

博士論文

撮像制御に基づく動きぼけと奥行きぼけの同時復元

Deblurring Depth Blur and Motion Blur
Simultaneously from Coded Imaging

2015年

小林 丈之

目次

第1章	序論	1
1.1	従来のぼけ復元	1
1.2	本研究の目的とアプローチ	2
1.3	本論文の構成	4
第2章	時空間符号化撮像法	5
2.1	奥行きぼけと動きぼけ画像	5
2.2	PSFによるぼけ復元	6
2.2.1	ウィナー・フィルタ	8
2.2.2	Richardson-Lucy フィルタ	9
2.2.3	実画像によるぼけ復元	11
2.2.4	安定的な復元	12
2.3	時空間符号化撮像法	15
2.4	最適な時空間符号	16
2.5	実画像実験	18
2.6	定量評価	19
第3章	奥行不変 PSF	26
3.1	レンズモデル	26
3.1.1	物体側テレセントリックレンズ	26
3.1.2	両側テレセントリックレンズ	27
3.2	奥行不変 PSF の導出	29
3.3	シミュレーション実験	30
3.3.1	数値シミュレーション	30
3.3.2	レンズシミュレーターによるぼけ画像の生成	33
3.3.3	レンズシミュレーターによる評価実験	34
3.4	実画像実験	36
第4章	奥行きと動き不変 PSF	42
4.1	IPSF の動き不変性	42
4.2	一般レンズにおける動き不変性	47

4.3	ノイズとの関係	48
4.4	シミュレーション実験	49
4.5	実画像実験	51
第5章	全焦点画像と超解像度画像の同時生成	59
5.1	超解像度画像	59
5.2	画像補間法	59
5.2.1	最近傍法 (Nearest Neighbor)	60
5.2.2	線形補間法 (Bilinear)	60
5.2.3	3次元補間法 (Bicubic)	60
5.3	画素シフトによる全焦点超解像画像	61
5.3.1	レンズシミュレーターによる評価実験	63
5.3.2	実画像実験	64
5.4	IPSF と IM-GPDCT による全焦点超解像画像	73
5.4.1	DCT	73
5.4.2	IM-GPDCT 法	76
5.4.3	IPSF と IM-GPDCT による超解像	80
5.4.4	シミュレーション実験	81
5.4.5	実画像実験	90
第6章	結論	91
付録 A		91
A.1	レンズシミュレーター的设计	92
A.1.1	透視レンズ	92
A.1.2	物理側テレセントリックレンズ	93
A.1.3	両側テレセントリックレンズ	94
A.2	画像評価法	95
A.2.1	PSNR	95
A.2.2	SSIM	96
	謝辞	97
	成果発表	98

第1章

序論

近年，カメラのぼけ関数 (PSF: Point Spread Function) を用いてデコンボリューションを行うことで，奥行ぼけや動きぼけの復元を行う研究が進みつつある．特に，コンピュータショナルフォトグラフィ[1]の研究の進展により，被写体の奥行が一定でない3次元シーンにおいても全焦点画像の生成や被写界深度の制御が可能になりつつある．コンピュータショナルフォトグラフィとは，撮像系を工夫することで従来のカメラでは得られなかった様々な情報を取得し，これを処理することで，従来のカメラでは不可能であった様々な機能を実現しようとするものである．そのため，これまでの撮像系では通常用いられることのなかった特殊な絞りやレンズが撮影に用いられたり，特殊な運動を行いながら撮影を行う．

カメラにより被写体にピントを合わせるとき，被写体前後においてピントが合う範囲を被写界深度と呼び，被写界深度外に被写体があるとき，撮影画像中においてぼけが発生する．このとき，ぼけの存在する画像からぼけの無い画像を推定する処理をぼけの復元と呼び，これまでに様々な手法が提案されてきた．その多くは，ぼけの発生が点広がり関数 (PSF: point spread function) の畳み込みであることを利用し，ぼけ画像に対して PSF の逆関数をかけ，デコンボリューションを行うことで復元を行う．

以下ではまず，従来のぼけ復元について簡単に説明し問題点を述べた上で，本研究の目的と概要を述べる．

1.1 従来のぼけ復元

一般的にぼけの種類としては，先に述べたようにピントが合っていない状態で発生する奥行きぼけ (Depth Blur) と，露光時間中にカメラや物体が動くことで発生する動きぼけ (Motion Blur) の2種類が存在する．

奥行きぼけについては，PSF は物体面上の各点の奥行に依存するため，異なる奥行きにピントの合った複数枚の画像を用いたり，Light Field を取得することでぼけの復元を行う手法が多数提案されてきた [2, 3, 4]．これらの手法では，ぼけの除去や任意の奥行きぼけの生成が可能である反面，複数枚の画像の取得が必要であり，このため時分割での撮

影や光路分割による撮影などを行う必要があった。

これに対して、コンピュータショナルフォトグラフィの分野において、一枚の撮影画像のみからぼけ復元が可能な符号化撮像法 [5] が注目されている。符号化撮像では、従来の画像処理のみでは不安定であった画像のぼけ復元や Depth from defocus [6, 7] による奥行き推定問題を、カメラの撮像時のぼけ関数を符号化することで安定的に求めようとする新たな手法である。ぼけ関数の符号化のために、Veeraraghavan ら [8] は最適化による探索により符号化絞りパターンを求めた。理想的なレンズのぼけ関数は、絞り形状そのものである。そこで Veeraraghavan らは、絞り形状そのもののフーリエスペクトルの最小値を評価関数とし、これを最大化することで、PSF の周波数特性のゼロ交差を避けたデコンボリューションに適した広帯域の絞りパターンを探索した。また長原ら [9] は、露光時間中に撮像素子を前後に移動させることで、物体の奥行きに依らず PSF が一定となる奥行き不変 PSF が得られることを示し、これを用いることで物体の奥行きに依らず全焦点画像を生成する手法を提案した。しかしこの方法では、カメラ内部において撮像素子を移動させなければならないため、特殊な構造を持ったカメラを構築する必要があり、既存のカメラを用いて実現することはできない。

一方、カメラの露光中に物体が運動することによって生ずる動きぼけに関しても、符号化撮像に基づくぼけ復元法が研究されつつある。Raskar ら [10] は、露光中のシャッターの開閉を符号化することで動きぼけを安定的に復元する手法を提案した。しかしこの方法ではシャッターを符号化することで撮像素子に入る光量が減少するため、耐ノイズ性が劣化する問題がある。また、Raskar らの手法では、画像中における物体の運動方向と運動速度を何等かの方法で事前に推定しておく必要があった。これに対して Levin ら [11] は、カメラを露光中に放物運動させることで、動きぼけの PSF が運動の大きさに依らず不変となることを示し、この性質を用いることで物体の速度に依らず動きぼけの復元が可能であることを示した。しかし、Levin らの手法においても画像中における物体の運動方向は事前に何らかの方法で推定しておく必要があり、カメラの放物運動の方向を物体の運動方向と一致させる必要があった。一方、坂東ら [12] は、露光中に撮像素子を撮像面に平行な面上で円運動させることで、物体の動きぼけを復元する手法を提案した。この方法では、PSF の周波数分布の特徴から、ぼけ PSF の推定が可能だが、画像中に異なる動きの PSF が混在する場合には、領域の分割と画像再合成が必要となる。

1.2 本研究の目的とアプローチ

このようにぼけの復元に関して様々な手法が提案されているが、これまでは、奥行きぼけと動きぼけが同時に発生する状況については考慮がされてこなかった。一方、異なる奥行きに動く被写体が複数存在するような状況や、奥行き差の大きいシーンにおいて手振れが発生した場合などにおいては、撮影した画像中に奥行きぼけと動きぼけが同時に発生する。このため、画像中の奥行きぼけと動きぼけを共に除去する画像復元技術が必要とされている。

そこで，本研究では，画像中の奥行きぼけと動きぼけの発生過程を詳しく解析し，この結果をもとに奥行きぼけと動きぼけを同時に復元する新たなぼけ復元技術を開発する．このため本研究では，まず特定の奥行きと運動下で発生するぼけに最適な符号化撮像法として時空間符号化を提案する．時空間符号化とは，カメラの開口を時間方向と空間方向とに同時に最適符号化することである．本手法により撮影された画像から，奥行きぼけと動きぼけを同時に復元することが可能であることを示す．

次に，既存のカメラを露光時間中に移動させるだけで，任意の運動ぼけの除去と全焦点化が同時に実現可能なぼけ復元法を提案する．提案法の効果は，従来の運動ぼけ復元とは異なり，あらゆる運動に対して運動が未知の状態でのぼけ復元が可能であり，さらに奥行のある物体に対しての全焦点画像の生成が同時に可能である．また，複数の運動ぼけが画像中に混在していても復元可能であり，従来難しかった回転や拡大縮小の動きにより発生した運動ぼけに関しても問題なく復元することができる．

また本研究では，提案法の有効性をレンズシミュレーターを構築することで定量評価する．一般に非平面物体を撮影した画像からのぼけ復元問題においては正解画像が存在しないため定量評価が行われてこなかった．そこで本研究では，レンズによる任意物体のぼけ画像が生成可能なレンズシミュレーターを構築し，このシミュレーターを用いて提案手法の有効性を定量的に評価する．

最後に，ぼけの復元と同時に超解像画像の生成が可能であることを示す．超解像画像は既存手法においては複数の撮影画像から行うのが一般的である [13, 14]．これに対して本研究では，1枚の撮影画像のみから超解像画像の生成を行う．そのため複数の撮影画像からの復元に比べて超解像の効果は少なくなるが，超解像化と共に任意の運動ぼけの除去と全焦点化が同時に行える効果がある．

1.3 本論文の構成

以下に本論文の構成について示す．

第2章 時空間符号化撮像法

第2章ではまず，絞り形状の符号化と露光時間の符号化を同時に最適化する手法を提案する．特定の奥行きぼけと運動ぼけの条件下で導出したコスト関数を最小化することで時空間符号を導出し，時空間符号化画像を復元することにより，特定の奥行きぼけと動きぼけを同時に取り除くことが可能であることを示す．またその有効性について，シミュレーション実験と実画像実験で評価する．

第3章 奥行不変 PSF

第3章では，既存のカメラを露光時間中に移動させることで，得られる画像中のぼけが撮影対象までの奥行きによって変化しない奥行不変な PSF となることを示す．まず，光軸方向に光学系を移動させても像の大きさが変化しないテレセントリックレンズ系をつかってモデル化することで奥行不変性について示す．また，様々な奥行きのある物体から全焦点の生成が可能なことをシミュレーション実験と実画像実験で評価する．

第4章 奥行きと動き不変 PSF

第4章では，3章の奥行き不変 PSF に動きぼけを含めたモデルについて述べる．画像中において物体が様々な方向へ様々な大きさを運動する複雑な動きぼけが復元可能なことを示し，撮像物を回転や拡大・縮小させる実験によりその有効性を示す．特に，同時復元可能な条件として，物体の運動する瞬間の速度に着目し，同時復元可能な物体の運動速度とカメラの運動速度との関係を明らかにする．

第5章 全焦点画像と超解像度画像の同時生成

第5章では，奥行き不変 PSF を用いた画素シフトと周波数ドメインにおける繰り返し推定法により，全焦点の超解像画像が一枚の撮影画像のみから生成可能であることを示す．その結果，従来一枚の画像からの超解像画像に比べてより高精細に復元が可能となり，同時に全焦点画像と任意の動きぼけの復元が可能となることを示し，その有効性について評価する．

第6章 結論

第6章では，時空間符号化撮像法と奥行き不変 PSF についての成果と論旨をまとめ，今後の展望について述べる．

第2章

時空間符号化撮像法

本章では、まず特定の奥行きと運動下で発生するぼけの復元に最適な時空間符号化撮像法について述べる。第1章で述べたように、従来の符号化撮像法では奥行きぼけ [8, 15, 16, 5, 17, 9, 18, 19, 20, 21] と動きぼけ [10, 11, 22, 12, 23] にそれぞれ特化した最適な符号化について研究がされてきた。しかし実際の撮影環境では、これらのぼけが同時に発生することが多々あり、従来手法では対応することが出来なかった。そこで、本研究ではカメラの開口を時間方向と空間方向とに同時に最適符号化する時空間符号化撮像法を提案する。

従来の Veeraraghavan ら [8] の符号化絞りと Raskar ら [10] の符号化露光撮像を単純に組み合わせるとイメージセンサーに入射する光量が減少するため、SN比が低下してしまう [24]。そこで、本研究では時空間で符号化最適化を行うことで従来と同等の光量で奥行きぼけと動きぼけを同時に復元する。

2.1 奥行きぼけと動きぼけ画像

三次元物体が焦点の外れた状態で撮影されると、画像には奥行きぼけが発生する。この場合、撮影された奥行きぼけ画像 $s(x, y)$ は奥行きぼけ PSF $h_d(x, y)$ とぼけのない画像 $f(x, y)$ により次式で表現される。

$$s(x, y) = h_d(x, y) * f(x, y) \quad (2.1)$$

ここで、 $*$ は二つの信号の畳み込み（コンボリューション）を表す。

次に、この三次元物体が焦点の外れた状態で、かつ露光時間中に三次元空間を運動していた場合、画像には奥行きぼけと運動ぼけが同時に発生する。奥行きぼけが露光時間中に変化しないとすると、撮影されたぼけ画像 $g(x, y)$ は運動ぼけ PSF $h_m(x, y)$ と奥行きぼけ画像 $s(x, y)$ により次式で表現される。

$$g(x, y) = h_m(x, y) * s(x, y) \quad (2.2)$$

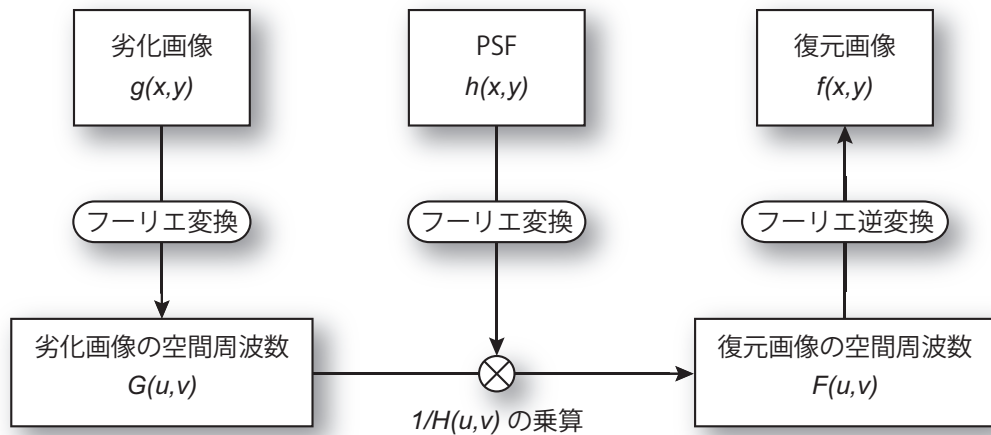


図 2.1 デコンボリューション

式 (2.1) と式 (2.2) より，奥行きぼけと動きぼけが同時に発生する画像 $g(x, y)$ とぼけのない画像 $f(x, y)$ の関係は次式となる．

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) \quad (2.3)$$

ここで， $h(x, y)$ は奥行きぼけと動きぼけによる混合ぼけの PSF であり，次式となる．

$$h(x, y) = h_m(x, y) * h_d(x, y) \quad (2.4)$$

すなわち， $h(x, y)$ が得られればこれを用いて $g(x, y)$ をデコンボリューションすることで元のぼけのない画像 $f(x, y)$ を復元することができる．

2.2 PSF によるぼけ復元

今，PSF の $h(x, y)$ が既知である場合に画像 $g(x, y)$ を観測したとする．この観測過程は，式 (2.3) の両辺をフーリエ変換することで，周波数空間において以下のように記述することができる．

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) \quad (2.5)$$

ここで， $G(u, v)$, $H(u, v)$, $F(u, v)$ はそれぞれ $g(x, y)$, $h(x, y)$, $f(x, y)$ のフーリエ変換を表す．雑音（画像ノイズ）がない場合には，劣化のない画像 $f(x, y)$ を復元するには式 (2.5) より，

$$F(u, v) = \frac{G(u, v)}{H(u, v)} \quad (2.6)$$

を計算し，逆フーリエ変換を行えばよい．このようにコンボリューションの畳み込みによってぼかされた画像を元に戻す操作をデコンボリューションと言う．デコンボリューションの手順を図 2.1 に示す．この画像復元に用いた，

$$M(u, v) = \frac{1}{H(u, v)} \quad (2.7)$$

は逆フィルタと呼ばれる。しかし、実際に観測される画像 $g(x, y)$ には画像ノイズが含まれるため、式 (2.6) は、

$$\frac{G(u, v)}{H(u, v)} = F(u, v) + \frac{N(u, v)}{H(u, v)} \quad (2.8)$$

となる。ここで、 $N(u, v)$ はノイズ成分 $n(x, y)$ のフーリエ変換を表す。したがって、もしある周波数で $H(u, v)$ の値が非常に小さくなると、この周波数付近では、 $N(u, v)/H(u, v)$ の値が、本来の信号成分 $F(u, v)$ よりはるかに大きくなってしまふ。つまり、こうした周波数成分においては、 $G(u, v)/H(u, v)$ の値のほとんどがノイズ成分を表していることになる。もし、こうしたノイズ成分を含めたまま逆フーリエ変換すると、得られた画像はノイズだらけになってしまう。そこで、逆フィルタとして次式の LPF (Low-pass filter) 使ってノイズの影響について調べてみる。

$$M(u, v) = \begin{cases} \frac{1}{H(u, v)}, & (\sqrt{u^2 + v^2} \leq w_0) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.9)$$

ここで、 w_0 はカットオフ周波数を表すが、説明を簡略化するために離散フーリエ変換後の最大周波数で正規化した値 w_1 を用いる。観測された画像のフーリエ変換 $G(u, v)$ に $M(u, v)$ を掛けた後逆フーリエ変換すると、復元画像が求まる ([25])。実際にはカメラの撮像素子により撮影された画像は、離散信号となるため次式の離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform: DFT) が使われる。

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-2\pi i \frac{kn}{N}} \quad (2.10)$$

また、この逆変換にあたる逆離散フーリエ変換 (Inverse Discrete Fourier Transform: IDFT) は次式となる。

$$f(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{2\pi i \frac{kn}{N}} \quad (2.11)$$

実際の撮影画像は 2 次元情報となるため、次式の 2 次元離散フーリエ変換を行う。

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-2\pi i (\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (2.12)$$

また、この逆変換にあたる 2 次元逆離散フーリエ変換は次式となる。

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{2\pi i (\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (2.13)$$

図 2.2 は w_1 と復元画像の PSNR (付録 A.2) との関係グラフ化したものである。グラフより、 $w_1 = 0.29$ を超えると PSNR が大きく低下しているのが分かる。図 2.3 はグラフ上

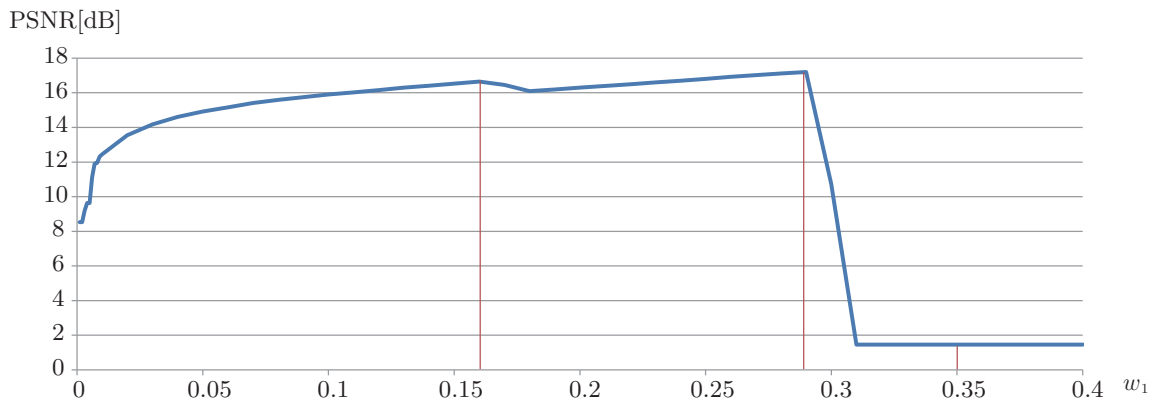
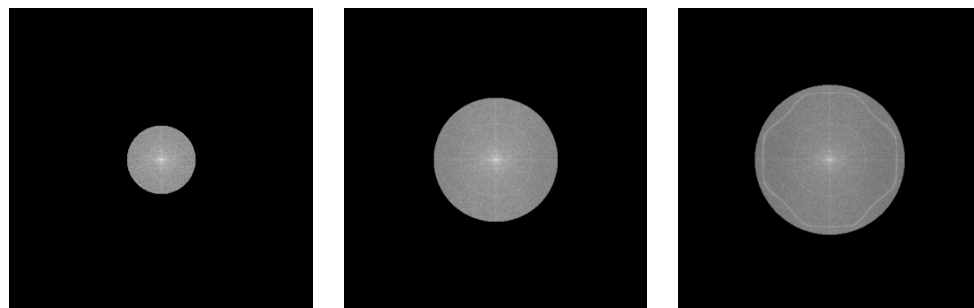


図 2.2 LPF によるぼけ復元画像の PSNR



(a) $w_1 = 0.16$

(b) $w_1 = 0.29$

(c) $w_1 = 0.35$

図 2.3 LPF によるパワースペクトル画像

の縦の赤線の LPF によるぼけ画像のパワースペクトル画像であり，図 2.4 はそのぼけ復元画像である．図 2.4(c) $w_1 = 0.35$ のぼけ復元画像は，ノイズが強調されて元画像の情報がほとんど失われているのが分かる．そこで通常は，SN 比が大きいと考えられる比較的低い周波数成分だけを用いて逆フーリエ変換をする方法がとられる．しかし，この方法では w_0 を超える高周波成分の情報を失った状態でぼけ復元を行うことになる．そのため，ぼけを安定的に復元する手法が提案されてきた．以下，2つの手法について説明する．

2.2.1 ウィナー・フィルタ

ウィナー・フィルタ (Wiener filter[26]) は，現画像 $f(x, y)$ と復元画像 $\hat{f}(x, y)$ との平均 2 乗誤差が最小となるような復元結果を求めるものであり，次式によって表現される．

$$M(u, v) = \frac{\overline{H(u, v)}}{|H(u, v)|^2 + [P_{nn}(u, v)/P_{ff}(u, v)]} \quad (2.14)$$

ここで， $P_{nn}(u, v)$ ， $P_{ff}(u, v)$ はそれぞれ雑音と原画像のパワー・スペクトル， $\overline{H(u, v)}$ は $H(u, v)$ の共役複素数を表す．通常は， $[P_{nn}(u, v)/P_{ff}(u, v)]$ を正確に求めることができないため，適当な定数 Γ を用意し，式 (2.14) の近似として，次式を用いる．

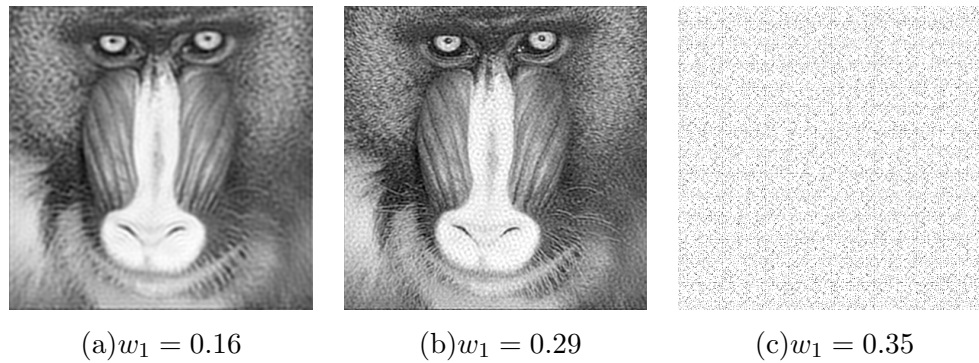


図 2.4 LPF によるぼけ復元画像

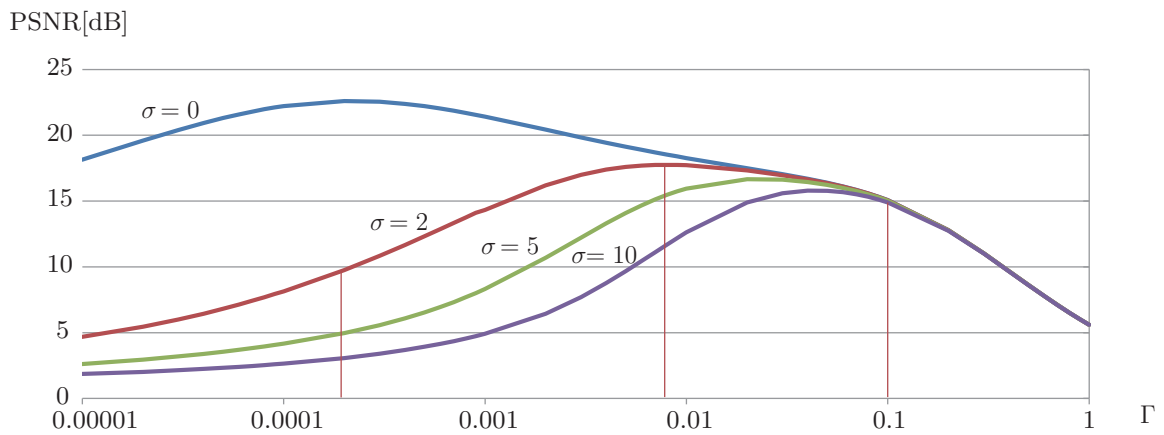


図 2.5 ウィナー・フィルタによるぼけ復元画像の PSNR

$$M(u, v) \approx \frac{\overline{H(u, v)}}{|H(u, v)|^2 + \Gamma} \quad (2.15)$$

図 2.5 は Γ と復元画像の PSNR との関係を図表化したものである。ぼけ画像 g には標準偏差 σ のガウシアンノイズを印加した。 $\sigma = 0$ は、ノイズのない状態を表す。ノイズ σ の量を増やしていくと、グラフのピーク値が右に移動していくことが確認できる。つまり、ウィナー・フィルタではノイズ量に応じて Γ の値を適切に選択することが重要だと言える。図 2.6 は $\sigma = 2$ の場合の、ぼけ復元画像である。図 2.6(a) のように Γ の値が少なすぎると、画像はシャープになるがノイズが強調されてしまう。反対に図 2.6(c) のように Γ の値が大きすぎると、ノイズは消えるが画像にぼけが残ってしまう。

2.2.2 Richardson-Lucy フィルタ

Richardson-Lucy フィルタ [27, 28] は、ベイズの定理を利用することで、繰り返し計算により復元画像を次式により導出する手法である。

$$f^{k+1} = f^k \cdot h^* * \frac{g}{f^k * h} \quad (2.16)$$

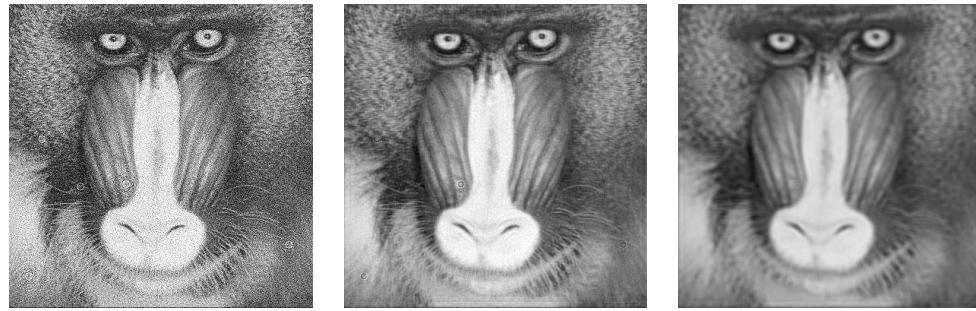
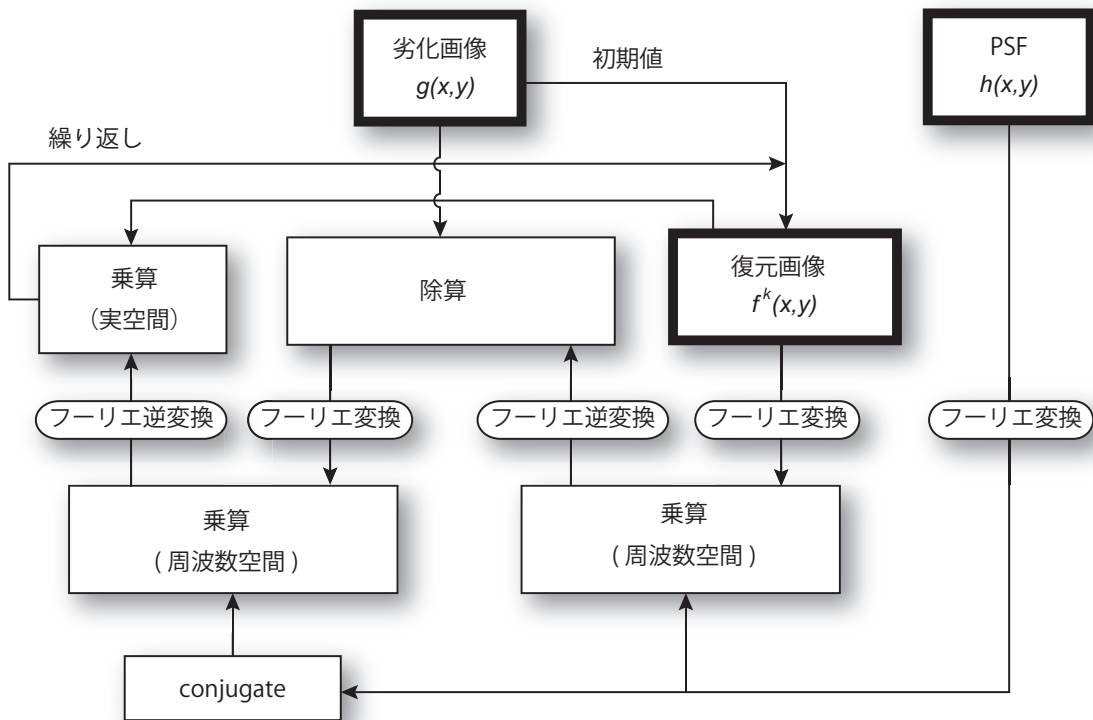
(a) $\Gamma = 0.0002$ (b) $\Gamma = 0.008$ (c) $\Gamma = 0.1$ 図 2.6 ウィナー・フィルタによるぼけ復元画像 ($\sigma = 2$)

図 2.7 Richardson-Lucy によるぼけの復元手順

ここで、 $h^*(x, y) = h(-x, -y)$ であり、 f^k は k 回目 ($k = 1, \dots, K$) の復元処理によって得られた画像を現す。また、初期値 $f^0 = g$ とする。Richardson-Lucy フィルタの手順を図 2.7 に示す。Richardson-Lucy フィルタは、繰り返し演算のため計算コストが大きい。

図 2.8 は繰り返し回数 K と復元画像の PSNR との関係グラフ化したものである。ノイズ σ の量を増やしていくと、グラフのピーク値が左に移動していくことが確認できる。つまり、Richardson-Lucy フィルタでもウィナー・フィルタと同様にノイズ量に応じて K の回数を適切に選択することが重要だと言える。図 2.9 は $\sigma = 2$ の場合の、ぼけ復元画像

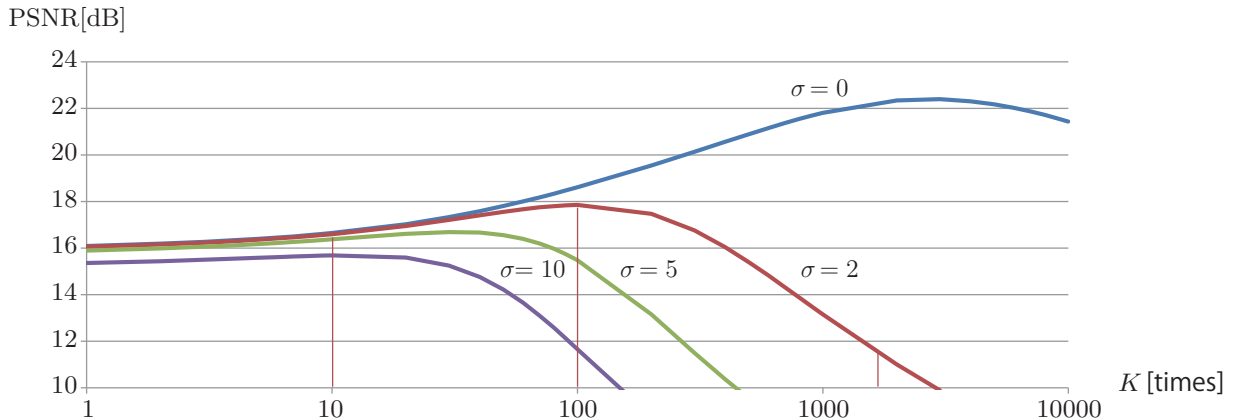
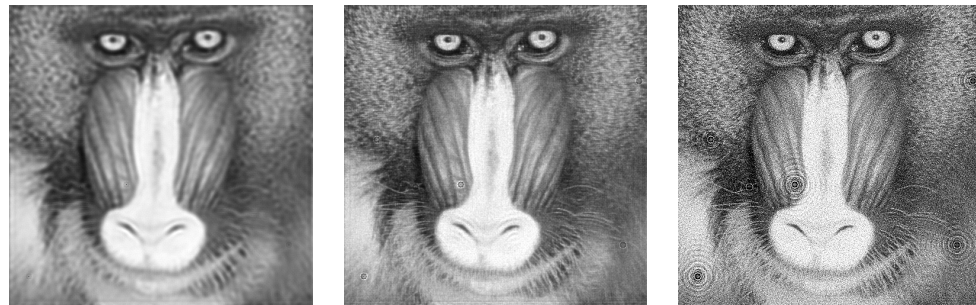


図 2.8 Richardson-Lucy によるぼけ復元画像の PSNR



(a) $K = 10$

(b) $K = 100$

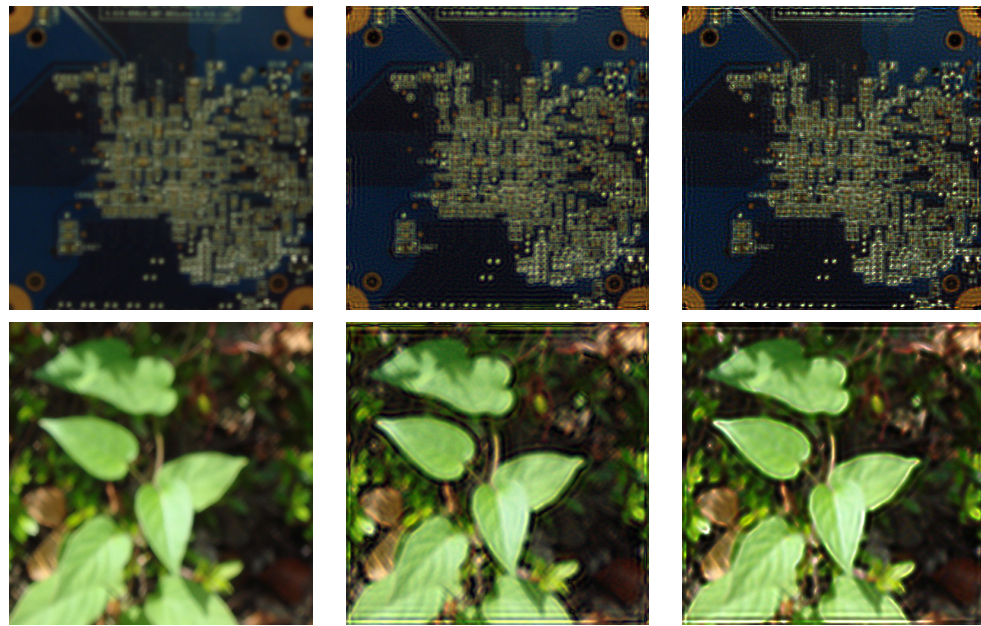
(c) $K = 2000$

図 2.9 Richardson-Lucy によるぼけ復元画像 ($\sigma = 2$)

である．図 2.9(c) のように K の値が大きすぎると，画像はシャープになるがノイズが強調されてしまう．反対に図 2.9(a) のように K の値が少なすぎると，ノイズは消えるが画像にぼけが残ってしまう．この傾向は，ウィナー・フィルタと同様でまたピーク値の PSNR も同等の値となっている．そのため，ぼけの復元性能については同等であると考えられる．

2.2.3 実画像によるぼけ復元

次に，実際のカメラで奥行きぼけが発生した画像のぼけ復元を行う．図 2.10 に撮影画像と，それをウィナー・フィルタと Richardson-Lucy フィルタでそれぞれぼけ復元を行った結果を示す．ぼけは円形絞りを想定し，ぼけの量とウィナー・フィルタの Γ の値と，Richardson-Lucy フィルタの繰り返し回数 k に関しては最良の結果が得られるように適当に選択した結果，表 2.1 の値とした．画像サイズは 512×512 である．図 2.10 より，どちらの手法でも良好にぼけの復元が出来ていることが確認できる．以上より，ウィナー・フィルタと Richardson-Lucy フィルタに関してはぼけの復元性能に関しては同等であることが確認できた．そこで，本研究では計算コストの面より繰り返し演算を必要としないウィナー・フィルタをデコンボリューションとして使うこととする．



(a) 撮影画像 (b) ウィナー・フィルタ (c) Richardson-Lucy

図 2.10 実画像によるぼけ復元画像

表 2.1 実画像によるぼけ復元条件

	ぼけ半径	Wiener filter	Richardson-Lucy
Circuit board	5 pix	$\Gamma = 0.01$	$K = 100$
Leaf	7 pix	$\Gamma = 0.03$	$K = 20$

