

超解像のための画素形状のコード化に関する研究

笹尾 朋貴^{†1} 日浦 慎作^{†2} 佐藤 宏介^{†1}

本研究では、撮像素子の各画素形状をコード化することで超解像を高性能化する手法を提案する。従来の研究では撮像素子の各画素が矩形（正方形）であることを前提としている。そのため、各画素のサンプリングは点サンプリングではなく正方形の畳み込みによって原画像の高周波成分が失われることになる。そこで本研究では、撮像素子の上に細かい黒色粉末等を振りかけることで各画素のサンプリング関数（受光分布）のランダムなコード化を行い、正方形の畳み込みによる原画像の高周波成分の損失を低減する手法を提案する。またさらに、この手法の効果を評価するためにシミュレーションを行った。

Research on Encoding Pixel Shape for Super-Resolution

TOMOKI SASAO,^{†1} SHINSAKU HIURA^{†2} and KOSUKE SATO^{†1}

We propose a technique for improving the performance of super-resolution by encoding the shape of each pixel on the image sensor. Sampling of each pixel is not a point sampling but a rectangular, and the high frequency component of the original image is lost by the convolution of pixel area. Therefore, we propose a random encoding of the sampling function of each pixel (sensitivity distribution) by sprinkling fine black powder on the image sensor to decrease the loss of the high frequency component of the original image. Moreover, we performed simulation to evaluate the effectiveness of this approach.

^{†1} 大阪大学大学院基礎工学研究科

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

^{†2} 広島市立大学情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University

1. はじめに

近年、CCD や CMOS センサなどの撮像素子の微細化が進んでおり、コンパクトデジタルカメラや携帯電話搭載のカメラなどの小型のカメラでも解像度が飛躍的に向上している。しかし CCD などの撮像素子はピクセル数が大きくなるほど読み出しに時間がかかる、感度が低下するためぶれやすくなるなどの問題があり、動物体の撮影が困難になる。この問題の一つの解決法としてピクセル数の小さい撮像素系を用いて撮影し、超解像によりセンサの解像度以上の高解像度画像を得ることが望まれる。

ここで、撮像素子のそれぞれのピクセルが点サンプリングの場合、サンプリング定理よりそのサンプル点の密度によって取り込むことができる空間周波数が決定される。そこで像を僅かにずらして何度も撮影することでサブピクセル単位で異なる画像をキャプチャーし、サンプル点の密度を上げるのがマルチフレーム超解像の考え方である。しかし実際の撮像素子の受光セルが点ではなく面積を持っているため、各ピクセルのサンプリングは有限の面積内の平均となってしまう。そのため図 1(a) に示すように正方形の畳み込みによって原画像の高周波成分が失われることになる。つまり原画像の高周波成分が失われた画像に対して超解像を行うことになるため、従来研究では失われた情報を何らかの先験的知識を用いて推定することで解像度を向上させることになる。ただしこの方法では、入力画像が仮定と異なっていると生成された高解像度画像は誤ったものになってしまう。

そこで本稿では、従来手法が積分区間全体について一様に積分していたことに対し、図 1(b) のように一様に積分しないことで、情報ができるだけ画像上に残存するようにする方法を提案する。これをコード化（符号化）と呼び、本研究では撮像素子のそれぞれの画素形状をコード化し、高周波成分の損失を防いで超解像を行うことに対応する。コード化の方法として撮像素子の上に細かい黒色粉末を振りかけて受光分布をランダムにコード化する手法を提案する。コード化を行うと一部の光を遮断することになり、それにより露光量が減少することが問題点としてしばしば指摘される。しかし全区間を一様に積分する方法では必ず高周波成分の損失が発生するため、コード化により光量を少し減らしながらも高周波成分の損失を防ぐことにより、超解像による解像度の向上をさらに高めることを目的とする。

2. 関連研究

超解像に関する研究は、対象となる 1 枚の画像のみを用いて空間解像度を向上させる手法^{1),2)} と、動画像などの複数の画像を用いて空間解像度を向上させる手法^{3),4)} に大別でき

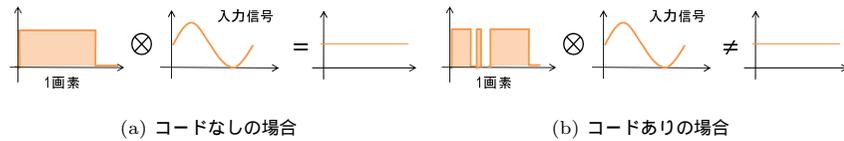


図 1 撮像素子における畳み込み演算

る．前者を Single Frame 超解像，後者を Multi Frame 超解像と呼ぶことにする．本章では関連分野における研究を紹介し，本研究の位置づけを明らかにする．

2.1 Single Frame 超解像

1 枚の画像のみを用いる手法では，最近傍補間やバイリニア補間などのように，隣接するピクセル値や周辺のピクセル値の統計量を利用して補間するピクセル値を決定し，空間解像度を向上させる．これらの手法は，平滑化を行うことが基本となるため，生成される画像はエッジ部分や画像の細部でぼけてしまい鮮明さに欠けるという問題がある．川合ら¹⁾は画像を切り出す局所ウィンドウの大きさを変えながら固有ベクトルを生成した場合に，この固有ベクトルがほとんど変化しない性質を利用して空間解像度を向上させる手法を提案している．また Hong ら²⁾は，画像の局所的な統計量を用いた手法を提案している．このようなアプローチは計算コストが低いという特長があるが，一般に複数の画像から空間解像度を向上させる手法に比べて空間解像度の向上効果は低い．

