

圧縮超解像イメージングにおける 符号化開口の多段化の検討

加藤 伶菜^{1,a)} 中村 友哉^{1,b)} 岩田 和也^{1,c)} 槇原 靖^{1,d)} 八木 康史^{1,e)}

概要：符号化開口は圧縮超解像イメージングに有用であるが、従来技術では一段の開口の利用が前提とされている。本研究では、符号化開口を多段化することで圧縮超解像イメージングの性能が改善するか検証した。回折ボケを考慮した光線追跡に基づく数値実験により、計測の光学系全体の微小開口の数や光学系薄さを固定した条件下であっても、観測行列のコヒーレンス値抑制及び 4×4 倍超解像再構成の画質改善に効果があることが確認された。

キーワード：デジタル超解像, 圧縮センシング, コヒーレンス, シフトバリエーション

1. はじめに

超解像とは、空間解像度の低い観測情報から空間解像度の高い観測情報へと復元する技術である [1]。この技術は複数枚の低解像度画像から1枚の高解像度画像を生成するマルチフレーム超解像技術 [2-4] と1枚の低解像度画像から1枚の高解像度画像を生成するシングルフレーム超解像技術の2つに大きく分けられる。先に挙げたマルチフレーム超解像は主に動画やカメラアレイを用いて実現することができて実用化もされているが、複数回観測する必要があることから時間分解能が犠牲となる。対して後に挙げたシングルフレーム超解像は1回の観測で良いため時間分解能の犠牲は小さく、本研究ではシングルフレーム超解像を考える。これまでに学習に基づく手法 [5-7] や符号化センシングに基づく手法 [8,9] など様々な手法が提案されているが、学習に基づいた手法は本質的には事前に計測したデータを用いた情報の内挿であり、対象を未知とした時の計測に有効かどうかは未知である。また符号化センシングに基づく手法は、光学的な超解像情報の特徴づけと観測対象のスパース性を積極的に利用した逆解析演算を組み合わせる手法で既存の研究では効果は限定的である。本研究では符号化センシングに基づく手法をベースに、圧縮セン

シングを用いた画像処理におけるデジタル超解像を考える。圧縮センシングとはスパース性を持つ高次元の信号を少ない観測から復元する技術である [10]。既存の研究で、符号化開口と圧縮センシングを組み合わせる超解像イメージングを実現する技術が提案されている [9,11]。一方で、既存研究では配置する符号化開口は1枚であることを前提としている。そこで本研究では符号化開口を多段化する光学系を提案し、圧縮超解像イメージングの性能が改善するか検証する。

2. 圧縮センシング

圧縮センシングとは、少ない観測データから、より密なデータを復元する技術である [12,13]。イメージング応用における数理的概念図を図1に示す。インコヒーレント光学系は光強度に対して線形なシステムであり [14]、デジタル画像はピクセル単位のデータ集合と考えられるので、イメージングの数理モデルはベクトルと行列の演算により表現できる。物体光強度空間分布を n 個の実数を持つベクトル $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ 、光学系作用を表す観測行列を $\Phi \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 、計測される観測データを m 個の実数を持つベクトル $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ とすると観測過程は $\mathbf{b} = \Phi \mathbf{x}$ という式で表現できる。圧縮センシングは物体のスパース性を利用することから、物体をスパースな物体データ $\mathbf{x}' \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ に陽に変換して表現する($\mathbf{x}' = \Psi \mathbf{x}$)。この時に作用する行列を基底変換行列 $\Psi \in \mathbb{R}^{n \times n}$ と呼び、観測行列 Φ と基底変換行列 Ψ をまとめて観測行列 $\mathbf{A} (= \Phi \Psi)$ と呼ぶ。本研究では物体はスパース性を持つことを前提とし、観測行列 $\mathbf{A} = \Phi$ とする。