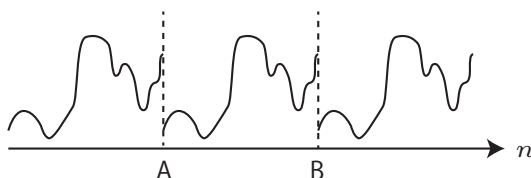


図 2.11 不連続な状態

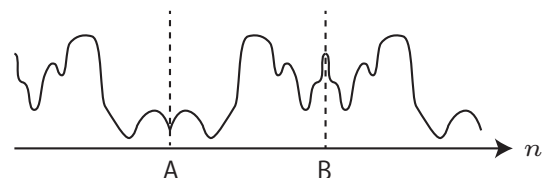


図 2.12 連続な状態

2.2.4 安定的な復元

デコンボリューションは周波数空間で行われるため、空間的に不連続な箇所ではリングングが発生してしまう。図 2.10 の復元画像を改めて見てみると、画像の上下左右の端にリングングが発生していることが確認できる。この原因と対策について考えてみる。

式 (2.10) による離散フーリエ変換は、図 2.11 のような元信号が周期的に無限に続く信号からの変換となっている。そのため、図 2.11 の A と B の境界では信号が不連続となってしまう、これがリングング発生の原因となる。境界部分でたまたま連続になることはあるが、ほとんどの場合は不連続となる。そこで、図 2.12 のように隣の信号を左右反転させることで、A と B の箇所での不連続性が解消される。この場合、両方の境界において

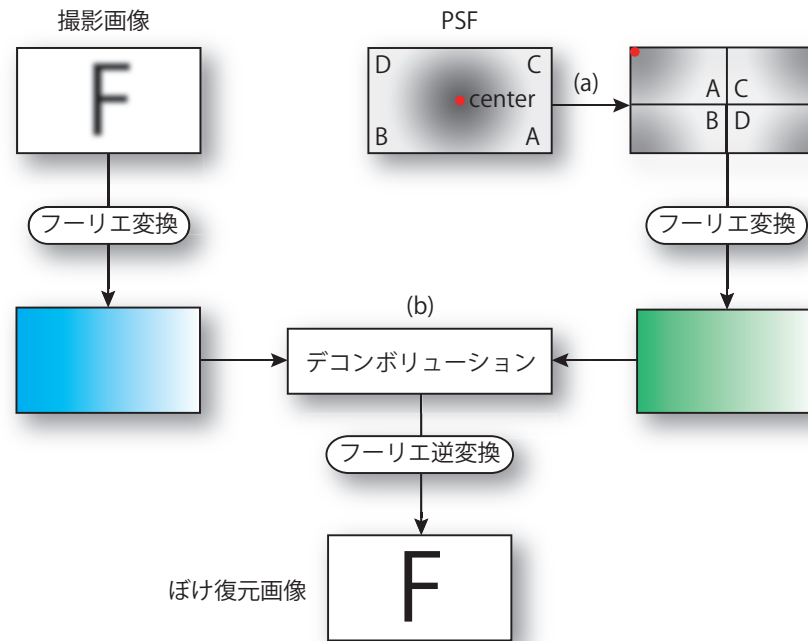


図 2.13 通常のぼけ復元手順

常に偶対称となり必ず連続となる。

図 2.13 は、実際の 2 次元画像での通常のぼけ復元手順である。撮影画像にはぼけが発生しており、これを PSF を使ってデコンボリューションすることでぼけを取り除くのが目的である。手順の流れは、図 2.1 と同じだが、注意しなければならないのは図 2.13(a) の PSF 画像の配置転換である。また、PSF は要素の総和が 1 となるように正規化しておく必要がある。まず、PSF 画像を画像中心で上下左右に A, B, C, D の 4 つに分割する。ただし、画像中心は A のパーツに含まなければならない。ここで言う画像中心とは PSF の生成において、点光源が投影される中心点のことを指す。よって、A, B, C, D のパーツの大きさは必ずしも同じにはならない。次に、撮影画像と PSF を式 (5.9) でそれぞれフーリエ変換を行う。その後、デコンボリューションを行い、式 (2.13) によりフーリエ逆変換を行う (b)。

図 2.14 は、安定的なぼけ復元の手順である。まず撮影画像を、上下左右にミラー反転した画像にし、これらをつなぎ合わせた画像を作成する (a)。この結果、作成される画像は上下左右の境界において連続となる。元の撮影画像の画像サイズを $M \times N$ とすると、合成後の画像サイズは $4M \times N$ となる。また、異なるサイズ間でデコンボリューションをすることが出来ないため、PSF についても $4M \times N$ のサイズに変形する必要がある (b)。ここで、PSF は要素の総和が 1 となるように正規化しておく必要がある。PSF 画像を画像中心で上下左右に A, B, C, D の 4 つに分割し、4 つの A, B, C, D のパーツを、サイズ $4M \times N$ の 0 で初期化された画像に図 2.14(b) のように画像中心が左上にくるように配置する。次に、合成した撮影画像と PSF を式 (5.9) でそれぞれフーリエ変換を行う。その後、ウィナー・

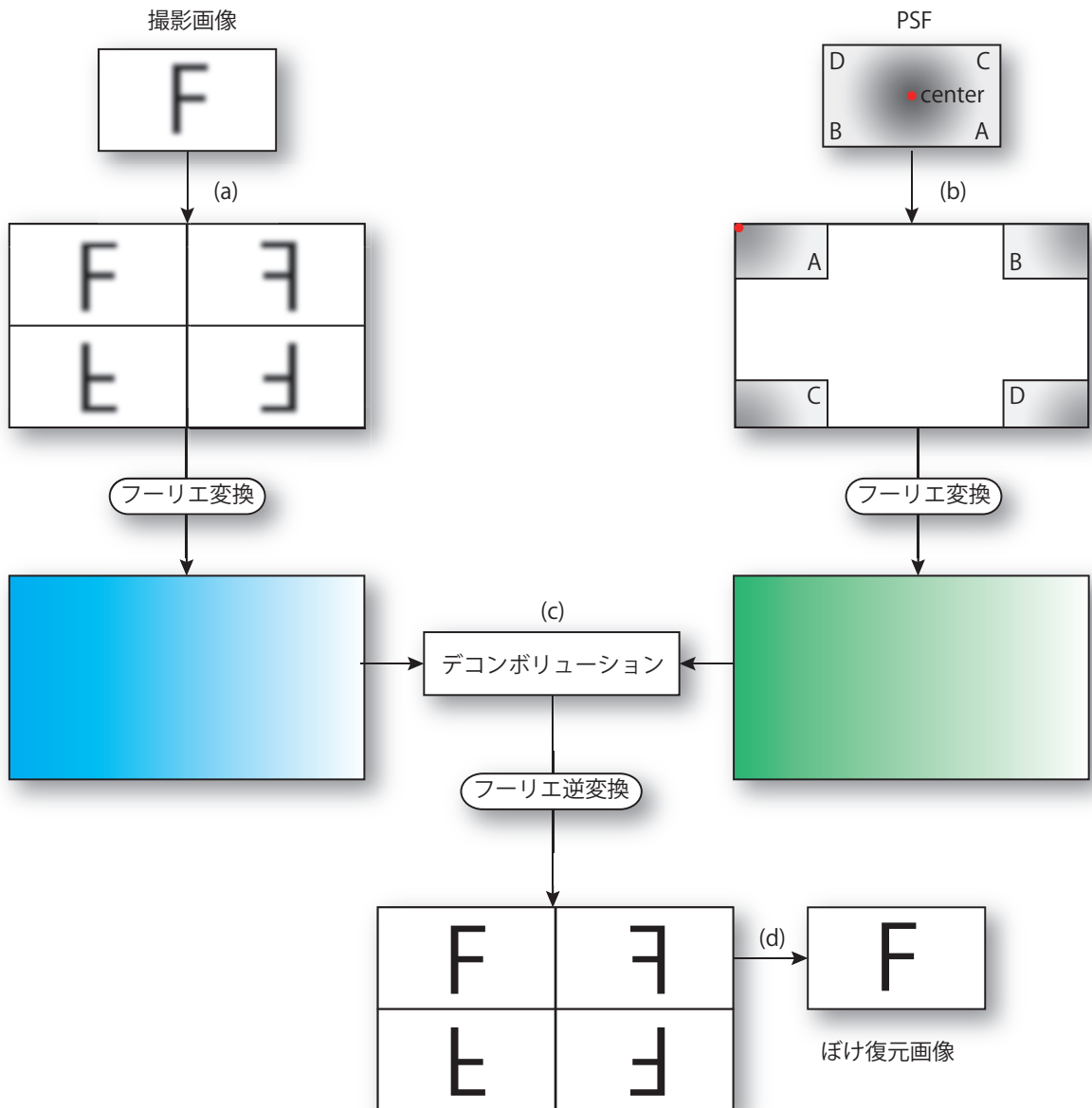


図 2.14 より安定的なぼけ復元の手順

フィルタによりデコンボリューションを行い、式 (2.13) によりフーリエ逆変換を行う (c) . 最後に、 $4M \times N$ のぼけ復元された画像の左上 $M \times N$ を切り出すことにより、安定的なぼけ復元画像が得られる (d) . PSF が数値計算で求められる場合は、手順 (b) の箇所で直接 $4M \times N$ のサイズで計算を行うことで精度の向上が見込める . この場合は、 $4M \times N$ の画像の要素の総和が 1 となるように正規化されている必要がある . 実際には、PSF は中心部分から離れるに従って値が小さくなりほとんど 0 に近い値となる . そのため先に示したように 0 で初期化しても影響はほとんどないため、本研究は 0 で初期化して行っている .

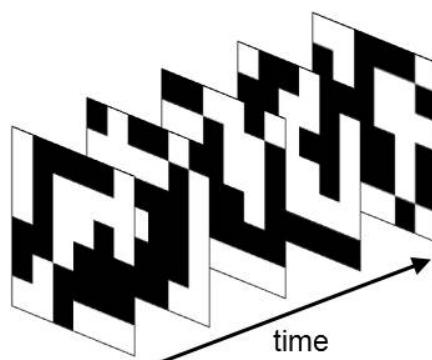


図 2.15 時空間符号化撮像法

2.3 時空間符号化撮像法

一般的なカメラで撮像したぼけ画像からデコンボリューションすると、復元画像はリングングの発生などにより不完全な復元結果となってしまふ。これは一般的なカメラで使われている円形絞りや全開口露光を用いて生成される PSF のパワースペクトルが、ゼロ交差や急激な増減を多数持つためであり、その結果デコンボリューションにより元画像の情報が失われ不安定になるからである。

一般的な円形絞りや全開口露光における問題を解決するため、本研究では開口を時間と空間で同時に符号化して撮像する時空間符号化を新たに提案する。具体的には、図 2.15 のように露光時間中に符号化絞りパターンを連続的に変化させることで、奥行きぼけと動きぼけを同時に復元する。Raskar ら [10] は符号化パターンの周波数特性の最小値を最大化することで最適な符号化露光を求めた。しかし、この手法では奥行きと動きぼけが同時に発生した場合には、周波数特性の最小値が最大とならないため、このような状況においてぼけの復元は困難である。本研究ではこの考えを拡張し、一次元パターンの周波数特性からでなく、符号化絞りパターンを連続的に変化させて得られた PSF から最適な符号化絞りパターンを導出する。

奥行きぼけと動きぼけの混合 PSF $h(x, y)$ のフーリエ変換を $H(u, v)$ とし、その対数パワースペクトルを $\Phi(H(u, v))$ とする。この混合 PSF $h(x, y)$ は露光時間中に移動する三次元点を一連の絞りパターンで投影することによって計算する。ぼけ画像を安定に復元するためには、PSF の全周波数域において平坦かつ高い周波数応答を持つことが理想である。そこで、次式のようなコスト関数 E を導入し、このコスト関数 E を最大化するような符号化絞りパターンを探索する。

$$E = \min [\Phi(H(u, v))] - \alpha \cdot \text{var}[\Phi(H(u, v))] \quad (2.17)$$

ここで、 $\min[\cdot]$ は最小値を表し、 $\text{var}[\cdot]$ は分散を表す。また、 α は適当な定数を表す。 E を最大化することで符号化絞りパターンの周波数特性は平坦かつ高い周波数応答となり、この PSF によるデコンボリューションは一般的な円形絞りと全開口露光に比べ、より安

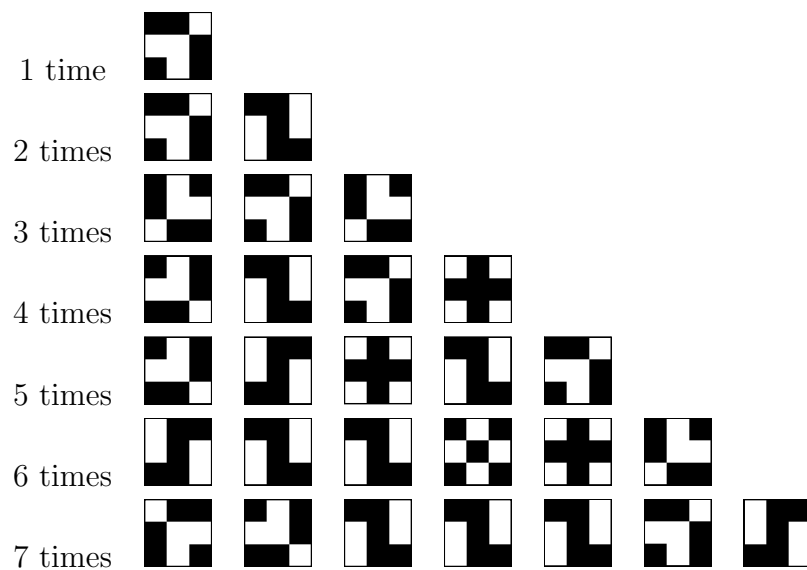


図 2.16 最適複数符号化絞りパターン (3 × 3).

定に復元を行うことが可能になる．さらに，導出された時空間符号は，奥行きぼけと動きぼけの同時復元に関して既存の符号化絞りや符号化露光に比べてより優れた特性を持つと言える．これは符号化絞りは奥行きぼけのみに，符号化露光は動きぼけのみのどちらか一方に最適化しているからであり，それらを同時に最適化している本手法には周波数特性が劣るからである．

時空間符号の導出に関して何も制約がない場合， E を最大化する符号化絞りパターンは最適な周波数特性を持つピンホール絞りの単時刻の露光となってしまう．しかし，この撮像では非常に微小な光量しか得ることができず，その結果として画像の S/N 比は非常に悪くなってしまう．そこで，本研究では各絞りパターンの $1/2$ を開くという条件を付けて E を最大化する．その結果，単純に符号化絞りと符号化露光を組み合わせた場合の光量低下は最大で $1/4$ なのに対して，提案する時空間符号の光量低下は最大で $1/2$ なる．符号化絞りのみの場合の光量低下は最大で $1/2$ ，符号化露光のみの場合の光量低下は最大で $1/2$ であることから，提案法の光量低下は従来法と同等になる．その結果，提案する時空間符号は復元画像の S/N 比を低下させることなく奥行きぼけと動きぼけを同時に復元することが可能である．

2.4 最適な時空間符号

最適な符号化パターンを導出する前に，まず何枚 (何時刻) 分の異なる符号化絞りを露光中に用いるかについて考える．そこで符号化絞りの数とコスト関数 E との関係について実験を行った．実験では， 3×3 の絞りのパターン数を 1 から 7 まで変化させて E を大域最適化により求めた．このときコスト関数 E は $\alpha = 6$ とし，全数探索を行った．絞りを高解像度化しパターン数を増加すると，探索する組み合わせの数が膨大になり計算が困

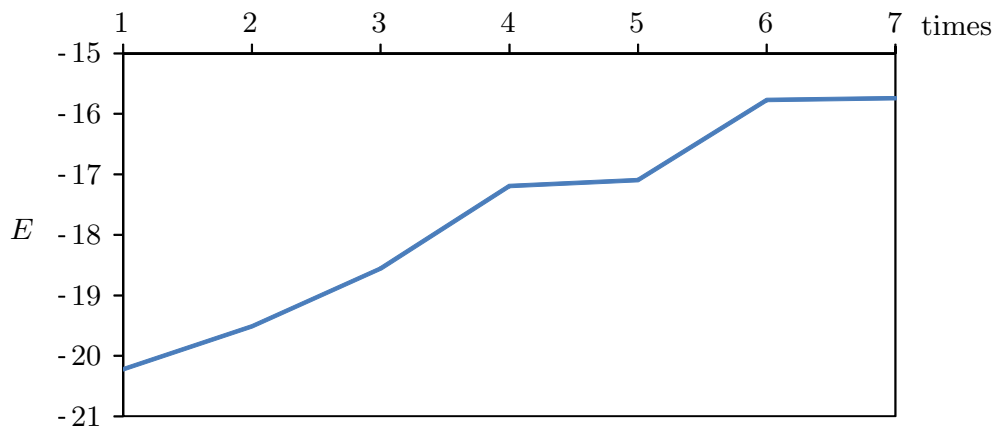


図 2.17 最適符号パターンのコスト関数 E

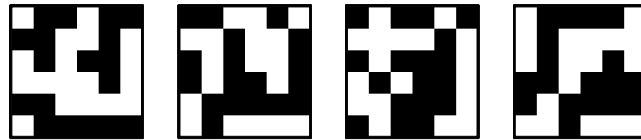


図 2.18 最適複数符号化絞りパターン (4 times, 6×6).

難になるため，実用的な範囲内になるよう絞りのサイズとパターン数を選択した．また，様々な実験により最適な正則化パラメータ $\alpha = 6$ とした．

次に，最適な符号化パターンの導出条件について説明する．レンズ中心から撮像面の距離は 600 mm とし，また焦点距離は 300 mm となるためレンズ中心から 600 mm に置かれた撮像物は焦点が合った状態でぼけが発生しない．しかし，本実験では撮像物はレンズ中心から 700 mm に置かれるため，撮影画像には奥行きぼけが発生する．絞りの口径は 50 mm とし，撮像される奥行きぼけの大きさは 16.7 ピクセルとなる．さらに，撮像物は水平方向に 20 pixels/frame の速度で移動しているため，撮影画像には運動ぼけも発生する．

図 2.16 は各絞り枚数において導出した最適な符号化パターンであり，図 2.17 は各絞り枚数における最適パターンのコスト関数 E をグラフ化したものである．横軸は絞りの枚数を表し，縦軸はコスト関数 E を表す．

図 2.17 より明らかなように，絞り枚数を増やしていくとコスト関数の値が上昇し，周波数特性が向上していくことが分かる．しかし，絞り枚数を増やしていくと上昇率が減少しているのが分かる．また一方で，絞りの枚数を増やせば増やすほど計算コストが莫大になるため最適パターンを導出するのが困難になる．それゆえ，本研究では絞り枚数を 4 とした絞りの解像度を 6×6 に固定して最適な時空間符号を導出する．局所探索法により 1 万個のランダムパターンから E を最大化することで図 2.18 に示す最適な符号化パターンが得られた．

次に，導出した時空間符号の効果を確認するために，従来法の符号化絞りや符号化露光

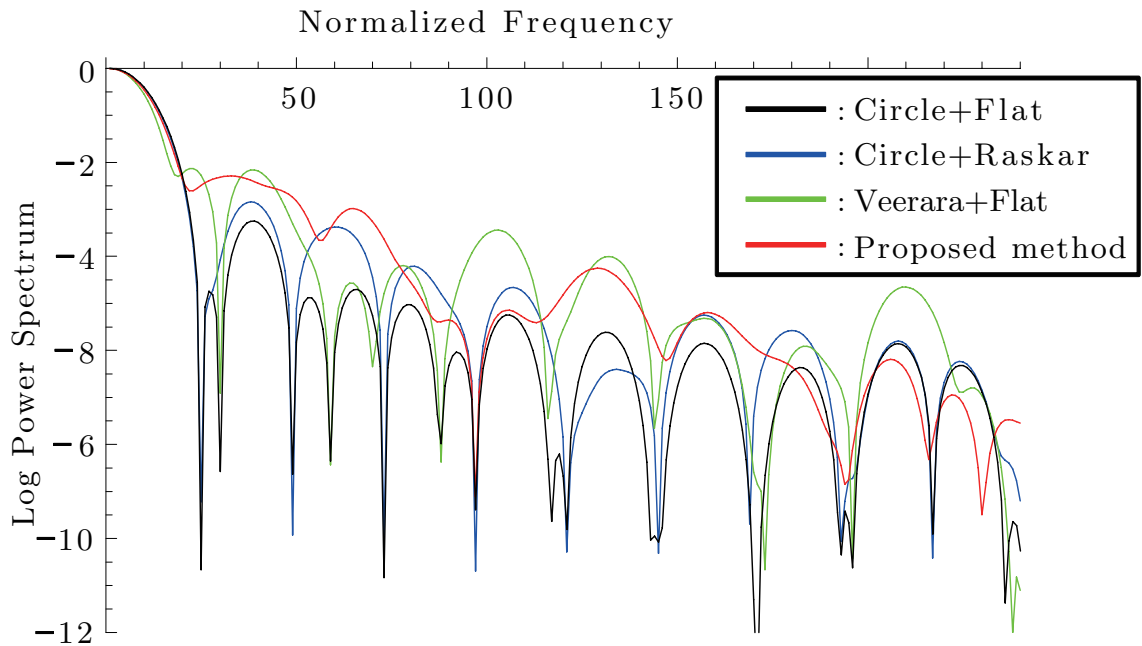


図 2.19 PSF の周波数比較

と周波数特性の比較を行う．図 2.19 は提案法と従来法の周波数特性をグラフ化したものである．従来法は，円形絞りの全開口露光，Veeraraghavan らの符号化絞り [8] の全開口露光，Raskar らの符号化露光 [10] の円形絞りである．これらの周波数特性を撮像物の運動方向に沿った二次元断面でグラフ化した．縦軸は対数パワースペクトルを表し，横軸は正規化周波数を表す．グラフから明らかなように，従来法の円形絞りの全開口露光や符号化絞りや符号化露光に比べて，提案法の時空間符号は周波数全体で平坦かつ高い周波数応答となっていることが確認できる．これは提案法の時空間符号は，従来法に比べてぼけ復元がより安定かつ高精度に行えることを意味している．

2.5 実画像実験

次に，実画像実験の結果を示す．実験では，“Lena”(図 3.14(b)) の平面画像を電動 XY ステージ上に貼り付けて，露光時間 10 sec 中に水平方向に 0.1 mm/sec で移動させた．そのため撮影画像には動きぼけが発生する．また撮像物は合焦位置にないため，撮影画像には奥行きぼけも発生する．図 2.20 に実験環境を示す．レンズ中心から撮像物までの距離は 250 mm で，絞りの口径は 20 mm である．使用したレンズは，光学倍率 0.10×，F=2.8，W.D= 205 mm，カメラから焦点面までの距離は 454 mm である．カメラは 1024 × 768 画素のインターライン方式のカラー CCD カメラで，撮像素子の大きさは 4.81 mm × 3.62 mm である．

図 2.21 において (a) は円形絞りの全開口露光，(b) は Raskar らの符号化露光 [10] の円形絞り，(c) は Veeraraghavan らの符号化絞り [8] の全開口露光，(d) は提案法の時空間符

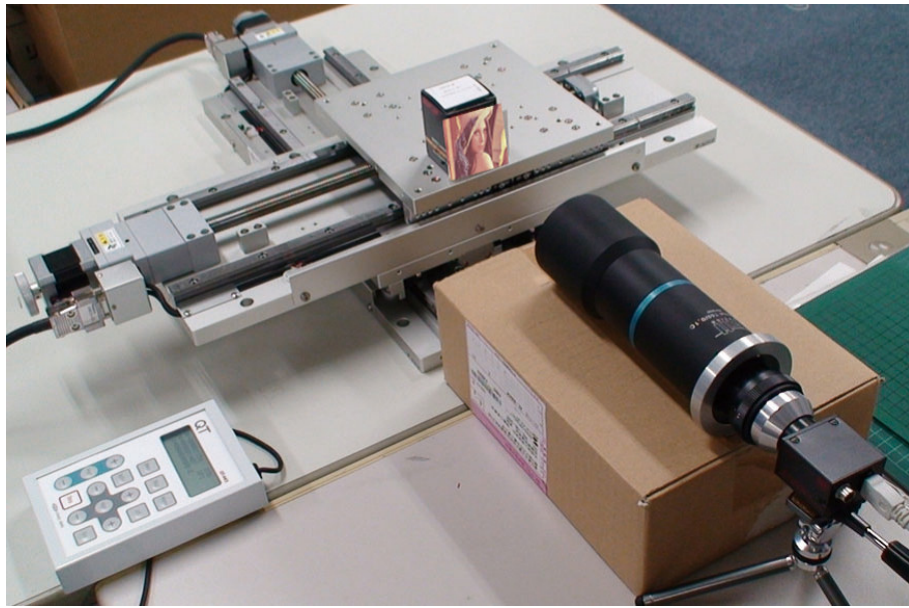


図 2.20 実画像実験環境

号化撮像法である．提案法では図 2.18 の 4 枚の絞りパターンをそれぞれ 2.5 秒の露光時間で撮影し，撮影後に加算合成することで露光時間 10 秒で 1 枚の撮影画像を作成している．レンズは絞りの部分が簡単に分解して見える構造になっており，フィルムで作成した絞りパターンを張り替えて撮影を行った．そしてこれらの撮影画像からウィナーフィルターによりぼけの復元を行った．図 2.22 (a), (b), (c), (d) は図 2.21 (a), (b), (c), (d) からそれぞれぼけ復元を行った結果である．これらの結果より，提案法がよい結果が得られているのが分かる．特に，提案法のぼけ復元画像は高精度でリングング等が少ないことが通常の撮影法や従来法と比べると分かる．

2.6 定量評価

実画像実験で示したように，本手法は奥行きぼけと動きぼけを同時に復元するのに有効である．しかし，実画像実験ではぼけの復元精度を定量的に評価することが難しい．そこで，本節ではレンズシミュレーター (付録 A.1) を使うことで本手法を定量評価する．本シミュレーターでは，光の広がりを正確にシミュレートすることが可能で，任意の符号開口パターンや符号露光パターンで制御することが可能である．ただし理想的なレンズであるとし，収差や周辺光量低下については無視している．

レンズシミュレーターにより，“Pepper”(図 3.14(c)) の平面画像を撮像物として撮影画像を作った．撮影画像サイズは 480×480 で，0 から 255 の輝度値に標準偏差 0.5 のガウシアンノイズを印加した．動きぼけと奥行きぼけの量は 2.4 章と同じである．

ぼけの復元精度を比較検討するために，レンズシミュレーターを使って提案法と既存の手法で撮影画像を生成し，ぼけ復元後に元画像と比較する．図 2.23 (a) は円形絞りの全



図 2.21 実画像実験の撮影画像

開口露光でぼけ復元を行った画像である．この図から分かるように，通常の開口と露光による撮影では画像のぼけが正確に取り除かれていない．図 2.23 (b) は Raskar らの符号化露光 [10] の円形絞りで，図 2.23 (c) は Veeraraghavan らの符号化絞り [8] の全開口露光である．これらの結果から，符号化撮像は通常の開口と露光による撮影に比べて良い結果が得られているのが分かる．しかし，まだぼけが残っておりリング等が画像に確認できる．この理由としては，実際には奥行きぼけと動きぼけが同時に発生しているにも関わらず，これら既存の符号化撮像はどちらか一方のぼけ復元についてのみ考えられているからである．しかし，図 2.23 (d) に示すように，提案法は高精度でリング等が少ないことが分かる．

表 2.2 はぼけ復元画像と元画像との PSNR である．表では，動きぼけのみ，奥行きぼけのみ，動きぼけと奥行きぼけの混合の 3 つの場合で比較を行っている．表 2.2 より，Raskar らの符号化露光は動きぼけの復元において良い結果となっており，また Veeraraghavan らの符号化絞りは奥行きぼけの復元において良い結果となっている．しかし，動きぼけと奥行きぼけの混合の場合ではどちらの手法も PSNR が低くなっているが，提案手法では良



図 2.22 実画像実験のぼけ復元画像

表 2.2 ぼけ復元画像の PSNR [dB]

Method	motion blur	depth blur	motion & depth blur
Circle+Flat	30.581	30.069	26.435
Circle+Raskar	36.115	30.069	27.243
Veeraraghavan+Flat	30.581	32.002	27.477
Proposed method	30.581	31.084	29.989

い結果が得られている．ここで，符号化絞りは奥行きぼけが発生しない状態では機能しないため，表 2.2 の動きぼけのみの場合で 3 つの手法の PSNR は 30.581 dB と同じ値になっている．同様に，符号化露光は動きぼけが発生しない状態では機能しないため，動きぼけのみの場合で 2 つの手法の PSNR は 30.069 dB と同じ値になっている．

図 2.24 は各手法での撮像物の運動速度と，ぼけ復元画像の PSNR との関係をグラフ化したものである．グラフより，7 pixels から 44 pixels の間で提案法は従来法に比べて高

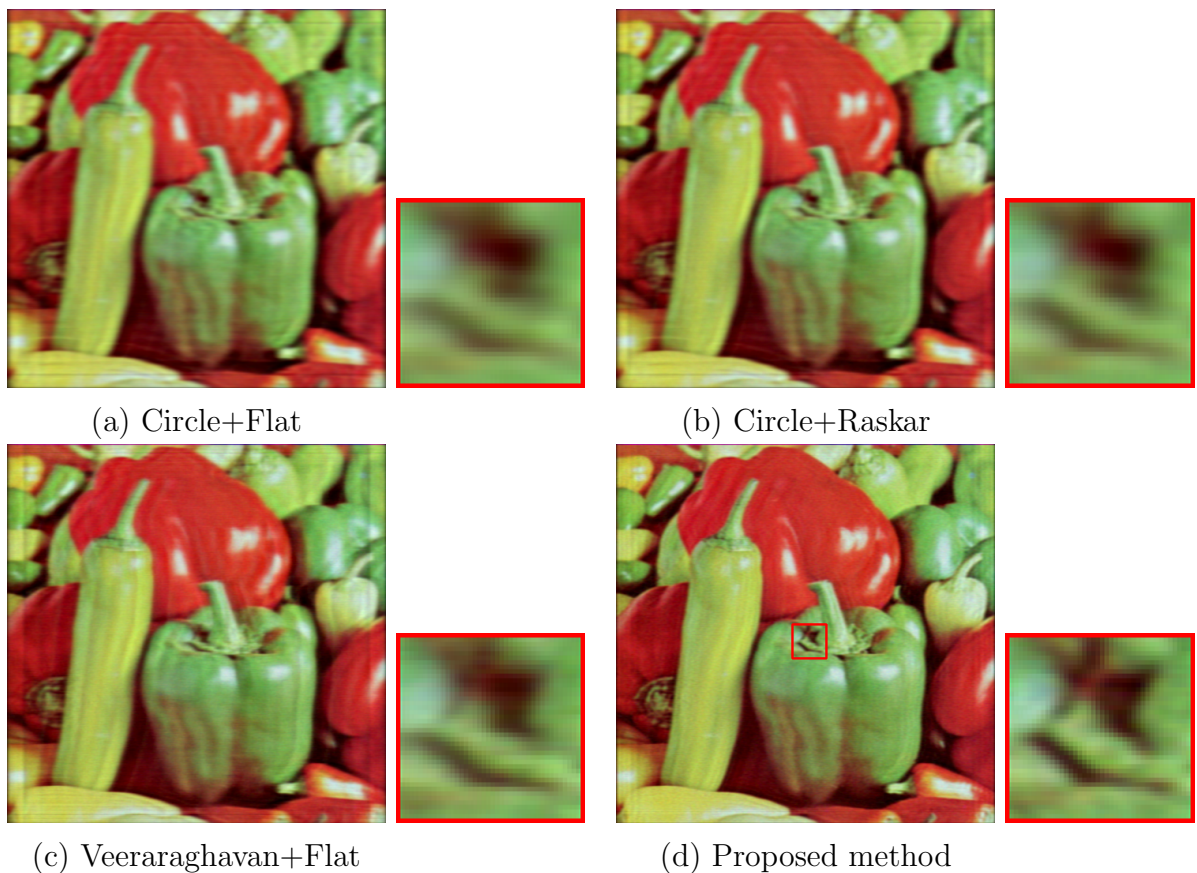


図 2.23 ぼけ復元画像

い PSNR であることが分かる．20 pixels にあるオレンジ色の縦線は最適パターンを導出した条件値を示している．そのため，本来なら提案法の時空間符号はオレンジ線で最大値となるはずだが，奥行きとぼけと動きぼけを同時に最適化しているため，図 2.24 のオレンジ線よりずれたところで最大値となっている．

図 2.25 は撮像物の奥行きと PSNR との関係をグラフ化したものである．グラフの横軸は合焦位置からの距離で，0 では奥行きぼけが発生しない．グラフより，60 mm から 430 mm の間で提案法は従来法に比べて高い PSNR であることが分かる．よって，本手法は特定の奥行きと動きだけでなく広い範囲でのぼけ復元に有効であると言える．

図 2.26 は画像ノイズと PSNR との関係をグラフ化したものである．動きぼけと奥行きぼけの量は図 2.24 と図 2.25 と同じになるため， $\sigma = 0.5$ の値は各グラフのオレンジ線と一致することになる．グラフより，本手法は σ が 1.5 より少ない場合に従来法に比べて高い PSNR であることが分かる．

図 2.27 は提案法と従来法の別の実験結果で，表 2.3 はそれらの PSNR を示している．動きぼけと奥行きぼけの量や他の条件については図 2.23 の実験と同じである．これらの結果より，提案法は他のすべての結果より優れていることが確認できる．

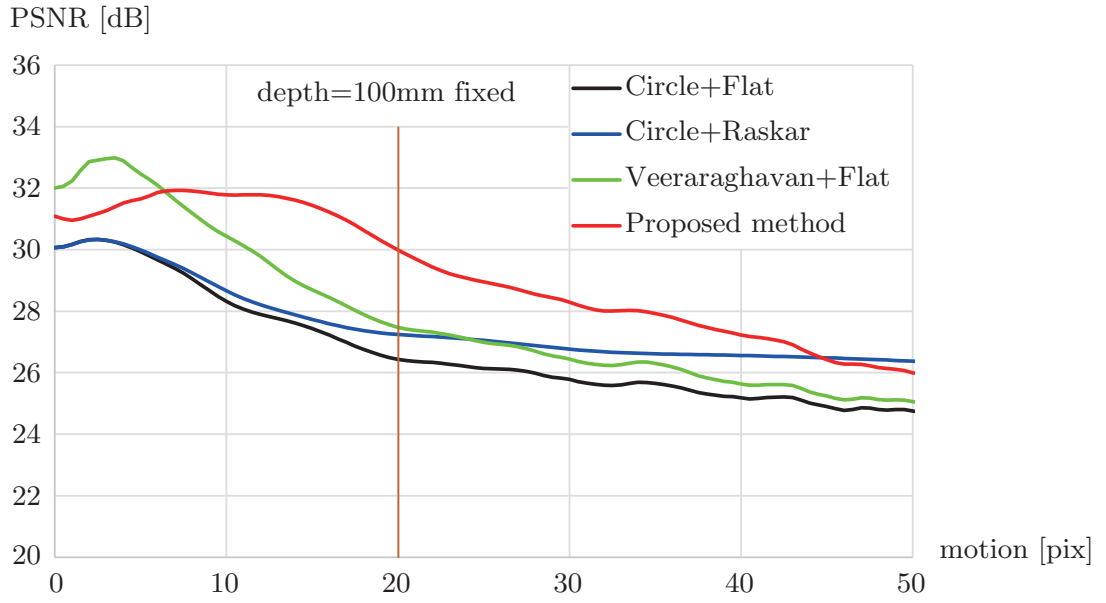


図 2.24 動きぼけと PSNR の関係

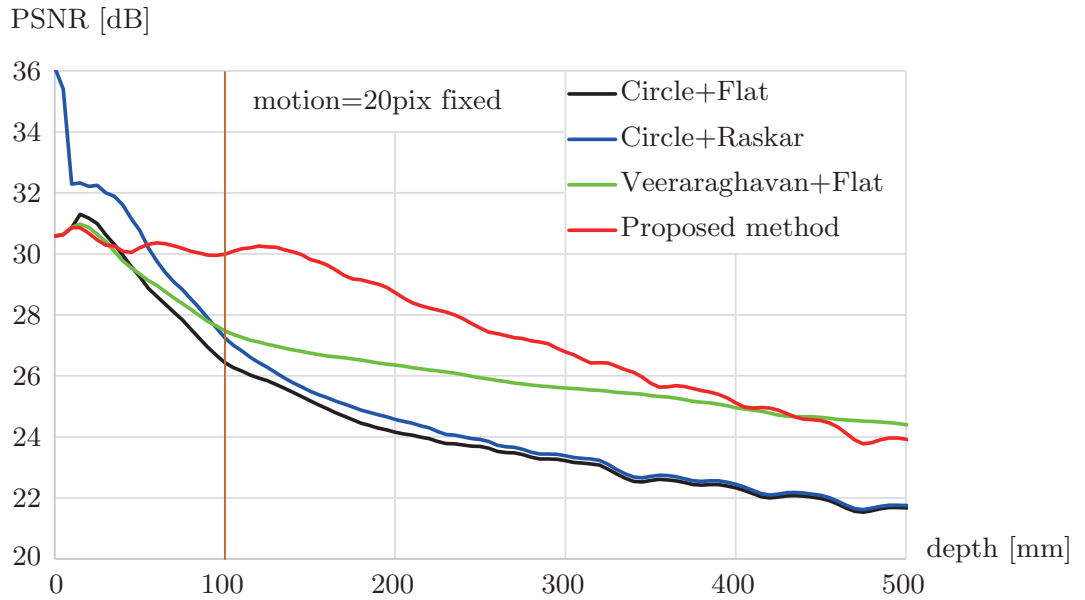


図 2.25 奥行きぼけと PSNR の関係

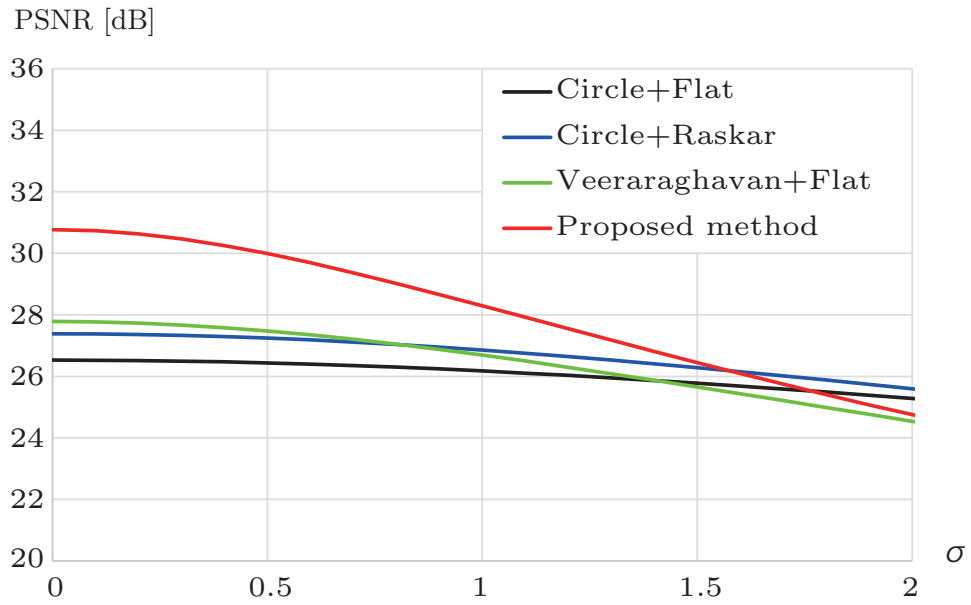
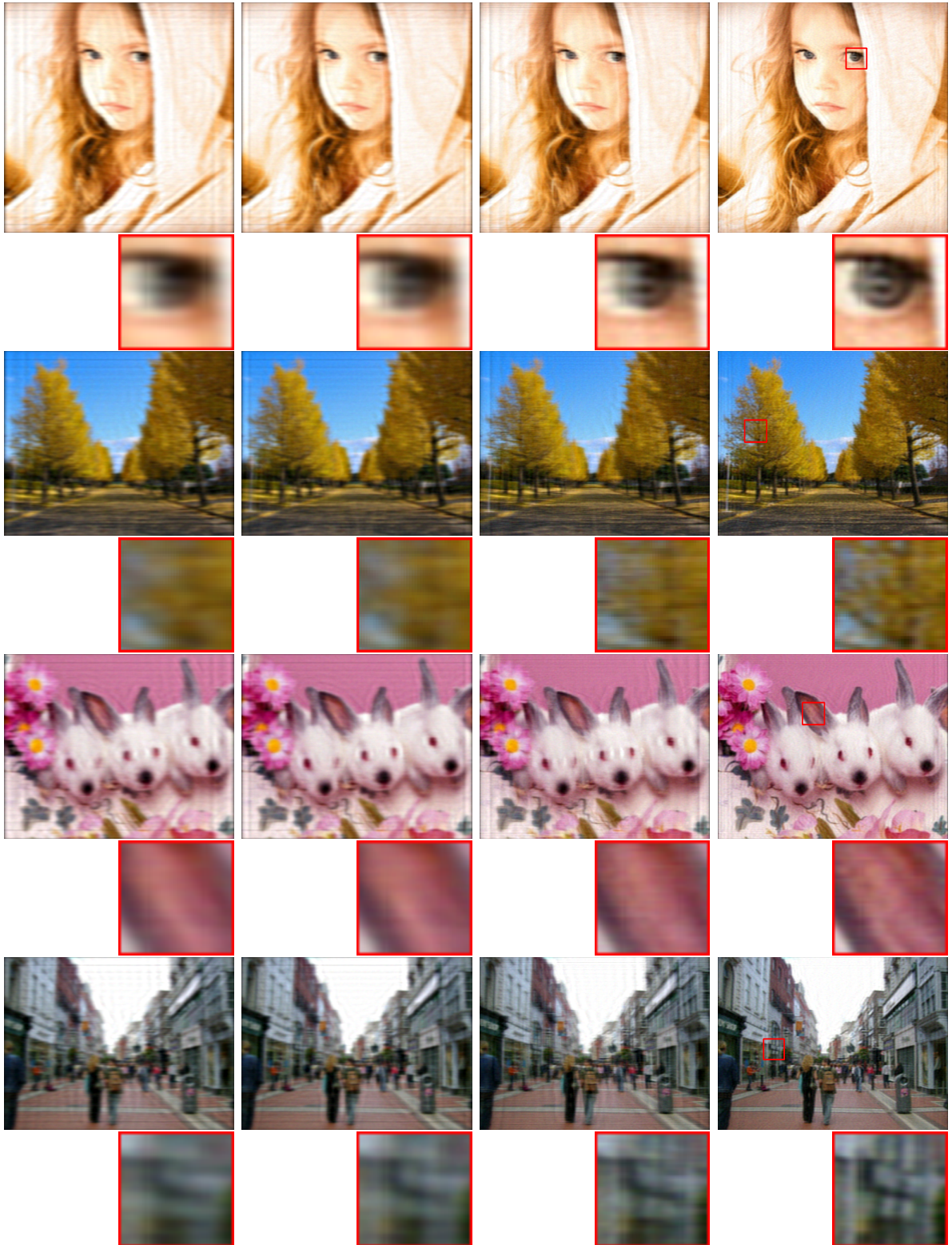


図 2.26 画像ノイズと PSNR の関係

表 2.3 ぼけ復元画像の PSNR [dB]

Method	girl	trees	rabbit	street
Circle+Flat	25.488	22.580	24.000	20.218
Circle+Raskar	26.149	22.857	24.500	20.602
Veeraraghavan+Flat	26.681	23.503	24.971	21.257
Proposed method	29.424	24.664	26.872	22.817



(a) Circle+Flat

(b) Circle+Ras.

