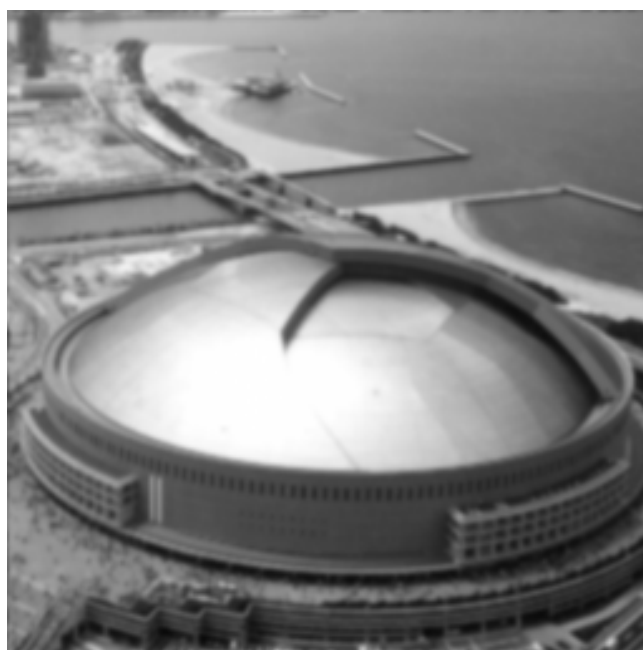
(b) ぼけ画像

図 4.10: 劣化画像 (福岡ドーム :  $\sigma = 0.5$ )





(a) ガウス関数



(b) ぼけ画像

図 4.11: 劣化画像 (福岡ドーム :  $\sigma = 0.9$ )

#### 4.2.5 Sign-only Synthesis を用いたシャープニング

図 4.12 と図 4.13 にぼけ画像のラプラシアンと Sign-only Synthesis(SOS) の画像を示す。SOS の画像は 3.4.1 で示した重畳型 SOS を用いて平坦部のノイズを低減したものである。図 4.13 を見ると、SOS 画像はエッジが細い線で強く出ているが、平坦部にノイズが発生していることがわかる。また、ラプラシアン画像はエッジの抽出が弱く太い線になっているが、平坦部のノイズが少なく滑らかであることがわかる。

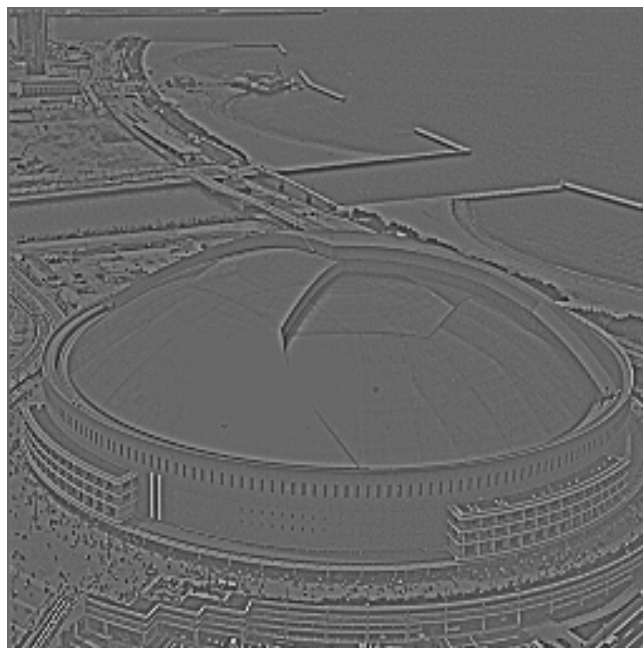


図 4.12: ぼけ画像のラプラシアン画像 ( $\sigma = 0.5$ )

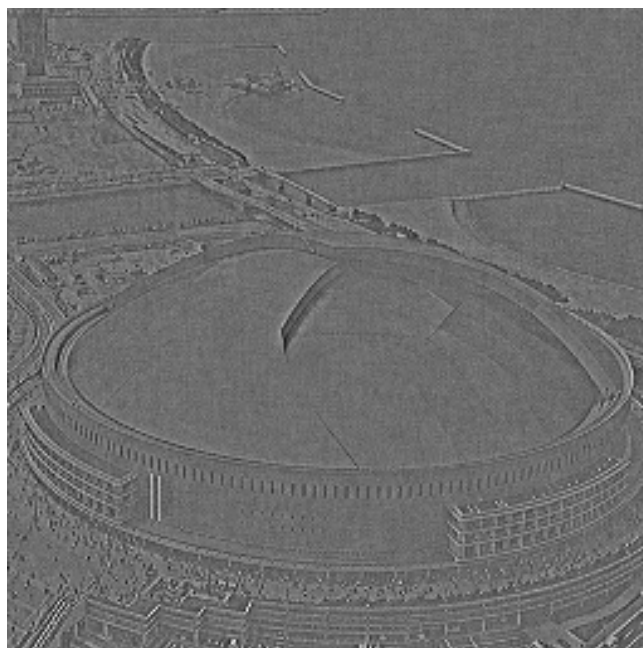


図 4.13: ぼけ画像の重畳型 SOS 画像 ( $\sigma = 0.5$ )