¹ 大阪大学

a) kato@am.sanken.osaka-u.ac.jp

b) nakamura@am.sanken.osaka-u.ac.jp

c) iwata.kazuya.6f@kyoto-u.ac.jp

d) makihara@am.sanken.osaka-u.ac.jp

e) yagi@am.sanken.osaka-u.ac.jp

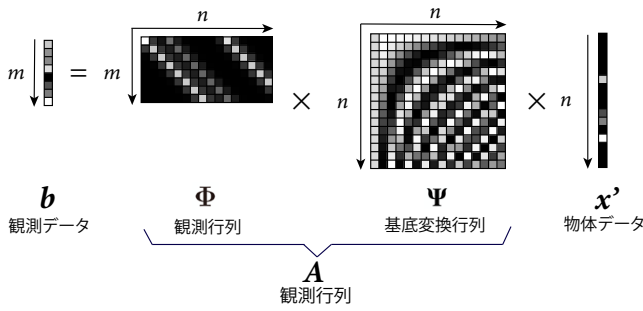


図 1 圧縮イメージングの数学的概念図

$m = n$ のような十分な観測ができていない場合、観測データから物体データを再構成するには $b = Ax'$ の逆問題を解けばいいが、 $m < n$ の場合未知数に対して式の数がない、すなわち逆問題が不良設定となるため解が一意的に定まらない。超解像画像再構成はこの問題の一種である。そこで、圧縮センシングの適用のため、まず問題を式 (1) のように定式化する。 l_0 ノルムを用いた最小化問題であるが、これを陽に計算する公式は無い。貪欲法においても非ゼロ成分の個数が不明なことから、 b が合成できる x' を非ゼロ成分の数 s 個として解を探すこととなり現実的ではない。

$$x'_{*0} = \arg \min_{x'} \|x'\|_0 \text{ subject to } Ax' = b. \quad (1)$$

式 (1) の問題は、凸最適化の一種である l_1 ノルム最小化問題に変換して解くことができる [15, 16]。そもそも最もスパースな x' とは一つだけであるのか、また l_1 ノルムによる凸最適化問題として考えても l_0 ノルムの場合と同じ x' が求まるのか、という解 x' の一意性と l_0, l_1 ノルムの等価性を保証する条件の一つとして観測行列 A のコヒーレンスに基づくものがある [13]。その値は式 (2) で求められる。

$$\mu(A) = \arg \max_{1 \leq i, j \leq n, i \neq j} \frac{|a^{(i)T} a^{(j)}|}{\|a^{(i)}\|_2 \|a^{(j)}\|_2}. \quad (2)$$

観測行列 A は列ベクトル ($a \in \mathbb{R}^{m \times 1}$) の集合であるため、コヒーレンス値は任意の異なる列ベクトル間における相関の最大値を意味する。非ゼロ成分の数が式 (3) を満たす場合に解 x'_* の一意性が保証される [13]。

$$\|x'_*\|_0 < \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\mu(A)} \right). \quad (3)$$

すなわち観測行列 A が列相関の低いインコヒーレントな行列であるほど、より多くの非ゼロ要素を持つ物体データに対しても解の一意性が保証される。微分不可能な l_1 ノルム項を含む凸最適化問題を解く手法として様々なものがあるが、本研究では全変動 [17, 18] を拘束項として用いた TwIST アルゴリズム [19] により超解像画像再構成を実装する。