(c) Veera.+Flat

(d) Proposed

图 2.27 Deblurred images.

第3章

奥行不変PSF

第2章では，符号化絞りと符号化露光の組み合わせによる時空間符号化撮像により特定の奥行きと特性の動きのもとで，奥行きぼけと動きぼけを同時に復元する方法を示したが，対象物の奥行きや動き情報を何かしらの方法で取得する必要がある．しかし，一般的に対象物の形状は複雑なために奥行き情報も複雑になり，また対象物の動きに関しても一様な運動ではなく不均一で複雑な運動を行うことが多い．そこで本章以降では，カメラを移動しながら撮影した画像におけるPSFの不変性を解析することで，任意の奥行きと動きにおいて，奥行きぼけと動きぼけを同時に復元する方法を導出する．まず本章では，任意の奥行きを持つ対象物体の奥行きぼけを復元するため，奥行きパラメータの推定を必要としない奥行不変な符号化撮像について説明する．

3.1 レンズモデル

本節では，光軸方向に光学系を移動させても像の大きさが変化しないテレセントリックレンズ系を用いて奥行不変PSFについて考える．通常の撮像系では，レンズから物体までの距離を変えたり，レンズから撮像素子までの距離を変えると，撮影される像の大きさが変化する．これに対して，物体を光軸に沿って移動させても像の大きさが変化しないレンズ系を物体側テレセントリックレンズと呼び，撮像面を光軸に沿って移動させても像の大きさが変化しないレンズ系を像側テレセントリックレンズと呼ぶ．また物体と撮像面の両方を移動させても像の大きさが変化しないレンズ系を両側テレセントリックレンズと呼ぶ．

3.1.1 物体側テレセントリックレンズ

物体側テレセントリックレンズの撮像モデルを図3.1に示す．焦点距離 f のレンズより距離 u の対象を撮像すると，式(3.1)に示すレンズの法則によりすべての入射光は距離 v の面上に集光する．

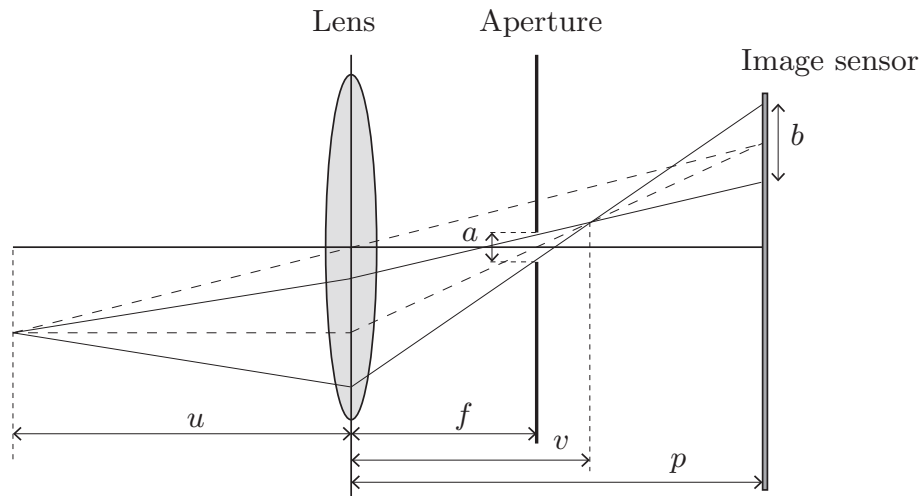


図 3.1 物理側テレセントリックレンズのモデル

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (3.1)$$

ここで，撮像面の位置 p が v と一致すれば，焦点の合った画像が得られるが，前後にずれると以下の式で表される様に，射影される光線は大きさ b の円として射影される．

$$b = a \left| \frac{p-v}{v-f} \right| = \frac{a}{f} \left| u \left(\frac{p}{f} - 1 \right) - p \right| \quad (3.2)$$

ここで， a は絞りの大きさを示し，ぼけの大きさ b が画素の大きさを超えると画像にぼけが生じる．式 (3.2) は，図 3.1 の Aperture と Image sensor 間の a, b をそれぞれ底辺とする三角形の相似より導き出せる．また式 (3.1) を代入して v を消去することで，式 (3.2) に示す通り， b が u と p の関数となる．

3.1.2 両側テレセントリックレンズ

本節では，図 3.2 に示す両側テレセントリックレンズに基づいて説明する．今，焦点距離が f_1 のレンズ (Lens 1) と焦点距離が f_2 のレンズ (Lens 2) があるとき，図 3.2 に示すように，これら 2 つのレンズの焦点位置に絞りが来るようにこれらを配置することで，両側テレセントリック光学系を構成することができる．ここで，Lens 1 から距離 u の位置にある 3 次元点を撮像したとき，Lens 1 への入射光が，Lens 1 からの距離が v_1 で Lens 2 からの距離が u_2 であるような点 A に集光したとする．また，この光が図 3.2 に示すように Lens 2 により集光され，Lens 2 からの距離が v_2 である点に集光したとする．このとき 2 つのレンズに関して次式が成り立つ．

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v_1} \quad (3.3)$$

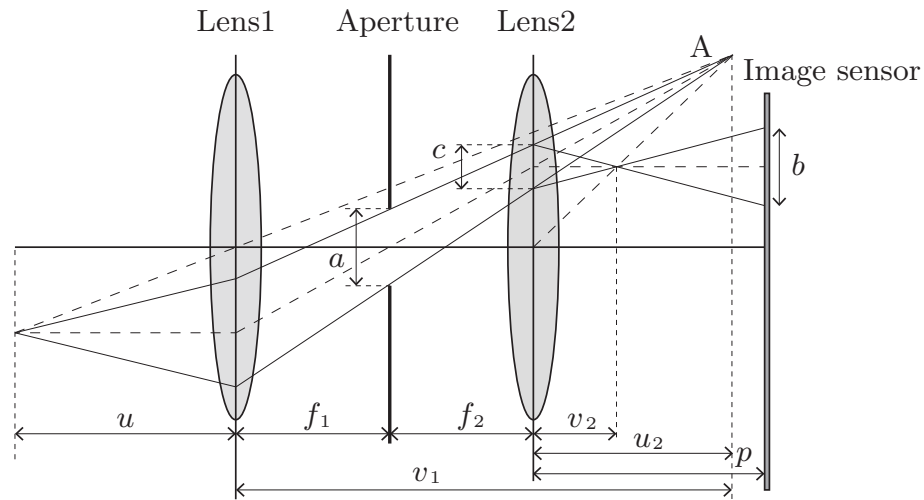


図 3.2 両側テレセントリックレンズのモデル

$$\frac{1}{f_2} = -\frac{1}{u_2} + \frac{1}{v_2} \quad (3.4)$$

また，図 3.2 に示す通り，絞りの大きさを a ，絞りを通して Lens 2 に入射する光の広がりを c ，最終的に撮像面に結像する光の広がり（ぼけの大きさ）を b ，Lens 2 から撮像面までの距離を p とすると，三角形の相似関係より次式が成り立つ．

$$\frac{a}{f_2 + u_2} = \frac{c}{u_2} \quad (3.5)$$

$$\frac{c}{v_2} = \frac{b}{p - v_2} \quad (3.6)$$

さらに，図 3.2 より明らかなように，2つのレンズ間において次式が成り立つ．

$$v_1 = f_1 + f_2 + u_2 \quad (3.7)$$

以上より，このレンズ系によって生成されるぼけの大きさ b は次式によって表されることがわかる．

$$b = a \left| \frac{f_2 u}{f_1^2} + \frac{p}{f_2} - \frac{f_2}{f_1} - 1 \right| \quad (3.8)$$

このとき，ぼけの大きさ b が 1 画素の大きさを超えると画像にぼけが生じ，逆に 1 画素以下の大きさであればぼけは生じない．

図 3.2 より明らかなように，テレセントリックレンズ系では，カメラ内において撮像面を光軸方向に移動させ Lens 2 と撮像面との距離 p を変化させると，撮像面上における投影点の投影中心位置は変化しないが，ぼけの大きさ b は変化する．また，カメラ全体を光軸方向に動かして 3 次元点までの距離 u を変化させた場合には，この点の撮像面上における投影中心位置は変化しない．しかし，開口を通して Lens 2 に入射する光の広がり c は変化することから，ぼけの大きさ b は距離 u に応じて変化する．このようにテレセントリッ

クレンズ系では，物体までの距離 u やカメラ内における撮像面位置 p を変化させると，各投影点の投影中心位置は変化せず，ぼけの大きさのみが変化する．

3.2 奥行不変 PSF の導出

次に，ある一定時間露光し，この露光中にカメラや撮像面を移動させたときに得られる PSF について考える．このように一定時間積算して得られる PSF を長原ら [9] は IPSF(Integrated PSF) と呼んだ．

ある 3 次元点が撮像面上において点 $\mathbf{m} = [u, v]^T$ に投影されたとする．このとき，投影像が一定の広がり（ぼけ）を持って撮像面に投影されたとすると，撮像面上において点 \mathbf{m} から距離 r の位置にある点 $\mathbf{x} = [x, y]^T$ の輝度は，次式に示すピルボックス関数による PSF によって表せる．

$$P(r, u, p) = \frac{4}{\pi b^2} \Pi\left(\frac{r}{b}\right) \quad (3.9)$$

ここで， b はぼけの大きさであり，式 (3.8) に示す通り 3 次元点までの距離 u と撮像面までの距離 p の関数である．また $\Pi(w)$ は次式に示す矩形関数である．

$$\Pi(w) = \begin{cases} 1, & |w| < \frac{1}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.10)$$

また，ぼけモデルをガウス関数とすると，PSF は次式となる．

$$P(r, u, p) = \frac{2}{\pi (gb)^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{(gb)^2}\right) \quad (3.11)$$

ここで， g は定数である．収差のない，理想的なレンズにおいてはぼけ関数はピルボックス関数として表すことができるが，現実のレンズにおいては，ガウス関数に近い形となる．また，レンズメーカーはぼけ画像が綺麗なグラデーションとなるように，ガウス関数に近い形になるように設計することがある．本稿では，特に記述がない場合は簡易のためピルボックス関数を取り扱うこととする．式 (3.9) に示すように，PSF はレンズから 3 次元点までの距離 u によって異なるため，奥行変化のある一般のシーンでは，撮像点ごとに PSF は異なる．

ここで，カメラの露光時間中に 3 次元点に対するカメラの距離 u 又はレンズに対する撮像面の距離 p を変化させることを考える．このときの 3 次元点の奥行き変化を $u(t)$ とし，撮像素子の距離変化を $p(t)$ とする．カメラの露光中は撮像素子に光が当たり電荷が蓄積されるため，PSF は時間軸上において積算され次式に示す IPSF が得られる．

$$IP(r) = \int_{T_1}^{T_2} P(r, u(t), p(t)) dt \quad (3.12)$$

ここで， T_1 は露光開始時刻であり T_2 は露光終了時刻である．したがって露光時間は $T = T_2 - T_1$ である．

例えば，カメラ全体を光軸方向に一定速度 s_u で並進させた場合，カメラと3次元点との距離 u は次式により変化する．

$$u(t) = u_0 + s_u t \quad (3.13)$$

ここで， u_0 は $t = 0$ におけるカメラと3次元点との距離である．式 (3.8)，式 (3.9)，式 (3.12) より，IPSF は次式となることがわかる．

$$IP(r, u) = \frac{2f_1^2}{\pi a s f_2} \left(\frac{\lambda_0 + \lambda_T}{r} - \frac{2\lambda_0}{b(0)} - \frac{2\lambda_T}{b(T)} \right) \quad (3.14)$$

ここで， λ_t は条件により以下の値となる．

$$\lambda_t = \begin{cases} 1, & b(t) \geq 2r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.15)$$

ここで， $b(t)$ は時刻 t におけるぼけの円の直径である．また，撮像物体の合焦位置は，時刻 $t = 0$ から $t = T$ の間の地点に存在するものとする．

一方ぼけモデルがガウス関数の IPSF は，式 (3.8)，式 (3.11)，式 (3.12) より次式となる．

$$IP(r, u) = \frac{f_1^2}{f_2 \sqrt{2\pi} r a s g} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{2}r}{gb(0)} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{\sqrt{2}r}{gb(T)} \right) \right)$$

ここで， $\operatorname{erfc}(x)$ は次に示す相補誤差関数である．

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{erf}(x) \quad (3.16)$$

3.3 シミュレーション実験

3.3.1 数値シミュレーション

まず数値シミュレーションにより，IPSF の不変性を確認した．本実験では， 100mm の位置の対象物が合焦するレンズ系において， $u_n = 95\text{mm}, 98\text{mm}, 100\text{mm}, 103\text{mm}, 106\text{mm}$ の5つの位置にある点光源をそれぞれ撮影した．まず，ぼけ関数が式 (3.9) のピルボックスである場合と式 (3.11) のガウスである場合のそれぞれにおいて，通常のカメラで撮影した場合の PSF を求めた．この結果を図 3.3 および図 3.5 にそれぞれ示す．次に，レンズと撮像物体の距離 u_n を中心に $s = 10\text{mm}/\text{sec}$ ， $T = 6\text{sec}$ にて式 (3.13) に従って移動させ，IPSF を求めた．このとき，撮像面は $p = 100\text{mm}$ ，焦点距離は $f = 50\text{mm}$ ，絞りの大きさは $a = 10\text{mm}$ とした．求めた IPSF を図 3.4 および図 3.6 に示す．

図 3.3 および図 3.5 より，通常 PSF では， u_n の奥行が変化するとグラフ形状が大きく異なるが，図 3.4 および図 3.6 の IPSF ではグラフがほぼ一致しているのが分かる．よって，奥行不変であると言え，奥行きが異なる地点でも同じぼけ関数で復元が可能となる．

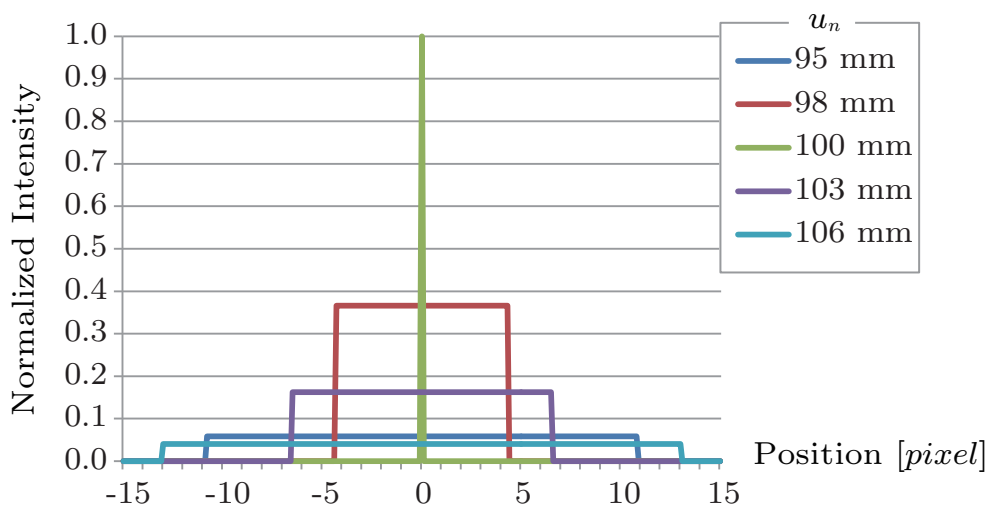


図 3.3 ピルボックス関数の PSF

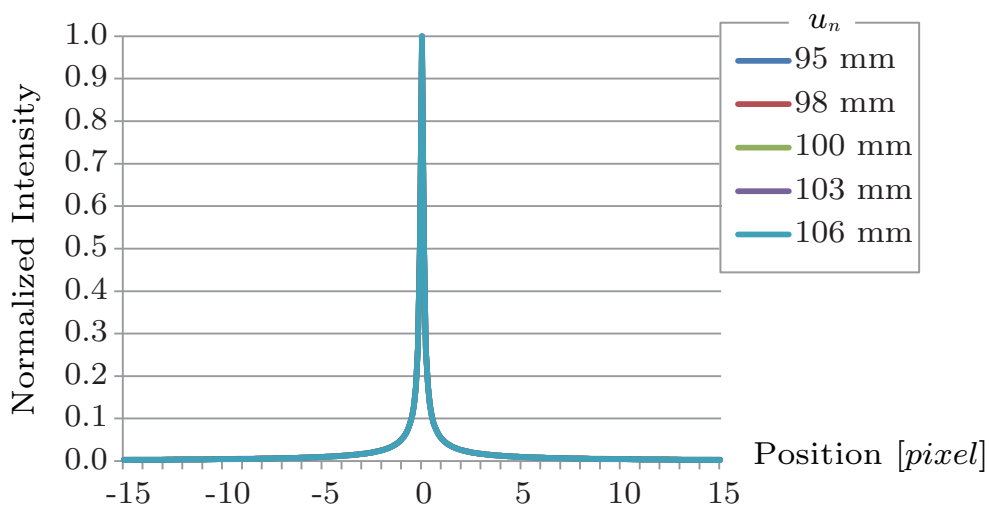


図 3.4 ピルボックス関数の IPSF

つまり，奥行情報を必要とせずに，ピントが一箇所に定まらない様な複雑な形状の物体でも，1回の撮影で全焦点画像の生成が可能となる。

さらに，理想的なレンズのぼけ関数のピルボックスと，実際のレンズに近いぼけ関数のガウスを比較すると，IPSFにおいてはグラフが同じ形状をしている．このことは，ぼけ関数が多少変化しても，同じIPSFにてぼけが復元できることを示している．通常のPSFでぼけを復元する場合には，あらかじめ点光源を撮影するなどして正確なPSFを計測する必要があるが，本手法ではレンズの微妙な特性の違いを気にすることなくぼけの復元が可能である．

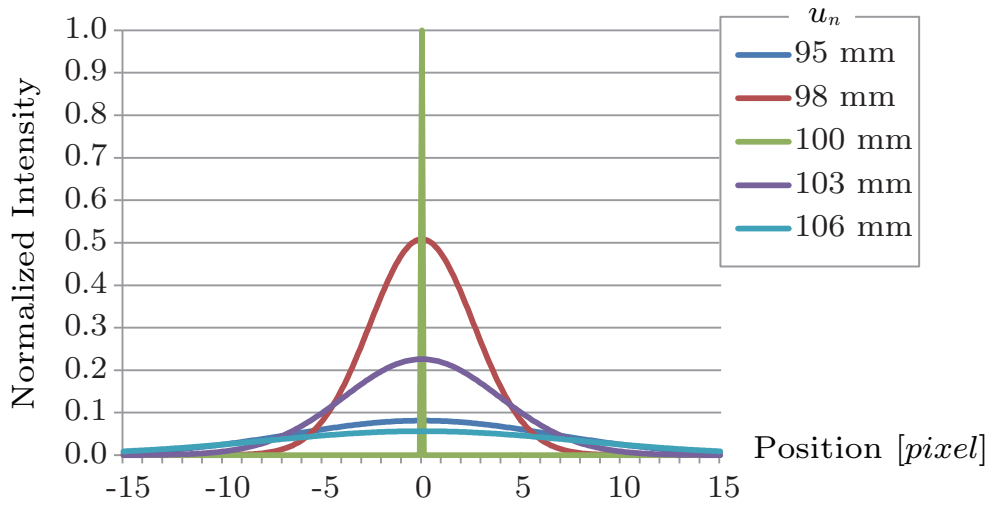


図 3.5 ガウス関数の PSF

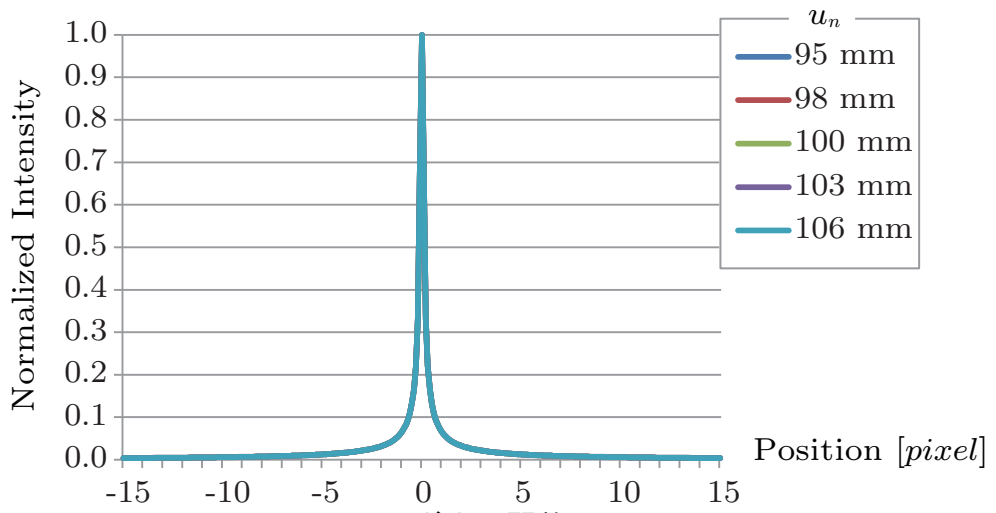


図 3.6 ガウス関数の IPSF

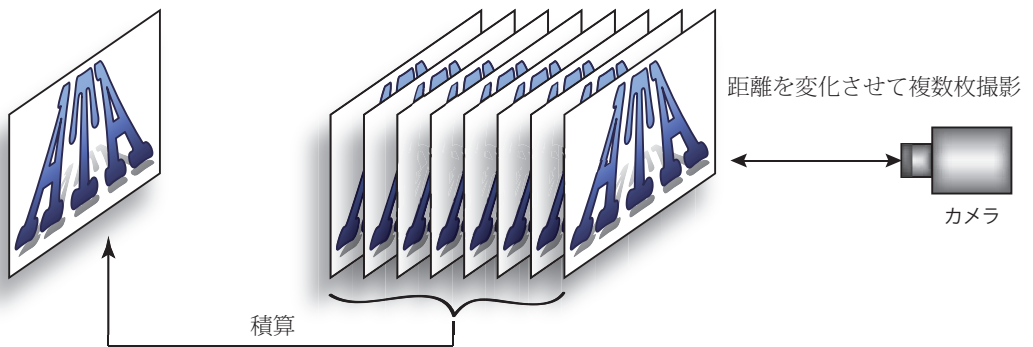


図 3.7 レンズシミュレーターによる積算画像の生成

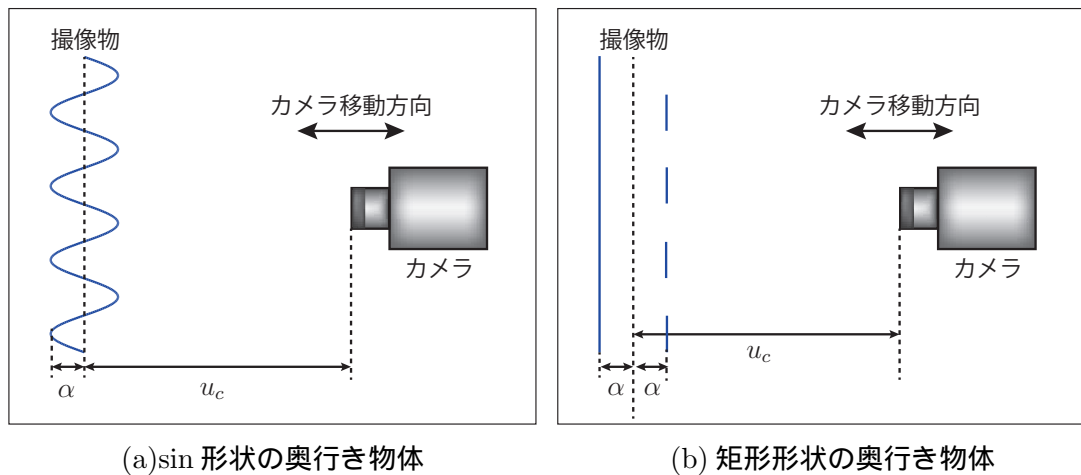


図 3.8 レンズシミュレーターによる実験

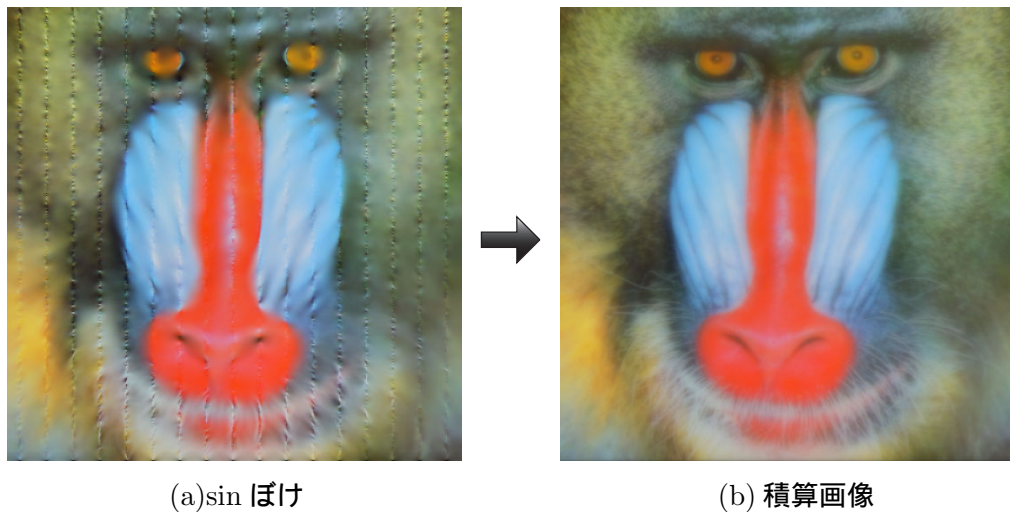


図 3.9 sin ぼけ画像から復元までの工程

3.3.2 レンズシミュレーターによるぼけ画像の生成

一般に 3 次元環境を撮影した画像のぼけ復元問題においては正解画像が存在しないため、これまでは定量的な比較評価が行われてこなかった。そこで本稿では、レンズによる任意 3 次元物体のぼけ画像が生成可能なレンズシミュレーター (付録 A.1) で生成した画像を用いて提案法と従来法との定量的な比較評価を行う。本シミュレーターでは、画像を積算することで、カメラを移動させながら露光した画像を生成することが可能である (図 3.7)。

本実験では、このシミュレーターを用いることで、ぼけ関数をピルボックスとし、50 枚の画像から積算画像を生成した。撮像物体は、図 3.8(a) で示すように、振幅 $\alpha = 5\text{mm}$ のサインカーブで奥行き形状が変化する物体と、図 3.8(b) で示すように、前面の物体をスリット状に配置することで、奥行き形状が矩形に変化する物体の 2 種類を用意した。それ

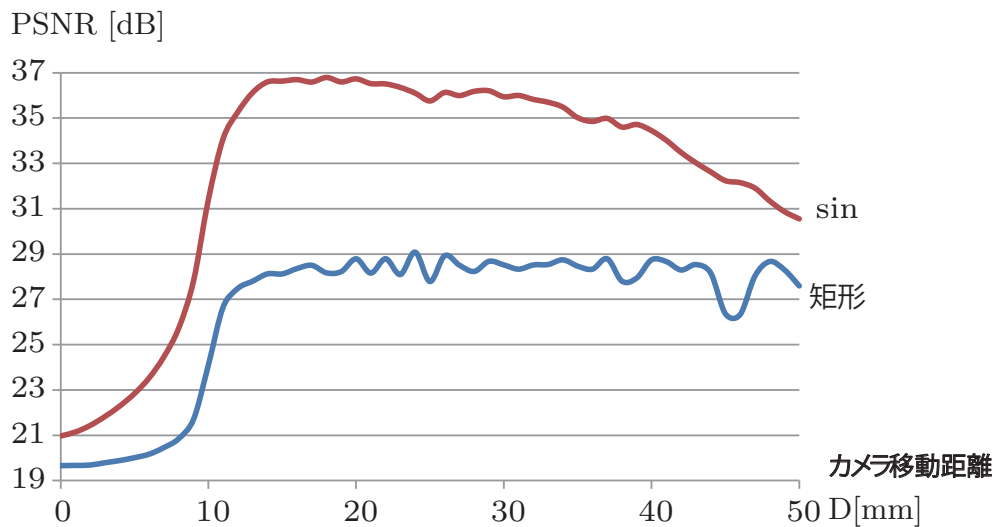


図 3.10 Mandrill

それぞれの撮像物体には、画像がテクスチャとして貼り付けられており、このテクスチャ画像を真値とすることで復元画像の定量的な評価を行った。図 3.8(b) の矩形形状では、前面のスリットと背景の両方に同じ画像が貼り付けられている。比較のため、本シミュレーターを用いて、長原ら [9] の手法（以下、本章内では従来法と呼ぶ）における画像も生成し、併せて評価した。ただし、従来法においてはテレセントリックレンズでないために、奥行き変化に伴う画像の拡大縮小が発生してしまい画像が大きく変形してしまう。そこで、スリット部と背景の画像を貼り付ける倍率を変化させて、中心位置 u_c において画像歪みが発生しないよう調整を行った。中心位置 u_c が、合焦位置となっている。

サイン形状物体を撮像した場合の通常のぼけ画像と、カメラを移動させながら画像を積算して生成した積算画像を図 3.9 に示す。通常の撮影方法では、図 3.9(a) のようにピントが合っている箇所がほとんどなく、残りはぼけた画像となっている。これをカメラを移動させながら撮影して積算した画像が図 3.9(b) であり、画像全体でぼけが均一になっていることが確認できる。

3.3.3 レンズシミュレーターによる評価実験

レンズシミュレーターを使って、提案法と従来法のそれぞれの画像を生成し復元することで、2つの手法における全焦点画像の生成精度を比較評価した。本評価では、図 3.14 に示す 3 枚の画像に対して図 3.8 に示すサイン形状と矩形形状を持たせて評価を行った。提案法の評価においては、中心位置 $u_c = 100\text{mm}$ 、撮像面 $p = 20\text{mm}$ 、焦点距離 $f_1 = 60\text{mm}$ 、 $f_2 = 60\text{mm}$ 、絞りの大きさ $a = 10\text{mm}$ とした。テクスチャ画像とセンサの解像度は $0.0385\text{mm}/\text{pixel}$ で 512×512 の大きさである。

作成した積算画像を基に IPSF によりぼけを除去し原画像との PSNR を計算したグラフが、図 3.10、図 3.11、図 3.12 である。グラフの横軸はカメラ移動距離 $D(= sT)$ であり、

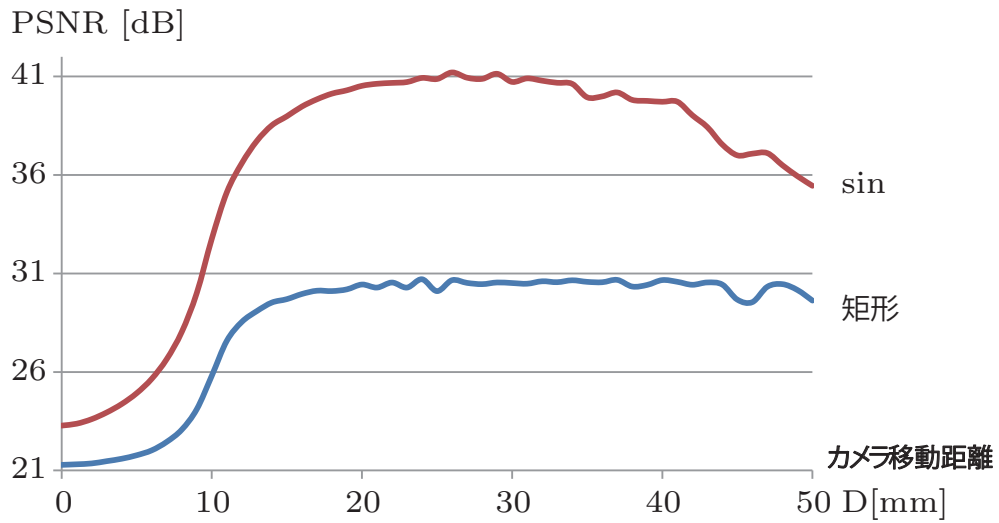


図 3.11 Lena

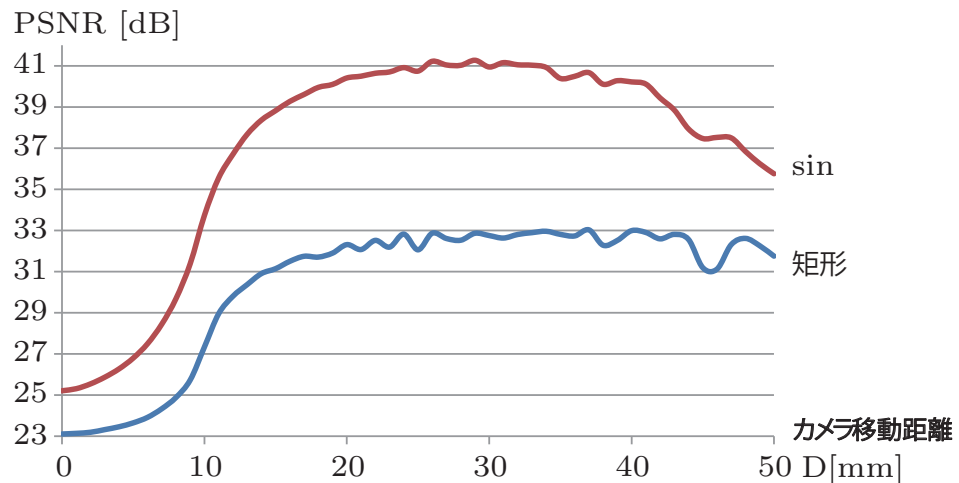


図 3.12 Peppers

縦軸は復元画像の PSNR である。グラフより、 $D = 15$ から $D = 30$ くらいの中に PSNR のピークがあることがわかる。撮像物体の奥行き振幅が $\alpha = 5\text{mm}$ であるため、 $D = 10$ 以上の移動量がなければ、積算画像に撮像物の合焦点が含まれないため、 $D = 10$ を超えたあたりから PSNR が急激に上昇していると考えられる。逆に移動範囲を大きくしすぎると、ぼけの影響が大きくなり、PSNR が向上しない。以上の結果より、本手法は物体の奥行き深さの 1.5 倍から 3 倍程度の範囲でカメラを移動させれば良好な結果が得られることが分かった。