以上のことから，本研究では強いエッジの部分では SOS を用い，弱いエッジの部分ではラプラシアンを用いることにする．

ラプラシアンを  $l(x, y)$ ，SOS を  $s(x, y)$  とすると，まず図 4.14 に示す方法でラプラシアンと SOS の局所的な標準偏差を揃える．これは，ラプラシアンと SOS では出力される数値の範囲が異なるため，これらを合成するには出力値の範囲をあらかじめ揃えておく必要があるからである．

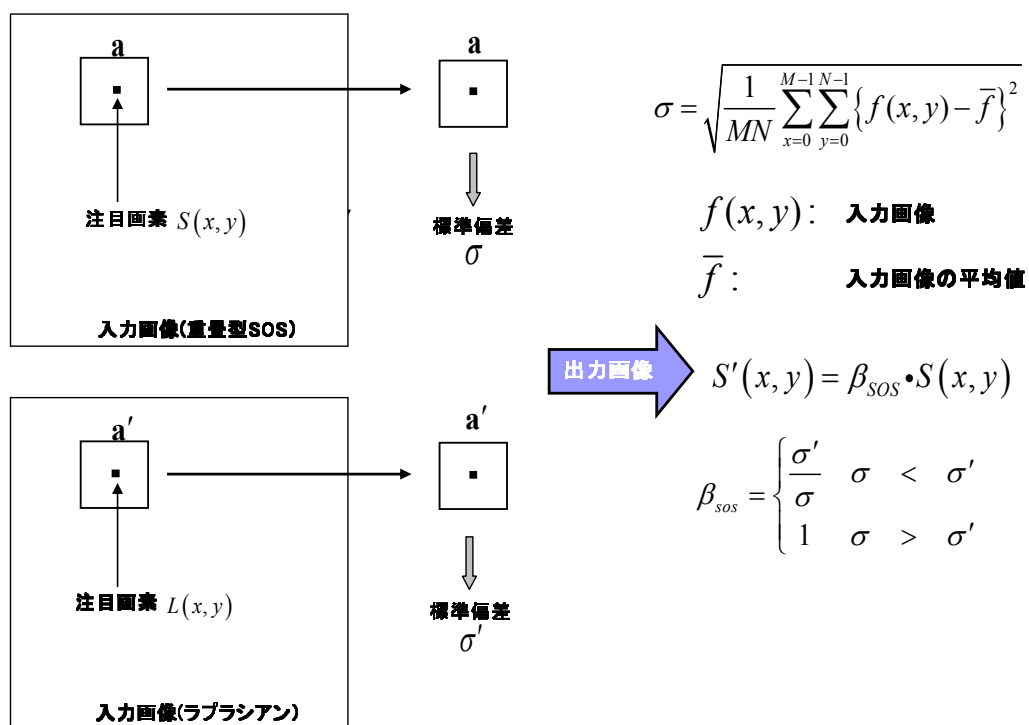


図 4.14: 標準偏差を揃える原理

次に、前述した式 (4.12) のアンシャープマスキングを次の式のようにラプラシアンと SOS の重み付きの和を用いたものに変更する。

$$g(x, y) = f(x, y) - k \{ \alpha l(x, y) + \beta s'(x, y) \} \quad (4.12)$$

ここで、

$$\alpha = \frac{a}{a+b}$$

$$\beta = \frac{b}{a+b}$$

$$a = 1 - h(i, j)^2 \quad (4.13)$$

$$b = 1 - \{h(i, j) - 1\}^2$$

$k$  : シャープニングの強さ

であり、 $h(i, j)$  には 4.2.3 で述べた線検出オペレータの出力の最大値を 1 に正規化したものを用いる。また、 $k$  はアンシャープマスキングの強さを調整するパラメータであり、利用者が必要とする結果となるように自由に決定することができる。ここでは、従来のアンシャープマスキング法と比較するために  $k = 1$  とした。