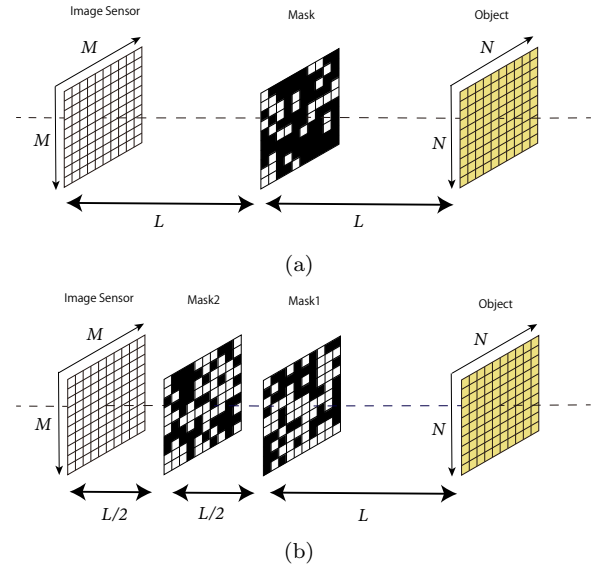


図 2 観測系物理モデル:(a) 単層系 (b) 多段系

3. 多段符号化開口による圧縮超解像イメージング

符号化開口を用いた圧縮超解像イメージングの研究では 1 段の開口を前提としているが、本研究では 2 枚以上を用いた符号化開口の多段化を検討する。観測系の物理モデルを図 2 に示す。本研究では、符号化開口と撮像素子のみで構成されるレンズレスイメージング系を考える。以下では配置する開口が 1 枚の場合を単層系 (図 2(a))、2 枚以上の場合を多段系 (図 2(b)) とする。開口 $[N \times N]$ とセンサ $[M \times M]$ 間距離を L と固定し、2 枚目以降の開口は、1 枚目の開口とセンサ間を等分するよう配置する。物体と 1 枚目の開口の距離は任意であるが、本研究では等倍イメージング系を仮定し L とする。

本研究では、圧縮超解像イメージングに対する観測光学系の条件の良さを評価する尺度として式 (2) で定式化される観測行列 A のコヒーレンス値を用いる。観測行列はインパルス応答群であり、各列ベクトルはインパルス応答を 1 次元列ベクトルに変形したものである。各インパルス応答は物体空間における点光源の応答を計測することで取得する。単層の符号化光学系は、インパルス応答が入力空間座標に不変な線形シフト不変システムであるため、観測行列がテプリッツ行列となる。一方で、本研究で提案する多段系はシフトバリエーションな線形システムであり、観測行列は非テプリッツ行列となる。本研究では、符号化開口の影であるインパルス応答が回折により帯域制限されている状況を考え、開口多段化によりインパルス応答群を低相関化できるか、またこれにより単層系よりも圧縮超解像に対して条件の良いインコヒーレントな観測行列 A が実装できるのかを検証する。

4. 数値実験

4.1 理想的なシフトバリエーション光学系の検証

光学系のシフトバリエーション化がそもそも圧縮超解像イメージングに有用かどうか、数値実験により検証した。圧縮センシングはその効果が対象依存するため、本検証では効果の評価尺度として観測行列のコヒーレンス値を用いる。本検証では、各入力面座標に対応するインパルス応答それぞれが光学系全体の微小開口の数を25%に固定した上での異なる二値ランダムパターンとなるよう設定し、それらを列ベクトルとして並べて配置することで観測行列を構成した。これは、光学設計をブラックボックス化した理想的なシフトバリエーション系観測行列に対応する。これにより、インコヒーレント光、すなわち自然光イメージングにおける、シフトバリエーション化によるコヒーレンス値抑制効果の上限を検証する。なお、以下の検証では、回折現象により必然的に生じる帯域制限を考慮し、各インパルス応答に二次元ガウスフィルタを作用させることとする。比較対象としての図2(a)の単層符号化開口レンズレス光学系の観測行列は、上記と同様の手順で得た単一のランダムインパルス応答からテプリッツ行列を構成することで実装した。

本評価では $M = N$ と設定し、理想系のランダム観測行列は100試行の最小値、最大値、平均値を評価した。 N および二次元ガウスフィルタの標準偏差値SDを変えながら得られたコヒーレンス値を表1-表3に示す。それぞれ最小値に注目すると、解像度 N 、標準偏差SDのすべての場合で単層系よりもインコヒーレントな行列が存在することが明らかとなった。特に $N = 32$ では、100パターンの観測行列すべてが単層系よりもインコヒーレントであることが明らかとなった。