次に、通常のレンズでセンサを移動させながら撮影を行う従来法との比較を行う。従来法では、中心位置 $u_c = 750\text{mm}$ 、撮像面 $p = 12.5\text{mm}$ 、焦点距離 $f = 50\text{mm}$ とし、ぼけの大きさが提案法と同じになるように絞りと物体の奥行き振幅の調整を行った。従来法との

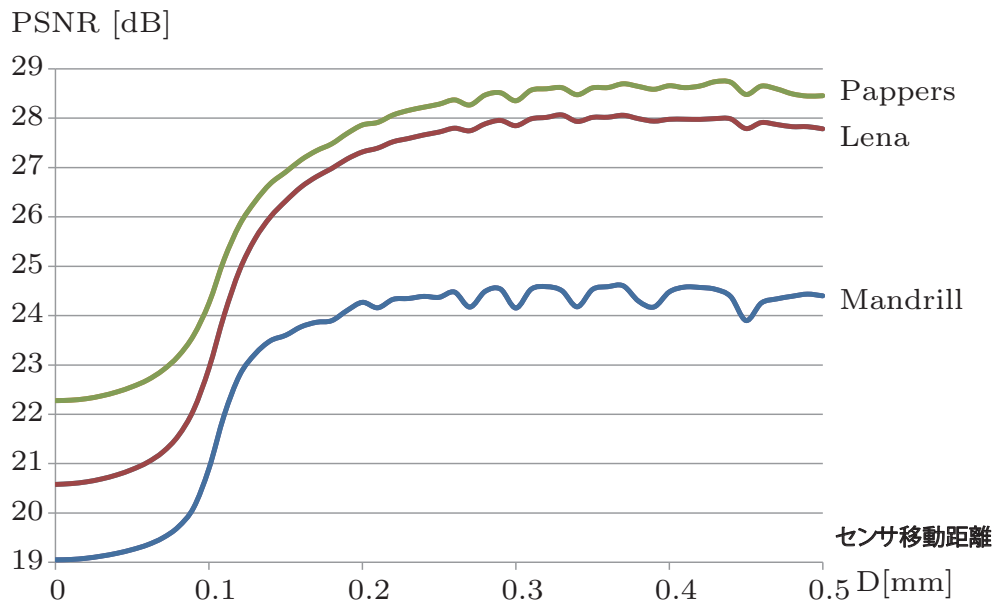


図 3.13 従来法

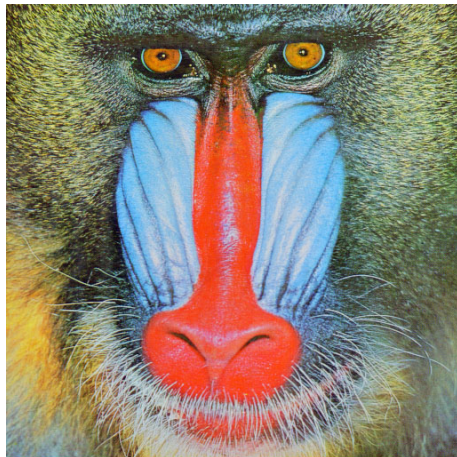
比較評価は，矩形形状でのみ行い，その結果を図 3.13 に示す．PSNR を比較すると，すべての画像で提案手法の方が高い数値が得られており，よりぼけの少ない正確な画像が復元できていることがわかる．

また，各グラフの PSNR がピーク値となる復元結果画像を図 3.15，図 3.16，図 3.17 に示す．従来法では，奥行きの違いがうっすらと短冊模様となって現れているのが確認できるが，本手法においては，ほとんど確認できないレベルになっている．テレセントリックレンズを使うことで，奥行き変化による，画像の歪みが発生しないためだと考えられる．また，提案法では，全体的にシャープになっており，ぼけの復元が効果的に行えていることが確認できる．

テレセントリックレンズにおいては，レンズの大きさを超える対象物を撮影することが出来ないが，通常のレンズでは，画角を広くすることで広い範囲の撮影が可能となる．よって，本手法は小さい物体の撮影に向き，従来法は遠くの物体を撮影するのに向く．通常のレンズでも，遠くの物体を撮影することで，入射光が平行光に近くなり，像の拡大縮小による効果を少なくすることが可能である．

3.4 実画像実験

次に，実際のカメラとレンズを使って，撮影された画像を用いてぼけの復元実験を行った． xy 移動ステージ上に撮像物体を配置して動かし，カメラを固定して撮影を行った．実験では，物体を動かしているが，カメラを動かして撮影した状況と変わらない． $s = 60\text{mm}/\text{sec}$ ， $T = 1\text{sec}$ にて物体を 60mm の距離だけ手前から奥へ移動させた．使用したテレセントリックレンズは，光学倍率 $0.17\times$ ， $W.D = 113\text{mm}$ ，被写界深度 11mm ，実効 $F = 4$ の C マウ



(a)Mandrill



(b)Lena

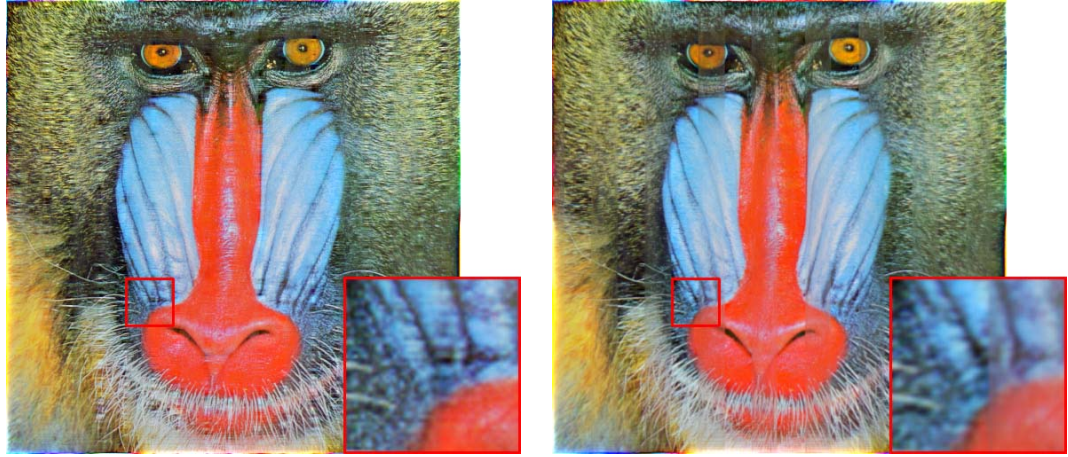


(c)Peppers

図 3.14 元画像

ントレンズである．また，使用したカメラは，1/2"CMOS，130万画素の単板カラーカメラである．図 3.18 は実際の撮影での様子である．

図 3.19，図 3.20，図 3.21，図 3.22 は撮影画像と，その復元画像である．これらの撮像物は，奥行きが 30mm から 40mm の幅があり，今回の実験で用いたレンズの被写界深度 11mm を超えているため，通常の撮影では全てに焦点のあった画像を撮影することが出来ない．しかし，提案手法による復元結果では，どの画像も綺麗な全焦点画像が得られていることが確認できる．以上より，提案法は，様々な奥行きを持つシーンにおいて，これらの奥行きに依らず全ての物体に対して焦点の合った全焦点画像が生成可能であることがわかる．



(a) 提案法

(b) 従来法

図 3.15 レンズシミュレーターによる実験: 画像 [Mandrill]



(a) 提案法

(b) 従来法

図 3.16 レンズシミュレーターによる実験: 画像 [Lena]



(a) 提案法

(b) 従来法

図 3.17 レンズシミュレーターによる実験: 画像 [Peppers]

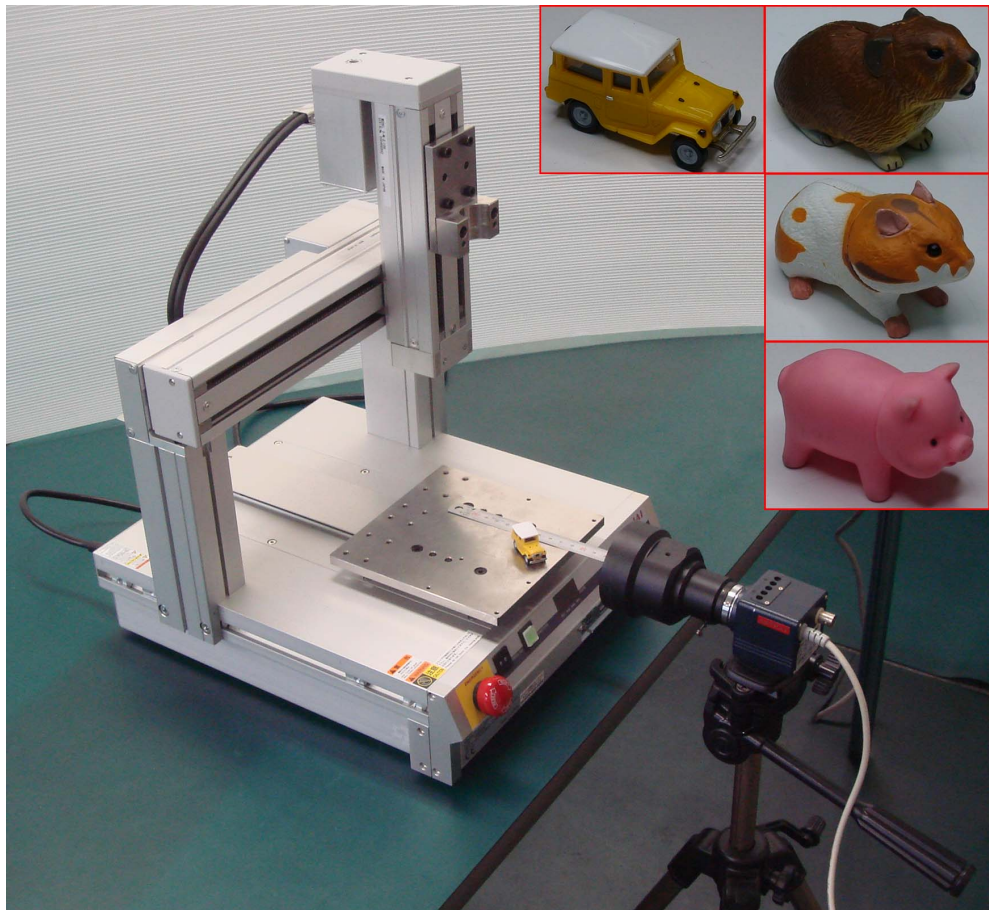


図 3.18 実画像実験の様子



(a) 撮影画像



(b) 復元画像

図 3.19 実画像実験: 画像 [Car]



(a) 撮影画像



(b) 復元画像

図 3.20 実画像実験: 画像 [Mouse1]



(a) 撮影画像



(b) 復元画像

図 3.21 実画像実験: 画像 [Mouse2]



(a) 撮影画像



(b) 復元画像

図 3.22 実画像実験: 画像 [pig]

第4章

奥行きと動き不変PSF

本章では，3章の奥行き不変PSFに動きぼけを含めたモデルを考えることで，奥行きぼけと動きぼけの両方が存在する状況下において，これらを同時に復元してぼけの無い画像を生成する方法を導出する．動きぼけと奥行きぼけの復元を同時に行う方法としては，Znamenskiyら[29]とBandoら[30]が，フォーカススイープによる手法でぼけの同時復元が可能であることを示した．しかし，これらは一定方向の等速運動による動きぼけに限定されており，複雑な動きのぼけ復元に関しては考慮されていない．そこで本稿では，画像中において物体が様々な方向へ様々な大きさで運動する複雑な動きぼけが復元可能なことを示し，撮像物を回転や拡大・縮小させる実験によりその有効性を示す．特に，同時復元可能な条件として，物体の運動する瞬間の速度に着目し，同時復元可能な物体の運動速度とカメラの運動速度との関係を明らかにする．また実画像実験では特殊な装置を使わず，一般的な撮影機器を利用することで本手法の有効性を示す．

4.1 IPSFの動き不変性

本節では，前節で述べたIPSFが一定の条件のもとでは物体の動きの速さや方向に対してほぼ不変となり，この結果，動きの速さや方向に依らず動きぼけの復元が可能となることを示す．簡単のため，まず3章で述べたテレセントリックレンズ系を用いて動き不変性

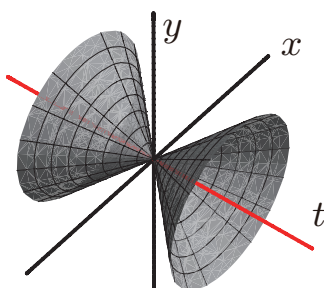


図 4.1 ぼけ範囲の時間的な推移

を考え、その後これを一般化し通常の透視投影に基づくレンズ系における動き不変 PSF について考える。テレセントリックレンズを用いることで、フォーカススイープによる像の拡大縮小の発生が抑えられるため、撮像面に投影された物体の動きと奥行きぼけを独立に考えることが可能となる。

式 (3.13) において $t = 0$ で合焦するとすると、 u_0 は合焦時におけるカメラと 3 次元点との距離である。また、この場合にはぼけ半径の変化速度は一定となるため、この変化速度を s_b とすると、式 (3.8) は次式のように表せる。

$$b(t) = |2s_b t| \quad (4.1)$$

このときのぼけの大きさの時間的な変化は図 4.1 に示す通りとなり、このときの円錐内の領域がぼけ領域、すなわち 3 次元点から入射した光が広がる範囲となる。合焦点を中心に、時刻 $t = -T/2$ から $t = T/2$ まで露光時間中にカメラを光軸方向に移動させると、式 (3.9)、式 (3.12)、式 (4.1) より、IPSF は次式となる。

$$IP(r) = \begin{cases} \frac{1}{\pi s_b^2} \left(\frac{2s_b}{r} - \frac{4}{T} \right), & r < \frac{|s_b T|}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.2)$$

これは、図 4.1 の円錐内において時間積分を計算したものである。

いま、3 次元空間中の物体が運動しているとし、時刻 t における物体上の 3 次元点 $\mathbf{X}(t)$ がカメラ画像中において点 $\mathbf{m}(t) = [u, v]^T$ に投影されたとする。すると、時刻 t におけるぼけ PSF は、画像上の観測点 $\mathbf{x} = [x, y]^T$ の関数として次式のように表せる。

$$P(\mathbf{x}, u, p) = \frac{4}{\pi b(t)^2} \Pi \left(\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{m}(t)\|}{b(t)} \right) \quad (4.3)$$

PSF を点 \mathbf{m} からの距離 r の関数としてではなく観測位置 \mathbf{x} の関数として考えるのは、物体の動きがある場合にはぼけの中心位置 $\mathbf{m}(t)$ が移動するためである。この PSF を時間軸上で積算することで、次式に示す IPSF が得られることがわかる。

$$IP(\mathbf{x}) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{4}{\pi b(t)^2} \Pi \left(\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{m}(t)\|}{b(t)} \right) dt \quad (4.4)$$

ここで、露光時間中における投影点 $\mathbf{m}(t)$ の運動が、速度 s_m 、方向 \mathbf{v} の等速運動であり、時刻 $t = 0$ において原点を通過するとすると、 $\mathbf{m}(t)$ は次式のように表せる。

$$\mathbf{m}(t) = s_m t \mathbf{v} \quad (4.5)$$

また、カメラを露光時間中に速度 s_u で光軸方向に等速運動させたると、ぼけの大きさ b は式 (4.1) に示すように一定速度 s_b で変化する。したがって IPSF は、式 (4.1) および式 (4.5) を式 (4.4) に代入することで、次式となることがわかる。

$$IP(\mathbf{x}) = \frac{1}{\pi s_b^2} \left\{ \lambda_0 \left(\frac{1}{|t_0|} - \frac{2}{T} \right) + \lambda_1 \left(\frac{1}{|t_1|} - \frac{2}{T} \right) \right\} \quad (4.6)$$

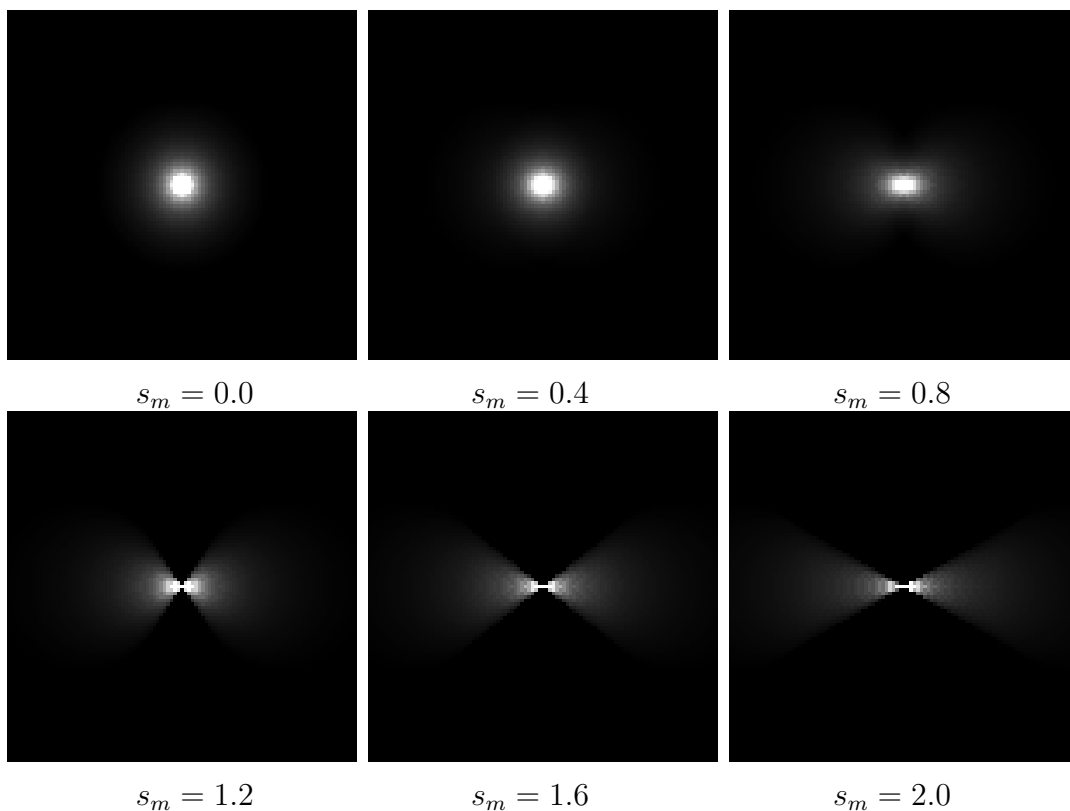


図 4.2 動きの大きさに対する IPSF の変化

ここで, $t_0, t_1 (|t_1| > |t_0|)$ は $|\mathbf{x} - s_m t \mathbf{v}|^2 = s_b^2 t^2$ の解であり, また λ_0, λ_1 は条件により以下の値を取る関数である.

$$t_{0,1} = \frac{-s_m \mathbf{x} \cdot \mathbf{v} \pm \sqrt{s_m^2 (\mathbf{x} \cdot \mathbf{v})^2 + |\mathbf{x}|^2 (s_b^2 - s_m^2)}}{s_b^2 - s_m^2} \quad (4.7)$$

$$\lambda_0 = \begin{cases} 1, & |t_0| < \frac{T}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1, & (|t_1| < \frac{T}{2}) \wedge (t_0 t_1 < 0) \\ -1, & (|t_1| < \frac{T}{2}) \wedge (t_0 t_1 > 0) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.9)$$

時間軸 t がぼけ円錐の内部に含まれる場合は図 4.4 の状態となり式 (4.6) の第一項と第二項の 2 つの積分区間の和となる. 一方, 時間軸 t が円錐の内部に含まれない場合は図 4.5 の状態となり, 式 (4.6) の第一項から第二項の積分区間を減算する必要があるため, $\lambda_1 = -1$ となる. この時の条件として, t_0 と t_1 の符号が等しくなる.

露光時間が短い場合には, カメラの運動も物体の運動もほぼ等速運動とみなせるため, 式 (4.6) で考えればよい.

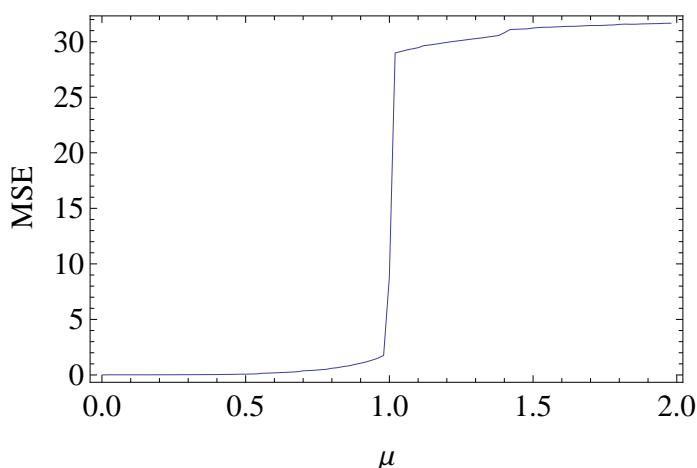


図 4.3 動きの大きさに対する IPSF の誤差の変化

図 4.2 はぼけ半径の変化速度が $s_b = 1$ である場合において，動きの大きさ s_m を様々に変化させたときに得られる点光源の IPSF である．この図より明らかなように，物体が露光中に運動する場合には，得られる IPSF は動きの速度や方向によって変化する．また物体の動きが無い場合 ($s_m = 0$) には IPSF は等方性となるが，物体が動く場合 ($s_m \neq 0$) には IPSF は非等方性となることがわかる．さらに重要な点は，ぼけ半径の変化速度 s_b と投影点の運動速度 s_m との速度比に応じて IPSF の性質が大きく異なることである．ここで，次式に示す速度比 μ を考える．

$$\mu = \left| \frac{s_m}{s_b} \right| \quad (4.10)$$

図 4.2 より明らかなように，速度比 μ が 1 以下の場合には，IPSF の等方性は概ね保持されるが，速度比 μ が 1 以上になると IPSF はリボン状となり等方性が大きく崩れる．このときのそれぞれの速度比 μ における IPSF と投影点の運動がない場合における IPSF との違いを評価すると図 4.3 の通りとなる．図 4.3 の横軸はぼけ半径の変化速度に対する動きの速度比 μ であり，縦軸はそれぞれの速度比 μ における IPSF と物体運動がない場合の IPSF との二乗誤差を表す．この図より，速度比 μ が 1 以下では IPSF はほぼ不変であるのに対して，速度比 μ が 1 を超えると IPSF の不変性は急激に崩れ違いが大きくなることがわかる．以上より，次式に示す条件を満たす物体運動のもとでは，IPSF はほぼ不変であると考えられる．

$$\mu \leq 1 \quad (4.11)$$

図 4.3 より明らかなように，この条件下では，物体運動の大きさや方向によらず，同一の IPSF を持つものとしてぼけの復元処理を行うことが可能である．

次に，速度比 μ が 1 を超えると不変性が急激に低下する原因について考える．IPSF の計算では，露光中の全ての時刻のぼけ PSF が積算されるが，特に合焦する時刻付近においてはぼけの大きさ b が小さくなることから積算値 $P(x, u, p)$ が非常に大きくなる．この

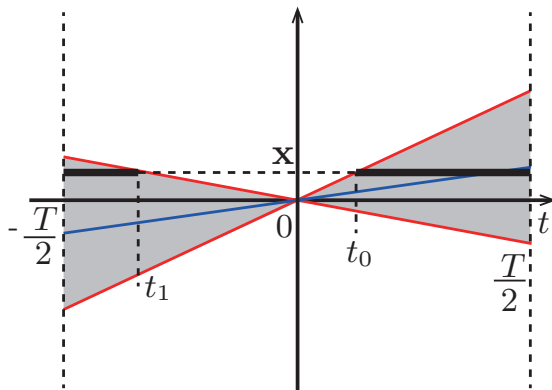


図 4.4 復元可能な IPSF

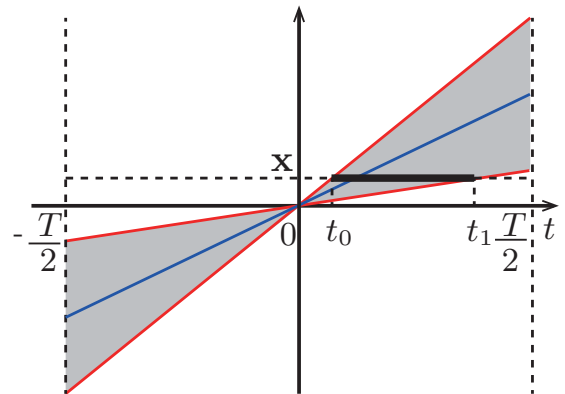


図 4.5 復元不可能な IPSF

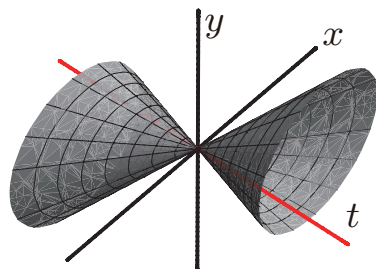
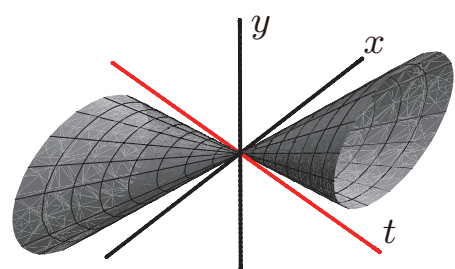
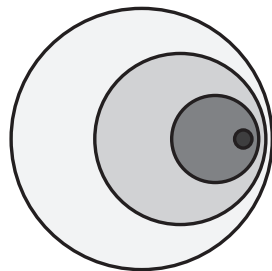
図 4.6 ぼけ範囲の時間的な推移 ($\mu = 0.8$)図 4.7 ぼけ範囲の時間的な推移 ($\mu = 1.4$)

図 4.8 復元可能

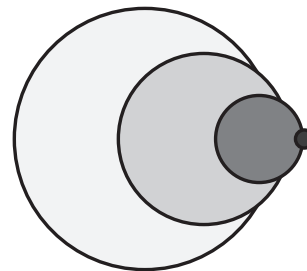


図 4.9 復元不可能

ため、一般に IPSF は合焦点付近においてその値が非常に大きくなり支配的となる。これは、図 4.2 のいずれの場合においても、画像中央（合焦点）において輝度が非常に高くなっていることからわかる。ここで、物体の画像中における運動速度 s_m がぼけの変化速度 s_b 以下であれば、PSF の時間的な変化は図 4.6 のようになり、時間軸 (t 軸) はぼけが成す錐の中に存在する。したがって、 $x - y$ 平面において考えると、図 4.8 に示すように合焦点はいずれの時刻においてもぼけ円の中に含まれる。この結果、合焦点近傍での IPSF の形状はほぼ円形状となり、物体の動きがない場合と比べて大きく変化することはない。一方、運動速度 s_m がぼけの変化速度 s_b を超えると、PSF の時間的な変化は図 4.7 のようになり、時間軸 (t 軸) はぼけが成す錐の外に出てしまう。したがって、 $x - y$ 平面において考えると、図 4.9 に示すように、合焦時刻以外の全ての時刻において合焦点はぼけ円の外に存在することになる。この結果、IPSF は合焦点においてくびれを持つことになり、物体の動きがない場合と比較すると、その形状が大きく変化する。したがって、物体の運動

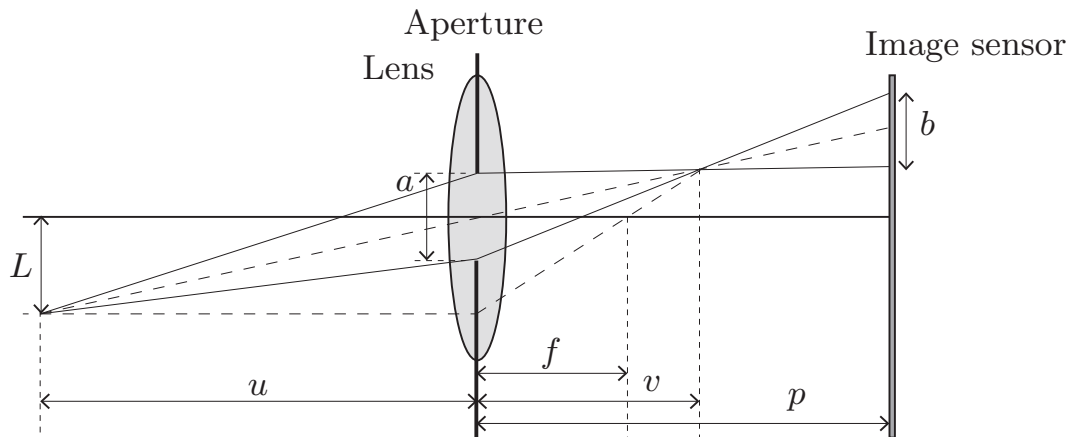


図 4.10 透視投影のレンズ

速度 $|s_m|$ が、ぼけ半径の変化速度 $|s_b|$ 以下であれば、IPSF はほぼ同一とみなすことができ、これを超えると IPSF の不変性が急激に崩れることがわかる。

以上の通り、一定の条件下においては、動きの大きさや方向に依らず IPSF はほぼ不変となる。このため、この IPSF を用いて画像をデコンボリューションすることにより、任意の動きの動きぼけを復元することができる。このとき、IPSF は奥行きに対しても不変であることから、奥行きぼけも同時に復元することができる。したがって、先に述べた運動条件下においては、動きの方向や大きさに依らず、IPSF を用いることで動きぼけと奥行きぼけを同時に復元することが可能である。ただし、合焦位置は3次元点の奥行に応じて異なるため、各点ごとに合焦する時刻が異なる。したがって、物体が露光時間中に運動している場合には奥行に応じて各点の IPSF の中心（合焦点）が移動する。この結果、ぼけ復元画像中において物体の像が奥行に応じて運動方向に伸び縮みする。しかし、文字を判読したい場合などにおいては、このような像の伸び縮みは大きな問題とはならない。

4.2 一般レンズにおける動き不変性

これまでは、簡単のため平行投影を行うテレセントリックレンズ系に基づいて考えたが、次に奥行に応じて結像位置が変化する一般の透視投影のレンズ系における動き不変性について考える。

図 4.10 に示すように、透視投影のレンズ系では物体までの距離 u や撮像面の位置 p に応じて結像位置が変化する。したがって提案法において露光中にカメラや撮像面を光軸方向に移動させると、この間に像の位置が変化する。これは、画像中心から周辺に向けて（あるいは周辺から中心に向けて）投影像が放射状に運動することに等しい。提案法では、画像中における像の動きの速度がぼけの変化速度以下であればぼけ復元が行えるのであった。したがって、このような奥行き変化によって生ずる像の動きも含めて画像中での動きの速度がぼけの変化速度以下であれば IPSF の不変性が保持され、動きぼけと奥行きぼけ

を同時に復元することができる．

今，物体までの距離 u や撮像面の位置 p を変化させたことによって生ずる投影点の動きが画像面上において方向 \mathbf{u} ，速度 s_z であるとする．このとき，画像中における投影点の動きは，カメラや撮像面を光軸方向に動かしたことによって生ずる動き $s_z \mathbf{u}$ と3次元点自身の運動によって生ずる動き $s_m \mathbf{v}$ を合成したものとなる．これを次式のようにその大きさ s_a と方向 \mathbf{w} によって表すことにする．

$$s_a \mathbf{w} = s_m \mathbf{v} + s_z \mathbf{u} \quad (4.12)$$

ここで，速度比 μ を次式のように定義する．

$$\mu = \left| \frac{s_a}{s_b} \right| \quad (4.13)$$

すると，次式の条件が各時刻において満たされるとき，合焦点は常にぼけ円内に存在することになる．

$$\mu \leq 1 \quad (4.14)$$

したがって，一般のレンズ系においては，式(4.14)が露光時間中において満たされていれば，物体の動きの大きさ，動きの方向，奥行きによらず，動きぼけと奥行きぼけの同時復元が可能となる．

4.3 ノイズとの関係

全焦点化のために被写界深度を増やす方法として，カメラの絞りを絞る方法がある．つまり，理想的なピンホールカメラとすると全焦点画像を得ることが可能である．また，任意の動きぼけに対応する方法として，カメラの露光時間を短くする方法がある．つまり，物体の画像中における運動量が1ピクセル以下になるように露光時間を調整すれば動きぼけが発生することがなくなる．しかし，これらの方法では受光素子に入射する光の量が大幅に低下してしまう．

そこで，光量と関係が深い画像ノイズについて考えてみる．アンプの増幅係数を A ，フォトン・エレクトロンショットノイズを N_s ，暗電流ショットノイズを N_{DC} ，読み出しノイズを N_R ，量子化ノイズを N_Q とすると，入力である光子と出力である画素値 O の関係は以下の式で表される [31]．

$$O = A(\tilde{I} + N_s + N_{DC} + N_R) + N_Q \quad (4.15)$$

ただし $\tilde{I} (\stackrel{\text{def}}{=} tKP)$ はノイズを含まない入力であり，露光時間を t ，光子に対する電荷の変換効率 K ，および単位時間あたりの光子数 P の積で表される．フォトン・エレクトロンショットノイズとは光・電子の粒子性にともない発生するノイズである．暗電流ショットノイズとは，光が全くない状態でも熱によりフォトダイオード内の電子が励起されることにより発生するノイズである．両ショットノイズはポアソン分布に従うと仮定される．つ

まり平均・分散に線形な関係がある。ただし、フォトン・エレクトロンショットノイズが分子・電子の量（大雑把に言えば明るさ）に比例して分散が増えるのに対し、暗電流ショットノイズの分散は温度や露光時間に依存する。ポアソン分布は、2項分布（成功か失敗かの2つの状態をもつ確率プロセスに対し、独立な試行を n 回行った際の確率分布）において試行回数が無限に近づいた際の確率分布として定義される。画像化プロセスにおいては、光子や電子の粒子性にとまなうノイズを表現する際に利用される。具体的には以下の式で表される。

$$p(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad (4.16)$$

ここで、 λ は任意の正の実数でポアソン分布の平均に対応する。ただし x は非負の整数である。ポアソン分布では平均と分散が等しいという性質があり、 λ が十分に大きい場合、正規分布で近似されることが多い。ポアソン分布の性質から、光子雑音の標準偏差は光子数の平均の平方根に等しいことが示せる。したがって SN 比は次の式で表される。

$$SNR = \frac{N}{\sqrt{N}} = \sqrt{N} \quad (4.17)$$

ここで N は検出される光子数の平均である。つまり、ショットノイズでは受光素子の光量を上げて N を大きくすれば、SN 比もそれにつれて大きくなることが分かる。

一方、量子化ノイズ N_Q は、アナログ信号をデジタル信号に変換する際にある区間の連続量を1つの値に集約してしまうことによって生じるノイズであり、一様分布で仮定される。そのため、光量による直接的な影響は発生しない。しかし読み出しノイズ N_R は、アンプや信号読み出し部で発生するノイズであり、正規分布で仮定される。光量が少ない場合はアンプ A により信号を増幅させる必要があるが、ノイズ成分も同時に増幅されてしまう。

以上により、画像取得による光量の低下は画像ノイズの増大を招くことが分かる。よって、全焦点化のためにカメラの絞りを絞り、動きぼけ除去のために露光時間を短くすることは、光量を低下させノイズを増大させることになる。これに対して提案法は、露光時間中にカメラを移動させるため、長時間の露光を前提としている。また、運動ぼけに関しては、式 (4.11)、式 (4.14) を満たすために s_b を大きくする必要があるが、式 (3.2)、式 (3.8) より絞りの大きさ a を大きくすればよいことが分かる。つまり、提案法では、長時間露光と絞りの拡大により、SN 比を低下させることなく画像の全焦点化と任意運動ボケの除去を実現することができる。

4.4 シミュレーション実験

一般に3次元環境を撮影した画像のぼけ復元問題においては、正解画像が存在しないため、定量的な評価を行うことが難しい。そこで本節では、レンズシミュレーターにより任意の3次元物体のレンズによるぼけ画像を生成し、提案法と従来法との定量的な比較評価を行った。本シミュレーターは、光の広がりを正確にシミュレートすると共に、画像を積算することで、カメラを移動させながら露光した画像を生成することが可能である。

本実験では、ぼけ関数をピルボックスとし、2,200 時刻の画像から積算画像を生成した。撮像物体には、画像がテクスチャとして貼り付けられており、このテクスチャ画像を真値（ぼけ無し画像）とすることで復元画像の定量的な評価を行った。