$\alpha, \beta$  は図 4.15 のようなグラフとなる。ここで、横軸は線検出オペレータの出力値であり、縦軸は重みである。 $\alpha + \beta$  は常に 1 となるように重み付けを行っている。また、それぞれの重みが 0 または 1 の付近で急に大きくなるようにすることによって、それぞれの長所がより引き出されるようにしている。ぼけ画像において、 $\alpha, \beta$  がどのような重みとなるかを図 4.16 と図 4.17 に示す。 $\alpha$  は平坦部で強い重みに、 $\beta$  はエッジ部で強い重みになっていることがわかる。

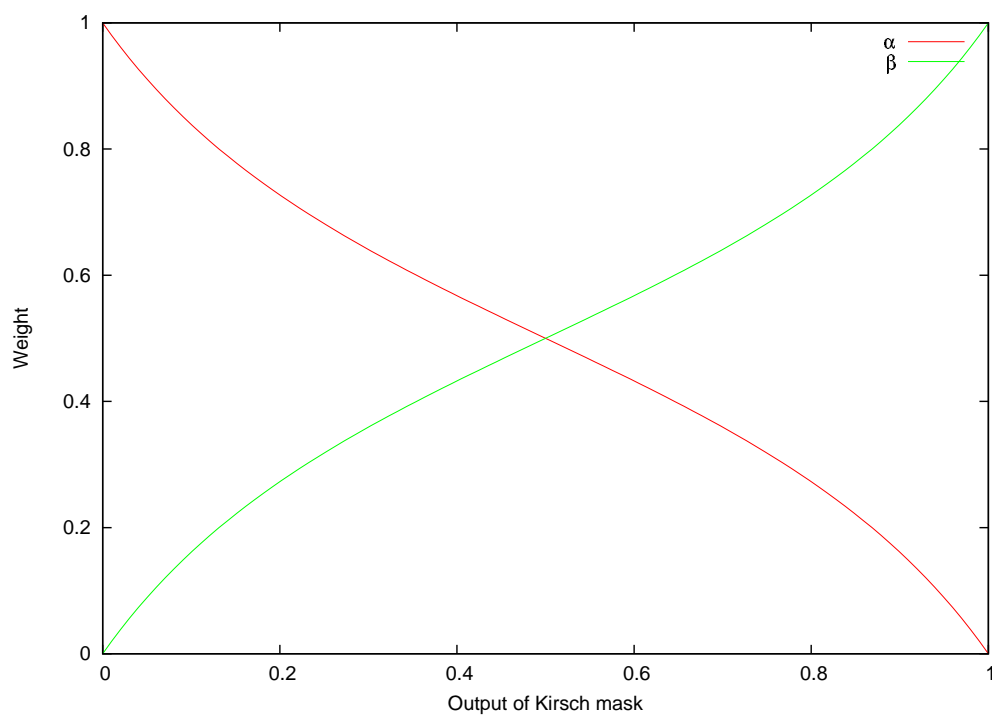


図 4.15:  $\alpha\beta$  の特性曲線

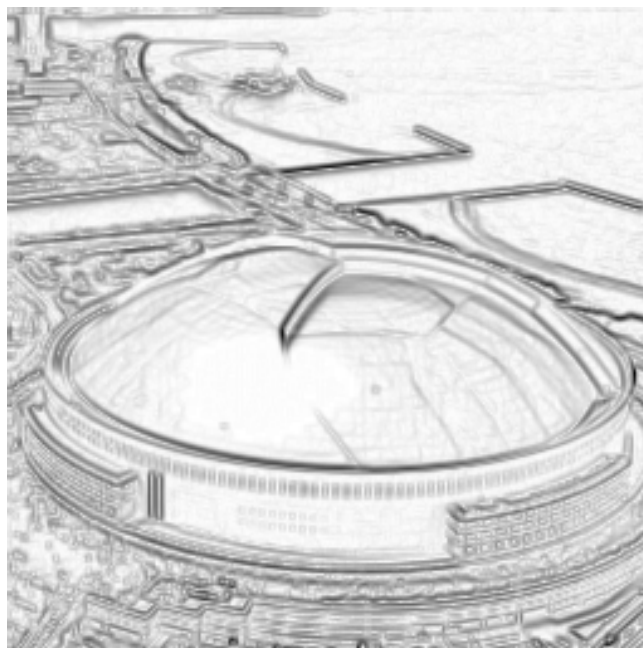


図 4.16:  $\alpha$  の値 (平坦部の重み)