4.2 多段符号化開口光学系の検証

次に、具体的なシフトバリエーション光学系の実装法の一つとして、符号化開口を多段化したレンズレス光学系を想定し、提案手法の評価を行う。以降の検証では、解像度 $N = 32$ と固定する。本検証で用いる光学設計では、物体面側符号化開口とイメージセンサ距離を固定し、その間に等間隔に符号化開口を追加挿入する。これにより、光学系の薄さを固定したままの多段化によりコヒーレンス値抑制効果が得られるかを検証する。また、符号化開口を多段化しても微小開口の数の点で不利にならないように、系全体の微小開口の数が25%で固定されるよう各開口の開口率を調整した。観測行列は光線追跡により計算機内で計測する。ここで、回折ボケ量は、光の伝搬距離に比例するよう実装する。具体的なパラメータとして、物体面側符号化開口とイメージセンサ間を伝搬した時に $SD = 1.0$ となるよう回折ボケ量を設定した。

表1 コヒーレンス $\mu(\mathbf{A}) : N = 8$

単層系		理想系		
		Min	Max	Avg
SD=0.0	0.5774	0.5443	0.7906	0.6523
SD=0.5	0.6966	0.6487	0.8469	0.7333
SD=1.0	0.9630	0.9119	0.9744	0.9444
SD=1.5	0.9879	0.9698	0.9923	0.9819

表2 コヒーレンス $\mu(\mathbf{A}) : N = 16$

単層系		理想系		
		Min	Max	Avg
SD=0.0	0.4899	0.4315	0.5930	0.4834
SD=0.5	0.6158	0.5916	0.6997	0.6258
SD=1.0	0.9286	0.8835	0.9403	0.9076
SD=1.5	0.9781	0.9487	0.9809	0.9657

表3 コヒーレンス $\mu(\mathbf{A}) : N = 32$

単層系		理想系		
		Min	Max	Avg
SD=0.0	0.3622	0.3652	0.4287	0.3859
SD=0.5	0.6283	0.5378	0.5978	0.5565
SD=1.0	0.9465	0.8587	0.8999	0.8711
SD=1.5	0.9858	0.9377	0.9570	0.9453

表4 コヒーレンス $\mu(\mathbf{A})$

単層系		理想系		
		多段系 (2枚)	多段系 (4枚)	理想系
Original	0.3118	0.5484	0.7357	0.3652
SD=0.5	0.7774	0.8469	0.8855	0.5379
SD=1.0	0.9464	0.9236	0.9093	0.8587

単層符号化開口系、符号化開口2枚の光学系、4枚の光学系に対する観測行列をそれぞれ100パターン用意してコヒーレンス値を求めた。今回、実用上重要な最小値について比較した。結果を表4に示す。参考として4.1章で求めた同条件での理想シフトバリエーション系のコヒーレンス最小値も併せて示す。SD=0.5以下、すなわちX線イメージングのように回折ボケがほぼ生じない条件下では、多段符号化開口光学系のコヒーレンス値は単層系よりもむしろ悪化するものの、SD=1.0の場合は、多段化によりコヒーレンス値を抑制できることが確認された。また、いずれの場合も理想的シフトバリエーション系より比較的大きなコヒーレンス値が確認された。これにより、例えば位相マスクや鏡など符号化開口以外の素子を用いた光学設計により、多段符号化開口系よりさらにコヒーレンス値を抑制できる可能性が示された。

表4におけるSD=1.0の観測行列を図3に可視化する。観察の便宜上部分拡大図を図4に示す。単層系(a)の各列ベクトルに注目すると列方向、つまり出力インパルス応答の空間ボケにより隣り合う列ベクトルが似た成分をもつ。対して理想系(d)は列方向にボケてはいるが、行つまり入力次元方向にみると隣り合ったインパルス応答がボケつつ