本評価では、Levin ら [11] の運動ぼけ復元法を従来法とし、レンズシミュレーターを用いて提案法と従来法における運動物体の撮影画像を生成しぼけ復元することで、これら 2 つの手法における運動ぼけの復元精度を比較評価した。対象物体は英数字が印字された平面物体とし、ぼけ復元後の文字の視認性と PSNR により評価を行った。提案法では、合焦距離を中心にカメラを前後に 11 mm 移動させた。また、焦点距離 $f_1 = 60$ mm, $f_2 = 60$ mm, 絞りの大きさ $a = 10$ mm とした。従来法 (Levin らの手法) では、合焦距離においてカメラを水平横方向に放物線状の速度分布で運動させた。どちらの手法においても、センサの解像度は 128×128 とし、各画素の輝度 (0~255) に対して標準偏差 $\sigma = 0.1$ のガウシアン輝度ノイズを印加した。対象物体の運動パターンは、(a) 停止、(b) 横移動、(c) 縦移動、(d) 斜め移動、(e) 回転、(f) 拡大縮小の 6 種類とした。回転と拡大縮小は、画像中心を基準としている。

図 4.11 (a) から (f) に、これら 6 種類の運動パターンにおける従来法 (Levin らの手法) によるぼけ復元結果を、また図 4.12 (a) から (f) に提案法による復元結果をそれぞれ示す。左列の画像はそれぞれの運動における画像中の 9 箇所での IPSF であり、赤矢印は物体運動を示している。中央列は撮影画像、右列はぼけ復元結果である。それぞれにおける μ の最大値は、(b) および (c) は 0.46, (d) は 0.65, (e) は 0.98, (f) は 0.86 であった。なお、本稿におけるデコンボリューションは、全てウィナー・フィルタ (Wiener filter) を用いて行った。

図 4.11 の従来法ではカメラを横方向に放物運動しているため、対象物体の運動が横方向である (b) では良好な結果が得られているが、他の運動に関してはぼけの復元が適切に行えていないことがわかる。この結果より、Levin らの手法ではカメラの運動方向が物体の運動方向とうまく一致している場合には高いぼけ復元効果があるが、これらの方向が異なる場合や曲線運動を行う物体の場合には適切にぼけ復元が行えないことがわかる。また全体的にリングングが発生しているが、これは提案法のぼけの大きさと従来法の放物運動の大きさを同等にしたためと考えられる。放物運動を大きくすればリングングが改善されるが画面端の影響を受けるために復元できるエリアが制限されてしまう。

一方、図 4.12 の提案法では、すべての運動において良好なぼけ復元画像が得られており、真値との PSNR においても、従来法より良い結果が得られている。これらの結果より、提案法では物体の運動速度がぼけの変化速度以下であれば、運動の方向や大きさによらず適切に動きぼけを復元できることがわかる。特に拡大縮小や回転といった動きは、撮影画像の位置で異なる PSF となるため、従来の方法では復元が困難であった (図 4.11 (e),(f) 左列)。これに対して、提案法では運動の瞬間速度が条件を満たせば PSF が撮影画像の位置によらずほぼ不変となっていることが確認できる (図 4.12 (e),(f) 左列)。

次に、提案法において物体の運動速度を様々に変化させた場合における動きぼけ復元の精度を評価する。図 4.13 は、速度比を変化させた場合におけるぼけ復元画像である。(a), (b), (c) は速度比 μ がそれぞれ 0, 0.5, 0.9 の場合であるが、いずれにおいても良好にぼけ

復元でき、すべての文字の判読が可能である。一方、(d), (e), (f) は速度比 μ がそれぞれ 1.1, 1.5, 2.0 の場合であるが、これらにおいては復元が正しく行えていないことがわかる。これらの結果より、速度比が 1 以下であれば提案法は有効であることが確認できる。

また図 4.14 のグラフは、速度比 μ を 0 から 2 まで変化させた場合におけるぼけ復元画像のぼけ無し画像に対する PSNR を求めた結果を示す。横軸は速度比 μ であり、縦軸はぼけ無し画像（復元画像の真値）に対する PSNR と SSIM である（付録 A.2）。この結果より、速度比が小さい場合には高い PSNR が得られており、ほぼ正確にぼけ復元が行えていることがわかる。一方、速度比が大きくなるに連れて PSNR が減少しており、また SSIM の値が $\mu = 1$ 付近で大きく下がっていることから、提案法の有効範囲が速度比 1 以下であることがわかる。Kodama ら [32] らの解析において、高周波成分では非常に良い性能を示すものの、低周波成分では一定の歪みが生じることが示されている。つまり、 $\mu < 1$ の条件下では本実験のような文字の視認性を考えた場合、テクスチャに強く関わる高周波成分が効果的に復元できていると考えられる。

4.5 実画像実験

次に、実際のカメラにおいてテレセントリックレンズを用いて撮影された画像から動きぼけの復元を行った結果を示す。本実験では図 4.15 に示すように、電動ステージと回転台を用いて物体とカメラとの相対運動を生成し撮影を行った。物体の運動は、横方向（水平方向）への並進運動、縦方向（垂直方向）への並進運動、およびカメラ光軸に対して垂直な面上での回転運動の 3 種類とした。提案法ではカメラを光軸方向に $s_u = 300$ mm/sec で移動させ、 $T = 0.5$ sec 間開口して IPSF 画像を撮影し、ぼけ復元を行った。比較のため、Levin らの手法 [11] も電動ステージを用いて実装し評価を行った。Levin らの手法では、カメラを放物線状に速度変化させながら横方向に移動させて IPSF 画像を撮影し、ぼけ復元を行った。使用したテレセントリックレンズは、光学倍率 $0.17\times$ 、W.D = 113 mm、被写界深度 11 mm、実効 $F = 4$ の C マウントレンズである。また、使用したカメラは、1/2" CCD、64 万画素の単板カラーカメラである。

図 4.16、図 4.17、図 4.18 は撮影画像と、その復元画像である。それぞれにおいて、(a) はカメラを固定して通常撮影した画像であり、(b) は (a) の状態から撮像物が動いている状態を撮影した画像、(c) は従来法（Levin らの手法）によりぼけ復元を行った結果、(d) は提案法で撮影した画像、(e) は (d) より IPSF を用いてぼけ復元を行った結果である。これらの撮像物は、30 mm くらい大きさでありカメラの被写界深度 11 mm を超えているため、通常の撮影では全てに焦点のあった画像を撮影することは出来ない。また、(b) より明らかなように、通常撮影では動きぼけも発生していることがわかる。図 4.16 の横運動では、(c) の従来法で動きぼけの除去が出来ているが、物体に奥行があるため奥行ぼけは除去できずに残っていることがわかる。図 4.17 の縦運動と図 4.18 の回転運動では、(c) の従来法では復元が出来ない。これは、従来法（Levin らの手法）においてはカメラの運動方向と対象物体の運動方向とが一致している必要があるためである。一方、提案法のぼ

け復元後の画像 (e) では、いずれの運動においてもぼけの除去が適切に出来ていることが確認できる。これは、提案法では運動の大きさの条件さえ満たされていれば動きの方向には依らずにぼけ復元が行えるためである。さらに、(a) で確認できる奥行ぼけについても同時に復元が行えていることがわかる。

次に、一般の透視レンズを装着したカメラにおける提案法による実験結果を示す。一般のレンズ系では、光軸方向へのカメラ移動や撮像面の移動を行うと、結像位置が移動するが、このような場合であっても画像中での動きの大きさが式 (4.14) の条件を満たせば提案法により動きぼけの復元が行える。そこで、透視レンズ系において、露光中に撮像面の位置を $x-y$ ステージを用いて光軸方向に移動させ IPSF 画像を取得した (図 4.19)。得られた IPSF 画像より動きぼけを復元した結果を図 4.20 に示す。(a) は IPSF 画像の取得に用いた撮影システムの様子である。カメラは 130 万画素であり、レンズは $f=4.4\text{mm}$ 、 $F=1.6$ のものを用いた。また、露光時間は 100msec とし、撮像面の移動速度は 2mm/sec とした。(b) は室内を歩いている人物を撮影した IPSF 画像である。カメラから人物までの距離は約 3.5m であった。(c) は (b) の IPSF 画像より動きぼけを復元した結果である。また、(d) は同じ露光時間で通常のカメラによって撮影した画像である。(d) より、人の手や足などが異なる方向に異なる大きさで運動しており、従来法では動きぼけの復元が難しいことがわかる。これに対して、提案法では (c) に示すように、手の運動も足の運動も良好にぼけ復元できていることがわかる。また、図 4.21、図 4.22 は提案法にて一眼レフカメラで撮影した画像である。図 4.21(a) はゴルフボールを回転させながら落下したものを撮影したもので、図 4.21(b) はそのぼけ復元結果である。露光時間中のゴルフボールの落下による奥行きぼけの変化により、カメラ移動による撮影と同じ効果が得られる。図 4.22(a) は送風口のファンの回転を、露光時間中にフォーカスレンズを手動で回して撮影したもので、図 4.22(b) はそのぼけ復元結果である。こちらも同様に、露光時間中のフォーカスレンズの操作により奥行きぼけが変化し、カメラ移動による撮影と同じ効果が得られる。以上の結果より、一般のレンズ系においても、提案法を用いることで任意の運動のぼけ復元が可能であることがわかる。

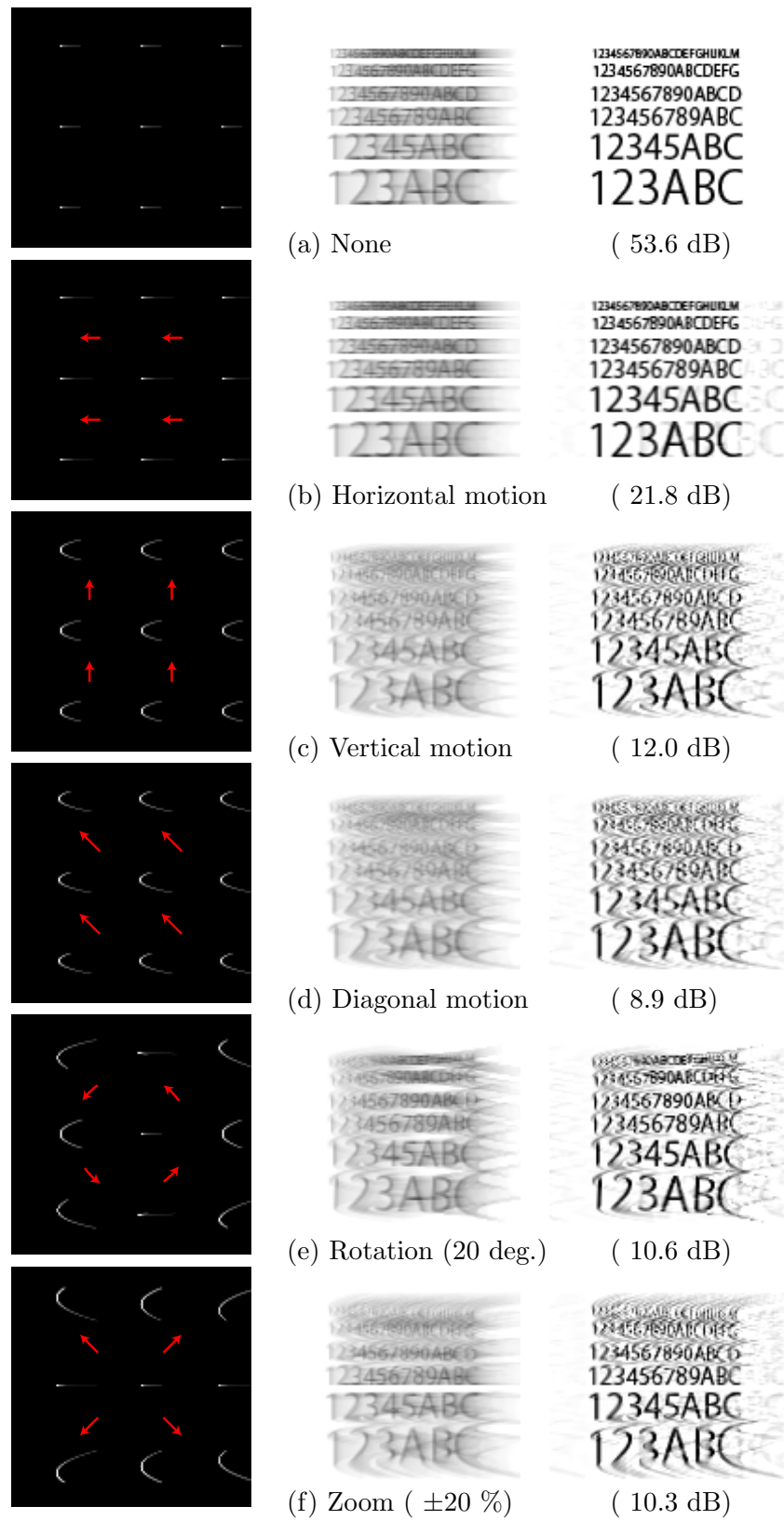


図 4.11 従来法 (Levin らの手法) による動きぼけ復元結果: 左から順に, IPSPF, 撮影画像, ぼけ復元画像.

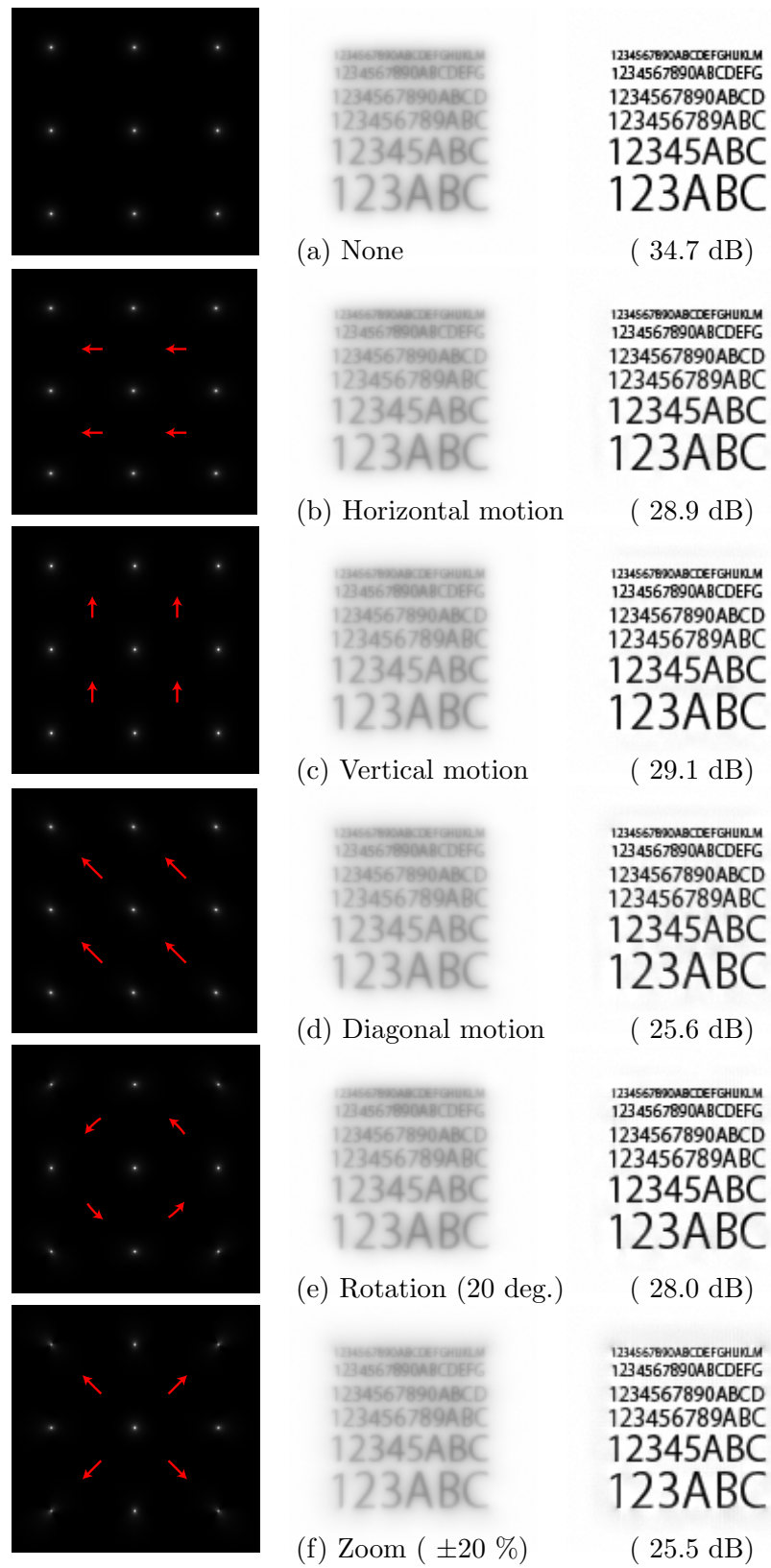


図 4.12 提案法による動きぼけ復元結果: 左から順に, IPSF, 撮影画像, ぼけ復元画像

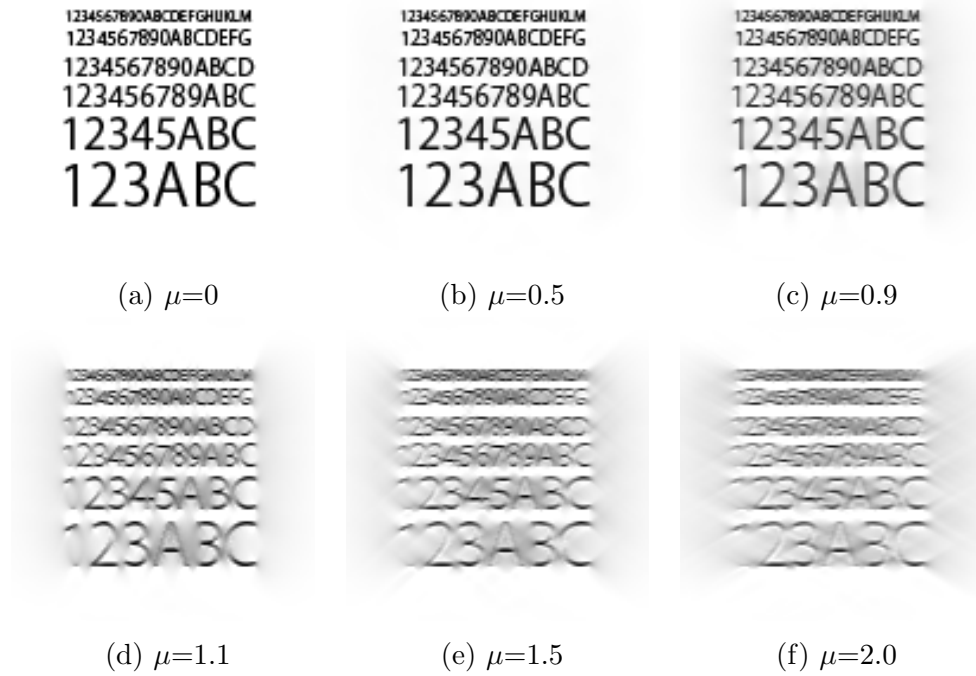


図 4.13 ぼけ復元画像

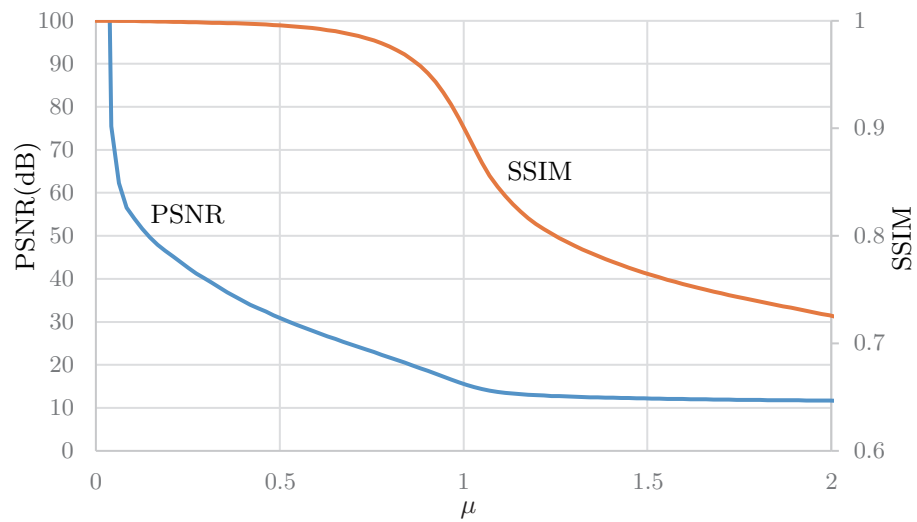


図 4.14 ぼけ復元画像の PSNR と SSIM

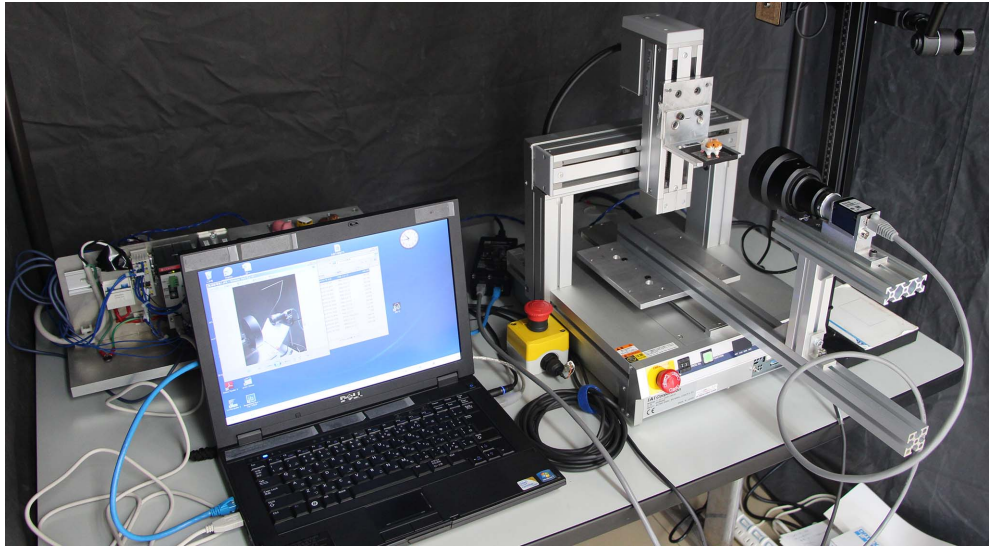


図 4.15 実画像実験で用いた撮像系

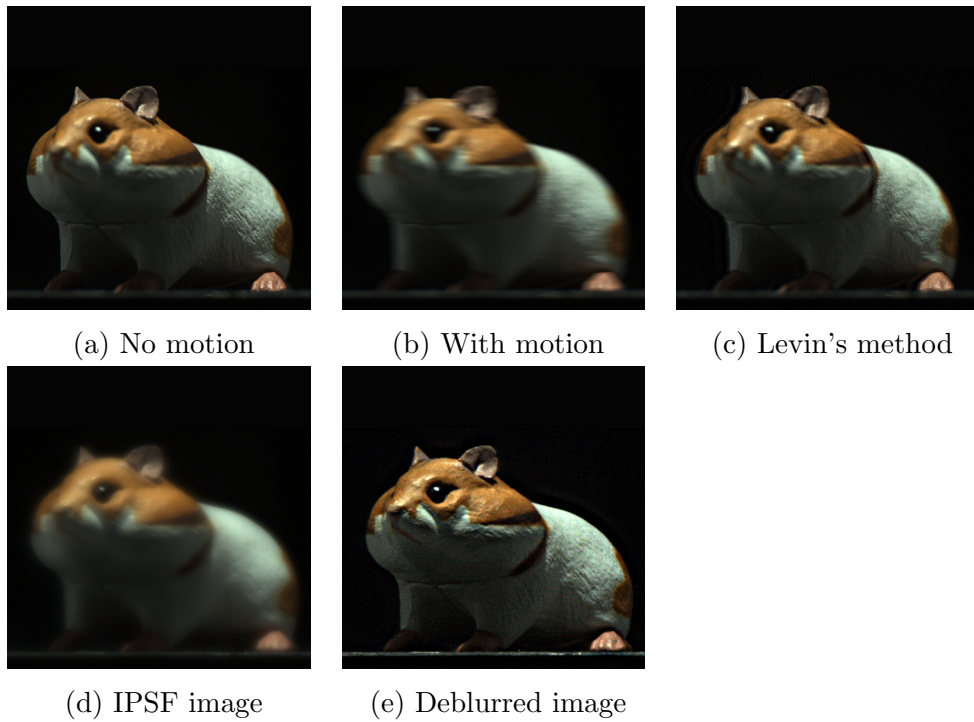


図 4.16 実画像実験（横運動するマウス）

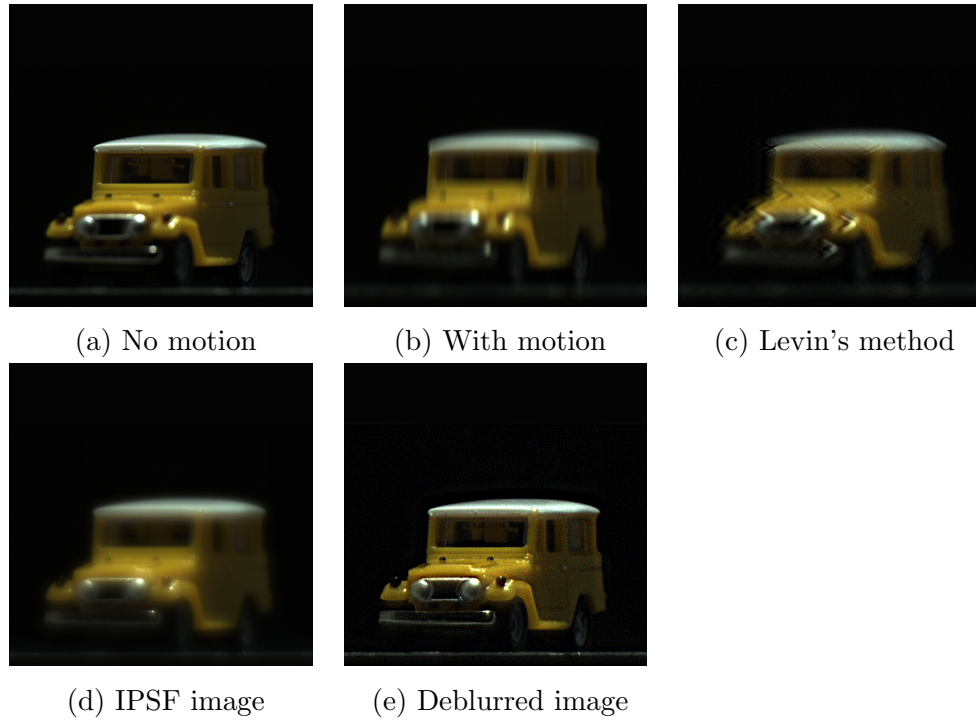


図 4.17 実画像実験（縦運動する車）



図 4.18 実画像実験（回転運動する文字）

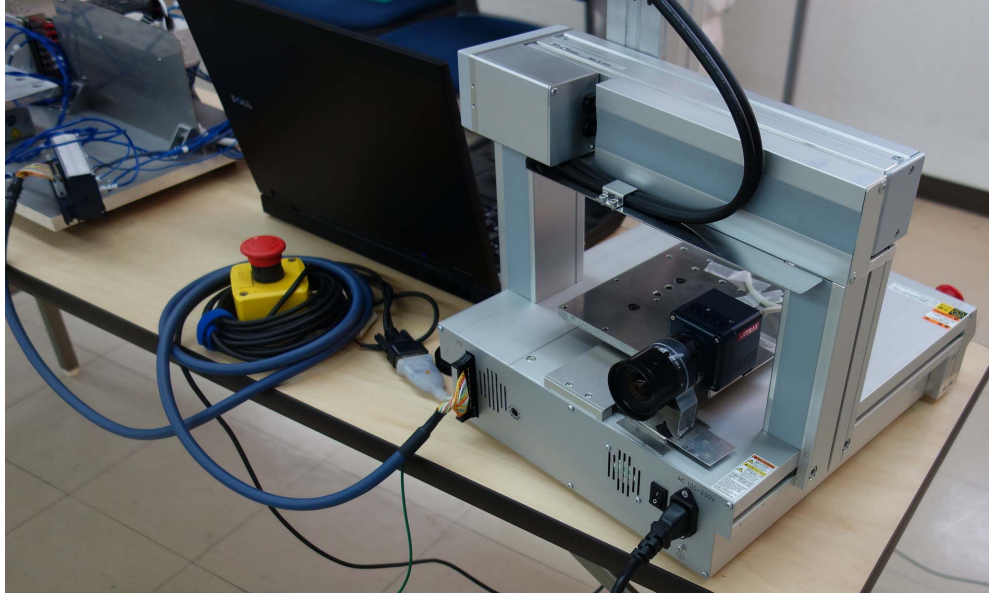
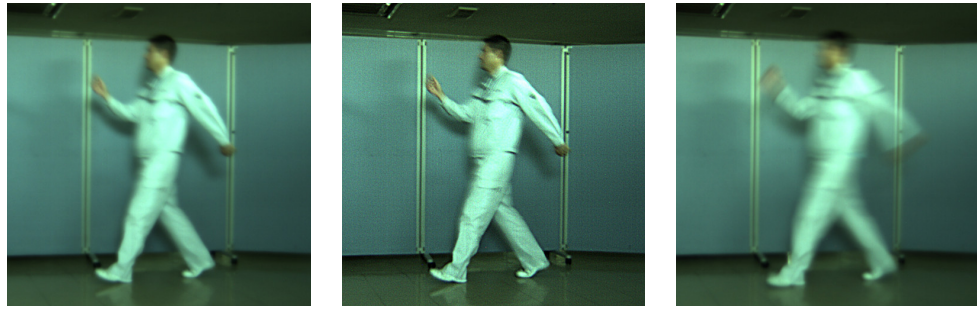


図 4.19 透視レンズ系の実画像実験で用いた撮像系

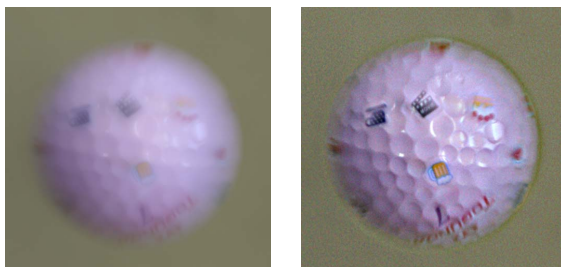


(a) IPSF image

(b) Deblurred image

(c) Normal imaging

図 4.20 透視レンズ系におけるぼけ復元結果 [歩行者]



(a) IPSF image

(b) Deblurred image

図 4.21 実画像実験 落下 [Ball]



(a) IPSF image

(b) Deblurred image

図 4.22 実画像実験 回転 [Fan]

第5章

全焦点画像と超解像度画像の同時生成

ここまで、全焦点画像と動きぼけの復元について述べて来たが、本章では奥行き不変PSFを用いた画素シフトを行うことで、同時に全焦点の超解像画像が生成可能であることを示す。超解像とは、撮像素子の解像度を超えて画像を復元する手法であり、近年、高画質化への要求により需要が増して来ている。本章では、前章までで示したカメラ移動による撮像法において、撮影した画像からぼけの復元方法を工夫することで超解像化を行う。超解像化の方法として、ここでは2種類の手法について述べる。また、それぞれの手法で実画像実験を行うとともに、レンズシミュレーターを用いて生成精度を定量的に評価することで、提案法の有用性を示す。

5.1 超解像度画像

超解像の研究においては1枚の観測画像だけを利用する方法と、複数の観測画像を利用して行う方法がある [13]。1枚の観測画像からの超解像は、信号処理的なアプローチによる手法が古くから行われているが、十分な効果が得られていない。

複数の観測画像からの超解像は多く研究がなされており、あらかじめ光学的に撮像素子を半画素ずつずらして配置し、高解像度画像を撮像する手法などが提案されている [14]。これらの手法は、非常に効果的な超解像を得ることができるが、多くの場合、位置ずれ量を精密に制御することはできず、複数の観測画像間の位置ずれ量は未知のため、画像取得後にサブピクセル精度の精密な画像位置合わせ処理が必要である。また、複数枚からの超解像画像の再構成処理が必要であり、計算コストとメモリコストが大きい。

そこで本稿では、既存のカメラを露光時間中に移動させるだけで、全焦点化と超解像化が同時に実現可能な手法を提案する。

5.2 画像補間法

画像の超解像化を信号処理的に行う手法として、従来からさまざまな画像補間法が提案されている。画像補間は、画像の平行移動、回転、拡大・縮小により発生した変換前の座

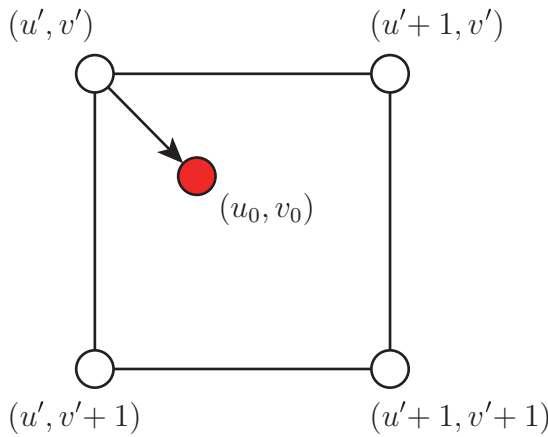


図 5.1 最近傍法

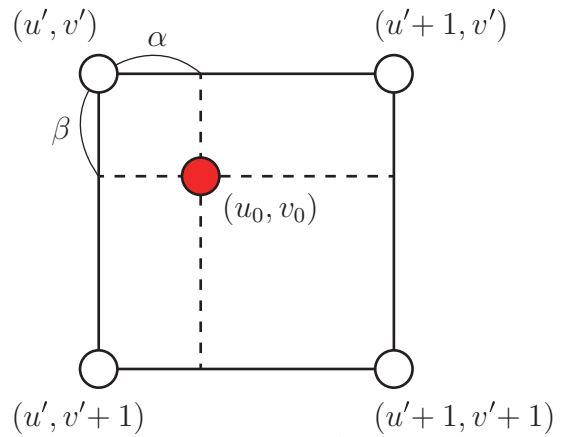


図 5.2 線形補間法

標系における格子点の不一致を，その周囲の格子点における濃度を利用して補間することである．非格子点 (u_0, v_0) の濃度値の補間法として，次の 3 つの手法について説明する ([25]) ．

5.2.1 最近傍法 (Nearest Neighbor)

非格子点 (u_0, v_0) に最も近い $u - v$ 座標系での格子点の濃度値を (u_0, v_0) とする (図 5.1) ．

$$f(u_0, v_0) = f([u_0 + 0.5], [v_0 + 0.5]) \quad (5.1)$$

ここで， $[W]$ は W を超えない最大の整数を表す ．

5.2.2 線形補間法 (Bilinear)

(u_0, v_0) の周囲の 4 つの格子点における濃度値を用いて線形補間を行う (図 5.2) ．

$$\begin{aligned} f(u_0, v_0) = & f(u', v')(1 - \alpha)(1 - \beta) + f(u' + 1, v')\alpha(1 - \beta) \\ & + f(u', v' + 1)(1 - \alpha)\beta + f(u' + 1, v' + 1)\alpha\beta \end{aligned} \quad (5.2)$$

ただし， $u' = [u_0]$ ， $v' = [v_0]$ ， $\alpha = u_0 - [u_0]$ ， $\beta = v_0 - [v_0]$ とする ．

5.2.3 3次元補間法 (Bicubic)

(u_0, v_0) の周囲の 16 個の格子点における濃度を用いて，3 次式による補間を行う (図 5.3) ．

$$f(u_0, v_0) = \sum_k \sum_l f(u_k, v_l) C(u_k - u_0) C(v_l - v_0) \quad (5.3)$$

ここで， (u_k, v_l) は (u_0, v_0) の周囲の格子点を表し，補間関数 $C(x)$ は

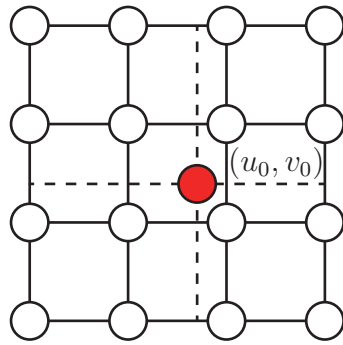
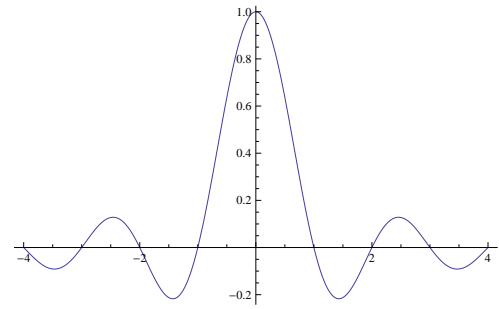


図 5.3 3次元補間法

図 5.4 関数 $\sin \pi x / (\pi x)$

$$C(x) = \begin{cases} 1 - 2|x|^2 + |x|^3 & (|x| < 1) \\ 4 - 8|x| + 5|x|^2 - |x|^3 & (1 \leq |x| < 2) \\ 0 & (2 \leq |x|) \end{cases} \quad (5.4)$$

で定義される。関数 $C(x)$ は標本化定理で現れる関数 $\sin \pi x / (\pi x)$ の近似式で、理論的には $C(x) = \sin \pi x / (\pi x)$ を用いると (u_0, v_0) の濃度が完全に復元できることになる (図 5.4)

5.3 画素シフトによる全焦点超解像画像

次に、奥行ぼけを復元しつつ超解像画像を生成する方法について述べる。

今、センサへ投影される画像の空間周波数を f_0 とすると、周期 $T_0 = 1/f_0$ となる (図 5.5(a))。通常の撮影では、センサ幅が $T_1 = 2T_0$ とすると、ぼけのない画像は式 (3.10) の矩形関数によりセンサに投影されると考えられる (図 5.5(b))。この状態から、元の入力信号を復元することは、不可能となる。

一方、カメラ移動による撮影法ではセンサへの入力信号は IPSPF により図 5.6(a) のように広がりを持つ。このとき、センサから出力される信号は図 5.6(b) のようになり、中心の画素以外の近傍画素にも信号が波及する。これを画像の空間周波数から考えると、IPSPF ではカメラの画素を超える高周波成分も、式 (3.8) によるぼけの大きさにより低周波成分としてカメラ移動範囲内ですべて含んで記録している。このように、元の入力信号の変化が、近傍画素にも表れるため、完全ではないが情報の復元が可能であり、より良い超解像画像が得られる。

超解像画像を復元するためには、カメラ移動による撮影画像から IPSPF によるデコンボリューションで任意の位置の画像を復元する必要がある。

一般に、関数 f と g の畳み込み $f * g$ は、次式のように定義される。

$$(f * g)(t) = \int f(\tau)g(t - \tau)d\tau \quad (5.5)$$

これに対して、 Δt だけ平行移動した畳み込みは、次式によって表させる。

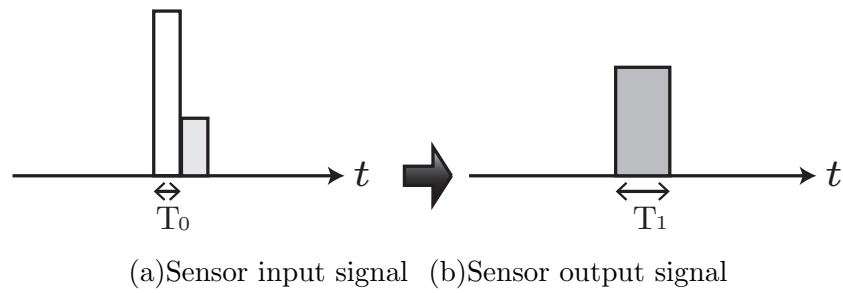


図 5.5 通常の撮影

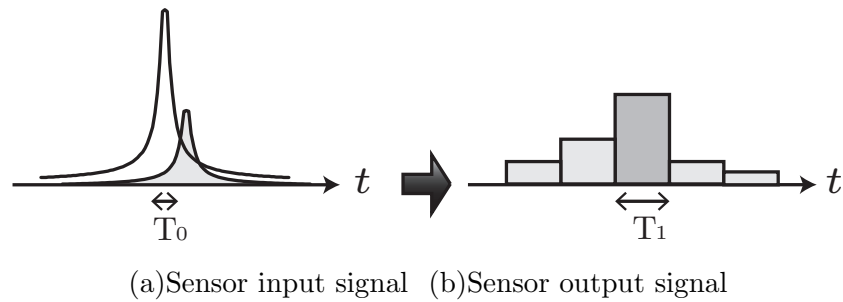


図 5.6 IPFS による撮影

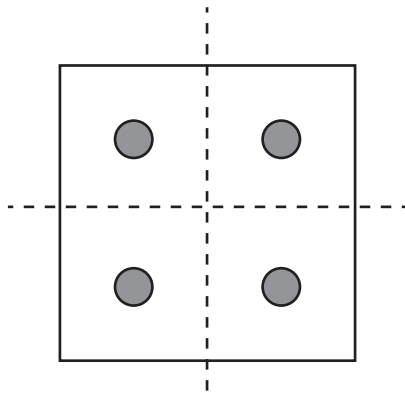


図 5.7 IPFS 配置 (2倍超解像化)

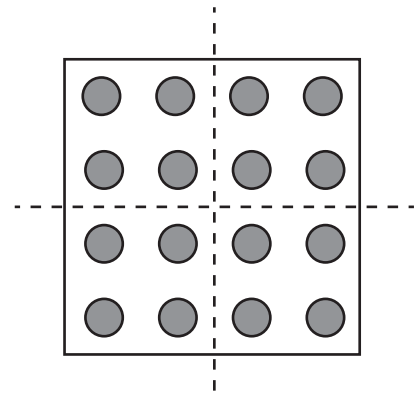


図 5.8 IPFS 配置 (4倍超解像化)

$$(f * g)(t - \Delta t) = \int f(\tau)g(t - \tau - \Delta t)d\tau \quad (5.6)$$

つまり f を原画像, g を IPFS とすると, IPFS を Δt だけ, 平行移動して畳み込むことで, 畳み込み画像を平行移動させることができる. 逆にデコンボリューションによるぼけ復元においても, 平行移動画像を復元することが可能となり, サブピクセル移動の復元画像を複数枚復元し, これらを再構成することで超解像でかつ全焦点の画像を得ることができる. 再構成の仕方は, IPFS の平行移動を超解像画像の画素に一致するようにすることで, そのまま配置するだけでよい. そのため, 従来の複数撮影画像からの超解像手法では必要だった位置合わせが必要ないため, 高速で正確な再構成が可能となる.