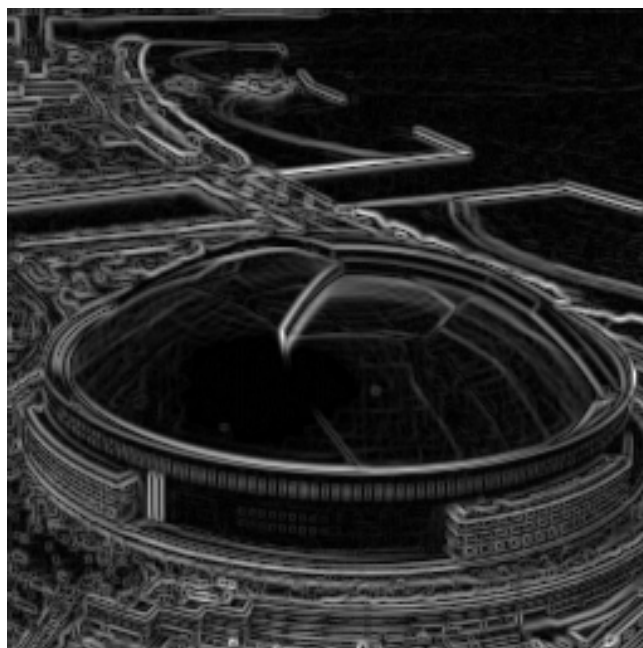


図 4.17:  $\beta$  の値 (エッジ部の重み)

#### 4.2.6 シミュレーション

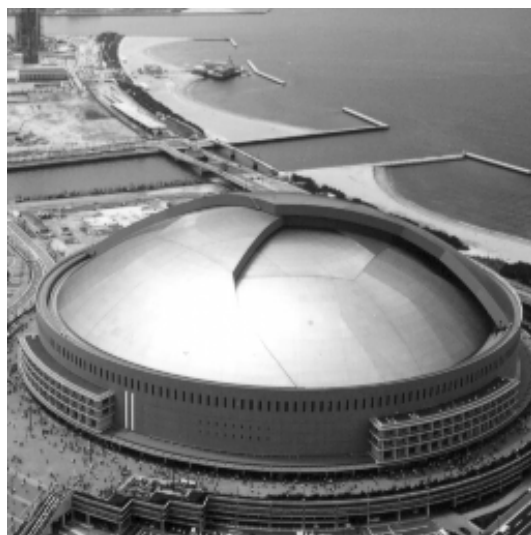
図 4.18 ~ 4.23 に従来のアンシャープマスキング法と本研究で提案する SOS を用いたアンシャープマスキング法の処理結果を示す。

ここでは、前述したように簡単な画像劣化モデルを構築して実験画像を作成しているので、劣化画像の復元の程度を原画像との  $SN$  比で評価する。

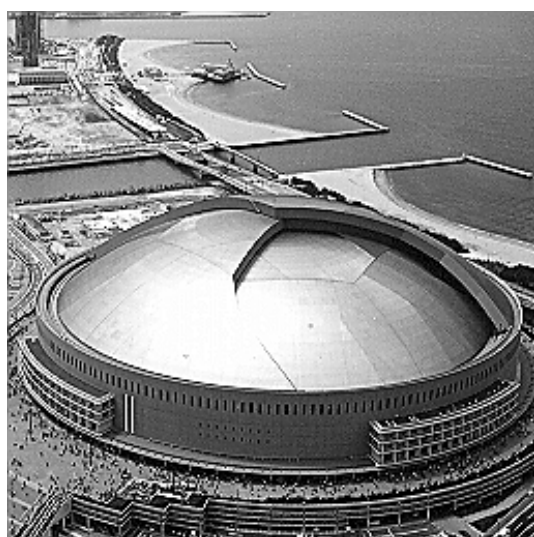
標準偏差  $\sigma$  の値が小さい（劣化が少ない）場合は、提案法と従来法の  $SN$  比の差はほとんどないが、標準偏差  $\sigma$  の値が大きくなる（劣化が大きい）と提案法の  $SN$  比が従来法よりも大きくなることが分かる。