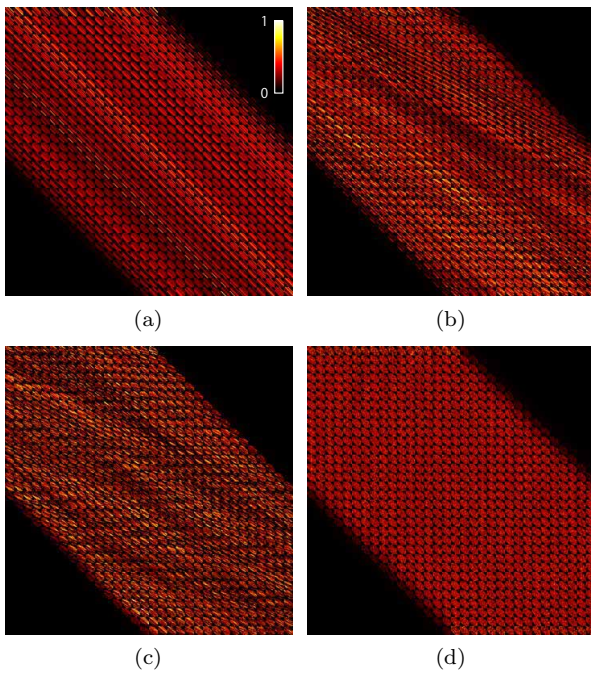


図 3 観測行列 (SD=1.0):(a) 単層系 (b) 多段系 (2 枚)(c) 多段系 (4 枚)(d) 理想系

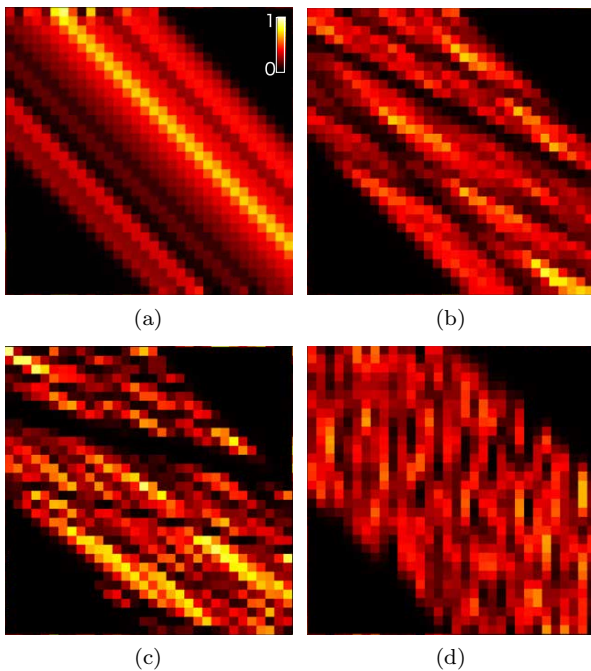


図 4 図 3 部分拡大図 (SD=1.0):(a) 単層系 (b) 多段系 (2 枚)(c) 多段系 (4 枚)(d) 理想系

も異なった構造となる。多段系 (b)(c) には中間的な性質を持ち、擬似的に理想系のような列ベクトル低相関性が確認できる。

4.3 超解像イメージングによる多段符号化開口の効果検証

次に、具体的な被写体の例を想定し、その場合の超解像イメージングによる多段符号化開口の効果を検証した。本実験では、被写体の輝度画像の例として図 5 の 2 枚の画像