表 5.1 レンズシミュレーター実験の PSNR[dB]

	Proposed	Bicubic	Bilinear	Nearest
Mandrill ×2	23.75	23.25	23.04	23.23
Chart ×2	22.01	21.34	20.19	19.00
Lena ×2	31.90	31.89	30.98	30.03
Mandrill ×4	20.94	20.82	20.76	20.63
Chart ×4	16.58	16.04	15.36	14.27
Lena ×4	27.27	27.17	26.74	25.87

具体的に2倍の超解像化の方法について考えてみる．この場合，サイズ $M \times N$ の画像から $2M \times 2N$ の超解像画像を作成することになる．よって復元する画像の枚数は4となり，それぞれのIPSFの中心位置は図5.7のようになる．また，中心からの移動量は式(5.7)となる．同様に，4倍の超解像化を行う場合は，サイズ $M \times N$ の画像から $4M \times 4N$ の超解像画像を作成することになる．よって復元する画像の枚数は16となり，それぞれのIPSFの中心位置は図5.8のようになる．また，中心からの移動量は式(5.8)となる．

$$(\Delta x, \Delta y) = \begin{bmatrix} (-0.25, -0.25) & (0.25, -0.25) \\ (-0.25, 0.25) & (0.25, 0.25) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$(\Delta x, \Delta y) = \begin{bmatrix} (-0.375, -0.375) & (-0.125, -0.375) & (0.125, -0.375) & (0.375, -0.375) \\ (-0.375, -0.125) & (-0.125, -0.125) & (0.125, -0.125) & (0.375, -0.125) \\ (-0.375, 0.125) & (-0.125, 0.125) & (0.125, 0.125) & (0.375, 0.125) \\ (-0.375, 0.375) & (-0.125, 0.375) & (0.125, 0.375) & (0.375, 0.375) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

5.3.1 レンズシミュレーターによる評価実験

本実験では，このシミュレーターを用いることで，ぼけ関数をピルボックスとし，50枚の画像から積算画像を生成した．撮像物体は，図3.8で示すように，振幅 $\alpha = 5$ mm のサインカーブで奥行き形状が変化する物体を用意した．撮像物体には，画像がテクスチャとして貼り付けられており，このテクスチャ画像を真値とすることで復元画像の定量的な評価を行った．

レンズシミュレーターを使って，提案法と従来法のそれぞれの画像を生成し復元することで，2つの手法における全焦点超解像画像の生成精度を比較評価した．本評価では，図5.12(a)，図5.13(a)，図5.14(a)に示す3枚の画像に対して実験を行った．ただしLenaには画像生成時に $\sigma = 1.0$ のガウスノイズを輝度に対して印加した．カメラに対する物体の中心位置は $u_c = 100$ mm，撮像面位置は $p = 20$ mm とした．また，焦点距離 $f_1 = 60$ mm， $f_2 = 60$ mm，絞りの大きさ $a = 10$ mm とした．センサの解像度は 256×256

および 128×128 とし、それぞれの画像から 512×512 の全焦点超解像画像を生成する実験を行った。

提案法では、低解像積算画像に対して IPSF によりぼけの除去と超解像化を行った。従来法では、積算を行わない低解像度画像に対して、Bicubic 法、Bilinear 法、Nearest Neighbor 法の 3 手法により超解像画像の生成を行った。また、従来法では、低解像積算画像から IPSF によって奥行きぼけの除去のみを行ったのちに、先の 3 手法によって超解像化を行った場合を合わせて評価した。

これらの提案法と従来法において超解像化を行い、原画像に対する PSNR を計算した結果を図 5.9, 図 5.10, 図 5.11 に示す。それぞれの図において、横軸はカメラの移動距離 D であり、縦軸は PSNR である。図 5.11 の Lena の場合を例にとると、従来法において積算画像を用いずに超解像化を行った場合には、 $D = 0$ の結果に示すように、PSNR は 24 dB 以下と非常に低いことがわかる。次に、従来法に対して積算画像による奥行きぼけ除去を組み合わせた場合には、最も良い結果が得られた Bicubic 法において 2 倍超解像で 31 dB、4 倍超解像で 26.7 dB である。これに対して、提案法では 2 倍超解像では 32 dB、4 倍超解像では 27 dB を超える PSNR が得られており、従来法よりも良質な画像が生成可能であることがわかる。なお、いずれの方法においても $D = 10$ mm を過ぎたあたりで急激に PSNR が高くなるが、これは物体の奥行き幅 ($\alpha = 5$ mm) 全体を含むようなカメラ移動を行った場合に良質な画像が得られることを表している。

次に、提案法で生成した全焦点超解像画像と、従来法に対して IPSF による奥行きぼけ除去を組み合わせて生成した全焦点超解像画像とを図 5.12, 図 5.13, 図 5.14 に示す。また、各画像の赤枠内を拡大したものを各画像の右に示す。これらの画像を比較すると、提案法では、PSNR の差以上に画像の解像感が得られており、提案法による超解像化の効果が確認できる。

また、奥行きぼけ除去と超解像化を同時に行っている提案法の最高 PSNR と、奥行のない (a) の低解像原画像から従来法で超解像化を行った実験結果を表 5.1 に示す。提案法では、奥行のぼけ除去を行っているにも関わらず、奥行ぼけのない画像に対する従来法よりいずれの画像においても良い結果が得られていることがわかる。

5.3.2 実画像実験

次に、実際のカメラとレンズを使って、撮影されたものからぼけの復元実験を行った。xy 移動ステージ上に、撮像物体を配置し、カメラを固定して撮影を行った。実験では、物体を動かしているが、カメラを動かして撮影した状況と変わらない。 $s = 60$ mm/sec, $T = 1$ sec にて物体を 60 mm の距離だけ手前から奥へ移動させた。使用したテレセントリックレンズは、光学倍率 $0.17\times$, W.D = 113 mm, 被写界深度 11 mm, 実効 $F = 4$ の C マウントレンズである。また、使用したカメラは、 $1/2''$ CMOS, 130 万画素の単板カラーカメラである。図 3.18 は実際の撮影での様子である。

図 5.15, 図 5.16, 図 5.17 は撮影画像と、その復元画像である。それぞれにおいて、(a) はカメラを移動させて撮影した画像であり、(b) は (a) より IPSF を用いて奥行きぼけの除

表 5.2 実画像実験の PSNR [dB]

	Proposed	Bicubic	Bilinear	Nearest
car	31.40	30.80	30.22	28.70
mouse1	32.00	31.69	30.96	29.86
mouse2	35.94	35.78	35.03	33.41

去を行った結果である．これらの撮像物は，奥行きが 30 mm から 40 mm の幅があり，今回の実験で用いたレンズの被写界深度 11 mm を超えているため，通常の撮影では全てに焦点のあった画像を撮影することが出来ない．しかし，IPSF による復元結果では，それぞれの図の (b) に示すように，どの画像においても綺麗な全焦点画像が得られており，提案法の効果が確認できる．

次に，全焦点化と超解像化が同時に行えることを確認するために，(a) の低解像度画像を生成し，これより提案法を用いて全焦点の超解像画像を生成した結果を (c) に示す．一方，同じ低解像度画像から IPSF によるぼけ除去を行ったのち従来法で超解像化を行った結果を (d), (e), (f) に示す．なお，本実験では， 128×128 pixel から 512×512 pixel の 4 倍超解像化を行った．実画像実験においても，提案法によって最も高い解像度が得られることがわかる．各手法で生成した画像に関して，高解像ぼけ無し画像である (b) との PSNR を計測した結果を表 5.2 に示す．この表より，いずれの画像においても提案法において最も高い PSNR が得られており，その効果が確認できる．

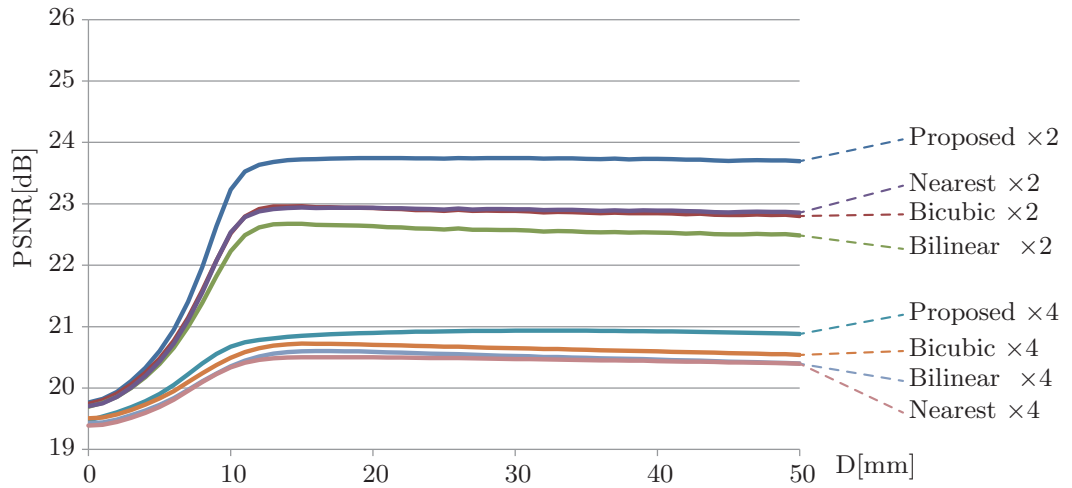


図 5.9 カメラの移動距離と PSNR [Mandrill]

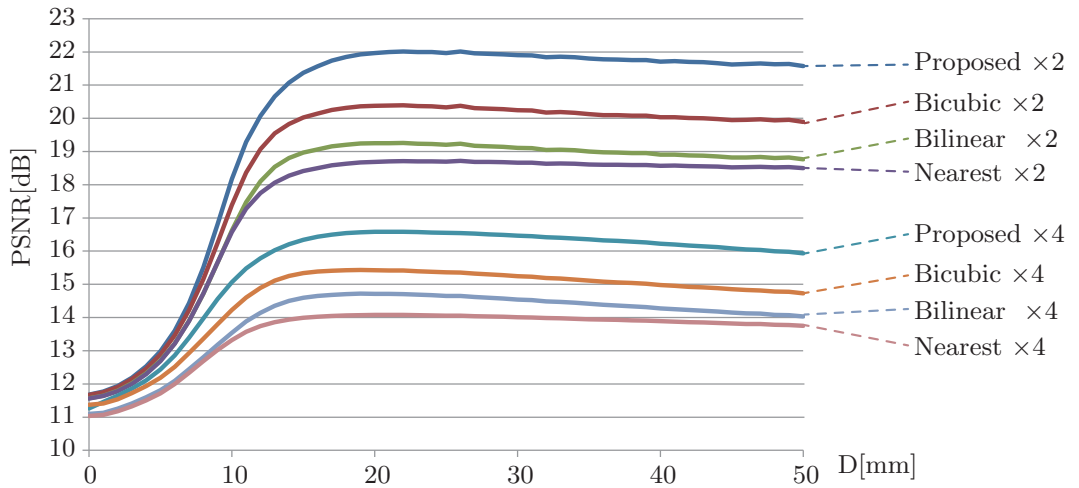


図 5.10 カメラの移動距離と PSNR [Chart]

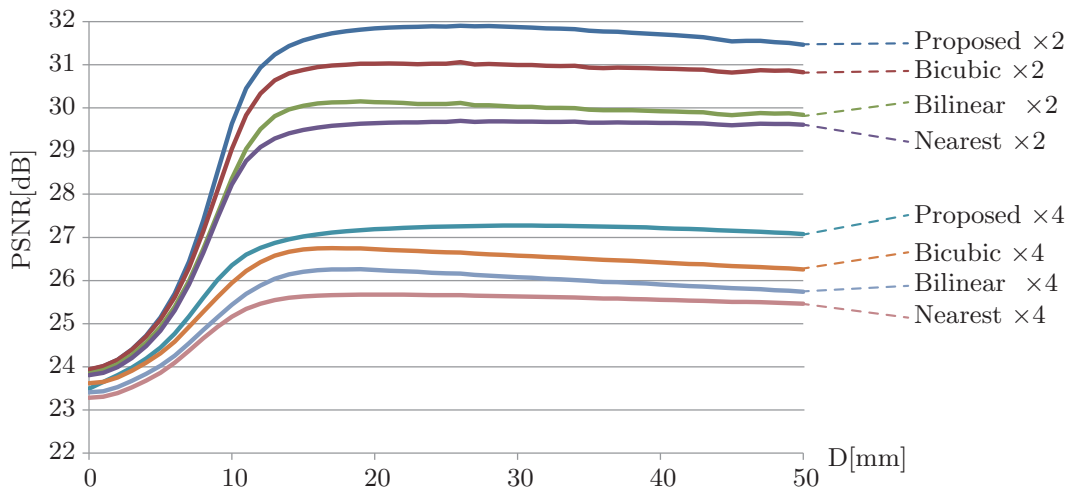
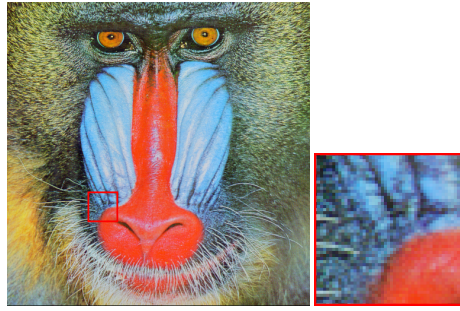


図 5.11 カメラの移動距離と PSNR [Lena](ノイズ $\sigma = 1.0$)



(a)Original image

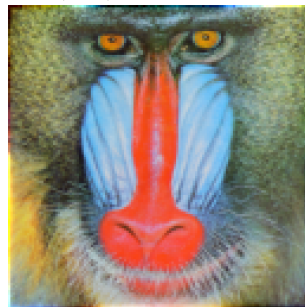
(b-1)Proposed $\times 2$ (b-2)Proposed $\times 4$ (c-1)Bicubic $\times 2$ (c-2)Bicubic $\times 4$ (d-1)Bilinear $\times 2$ (d-2)Bilinear $\times 4$ (e-1)Nearest $\times 2$ (e-2)Nearest $\times 4$

図 5.12 レンズシミュレーターによる復元実験 [Mandrill]

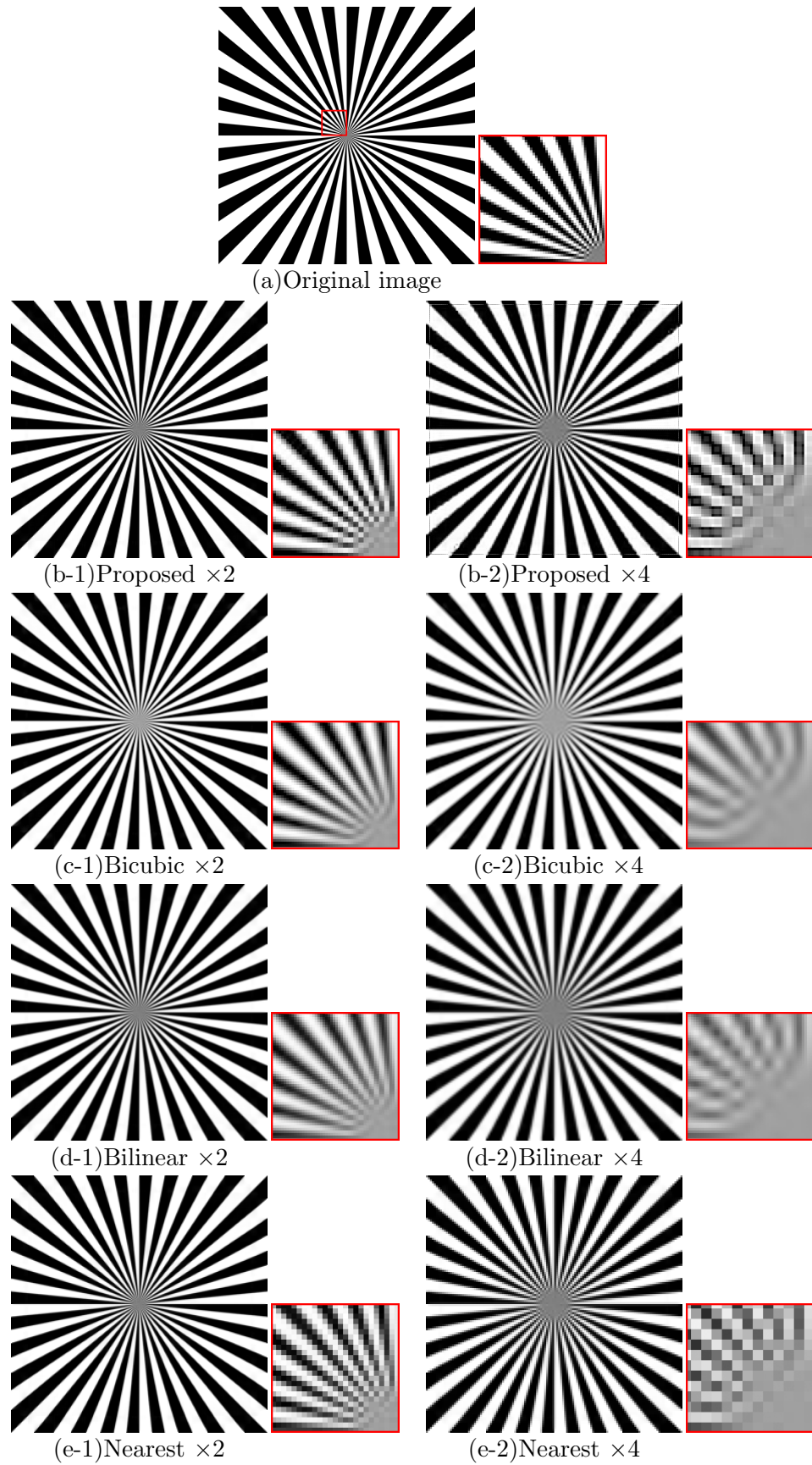


図 5.13 レンズシミュレーターによる復元実験 [Chart]



(a)Original image

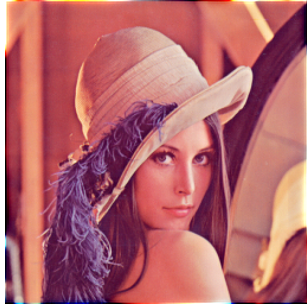
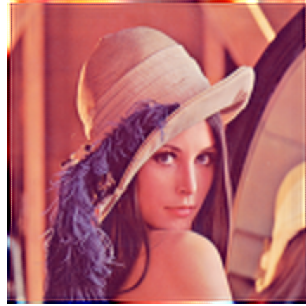
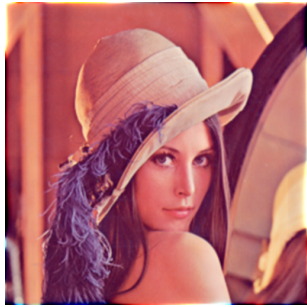
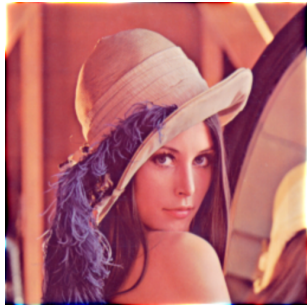
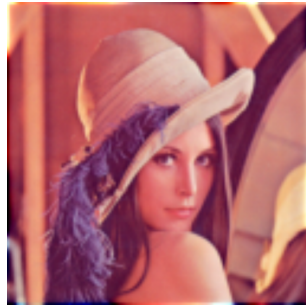
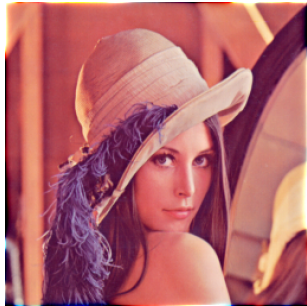
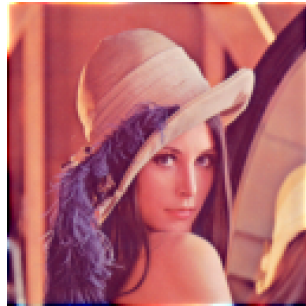
(b-1)Proposed $\times 2$ (b-2)Proposed $\times 4$ (c-1)Bicubic $\times 2$ (c-2)Bicubic $\times 4$ (d-1)Bilinear $\times 2$ (d-2)Bilinear $\times 4$ (e-1)Nearest $\times 2$ (e-2)Nearest $\times 4$

図 5.14 レンズシミュレーターによる復元実験 [Lena]

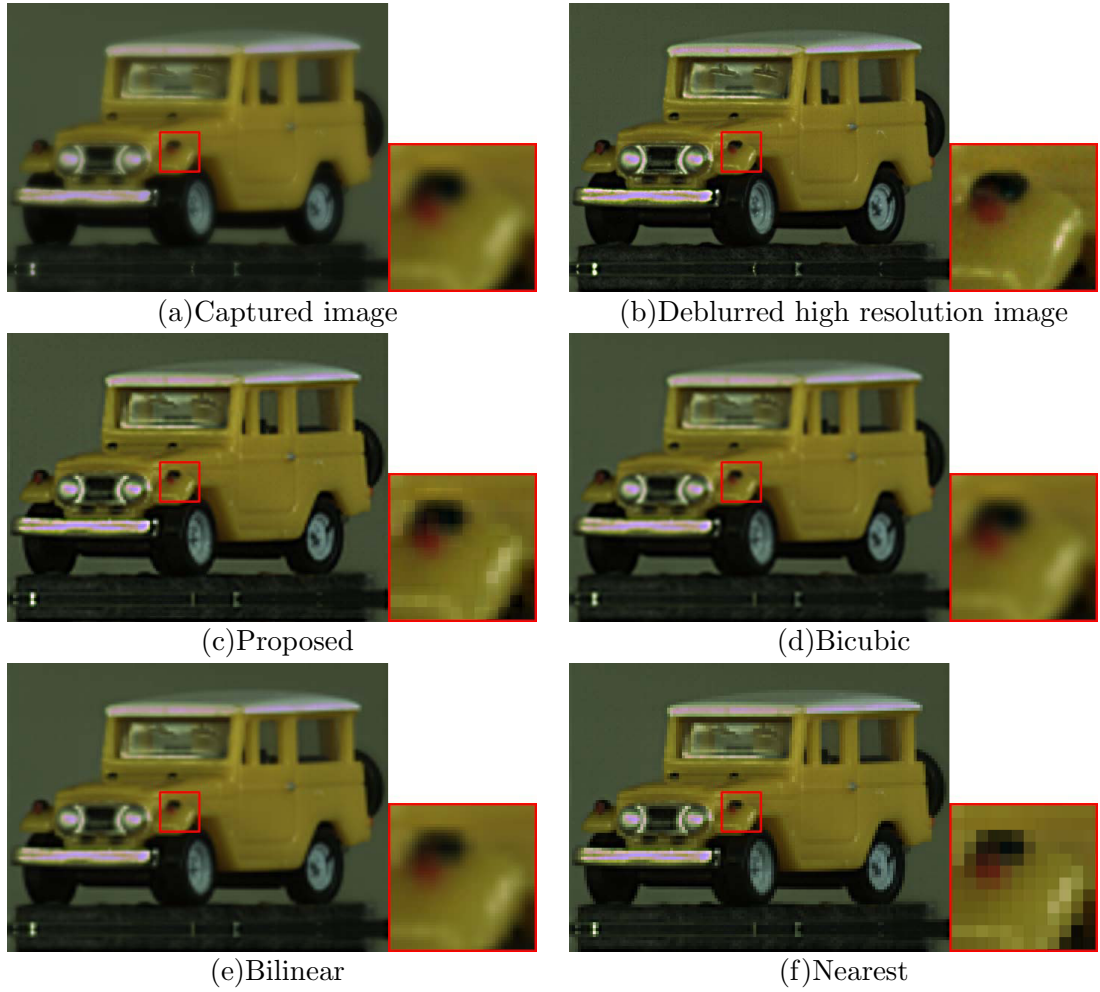


図 5.15 実画像実験 [Car]

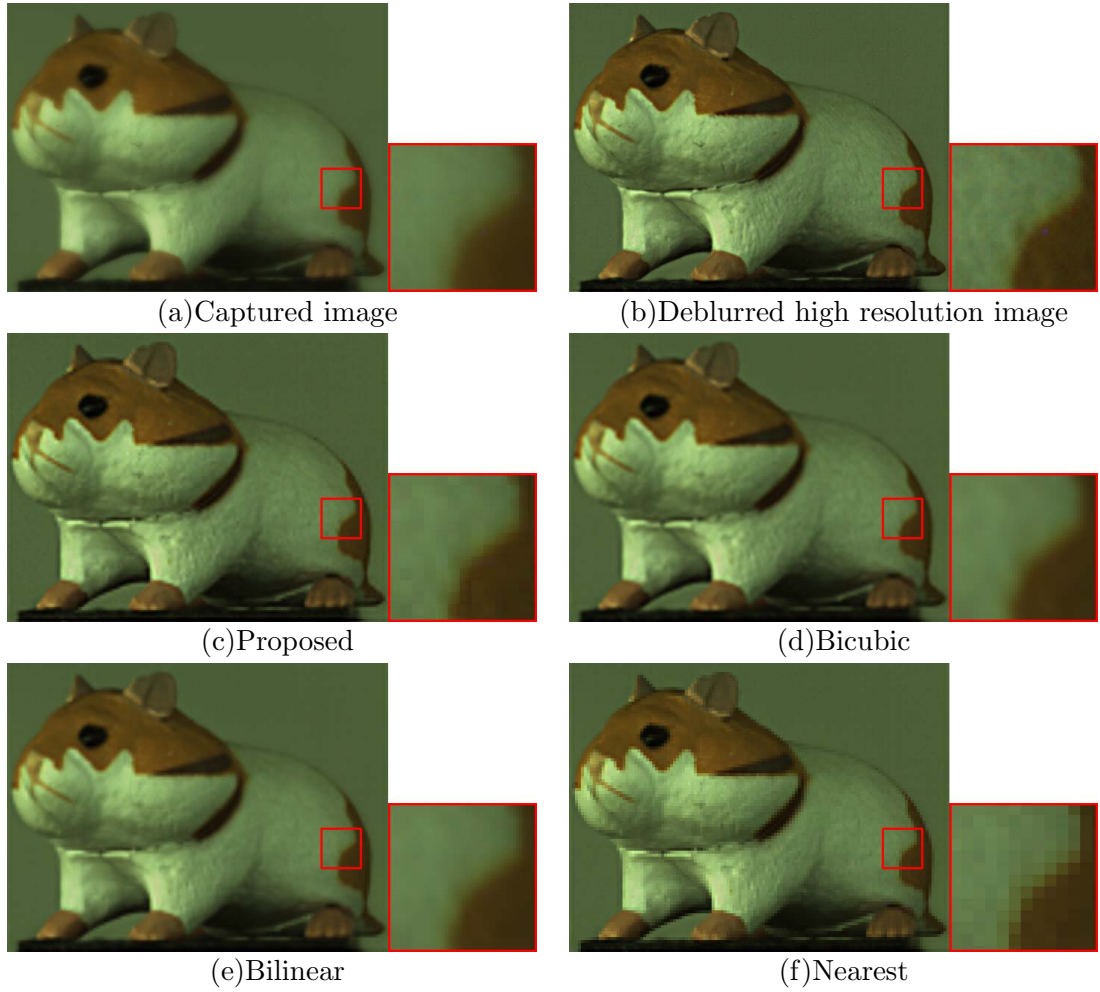


図 5.16 実画像実験 [Mouse1]

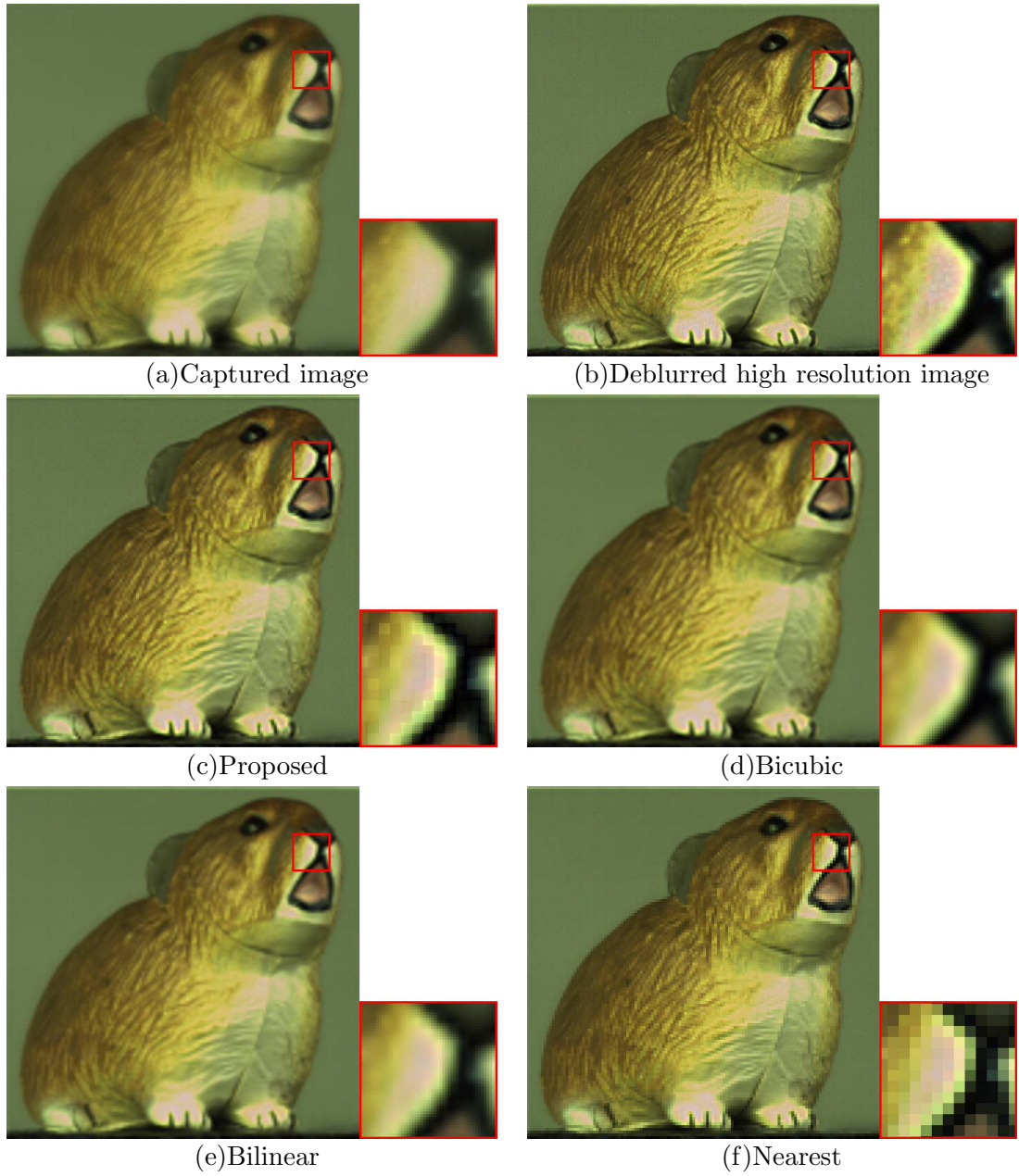


図 5.17 実画像実験 [Mouse2]

5.4 IPSF と IM-GPDCT による全焦点超解像画像

画素シフトによる超解像化では，空間的高周波成分を十分に復元できないためその超解像による効果が少なかった．そこで，本節では離散コサイン変換 (Discrete Cosine Transform:DCT) を用いた，Gerchberg-Papoulis(GP) 反復法 [33] を適用した IM-GPDCT(Image Magnification applying GP iterative algorithm with DCT) 法 [34] を応用した超解像度化を行う．

5.4.1 DCT

ここでは，IM-GPDCT 法で重要な DCT を使ったデコンボリューションについて述べる．2.2.4 章では，DFT を使った安定的なぼけ復元について述べた．しかし，図 2.14 から分かるように，撮影画像と PSF はそれぞれ元の画像の 4 倍の大きさにして処理を行う必要があるため，情報量が多くなり演算コストが増大する．しかし，DCT を使ってデコンボリューションを行うことで安定的なぼけ復元を行いつつ，情報量の削減が可能となる．ただし，PSF が画像中心で対称（偶関数）となっている必要がある．しかし式 (4.6) による本手法での撮影では，ぼけ復元の PSF は奥行きと動き不変性のため，奥行きは中心で，動きはない状態で復元が可能となる．そのため，PSF は画像中心で対称となり DCT でのぼけ復元が可能となる．

式 (2.10) の DFT の式を展開すると次式となる．

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cos(2\pi \frac{kn}{N}) - i \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \sin(2\pi \frac{kn}{N}) \quad (5.9)$$

ここで $f(n)$ が $f(n) = f(-n)$ の偶関数の場合，式 (5.9) の第二項が 0 となり次式の実数のみの式となる．

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cos(2\pi \frac{kn}{N}) \quad (5.10)$$

また，入力画像の値は実数として与えられるため，式 (5.10) による変換後も実数のみとなり，

$$F(-k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cos(-2\pi \frac{kn}{N}) = F(k) \quad (5.11)$$