これは、前述したように SOS の方がラプラシアンよりも対象物の輪郭線やエッジの線を細く取り出すことができるためだと考えられる。

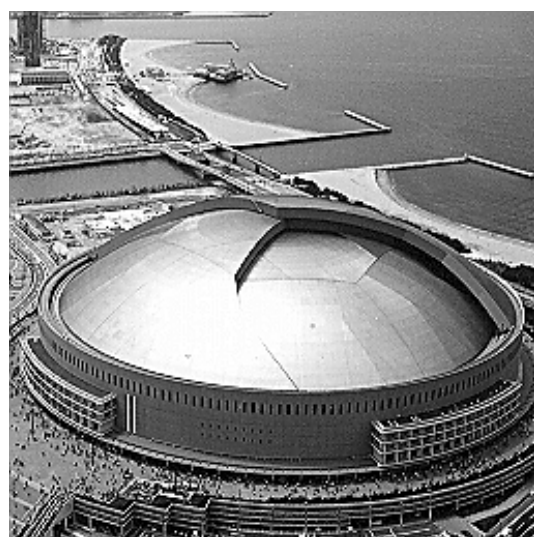




(a) ぼけ画像 ( $SNR = 51.01\text{dB}$ )

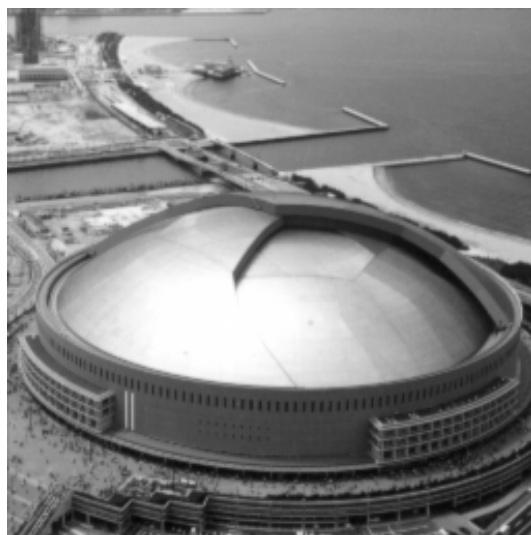


(b) 従来法 ( $SNR = 17.54\text{dB}$ )

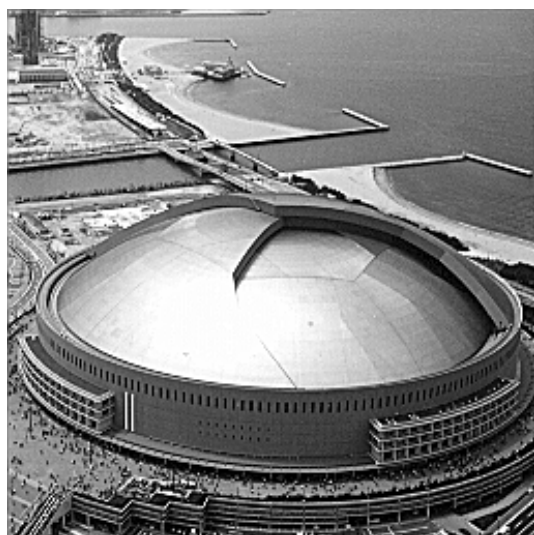


(c) 提案法 ( $SNR = 17.75\text{dB}$ )

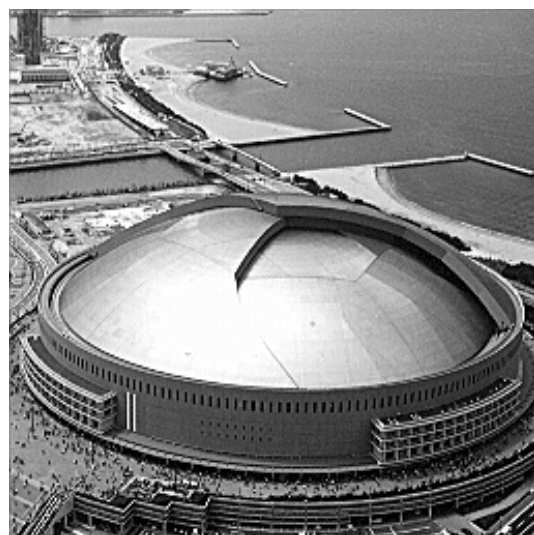
図 4.18: 福岡ドーム ( $\sigma = 0.3$ )



(a) ぼけ画像 ( $SNR = 34.66\text{dB}$ )

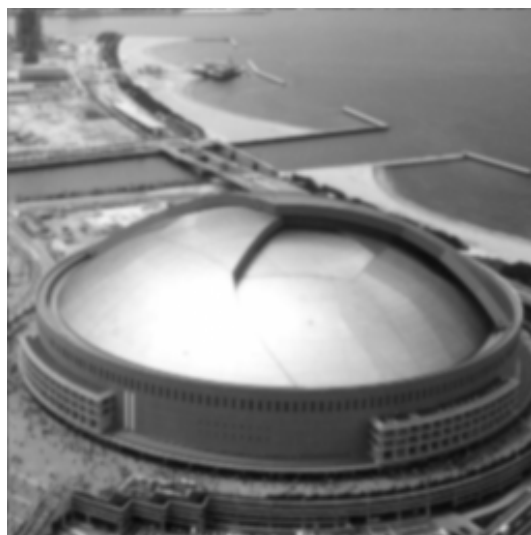


(b) 従来法 ( $SNR = 21.28\text{dB}$ )