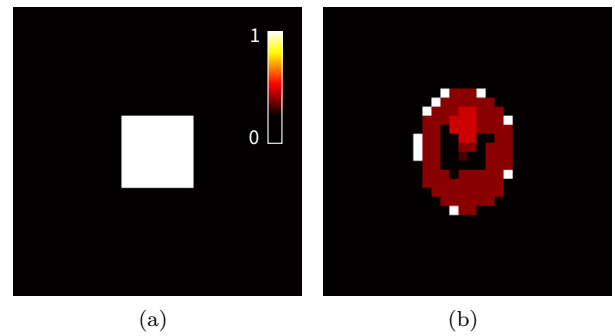


図 5 被写体の 32×32 画素の場合の真値:(a) 正方形 (b) Shepp-Logan phantom

を用いる。どちらも 32×32 画素であり、図 5(a) は正方形、図 5(b) は Shepp-Logan phantom である。まず、表 4 における SD=1.0 の観測行列を用い、 16×16 画素のイメージセンサによる計測を想定した場合の 2×2 倍の超解像画像再構成を検証した。結果をそれぞれ図 6、図 7 に示す。図は、左の列から、単層系、二段符号化開口系、四段符号化開口系に対応し、上の行から計測符号化画像、ノイズがない場合の再構成結果、30dB の加法性ホワイトガウスノイズを印加した場合の再構成結果に対応する。まず観測画像に注目すると図 6、図 7 のどちらの結果に対しても単層系に比べて開口を多段化するほど空間情報が強く特徴づいた超解像情報となっている。また、再構成画像の PSNR で比較する。図 6 の結果に注目すると、ノイズがない場合は多段系 4 段、単層系、多段系 2 段の順に値が大きくなり、ノイズがある場合は単層系よりも多段系の方が値が大きく、再構成画質が良い。続いて図 7 の結果に注目するとノイズの有無に関わらず単層系よりも多段系の方が値が大きく、再構成画質が高い。結論として、圧縮超解像イメージングの効果は対象依存するが光学系全体の微小開口の数と光学系の薄さを固定した条件下であっても、少なくとも本実験で行った 4 段までの段数に対しては、開口の多段化により 2×2 倍解像度の超解像画像再構成を高精度化できることが明らかとなった。

続いて、より挑戦的なパラメータとして、 4×4 倍の超解像について同一対象のイメージング結果を検証した。 32×32 画素の計測画像から、 128×128 画素の画像を超解像再構成した。被写体 128×128 画素の画像は図 8 の Shepp-Logan phantom を用いた。 32×32 画素の物体画像真値を図 9(a)、計測画像を図 9(b)、比較対象として Bicubic 補間による 4×4 倍のアップサンプリング結果を図 9(c)、4 段符号化開口系を用いた超解像再構成結果を図 9(d) に示す。計測条件として、回折ボケについては SD=1.0、ノイズ印加は 40dB と設定した。図 9(c) の補間画像には計測過程で欠落するサブピクセル情報が復元されないが、図 9(b) の符号化計測画像には情報が符号化されて計測される。そのため、図 9(d) の再構成画像から確認されるように、多段符号化

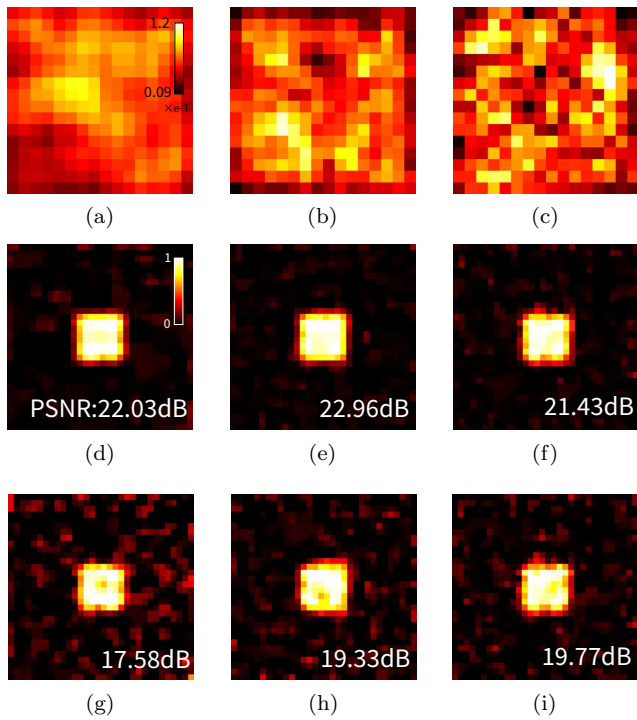


図 6 図 5(a)2 × 2 倍超解像イメージング結果: (a)–(c) 符号化計測画像 (16 × 16), (d)–(f) ノイズなし再構成画像, (g)–(i) 30dB ノイズ印加時再構成画像. 左列から単層系, 2 段符号化開口系, 4 段符号化開口系の結果に対応