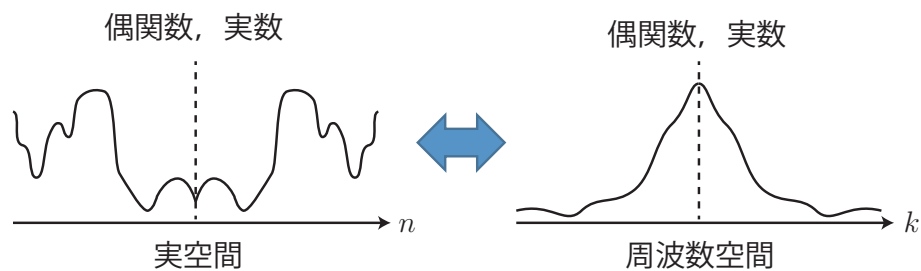


図 5.18 偶関数のフーリエ変換

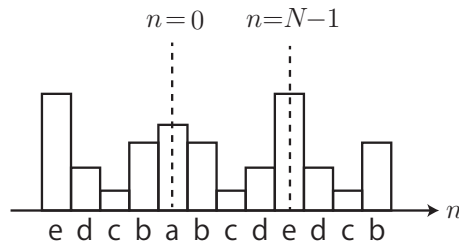


図 5.19 DCT-I の境界条件

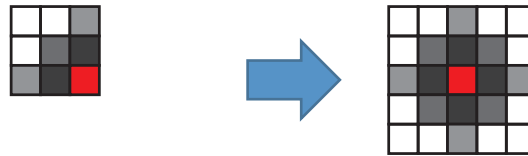


図 5.20 DCT-I の PSF

となるため、 $F(k)$ も偶関数となる．よって逆変換も式 (5.10) の形で同様に行うことが可能となる (図 5.18) ．

DCT はこの仕組みを応用したもので、偶関数の冗長な情報をなくし、かつ実数のみを取り扱うことにより計算の扱いが容易になる．DCT には境界条件の扱いや、正規化の方法によりいくつかの手法があるが、そのうちの 2 種類をここでは扱う．

DCT-I

DCT-I は、その境界条件より PSF によるデコンボリューションに適しており、次式となる．

$$X(k) = x(0) + \sum_{n=1}^{N-2} 2x(n) \cos\left(\frac{\pi}{N-1}nk\right) + (-1)^k x(N-1) \quad (5.12)$$

一般的な DCT-I の式と異なり、DFT との対応から 2 倍してある．これにより、周波数空間でデコンボリューションを行っても全体の値が増減することはない．また、この逆変換は次式となる．

$$x(n) = \frac{1}{N-1} \left\{ \frac{1}{2}X(0) + \sum_{k=1}^{N-2} X(k) \cos\left(\frac{\pi}{N-1}nk\right) + \frac{(-1)^n}{2}X(N-1) \right\} \quad (5.13)$$

DCT-I では、境界条件から $2(N-1)$ 周期に拡張された関数を考えていることに対応するので、 $N \geq 2$ でないと定義できない．また、 $2(N-1)$ 個の実数をもつ偶対称関数の DFT とまったく同じものである．例えば、図 5.19 のように $N = 5$ とし、5 個の実数を abcde とすると、これは 8 個の実数 abcdecdb (偶対称) に対する DFT を 2 で割ったものになる．境界条件は、 x_n が $n = 0$ と $n = N-1$ に関して偶対称となる．そのため、PSF 画像では図 5.20 のようになり、中心に対して左右上下対称な形状になっている必要がある．

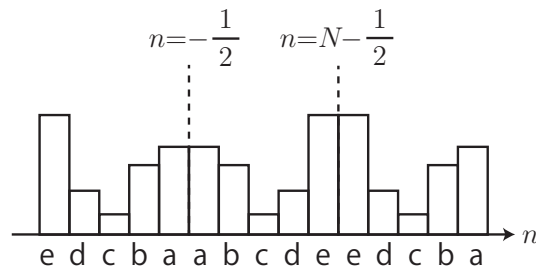


図 5.21 DCT-II の境界条件

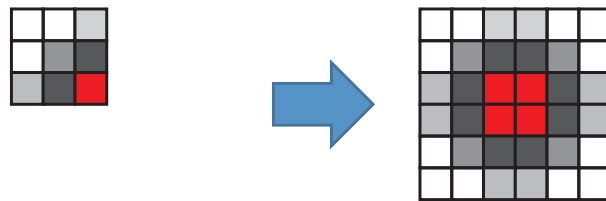


図 5.22 DCT-II の PSF

DCT-II

DCT-II は信号の圧縮分野などの応用で最も広く用いられ、例えば、JPEG、MJPEG、MPEG、DV 等の画像圧縮に用いられている。そのため、単に DCT と呼ばれることもある。DCT-II は次式で定義される。

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cos \left\{ \frac{\pi}{N} \left(n + \frac{1}{2} \right) k \right\} \quad (5.14)$$

また、この逆変換は次式となる。

$$x(n) = \frac{2}{N} \left\{ \frac{1}{2} X(0) + \sum_{k=1}^{N-1} X(k) \cos \left\{ \frac{\pi}{N} \left(n + \frac{1}{2} \right) k \right\} \right\} \quad (5.15)$$

式 (5.15) は、DCT-III と呼ばれることがある。また、DCT-II は境界の両側に要素の間隔の半分のシフトを含んだ偶対称への拡張を考える。例えば、図 5.21 のように $N = 5$ のときの実数列を abcde とすれば、 $2N = 10$ 個の実数列 abcdeedcba となる。両端の要素 a, e が繰り返される点が DCT-I とは異なっている。境界条件は、 x_n が $n = -1/2$ と $n = N - 1/2$ に関して偶対称となる。そのため、PSF 画像では図 5.22 のようになり、中心に対して左右上下対称な形状になっている必要があるが、 $n = -1/2$ に関して偶対称となるため中心 4 画素は同じ値となる。通常 PSF は 1 つの画素の中心を基準とするため、このような形状にはならない。そのため、PSF を使ったデコンボリューションでは DCT-I を通常は使う。

図 5.23 に DCT-I を使ったデコンボリューション手順を示す。通常の DFT を使ったデコンボリューションとの違いは、フーリエ変換に DCT を用いる以外に PSF の画像の配置が異なる。PSF は要素の総和が 1 となるように正規化しておく必要があり、PSF 画像を

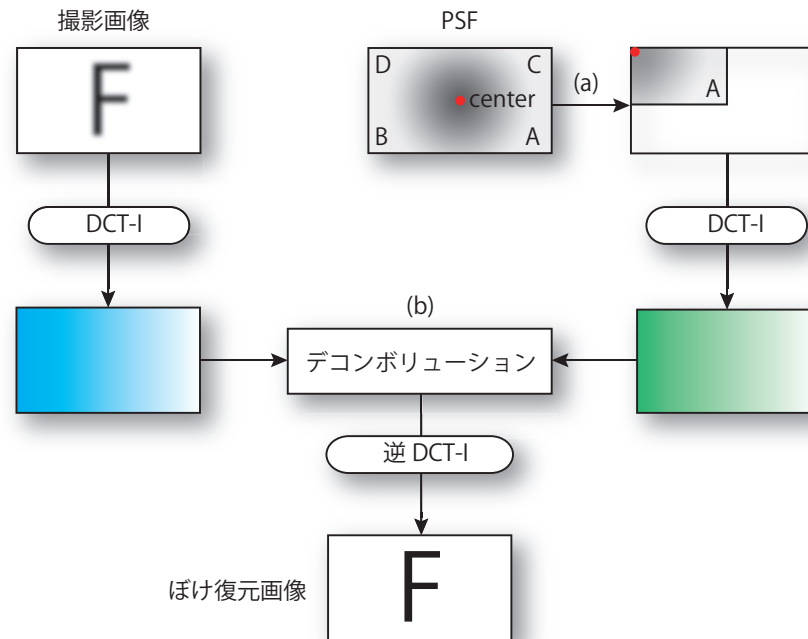


図 5.23 DCT によるデコンボリューション

画像中心で上下左右に A,B,C,D の 4 つに分割するところまでは DFT と同じになる。しかし，DCT では A の部分のみを 0 で初期化された画像に配置する。ただし，画像中心は A の部分に含まなければならない。(a) の配置後の画像は要素の総和が 1 とならないが，式 (5.12) は DFT との関係が保てるようになっている。(b) でのデコンボリューション後に，式 (5.13) で逆変換を行い，ぼけ復元画像が得られる。

5.4.2 IM-GPDCT 法

デジタル画像のような離散信号においては離散フーリエ変換を用いるが，新堀らによって，離散コサイン変換を代用することで GP 反復法の演算負荷を低減させた IM-GPDCT [34] が提案されている。[34] では従来の画像補完法以上に優れていることが示されている。

デジタル画像は取得される時点で，撮像系の周波数特性の関係とエイリアシングを防ぐ目的から LPF が掛けられている。後の議論を一般化，簡単にするために理想的な LPF がかかっていると仮定する。原信号を f とし， f の周波数成分を u_0 以下に帯域制限した信号を g とする。帯域制限を行う過程を A で表せば，

$$g = Af \quad (5.16)$$

となる。 f, g のフーリエ変換を， $F(u), G(u)$ とそれぞれ表す。更に，周波数領域における窓関数 $W_{obs}(u)$ を

$$W_{obs}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq u_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.17)$$

で定義する．式 (5.16) を周波数領域で表現すれば，

$$G(u) = W_{obs}(u)F(u) \quad (5.18)$$

となる．一方，正規に拡大画像を取得する場合には，cut off 周波数の異なる窓関数 $W_{ent}(u)$ を用いて，同様に次の関係が成立している．

$$W_{ent}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq u_1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.19)$$

$$G_{ent}(u) = W_{ent}(u)F(u) \quad (5.20)$$

ただし， $u_0 < u_1$ とする．画像を拡大することは $G(u)$ から $G_{ent}(u)$ を導出することと同義である．しかし，拡大前の画像 $G(u)$ は u_0 以上の周波数成分が 0 になっているため，正規の拡大像にするためには $u_0 < u < u_1$ に相当する周波数成分を復元しなければならない．これは，超解像問題，式 (5.16) の g から f を求めること，すなわち，式 (5.18) の $G(u)$ から $F(u)$ を求めることに帰着する．

しかしながら，原信号 f に対して何の制限もなければ， $F(u)$ の一部 $G(u)$ から，残りの部分を知ることはできない．そこで，原信号 f に対して，物体が得られた大きさしかもたない（空間的領域制限されている）ときに原理的に無限大の解像力が得られているという仮定を適用することにより，超解像問題を解くことが可能になる．

様々な超解像法が存在するが，反復解法は収束途上の結果を利用することができ，超解像力が低周波側から漸的に向上するため扱いやすいという利点もある．また，反復法はその処理過程に，原画像に関して得られる個々の知識をもとにした処理を付加することが容易にでき，拡張性に富んでいる．これらの理由から，帯域拡張法として GP 反復法を用いている．

GP 反復法は帯域制限信号に対して，正逆のフーリエ変換を繰り返す過程に，画像の空間的な広がりが限定されていること，通過帯域内の正しい情報が既知であることの二つの拘束条件を用いて，漸的に高周波成分を復元する手法である．反復が k 番目の地点での像を f_k としたとき，次式のように記述され， $k \rightarrow \infty$ まで繰り返すことで f に収束する．

$$f_{k+1} = P_{bt}P_{st}f_k \quad (5.21)$$

ここで， f_0 は任意の開始点であるが，通常観測画像 g を用いる．拘束条件は P_{bt} ， P_{st} として式の中に含まれている． P_{st} は画像の広がりを限定させる演算で，既知の存在範囲 Ω 以外を既知の値 l にする．

$$P_{st}f = \begin{cases} f, & (x, y) \in \Omega \\ l, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.22)$$

P_{bt} は通過帯域内の情報を修正する演算で，フーリエ平面上で既知の周波数帯域 Λ 内部のみを既知情報に修正し，実空間に戻すものである．

$$P_{bt}f \leftrightarrow \begin{cases} G(u, v), & (u, v) \in \Lambda \\ F(u, v), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.23)$$

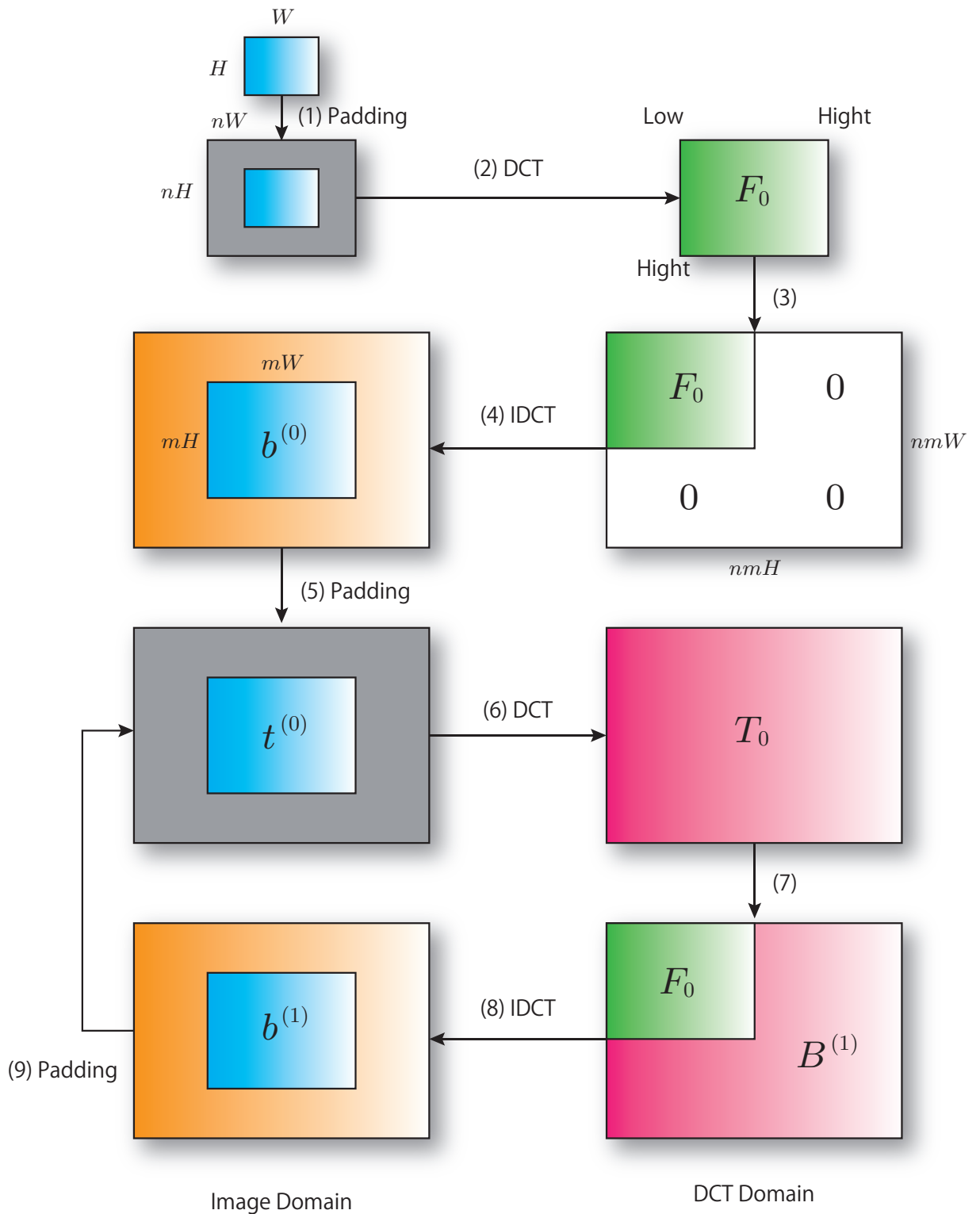


図 5.24 IM-GPDCT 法の処理フロー

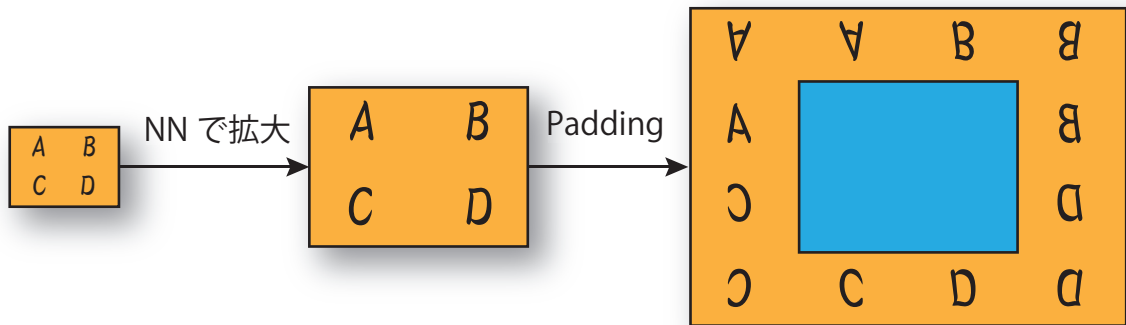


図 5.25 ミラー反転によるパディング

次に，IM-GPDCT の処理フローを図 5.24 に示し，処理内容を順を追って説明する．

(1) 拡張領域パディング

幅 W ，高さ H の低解像度画像を幅 nW ，高さ nH の領域の中央に配置する．周囲の領域を拡張領域と呼ぶ．拡張領域を低解像度画像の画素平均値で一様に埋める．

(2) DCT

パディングされた結果を DCT して，これを既知の低解像度画像 F_0 とする．

(3) 高周波数成分の拡張

面積が $mnH \times mnW$ になるように高周波数成分，すなわち右下方向を拡張する．このとき，高周波数成分の値を 0 とする．

(4) IDCT

高周波数成分が拡張された DCT 成分を IDCT して，この結果を $b^{(0)}$ とする．本論文ではここまでを初期拡大処理．以降を反復処理と定義する．

(5) 拡張領域パディング

$b^{(0)}$ の中央に面積 $mH \times mW$ の画像が出現する．その外側を中央の画像の平均画素値で埋めて，新たに $t^{(0)}$ とする．この操作が空間的領域制限である．

(6) DCT

$t^{(0)}$ を DCT して $T^{(0)}$ とする．

(7) 低周波数成分置換

$T^{(0)}$ の低周波数成分を F_0 に置換する．これを $B^{(1)}$ とする．

(8) IDCT

$B^{(1)}$ を IDCT して $b^{(1)}$ とする．反復処理によって高周波成分が復元されていく

パディング

IM-GPDCT で重要な操作としてパディングがある．井上ら [35] は，拡張領域パディング方法が高解像度化に与える影響について検討し，パディング方として 0(黒)，画像全体の平均値，255(白) を検討した．しかし，画像の境界画素値と拡張領域の値との差分が大

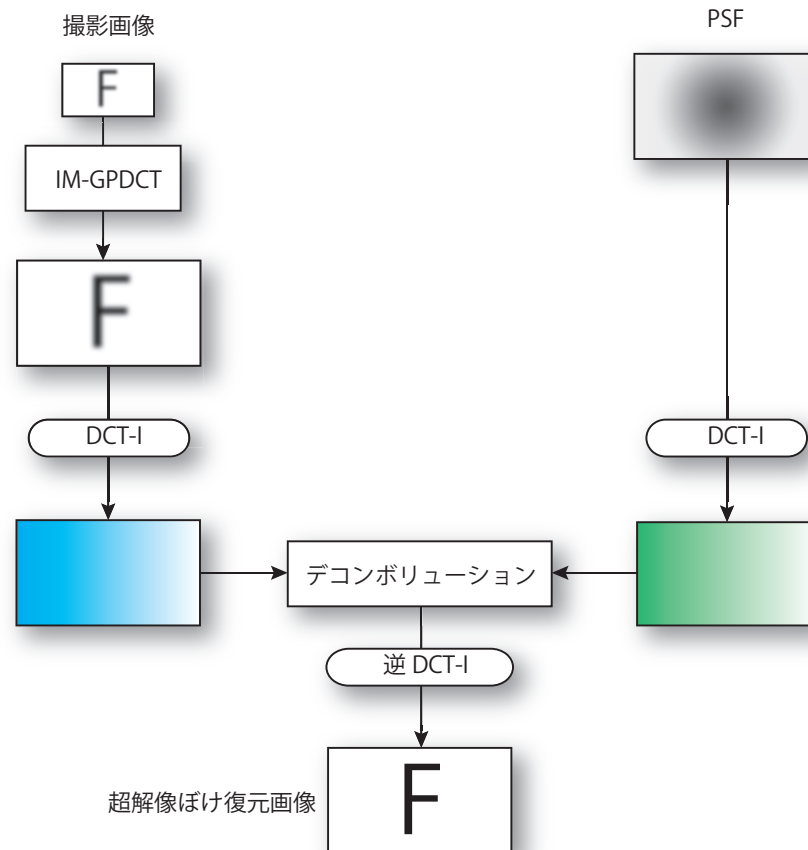


図 5.26 IPSF と IM-GPDCT による超解像の手順

きい場合，高周波成分の回復に伴い，生成した高解像画像の境界付近にリングが生じる．そこで，ミラー反転した鏡像を繰り返す方法を提案し，良好な結果が得られることが確認できた．本研究でも同様に検討を行った結果，ミラー反転による方法が良好な結果となったためこれを採用することとする．しかし，手順 (1) のパディングは元画像をそのまま用いることが出来るが，手順 (5) と (9) に関しては拡大した画像でパディングする必要がある．そこで本研究では，式 (5.1) の最近傍法で拡大後にミラー反転でパディングを行った (図 5.25) ．

5.4.3 IPSF と IM-GPDCT による超解像

次に，4 章の奥行きと動き不変 PSF で，IM-GPDCT による超解像化する方法を提案する．図 5.26 に本手法の手順を示す．まず，撮影画像を IM-GPDCT 法により超解像化を行う．このとき扱う DCT としては新堀ら [33] と同様に DCT-II を用いる．一方，PSF に関しては，本手法での撮影で行うことで，ぼけ復元の PSF は奥行きと動き不変性となる．そのため，PSF は式 (4.6) による計算で求めることができ，理論的に任意の大きさで計算可能である．つまり，撮影画像については IM-GPDCT 法による推定値となるが，PSF に

については正しい値を与えることが可能となる．その結果，IM-GPDCT 法単独で超解像を行った場合に比べて，PSF が高周波まで含まれているため，高周波領域でより正確な復元が期待できる．また，両者をデコンボリューションした結果は超解像のぼけ復元画像となり，結果的に超解像化と全焦点化と動きぼけの除去の3つを同時に行ったことになる．

5.4.4 シミュレーション実験

IPSF と IM-GPDCT による超解像の効果を確認するためにレンズシミュレーターをつかったシミュレーション実験を行った．ぼけ関数はピルボックスとし，センサの解像度は 256×256 から 512×512 の全焦点超解像画像を生成する実験を行った．ただし，Text 画像については 64×64 から 128×128 への超解像化を行っている．また，画像生成時に $\sigma = 0.2$ のガウスノイズを輝度に対して印加した．他の条件については，5.3.1 節と同様であるが，超解像の効果のみを確認するために物体の形状は平面とし，また静止した状態で撮影を行い運動ぼけが発生しない状況となっている．比較する従来法としては，積算を行わない低解像度画像に対して，Bicubic 法，Bilinear 法，Nearest Neighbor 法で超解像画像を生成し，また IM-GPDCT のみでの超解像画像の生成も行った．提案法では，IPSF と IM-GPDCT による超解像化を行い IM-GPDCT 法では DCT-II を，デコンボリューションでは DCT-I をそれぞれ使っている．また，Padding はミラー反転画像で行った．

図 5.27，図 5.28，図 5.29，図 5.30 は，IM-GPDCT のみの超解像化と提案法の実験結果である．グラフの横軸は，IM-GPDCT 法の繰り返し回数で，縦軸は真値との PSNR である．上のグラフより，IM-GPDCT 法のみでの超解像化より IPSF と IM-GPDCT 法を組み合わせた提案法の方がよい結果が得られていることが分かる．下のグラフは提案法の縦軸を拡大したものである．繰り返し回数を増やしていても必ずしも PSNR が向上していかないことが分かる．図 5.28 「Mandrill」と，図 5.30 「Text」の結果では繰り返し回数を重ねていくと PSNR が向上していき，画像の高周波成分が復元されていると思われる．しかし，図 5.27 「Lena」，図 5.29 「Papper」の結果では繰り返し回数 1 回をピークに PSNR が下がってしまっている．原因としては，「Lena」と「Peppers」の画像では画像の端にもともとノイズが乗っており，境界部分で連続にならないためだと考えられる．反対に，「Text」は画像の端に一定幅のブランクが挿入されているため繰り返し回数による PSNR の向上が大きい．また，すべてにおいて繰り返し回数 0 回よりも 1 回の方が PSNR が向上していることから，IM-GPDCT 法の Padding による効果があることが分かる．

図 5.31，図 5.32，図 5.33，図 5.34 はシミュレーション実験結果の画像である．画像の IM-GPDCT 法における繰り返し回数は 1 回とした．また，表 5.3 は，その真値との PSNR である．提案法はすべての画像で PSNR で一番良い値となっている．IM-GPDCT 法のみでの超解像と比べても，本手法では良好な結果が得られており，IPSF との組み合わせがうまく機能していると考えられる．また，超解像画像においても提案法はよりシャープで高周波成分が復元されていることが分かる．

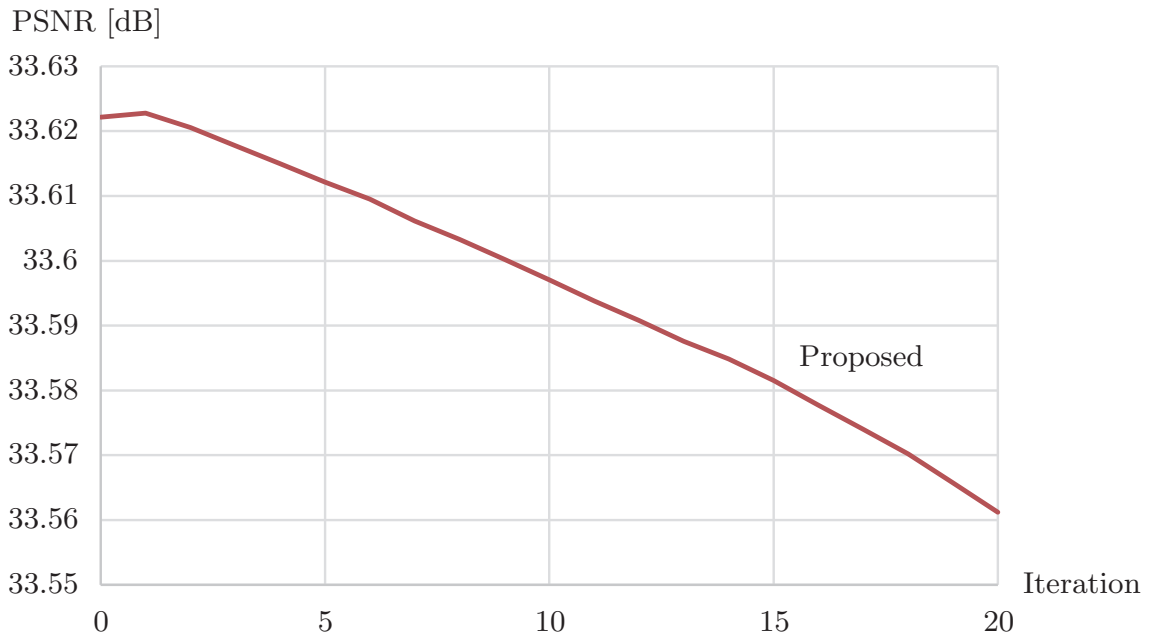
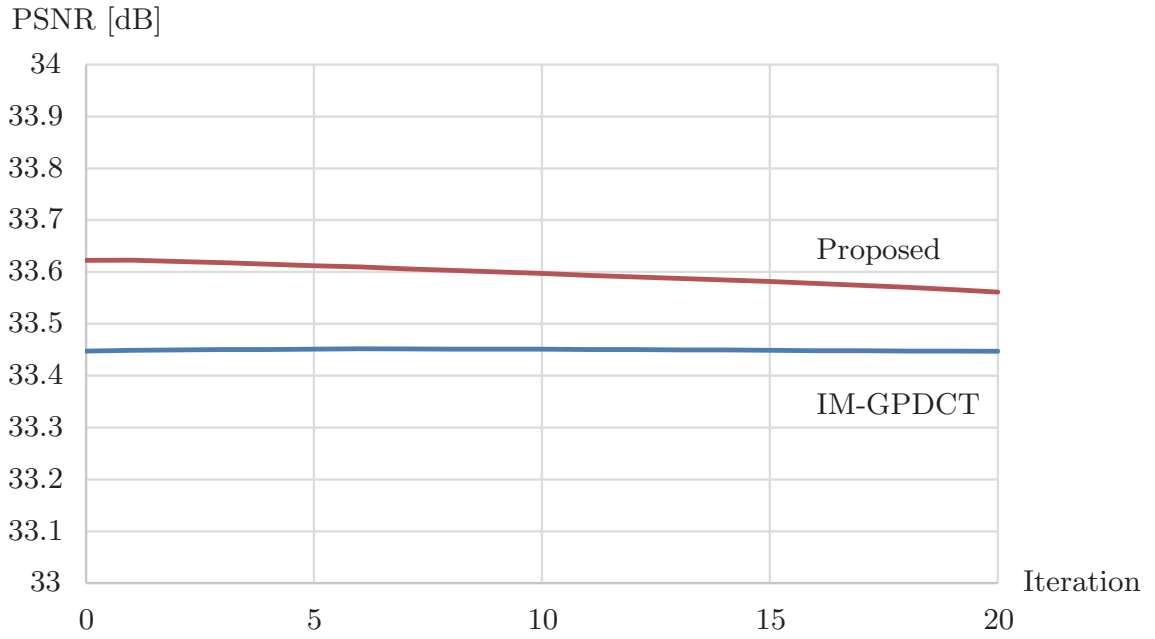


図 5.27 繰り返し回数による超解像「Lena」

表 5.3 超解像シミュレーション実験の PSNR [dB]

	Nearest	Biliner	Bilinear	Bicubic	Proposed
Text	13.18	12.85	13.43	13.27	13.55
Lena	30.94	31.88	33.38	33.45	33.62
Mandrill	23.11	22.89	23.46	23.20	23.49
Peppers	30.63	31.48	32.25	32.27	32.44

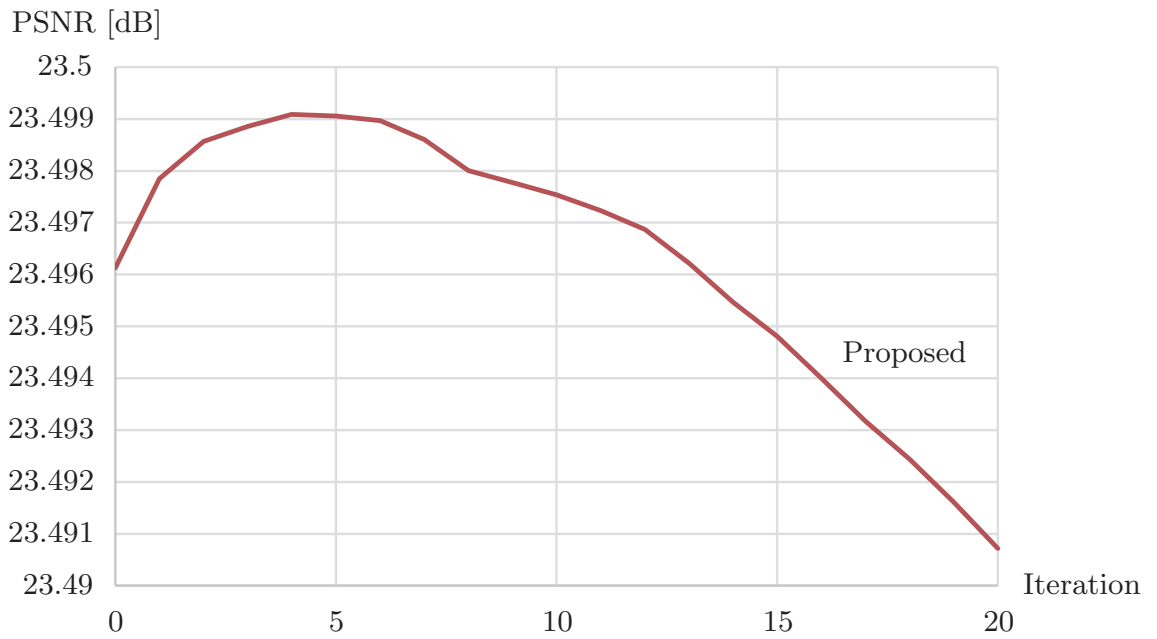
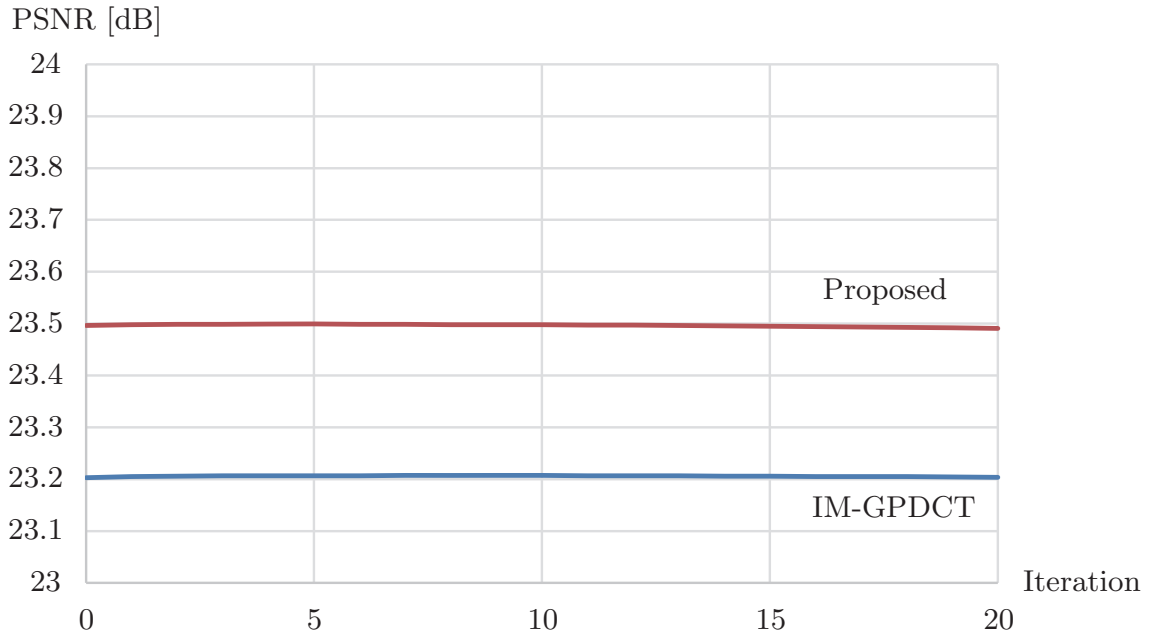


図 5.28 繰り返し回数による超解像「Mandrill」

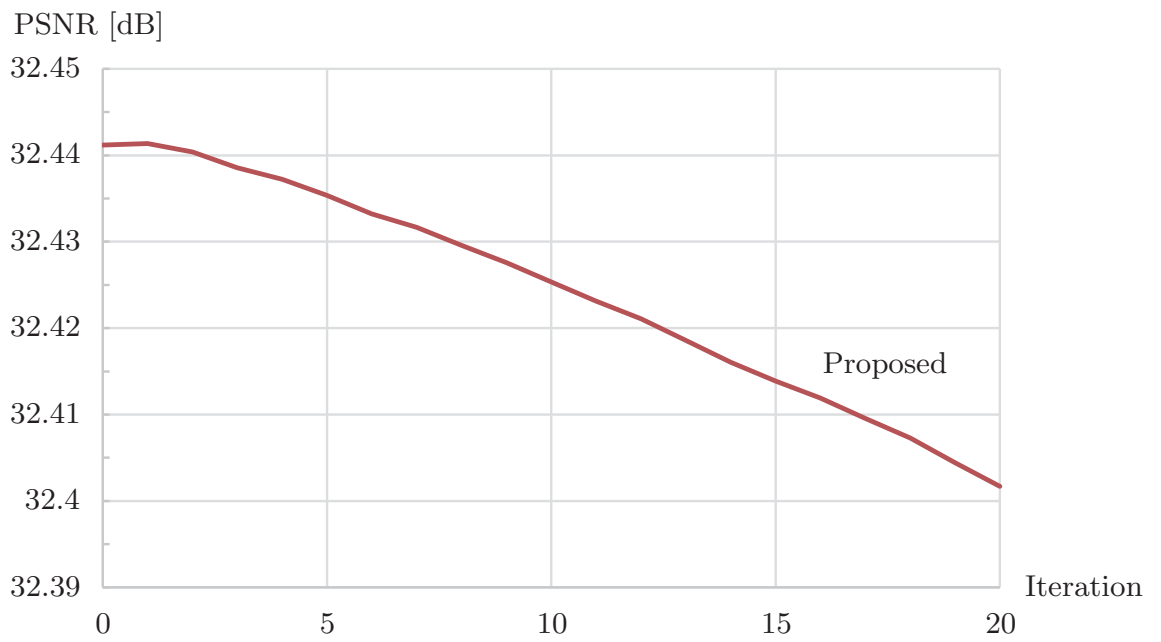
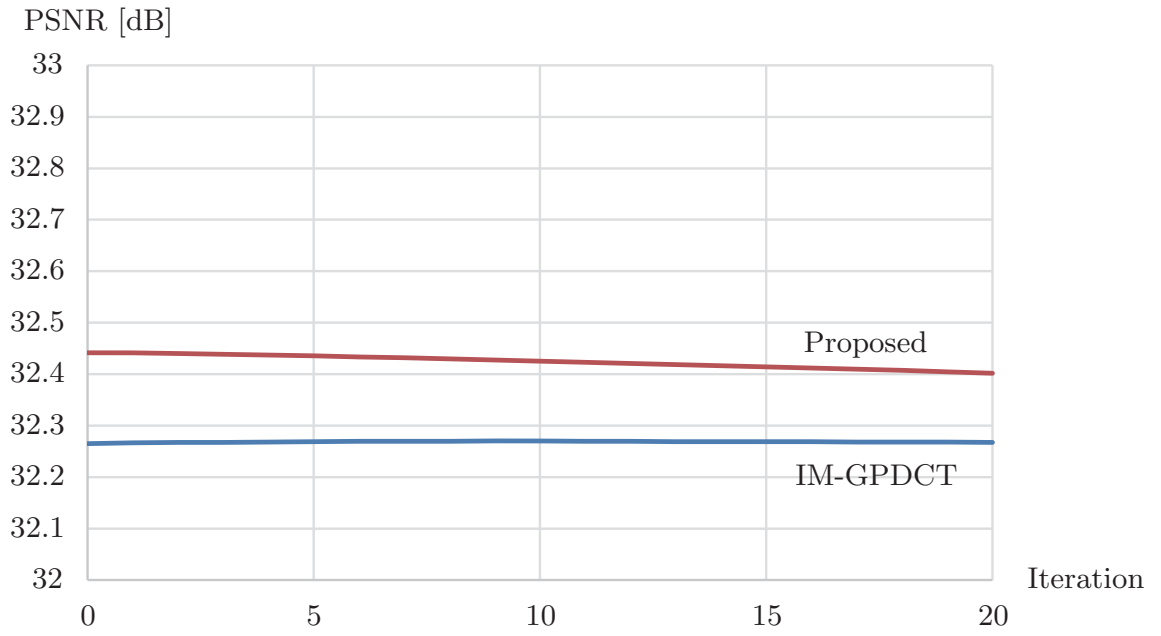