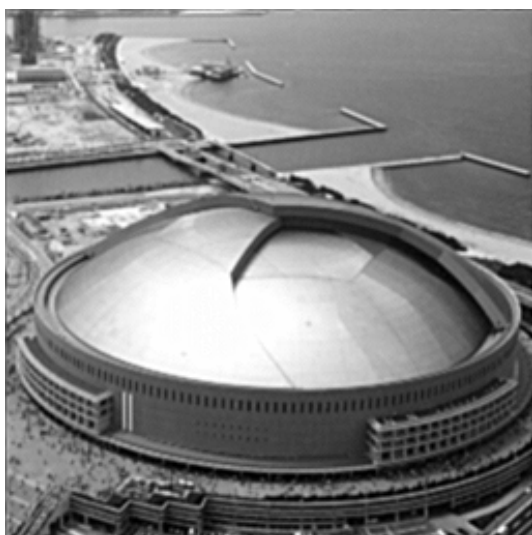


(c) 提案法 ( $SNR = 21.61\text{dB}$ )

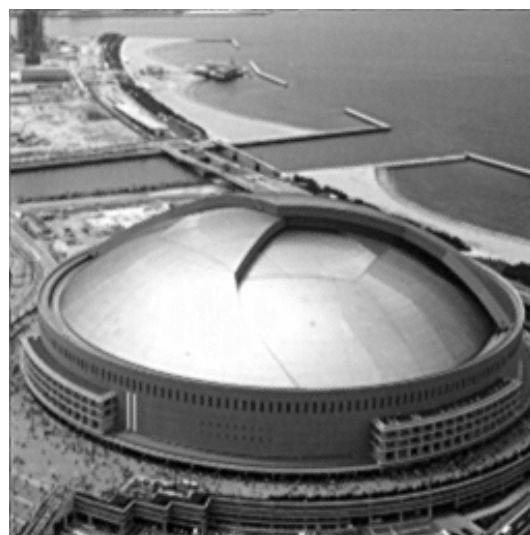
図 4.19: 福岡ドーム ( $\sigma = 0.5$ )



(a) ぼけ画像 ( $SNR = 27.01\text{dB}$ )



(b) 従来法 ( $SNR = 30.32\text{dB}$ )



(c) 提案法 ( $SNR = 31.12\text{dB}$ )

図 4.20: 福岡ドーム ( $\sigma = 0.9$ )



(a) ぼけ画像 ( $SNR = 51.23\text{dB}$ )



(b) 従来法 ( $SNR = 18.91\text{dB}$ )



(c) 提案法 ( $SNR = 19.04\text{dB}$ )

図 4.21: 花 ( $\sigma = 0.3$ )



(a) ぼけ画像 ( $SNR = 35.86\text{dB}$ )



(b) 従来法 ( $SNR = 22.66\text{dB}$ )



(c) 提案法 ( $SNR = 22.90\text{dB}$ )

図 4.22: 花 ( $\sigma = 0.5$ )



(a) ぼけ画像 ( $SNR = 28.20\text{dB}$ )



(b) 従来法 ( $SNR = 30.92\text{dB}$ )



(c) 提案法 ( $SNR = 31.67\text{dB}$ )

図 4.23: 花 ( $\sigma = 0.9$ )

### 4.3 結論

本章では, Sign-only Synthesis の応用の一つとしてぼけ画像のシャープニングについて示した. 本研究で提案した新しいアンシャープマスキング法は, 劣化の強い画像では従来のラプラシアンのみを用いる手法よりも効果的であることがわかった. また, 本研究では式 (4.12) において  $k$  の値を 1 として実験を行ったが利用者の目的に応じて  $k$  の値を変更することによりシャープニングの強さを変更することが出来る.