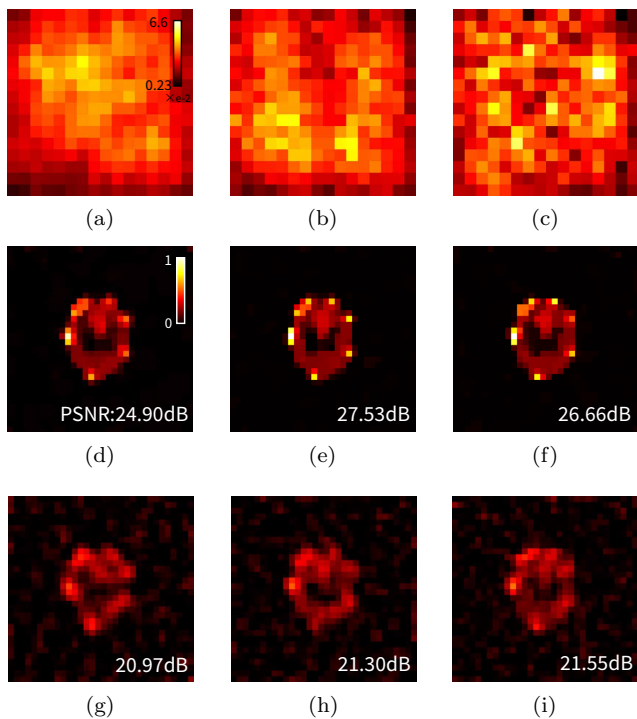


図 7 図 5(b)2 × 2 倍超解像イメージング結果: (a)–(c) 符号化計測画像 (16 × 16), (d)–(f) ノイズなし再構成画像, (g)–(i) 30dB ノイズ印加時再構成画像. 左列から単層系, 2 段符号化開口系, 4 段符号化開口系の結果に対応

開口による圧縮超解像イメージングの方が補間法よりも物体真値に視覚的に近い画像が再構成できており, PSNR も 4.0dB 向上した.

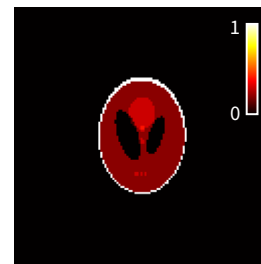


図 8 Shepp-Logan phantom の 128 × 128 画素の場合の真値

5. おわりに

本論文では圧縮超解像イメージングにおける符号化開口の多段化を提案し, それが光学系全体の微小開口の数や光学系薄さを犠牲にせず, 観測行列のコヒーレンス値抑制や再構成画像の画質改善の観点から効果があることを数値実験で明らかにした. 光学実験による原理実証, 及び符号化開口以外の実装法の検討が今後の課題である.

謝辞

本研究は JST 創発的研究支援事業 (JPMJFR206K) の助成を受け実施された.

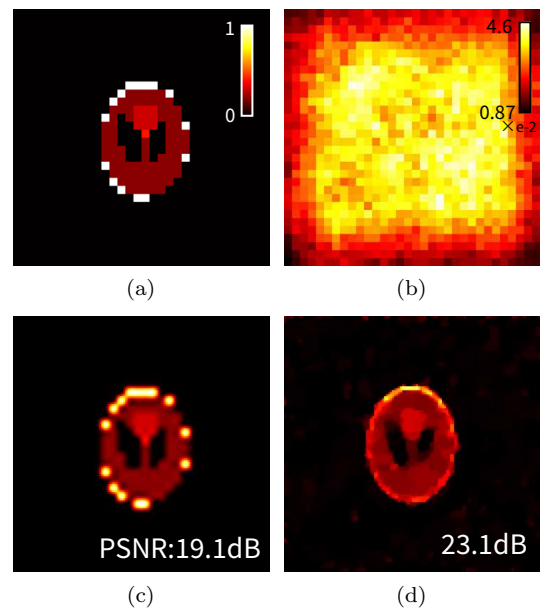


図 9 4 × 4 倍超解像イメージング結果:(a)–(b) 真値及び観測画像 (32 × 32), (c) Bicubic 補間結果, 及び (d) 4 段符号化開口系による再構成結果