図 5.29 繰り返し回数による超解像「Peppers」

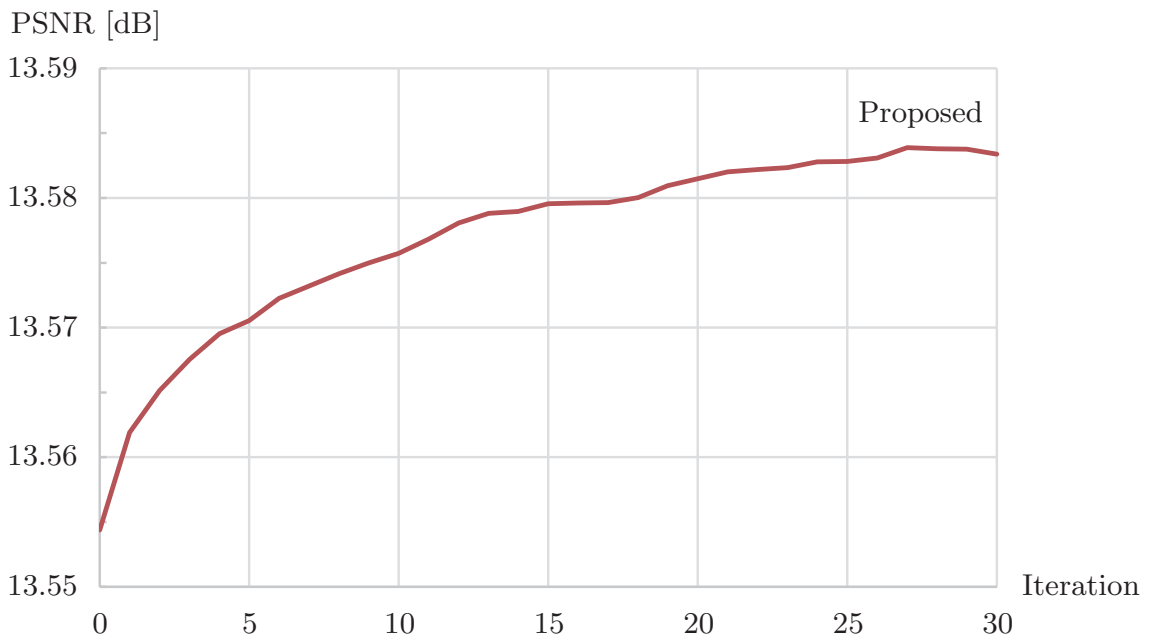
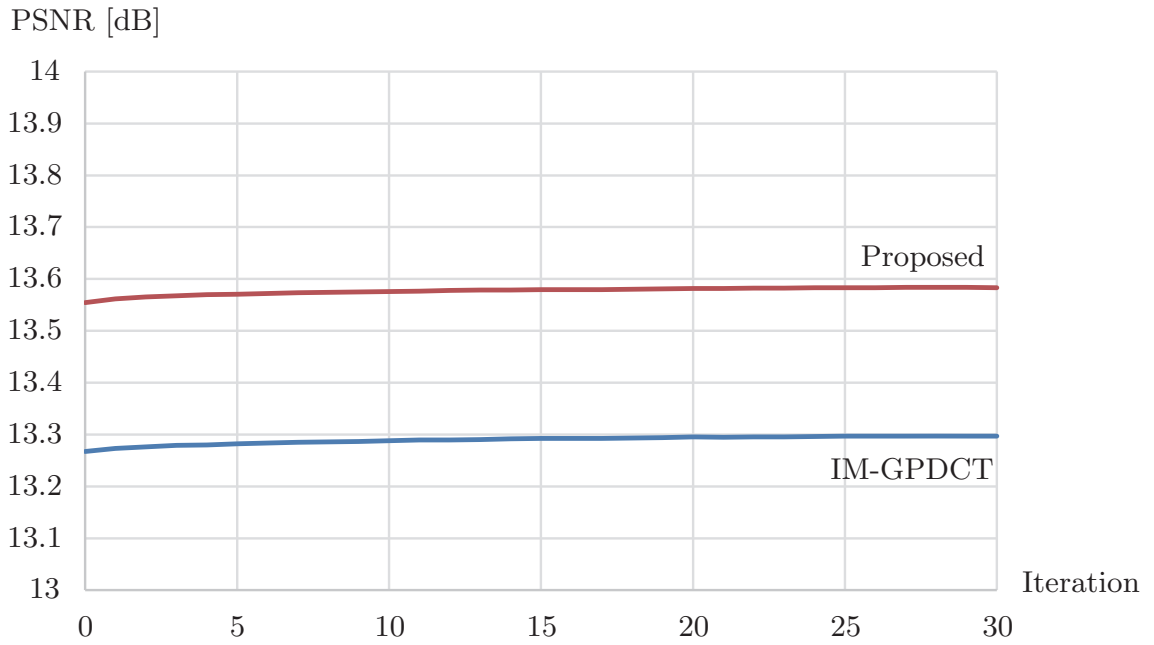


図 5.30 繰り返し回数による超解像「Text」

1234567890ABCDEFGHIJKLM
1234567890ABCDEFGHIG
1234567890ABCD
123456789ABC
12345ABC
123ABC

(a)Grand truth

1234567890ABCDEFGHIJKLM
1234567890ABCDEFGHIG
1234567890ABCD
123456789ABC
12345ABC
123ABC

(b)Nearest neighbor

1234567890ABCDEFGHIJKLM
1234567890ABCDEFGHIG
1234567890ABCD
123456789ABC
12345ABC
123ABC

(c)Biliner

1234567890ABCDEFGHIJKLM
1234567890ABCDEFGHIG
1234567890ABCD
123456789ABC
12345ABC
123ABC

(d)Bicubic

1234567890ABCDEFGHIJKLM
1234567890ABCDEFGHIG
1234567890ABCD
123456789ABC
12345ABC
123ABC

(e)IM-GPDC

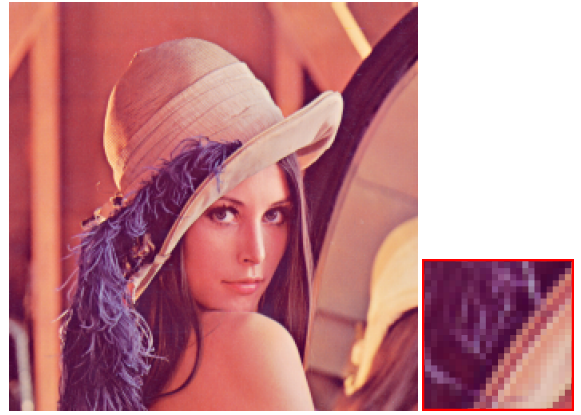
1234567890ABCDEFGHIJKLM
1234567890ABCDEFGHIG
1234567890ABCD
123456789ABC
12345ABC
123ABC

(f)Proposed

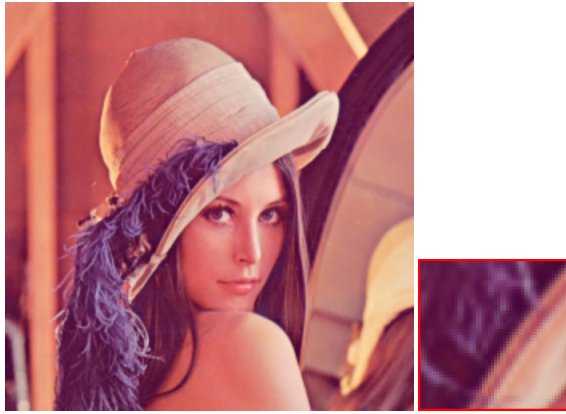
図 5.31 超解像シミュレーション実験 「Text」



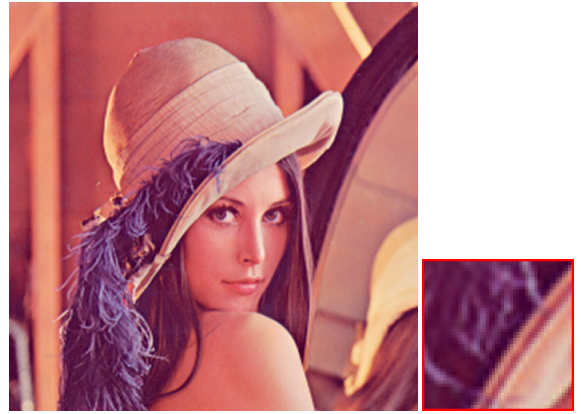
(a)Grand truth



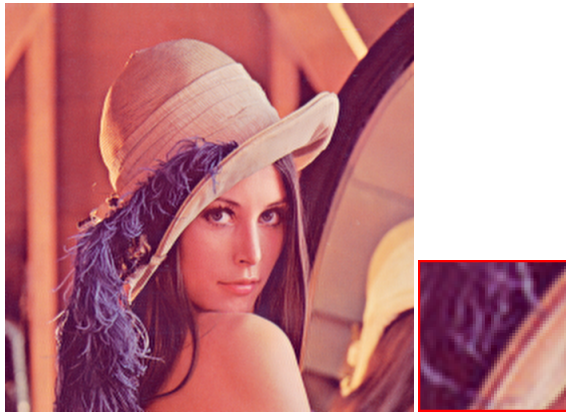
(b)Nearest neighbor



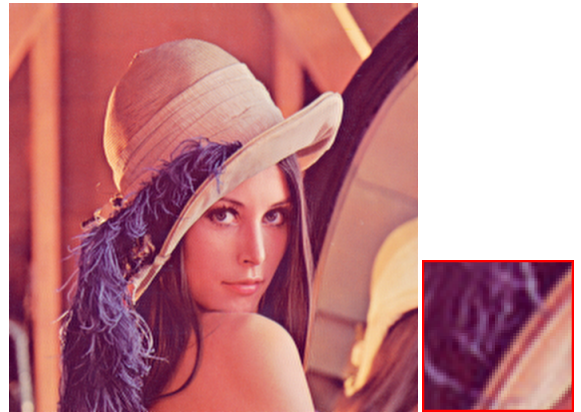
(c)Biliner



(d)Bicubic

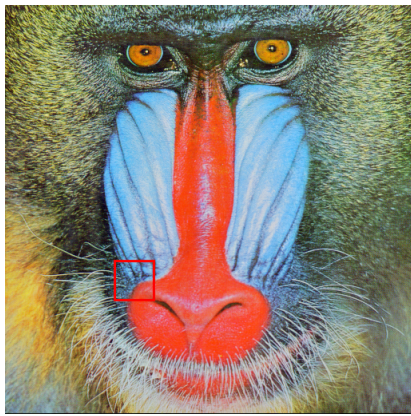


(e)IM-GPDCT

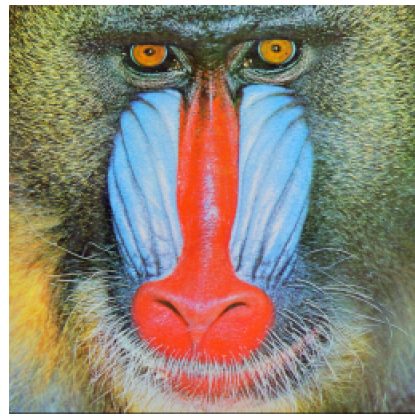


(f)Proposed

図 5.32 超解像シミュレーション実験 「Lena」



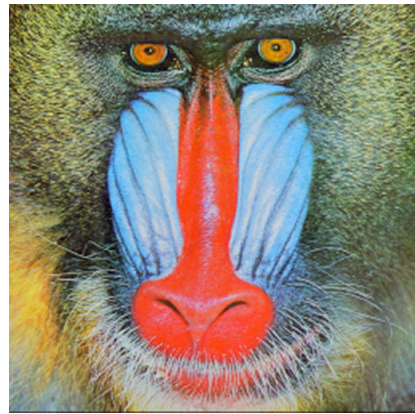
(a)Grand truth



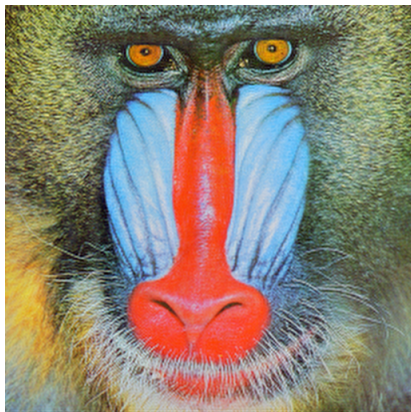
(b)Nearest neighbor



(c)Biliner



(d)Bicubic



(e)IM-GPDCT



(f)Proposed

図 5.33 超解像シミュレーション実験 「Mandrill」



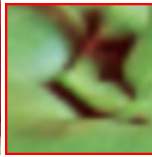
(a)Grand truth



(b)Nearest neighbor



(c)Biliner



(d)Bicubic



(e)IM-GPDCT



(f)Proposed



図 5.34 超解像シミュレーション実験 「Peppers」



図 5.35 超解像による実画像実験

5.4.5 実画像実験

次に、実画像で実験を行った。実験の設備と、条件に関しては5.3.2節と同様である。図5.35に結果画像を示す。図5.15，図5.16，図5.17の結果と比べてみると，提案法では画像がシャープに復元されていることが確認できる。

第6章

結論

本研究では、露光時間中にカメラを移動させて撮影することで、単一画像から動きぼけと奥行きぼけを同時に復元し全焦点画像を生成する手法を提案した。特に、カメラを光軸方向に移動することで動き不変 PSF が得られることを示し、この動き不変性を用いることで全焦点画像が生成できることを示した。本研究では、簡単のためまず平行投影を行う光学系において動き不変 PSF の解析を行い、次にこれを一般化して透視投影光学系の下での動き不変 PSF について考えた。特に、動きぼけと奥行きぼけの瞬間的な速度におけるぼけ除去可能条件を明らかにした。また、実画像実験により、様々な運動が存在する状況下において、テレセントリックレンズおよび一般の透視投影レンズを用いて動きぼけ復元を行い、従来法と比較することで提案法の有効性を示した。提案法には、ぼけにより輝度値が画像全体で平滑化されるため、ダイナミックレンジの拡大が期待できる効果がある。さらに、隣り合う画素は一定の勾配内に収まるため、センサー異常によるドット欠け等で発生するスパイクノイズの除去が可能である。

次に、奥行き不変 PSF を用いた画素シフトと周波数ドメインにおける繰り返し推定法により、全焦点の超解像画像が一枚の撮影画像のみから生成可能であることを示した。2つの超解像化の手法を提案したが、画素シフトによる超解像化は、画像ノイズが多い場合や物体形状が複雑な場合に有効であり、ロバスト性が求められる環境に向いている。また、IPSF と IM-GPDCT による超解像化は、画像ノイズが少ない場合や物体形状が平坦な場合に有効であり、高精度な画像復元が求められる環境に向いている。

今後の課題としては、ノイズ除去について検討を行う必要がある。特に、センサーに入射する光量はノイズと深い関係がある。符号化撮像では撮影法によりセンサーに入射する光量が低下する場合があるため、ノイズに関しては慎重に議論する必要がある。一方、本手法のカメラを移動による撮影法では露光時間中の光量が低下は発生しないが、従来法との比較時についてはノイズに関して考慮する必要がある。

付録 A

A.1 レンズシミュレーターの設計

本研究のシミュレーション実験で使われているレンズシミュレーターについて説明する。

A.1.1 透視レンズ

本節では、非テレセントリックレンズである一般的な透視レンズにおけるレンズシミュレーターについて説明する。図 A.1 の示すように、Lens の中心 o を原点とする $x - y$ 座標系を考えた場合、直線 l_1, l_2 は次式となる。

$$l_1: y = \frac{h_1}{p}x \quad (\text{A.1})$$

$$l_2: y = \frac{h_1}{f}x + h_1 \quad (\text{A.2})$$

式 (A.1), 式 (A.2) より交点 $A(u, h_2)$ を求める。

$$(u, h_2) = \left(\frac{fp}{f-p}, \frac{fh_1}{f-p} \right) \quad (\text{A.3})$$

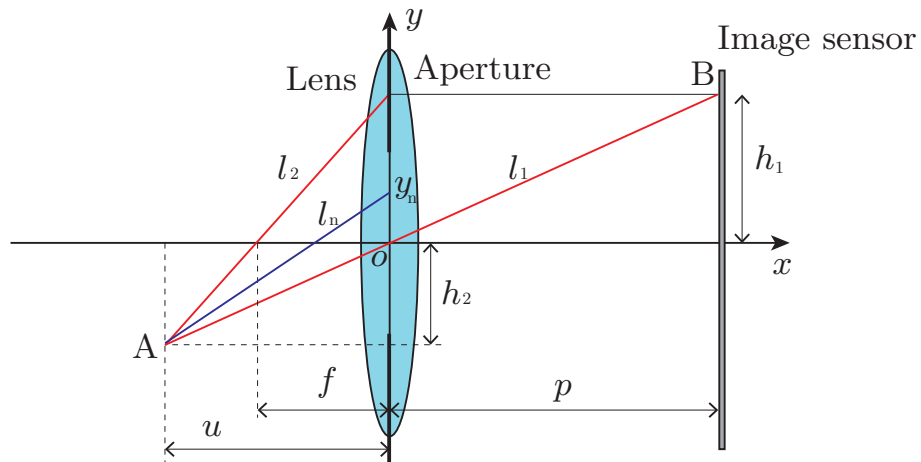


図 A.1 透視レンズ

撮像物上の点 A から発せられた光は，レンズを通り点 B で集光する．レンズ面上の任意の点を $(0, y_n)$ とすると，点 $(0, y_n)$ と (u, h_2) の2点を通る直線 l_n は次式となる．

$$l_n : y = \left\{ \frac{h_1}{p} + \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{p} \right) y_n \right\} x + y_n \quad (\text{A.4})$$

光の減衰がないと仮定すると，センサー面 B に入射する光の総量は光線 l_n を集めればよいことが分かる．シミュレーターでは， y_n を均等に N 個配置して，入射する光の平均を求めている． N を大きくすると精度は向上するが，計算量が膨大になるため並列化による高速化が必要となる．本稿では $N = 100 \times 100$ とし CUDA による高速化を行っている．また，絞りをレンズ面上に配置する場合は光線 l_n を任意に選択することで符号化開口を実現することが可能である．

A.1.2 物理側テレセントリックレンズ

本節では，物理側テレセントリックレンズにおけるレンズシミュレーターについて説明する．物理側テレセントリックレンズでは図 A.2 の示すように，絞りの位置が焦点 f となる．絞り上の点を (f, y'_n) とすると，三角形の相似関係より次式が成り立つ．

$$\frac{y'_n - y_n}{f} = \frac{h_1 - y'_n}{p - f} \quad (\text{A.5})$$

式 (A.4)，式 (A.5) より y_n を消去すると，物理側テレセントリックレンズの式となる．

$$l'_n : y = \frac{y'_n}{f} x + y'_n - \frac{f}{p - f} (h_1 - y'_n) \quad (\text{A.6})$$

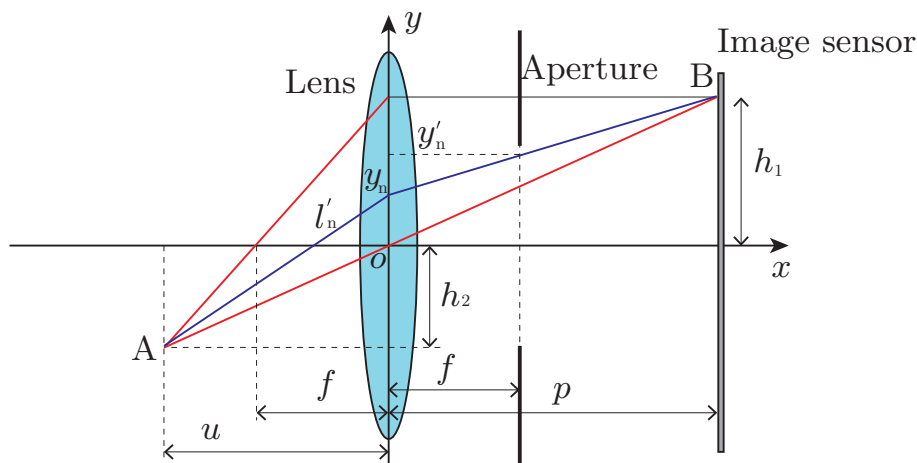


図 A.2 物理側テレセントリックレンズ

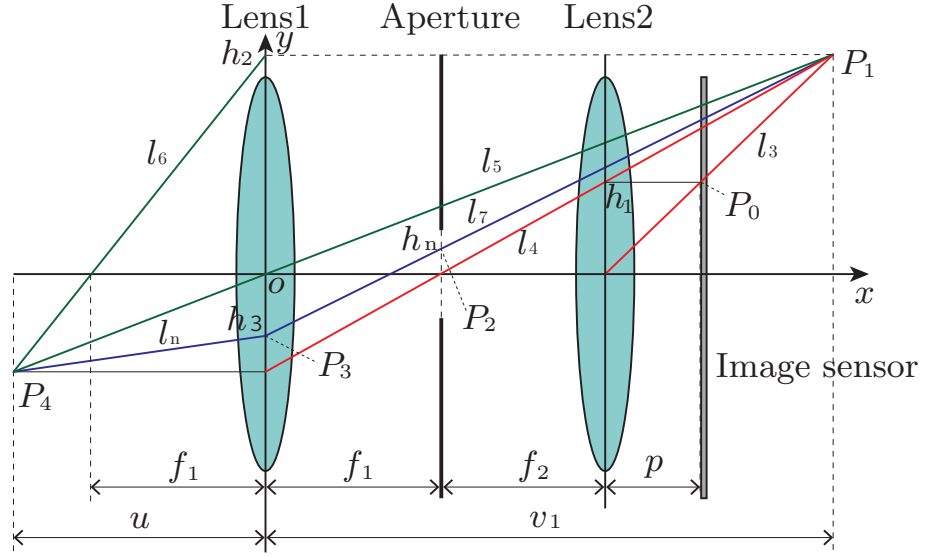


図 A.3 両側テレセントリックレンズ

A.1.3 両側テレセントリックレンズ

本節では、両側テレセントリックレンズにおけるレンズシミュレーターについて説明する。Lens1 の中心 o を原点とすると、センサー面 $P_0(p, h_1)$ に集光する光は、Lens2 によりすべて点 $P_1(v_1, h_2)$ を通る。このとき、直線 l_3, l_4 から交点 $P_1(v_1, h_2)$ を求める。

$$l_3: y = \frac{h_1}{p}(x - f_1 - f_2) \quad (\text{A.7})$$

$$l_4: y = \frac{h_1}{f_2}(x - f_1 - f_2) + h_1 \quad (\text{A.8})$$

$$P_1(v_1, h_2) = \left(f_1 + f_2 + \frac{f_2 p}{f_2 - p}, \frac{f_2 h_1}{f_2 - p} \right) \quad (\text{A.9})$$

次に、直線 l_5, l_6 から点 $P_4(x_4, y_4)$ を求める。

$$l_5: y = \frac{h_2}{v_1}x \quad (\text{A.10})$$

$$l_6: y = \frac{h_2}{f_1}x + h_2 \quad (\text{A.11})$$

$$P_4(x_4, y_4) = \left(\frac{f_1 v_1}{f_1 - v_1}, \frac{f_1 h_2}{f_1 - v_1} \right) \quad (\text{A.12})$$

絞り上の点を $P_2(f_1, y_n)$ とし、 P_1, P_2 を通過する直線 l_7 を求める。

$$l_7: y = \frac{y_n - h_2}{f_1 - v_1}(x - f_1) + y_n = \frac{y_n - h_2}{f_1 - v_1}x + \frac{f_1 h_2 - y_n v_1}{f_1 - v_1} \quad (\text{A.13})$$

直線 l_7 と Lens1 との交点を $P_3(0, h_3)$ とすると, 式 (A.13) より h_3 は次式となる .

$$h_3 = \frac{f_1 h_2 - y_n v_1}{f_1 - v_1} \quad (\text{A.14})$$

P_3, P_4 を通過する直線 l_n を求める .

$$l_n : y = \frac{y_4 - h_3}{x_4} x + h_3 \quad (\text{A.15})$$

式 (A.15) に式 (A.14) を代入する .

$$l_n : y = \frac{y_n}{f_1} x + \frac{f_1 h_2 - y_n v_1}{f_1 - v_1} \quad (\text{A.16})$$

式 (A.16) に式 (A.9) を代入することで, 両側テレセントリックレンズの式となる .

$$l_n : y = \frac{y_n}{f_1} x + y_n \left\{ \frac{f_1}{f_2} \left(1 - \frac{p}{f_2} \right) + 1 \right\} - \frac{f_1 h_1}{f_2} \quad (\text{A.17})$$

一方, 光学倍率は式 (A.9), 式 (A.12) より次式となる .

$$\beta = \frac{h_1}{-y_4} = \frac{f_2}{f_1} \quad (\text{A.18})$$

また, ワーキングディスタンスは式 (A.9), 式 (A.12) より次式となる .

$$W.D. = -x_4 = f_1 \left\{ \frac{f_1}{f_2} \left(1 - \frac{p}{f_2} \right) + 1 \right\} \quad (\text{A.19})$$

A.2 画像評価法

本研究では, 復元画像を真値である元画像と比較することで性能評価を行っており, その評価尺度として PSNR と SSIM を用いている .

A.2.1 PSNR

画像の客観的な評価尺度の 1 つとして, 信号対雑音比 (Peak Signal to Noise Ratio: PSNR) があり, 次式で定義される .

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{MAX^2}{MSE} \quad (\text{A.20})$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_i (X[i] - Y[i])^2 \quad (\text{A.21})$$

ここで, $X[i], Y[i]$ はそれぞれ原画像及び復号画像の i 番目の画素位置における輝度値, N は計算対象の画素数である . また, MSE (Mean Squared Error) は原画像と復号画像の差

分二乗平均であり， MAX は画像が取りうる最大輝度値である．8bit 階調画像の場合は， $MAX = 255$ となる．

RGB からなるカラー画像の場合，式 (A.20) は同じで MSE は次式となる．

$$MSE = \frac{1}{3N} \sum_i ((X_R[i] - Y_R[i])^2 + (X_G[i] - Y_G[i])^2 + (X_B[i] - Y_B[i])^2) \quad (A.22)$$

A.2.2 SSIM

SSIM (Structural SIMilarity) は Wang ら [36] によって提案された指標で，PSNR が符号化にともない生じた雑音成分の知覚感度に基づく指標であるのに対し，画像構造の類似度が人間の画質劣化の知覚に寄与するとの仮説に基づいて定義されている．画像構造の類似度には，ピアソンの相関係数を用いており，これに原画像及び復号画像の輝度コントラストの比較項を乗じ評価値を構成している．原画像 $x[i]$ ，復号画像 $y[i]$ の画像構造の類似度項を $s(x, y)$ ，輝度及びコントラストの比較項をそれぞれ $l(x, y)$ ， $c(x, y)$ ， $s(x, y)$ とすると，SSIM は，

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma \quad (A.23)$$

により与えられる． α, β, γ は，正の定数であり，本研究では $\alpha = \beta = \gamma = 1$ としている．また， $l(x, y)$ ， $c(x, y)$ ， $s(x, y)$ は，

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1}, \quad c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2}, \quad s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (A.24)$$

である．ここで， C_1 及び C_2 は L を信号の最大振幅（8 ビット表現であれば $L = 255$ ）， K_1, K_2 を $K_1 \ll 1, K_2 \ll 1$ なる定数とするとき $C_1 = (K_1L)^2$ ， $C_2 = (K_2L)^2$ であり， C_3 は計算の簡略化のため $C_3 = C_2/2$ とされる．なお，本研究では $K_1 = 0.01$ ， $K_2 = 0.03$ としている．また， $\mu_x, \sigma_x, \sigma_{xy}$ は 11×11 画素の正規化された円対称ガウス関数 $w[i]$ により重みづけられた原画像 $x[i]$ の平均，標準偏差及び $x[i]$ ， $y[i]$ の共分散であり，

$$\mu_x = \sum_i w[i] \cdot x[i], \quad \sigma_x^2 = \sum_i w[i](x[i] - \mu_x)^2, \quad \sigma_{xy} = \sum_i w[i](x[i] - \mu_x)(y[i] - \mu_y) \quad (A.25)$$

と定義されている．なお， μ_y, σ_y は復号画像 $y[i]$ に対して上記と同様の定義を適用したものである．最終的に，式 (A.23) 及び式 (A.24) を統合することにより，SSIM は以下のように定義される [37]．

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (A.26)$$

謝辞

本研究は，名古屋工業大学教授佐藤淳先生，ならびに助教坂上文彦先生のもとで行われたものであり，その間熱心な御指導ならびに御助言を賜りましたことを深く感謝いたします．また日頃から多方面にわたりご協力を頂いた，佐藤研究室ならびに本谷研究室の諸氏に深く感謝いたします．最後に，研究に協力してくれました株式会社 ATA に深く感謝いたします．

成果発表

本研究における成果の一部は，以下の学会において発表した．

学術論文

- [1] T. Kobayashi, R. Naito, F. Sakaue, J. Sato, “Space-Time Coded Imaging for Robust Depth and Motion Deblurring”, ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol.2, No.2 pp.192–198, 2014.
- [2] 小林丈之，内藤遼介，坂上文彦，佐藤淳，“IPSFに基づく動きぼけと奥行きぼけの同時復元”，映像情報メディア学会, Vol.68, No.9, pp.399–407, 2014.

国際会議

- [1] R. Naito, T. Kobayashi, F. Sakaue, J. Sato, “Deblurring Depth Blur and Motion Blur Simultaneously by Using Space-Time Coding”, International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Technical Program WeBT2.2, pp.2177–2180, Tsukuba, 2012.
(オーラル発表)
- [2] T. Kobayashi, F. Sakaue, J. Sato, “Depth and Arbitrary Motion Deblurring Using Integrated PSF”, Workshop on Light Field for Computer Vision (LF4CV, ECCV Workshop), Zürich, 2014.
(オーラル発表)

国内会議

- [1] 小林丈之, 内藤遼介, 坂上文彦, 佐藤淳, “カメラ移動に基づく奥行不変 PSF を用いた全焦点画像の生成”, 第 177 回 CVIM 研究会, CVIM-176-26, 大阪, 2011 .
(オーラル発表)
- [2] 小林丈之, 内藤遼介, 坂上文彦, 佐藤淳, “カメラ移動に基づく奥行不変 PSF を用いた全焦点画像の生成”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU), OS4-2 & IS1-55 , pp.456-463, 石川, 2011 .
(オーラル発表, ポスター発表)
- [3] 小林丈之, 内藤遼介, 坂上文彦, 佐藤淳, “時空間符号化による奥行きぼけと動きぼけの同時復元”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU), SS2-8, 東京, 2013 .
(ポスター発表)

参考文献

- [1] 日浦慎作, “コンピュータショナルフォトグラフィ理解のための光学系入門,” 情報処理学会 (CVIM) 研究報告, vol.171, no.13, 2010.
- [2] K.Kodama, H.Mo and A.Kubota, “Simple and fast all-in-focus image reconstruction based on three-dimensional/two-dimensional transform and filtering,” IEEE ICASSP2007, vol.1, pp.769–772, 2007.
- [3] 児玉和也, 久保田彰, “単一のレンズ系からの多様なボケ味の生成,” 映像情報メディア学会誌, vol.65, no.3, pp.372–381, 2011.
- [4] A.Levin and F.Durand, “Linear view synthesis using a dimensionality gap light field prior,” IEEE CVPR2010, pp.1831–1838, 2010.
- [5] 長原一, “符号化撮像,” 情報処理学会 (CVIM) 研究報告, vol.171, no.14, 2010.
- [6] A. Pentland, “A new sense for depth of field,” IEEE Trans. PAMI, vol.9, no.4, pp.523–531, 1987.
- [7] M. Subbarao and G. Surya, “Depth from defocus: A spatial domain approach,” International Journal of Computer Vision, vol.13, no.3, pp.271–294, 1994.
- [8] A. Veeraraphavan, R. Raskar, A. Agrawal, A. Mohan and J. Tumblin, “Dappled photography : Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing,” ACM Trans. Graphics, 2007.
- [9] H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou and S.K. Nayar, “Flexible depth of field photography,” Proc. European Conf. Computer Vision, LNCS 5305, pp.60–73, 2008.
- [10] R. Raskar, A. Agrawal and J. Tumblin, “Coded exposure photography: Motion deblurring using fluttered shutter,” ACM Trans. Graphics, vol.25, pp.795–804, 2006.
- [11] A. Levin, P. Sand, T. Cho, F. Durand and W. Freeman, “Motion-invariant photography,” SIGGRAPH, ACM Trans. Graphics, 2008.

- [12] Y. Bando, B.Y. Chen and T. Nishita, “Motion deblurring from a single image using circular sensor motion,” *Computer Graphics Forum (Proceedings of Pacific Graphics 2011)*, vol.30, no.7, pp.1869–1878, 2011.
- [13] S. Park, M. Park and M. Kang, “Super-resolution image reconstruction: A technical overview,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol.20, no.3, pp.21–36, 2003.
- [14] 菅原正幸, 三谷公二, 齋藤敏紀, 藤田欣裕, 末次圭, “4板撮像方式における画素ずらし効果についての検討,” *テレビ誌*, vol.49, no.2, pp.212–218, 1995.
- [15] A. Levin, R. Fergus, F. Durand and W. Freeman, “Image and depth from a conventional camera with a coded aperture,” *ACM Transactions on Graphics*, no.3, 2007.
- [16] C. Liang, T. Lin, B. Wong, C. Liu and H. Chen, “Programmable aperture photography: Multiplexed light field acquisition.,” *SIGGRAPH, ACM Transactions on Graphics*, 2008.
- [17] E. Dowski and W. Cathey, “Extended depth of field through wave-front coding,” *Journal of the Optical Society of America A*, no.11, pp.1859–1866, 1995.
- [18] A. Levin, S. Hasinoff, P. Green, F. Durand and W.T.Freeman, “4d frequency analysis of computational cameras for depth of field extension,” *SIGGRAPH, ACM Transactions on Graphics*, 2009.
- [19] O. Cossairt, C. Zhou and S.K. Nayar, “Diffusion coded photography for extended depth of field,” *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH)*, 2010.
- [20] C. Zhou, S. Lin and S. Nayar, “Coded aperture pairs for depth from defocus,” *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2009.
- [21] R. Marcia, Z. Harmany and R. Willet, “Compressive coded aperture imaging,” *Proceedings of the SPIE*, 2009.
- [22] T.S. Cho, A. Levin, F. Durand and W. Freeman, “Motion blur removal with orthogonal parabolic exposures,” *IEEE International Conf. on Computational Photography(ICCP)*, 2010.
- [23] Q. Shan, J. Jia and A. Agarwala, “High-quality motion deblurring from a single image,” *ACM Trans. Graphics*, vol.27, no.3, p.Article 73, 2008.
- [24] R. Naito, T. Kobayashi, F. Sakaue and J. Sato, “Deblurring depth blur and motion blur simultaneously by using space-time coding,” *International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, 2012.

- [25] 田村秀行, “コンピュータ画像処理,” オーム社出版局, pp.117–127, 2002.
- [26] N. Wiener, “Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series,” , 1964.
- [27] W.H. Richardson, “Bayesian-based iterative method of image restoration,” J. Opt. Soc. Am., vol.62, no.1, pp.55–59, 1972.
- [28] L.B. Lucy, “An iterative technique for the rectification of observed distributions,” Astronomical Journal, vol.79, no.6, pp.745–754, 1974.
- [29] D. Znamenskiy, H. Schmeitz and R. Muijs, “Motion invariant imaging by means of focal sweep,” IEEE International Conference on Consumer Electronics, pp.91–92, 2011.
- [30] Y. Bando, H. Holtzman and R. Raskar, “Near-invariant blur for depth and 2d motion via time-varying light field analysis,” ACM Transactions on Graphics, vol.32, no.2, 2013.
- [31] 高松淳, 日浦慎作, 長原一, 富永昌治, 八木康史, 斎藤英雄, “コンピュータビジョン最先端ガイド4,” CVIM チュートリアルシリーズ, 第1章: 画像化プロセスと画像ノイズ, pp.1–21, 2011.
- [32] K. Kodama and A. Kubota, “Efficient reconstruction of all-in-focus images through shifted pinholes from multi-focus images for dense light field synthesis and rendering,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.22, no.11, pp.4407–4421, 2013.
- [33] M. Jones, “The discrete gerchberg algorithm,” IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process, ASSP-34, no.3, pp.624–626, 1986.
- [34] 新掘英二, 高木幹雄, “Dct を用いた gerchberg-papoulis の反復法を適用した高画質画像拡大,” 電子情報通信学会論文誌 D, J76-D2, no.9, pp.1932–1940, 1993.
- [35] 井上義隆, 甲藤二郎, “複数の拡大手法と選択的低周波数置換による im-gpdct の性能改善,” 電子情報通信学会論文誌 D, J92-D, no.10, pp.1740–1742, 2009.
- [36] Z. Wang, A.C. Bovik, H.R. Sheikh and E.P. Simoncelli, “Image quality assessment: From error visibility to structural similarity,” IEEE Transactions on Image Processing, vol.13, no.4, pp.600–612, 2004.
- [37] 杉本修, 八島由幸, “知識の森,” 電子情報通信学会, 2群(画像・音・言語) - 5編(画像符号化) - 9章 符号化画質, pp.5–7, 2013.