## 第5章 結論

本論文は，実数型直交変換の Sign-only Synthesis(SOS) について考察し，その性質と応用例を示した．

本研究のオリジナリティ

### 1. 重畳型 SOS と局所的 SOS を提案した．

SOS の平坦部でのノイズを削減するために重畳型 SOS と局所的 SOS を提案した．重畳型 SOS は上下左右に 1 ピクセルシフトした画像の SOS を重ね合わせることによって，平坦部に発生するランダムなノイズを効果的に削減することができた．

### 2. ぼけ画像の新しいシャープニング法を提案した．

SOS は信号の高周波成分を強調するという特徴を用いてぼけ画像の新たなシャープニング法を提案した．

SOS とラプラシアンそれぞれの長所を用いることによって，従来のラプラシアンのみを用いる場合よりも効果的なシャープニングが行えることが分かった．また，重み係数としてカーシュマスクによるエッジ強度を用い



たことにより，平坦部のノイズを増強することなくエッジ強調が行えるようになった．

#### 今後の課題と問題点

##### 1. 高速なノイズ削減法の開発

SOSの平坦部におけるノイズの削減方法として，シフトSOSと局所的SOSを提案した．しかし，直交変換を何度も行うため，計算時間が長くなるという問題がある．特に画像サイズが大きくなると計算時間が指数関数的に増加してしまうためより高速なノイズ削減法が求められる．

## 参考文献

- [1] 高木幹雄・下田陽久 [ 監修 ]. 新編 画像解析ハンドブック. 東京大学出版会, 2004.
- [2] Sri-Rajasekhar Kothapalli, Chandra S. Yelleswarapu, and Sriram G. Naraharisetty. Spectral phase based medical image processing. *Acad Radiol*, No. 12, pp. 708–721, 2005.
- [3] Huang TS, Bumett JW, and Deczky AG. The importance of phase in image processing filters. In *IEEE Trans Acoust Speech Signal Processing*, No. ASSP-23, 1975.
- [4] Oppenheim AV and Lim JS. The importance of phase in signals. In *Proc of the IEEE*, No. 69, 1981.
- [5] H. Kondo and E. Maeda. The importance of the phase in spectral analysis of image. *Journal of ITE*, Vol. 45, No. 10, pp. 1164–1171, 1991.
- [6] Eklundh JO. On the use of fourier phase features for texture discrimination. *Computer Graphics and Image Processing*, No. 9, pp. 199–201, 1979.

- [7] Horner JL and Gianino PD. Phase-only matched filtering. *Applied Optics*, No. 23, pp. 812–816, 1984.
- [8] Chen QS, Defrise M, and Deconinck F. Symmetric phase-only matched filtering of fourier-mellin transform for image registration and recognition. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, No. 16, pp. 1156–1168, 1994.
- [9] Henry Stark. *Image Recovery-theory and Application*, chapter 1-6, pp. 1–228. Academic Press, 1987.
- [10] H.Kondo, S. Agus, and M. Morokuma. Adaptive edge sharpening of digital images using phase-only synthesis. *Journal of ITE*, Vol. 50, No. 9, pp. 1383–1389, 1996.
- [11] Zhimei YANG, Takaharu KOUDA, Lifeng ZHANG, and Hiroshi Kondo. New adaptive technique for binary signal compression -application of hadamard signs-. In *Proc. of the 28th SITA*, Vol. 1, pp. 311–314, 2005.
- [12] Zhimei YANG, Takaharu KOUDA, Lifeng ZHANG, and Hiroshi Kondo. New adaptive technique for binary signal compression -application of hadamard signs-. In *Proc. of IWAIT 2006*, Vol. 1, 2006.
- [13] 田村秀行. コンピュータ画像処理. オーム社, 2004.
- [14] A .Rosebfeld, A. C. Kak 著, 長尾真 [ 監訳 ] . デジタル画像処理. 近代科学社, 1978.

- [15] Hiroshi Kondo, Zhimei YANG, Takaharu KOUDA, and Lifeng ZHANG. Sign-only synthesis. In *Proc. of Information-MFCSIT'06*, Vol. 1, pp. 134–138, 2006.
- [16] Zhimei YANG, Hiroshi Kondo, Takaharu KOUDA, and Lifeng ZHANG. Sign-only-synthesis of typical orthogonal transforms. In *Proc. of NICOGRAPH International 2006*, No. SessionII Advanced Image Processing, 2006.
- [17] Zhimei YANG, Hiroshi Kondo, Takaharu KOUDA, and Lifeng ZHANG. Sign-only synthesis, 2006.
- [18] 鳥脇純一郎. 画像理解のためのデジタル画像処理 [1][2]. 昭晃堂, 1988.
- [19] W. K. Pratt. *Digital Image Processing*. New York:John Wiley & Sons, 1978.
- [20] 坂上 勝彦田村 秀行, 舟久保登, 小野雅敏, 中山勝矢, 小川克郎. 地形判読のためのランドサット画像強調法. 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 4, No. 2, pp. 137–149, 1984.
- [21] D. Marr and E. Hildreth. Theory of edge detection. In *Proc. Royal Society of London, B*, Vol. 207, pp. 187–217, 2000.
- [22] R. Kirsch. Computer determination of the constituent structure of biological images. *Comput. Biomed. Res*, Vol. 4, pp. 315–328, 1971.
- [23] 久保田彰, 相澤清晴. 線形フィルタによる2枚の合焦画像からの任意ぼけ画像の再構成. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J83-D-II, No. 12, pp. 2663–2674, 2000.