参考文献

- [1] Park, S. C., Park, M. K. and Kang, M. G.: Super-resolution image reconstruction: a technical overview, *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 20, No. 3, pp. 21–36 (online), DOI: 10.1109/MSP.2003.1203207 (2003).
- [2] 田中正行, 奥富正敏: 画素数の壁を打ち破る複数画像からの超解像技術, *映像情報メディア学会誌*, Vol. 62, No. 3, pp. 337–342 (2008).

- [3] 厚木七恵, 永田明德ほか: 超解像技術による画像拡大の検討, マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2011 論文集, Vol. 2011, pp. 1043–1048 (2011).
- [4] 青木伸: 複数のデジタル画像データによる超解像処理, *Ricoh Technical Report*, Vol. 24, pp. 19–25 (1998).
- [5] Dong, C., Loy, C. C., He, K. and Tang, X.: Learning a deep convolutional network for image super-resolution, *European Conference on Computer Vision*, Springer, pp. 184–199 (2014).
- [6] Sajjadi, M. S., Scholkopf, B. and Hirsch, M.: Enhancenet: Single image super-resolution through automated texture synthesis, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 4491–4500 (2017).
- [7] Cai, D., Chen, K., Qian, Y. and Kämäräinen, J.-K.: Convolutional low-resolution fine-grained classification, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 119, pp. 166–171 (2019).
- [8] Lepora, N. F. and Ward-Cherrier, B.: Superresolution with an optical tactile sensor, *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, pp. 2686–2691 (2015).
- [9] Monakhova, K., Yanny, K., Aggarwal, N. and Waller, L.: Spectral DiffuserCam: Lensless snapshot hyperspectral imaging with a spectral filter array, *Optica*, Vol. 7, No. 10, pp. 1298–1307 (2020).
- [10] Donoho, D. L.: Compressed sensing, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 52, No. 4, pp. 1289–1306 (2006).
- [11] Ashok, A. and Neifeld, M. A.: Pseudorandom phase masks for superresolution imaging from subpixel shifting, *Applied Optics*, Vol. 46, No. 12, pp. 2256–2268 (2007).
- [12] 三村和史: 圧縮センシング: 疎情報の再構成とそのアルゴリズム (時間周波数解析の理論とその理工学的応用), 数理解析研究所講究録, Vol. 1803, pp. 26–56 (2012).
- [13] 酒井智弥: 圧縮センシングの基礎原理と画像再構成アルゴリズムの進歩, *Medical Imaging Technology*, Vol. 34, No. 4, pp. 177–185 (2016).
- [14] J.W.Goodman: Introduction to Fourier Optics, *McGraw-Hill* (1996).
- [15] Chen, S. S., Donoho, D. L. and Saunders, M. A.: Atomic decomposition by basis pursuit, *SIAM Review*, Vol. 43, No. 1, pp. 129–159 (2001).
- [16] Candes, E. and Romberg, J.: Sparsity and incoherence in compressive sampling, *Inverse Problems*, Vol. 23, No. 3, p. 969 (2007).
- [17] Chambolle, A.: An algorithm for total variation minimization and applications, *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, Vol. 20, No. 1, pp. 89–97 (2004).
- [18] Rudin, L. I., Osher, S. and Fatemi, E.: Nonlinear total variation based noise removal algorithms, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 60, No. 1–4, pp. 259–268 (1992).
- [19] Bioucas-Dias, J. M. and Figueiredo, M. A.: A new TwIST: Two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration, *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 16, No. 12, pp. 2992–3004 (2007).