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり，終始懇切なるご指導，ご鞭撻を賜りました九州工業大学工学部電気工学科電気工学教室 近藤 浩 教授に心から深く感謝致します．

また，本論文の作成にあたり，貴重なご助言，ご指導を頂きました九州工業大学工学部電気工学科 芹川 聖一 教授，高城 洋明 教授，物質工学科 恵良 秀則 教授に深く感謝致します．

最後に，本研究に貴重なご助言を頂いた（株）グローバル・セキュリティ・デザインの江田 孝治氏と本研究の実験等に協力していただいた九州工業大学工学部電気工学科電気工学教室画像処理研究室の大学院生，学部生の諸氏に感謝致します．

## 研究業績：発表論文および学会発表

- (1) Hiroshi Kondo, Zhimei YANG and Takaharu KOUDA, "Natural Dilation of an Image using DWT", Proc. of ISRSE, vol.1, No.TS-20.5, (2003年11月)
- (2) Zhimei YANG, Hiroshi Kondo and Takaharu KOUDA, "Natural Image Dilation using DWT", Proc. of ISPACS 2003, vol.1, No.D1-5, pp.155-159, (2003年12月)
- (3) Zhimei YANG, Hiroshi Kondo and Takaharu KOUDA, "Substituted DWT Image Dilation", Proc. of the Third International Conference on Information 2004, vol.1, pp.510-513, (2004年12月)
- (4) H.Kondo, S.Kunifusa, Z.YANG, T.KOUDA and L..ZHANG, "Binary Signal Compression using DCT signs", Proc. of ICARA 2004, vol.1, No.PS-1, pp.240-243, (2004年12月)
- (5) Zhimei YANG, Takaharu KOUDA, Lifeng ZHANG and Hiroshi Kondo, "New Adaptive Technique for Binary Signal Compression -Application of Hadamard signs-", Proc. of SITA 2005, vol.1, No.1, pp.311-314, (2005年11月)
- (6) Zhimei YANG, Takaharu KOUDA, Lifeng ZHANG and Hiroshi Kondo, "New

- Adaptive Technique for Binary Signal Compression -Application of Hadamard signs-", Proc. of IWAIT 2006, vol.1, No.S06-6, (2006年1月)
- (7) Zhimei YANG, Hiroshi Kondo and Takaharu KOUDA, "Substituted DWT Image Dilation", Journal of INFORMATION, vol.9, No.2, pp.323-329, (2006年3月)
- (8) Zhimei YANG, Hiroshi Kondo, Takaharu KOUDA and Lifeng ZHANG, "Sign-only-Synthesis of Typical Orthogonal Transforms", Proc.of NICOGRAPH International 2006, No.SessionII Advanced Image Processing, (2006年6月)
- (9) Hiroshi Kondo, Zhimei YANG, Takaharu KOUDA and Lifeng ZHANG, "Sign-only Synthesis", Proc.of Information-MFCSIT'06, vol.1, pp.134-138, (2006年8月)
- (10) Lifeng ZHANG, Zhimei YANG, Hiroshi Kondo and Takaharu KOUDA , "Face authentication using Orthogonal Transform signs", Proc.of ISCIT2006 (International Symposium on Communications and Information Technologies 2006), No.F2A-4, (2006年10月)
- (11) Lifeng ZHANG, Zhimei YANG, Hiroshi Kondo and Takaharu KOUDA , "Face Identification Using Facial Expression", Proc.of ISCIT2006 (International Symposium on Communications and Information Technologies 2006), No.T3A-3, (2006年10月)

- (12) Zhimei YANG, Hiroshi Kondo, Takaharu KOUDA and Lifeng ZHANG, "Sign-only Synthesis", Proc.of ISITA 2006 (The 2006 International Symposium on Information Theory and its Applications), No.Wed1-5-1, (2006年11月)
- (13) Hiroshi Kondo, Zhimei YANG, Takaharu KOUDA and Lifeng ZHANG, "Sign-only Synthesis", Journal of INFORMATION, vol.10, No.1, (2007年1月)