2.2 Multi Frame 超解像

対象物体に対するサンプリング点の位置が少しずつずれた複数の観測画像を対象画像にサブピクセル精度で対応付けることで高解像度画像のピクセル値を推定し，空間解像度を向上させる．Nayar ら³⁾は画像間の幾何学的な位置ずれを既知とするために，撮像素子の位置を制御可能な特殊なカメラを用いた提案している．また Raskar ら⁴⁾は，開口部にマスクを置きさらに故意にボケを与えることで観測画像のわずかなピクセルの変位を得る手法を提案しているが，このような特殊な機器を用いない場合は画像間の対応関係を求める必要がある．

2.3 画素形状に関する研究

コード化に関連する超解像研究の一つに組合せ画素混合を利用した田中らの手法⁵⁾がある．組合せ画素混合では，一度の撮影で 9 画素混合画像と間引き読み出し画像を生成するが，前者はエイリアシングの影響が弱い画像，後者はエイリアシングの影響が強い画像となる．超解像において，位置合わせ処理にエイリアシングの影響は好ましくなく，再構成処理ではエイリアシングの影響を利用して高解像度画像を再構成しているため，画素混合画像を位

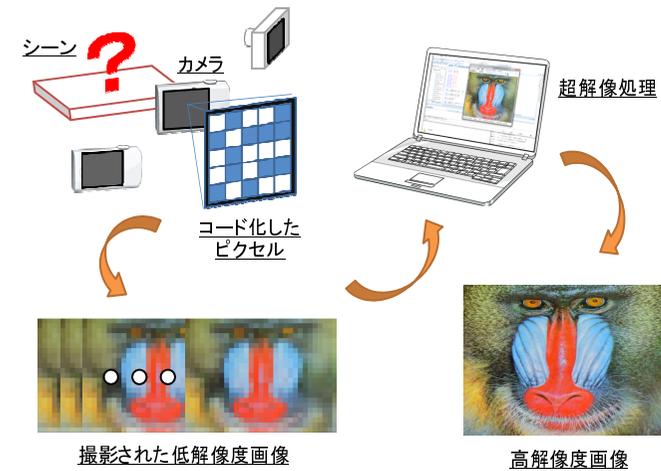


図 2 提案システムの流れ

置合わせ処理に利用し，間引き読み出し画像を再構成処理に利用して効果的な超解像処理を行っている．しかし，間引き読み出し画像は九つのピクセルの代表ピクセル値として一つのピクセルのみを読み出すため，9 ピクセル全体から見ると 1/9 の受光量となってしまう，撮影された画像のノイズが増加しやすいという問題がある．これは，後に述べる実験において撮像素子のそれぞれの画素形状をピンホールコードによりコード化した場合と同様であり，そのため，ノイズの多い間引き読み出し画像を使用した再構成処理では，超解像画像の精度が落ちることを示す．

2.4 本研究の位置づけ

本章で紹介した全ての研究では撮像素子における各ピクセルを矩形（正方形）のまま扱っているため，原画像の高周波成分が失われた画像に対して超解像を行っていることになる．そこで本研究では，撮像素子における画素形状をコード化することで各ピクセルのサンプリング関数（受光分布）のコード化を行い，正方形の畳み込みによる原画像の高周波成分の損失を低減させ，超解像を行うことを目的とする．

3. 画素形状のコード化による超解像処理

本稿では，撮像素子における画素形状をコード化することで複数の低解像度画像から高解

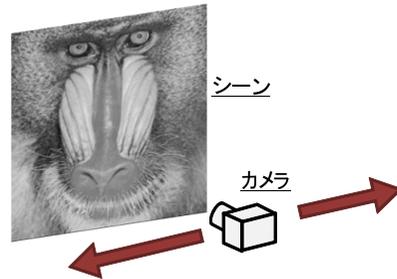


図3 カメラの動きを横移動のみにした場合

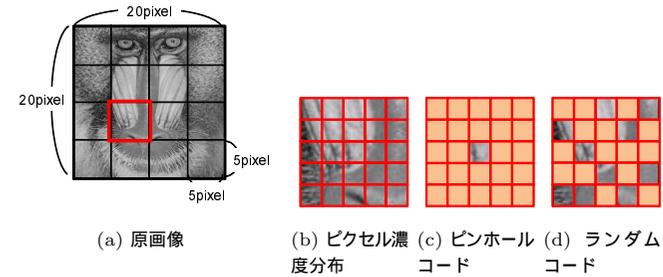


図4 コードによって得られる情報の違い

像度画像を推定する手法を提案する．撮像素子の上に細かい黒色粉末を振りかけてランダムにコード化することで各ピクセルのサンプリング関数のコード化を行い，正方形の畳み込みによる原画像の高周波成分の損失を低減する．図2に提案システムの流れを示す．

3.1 コードと原画像の情報損失との関係

超解像においてカメラから入力される画像は必ずしも望ましいサンプル点配置を持つとは限らない．たとえば，カメラの動きを図3のように横方向に制限した場合のことを考える．

ここで例として，原画像を 20×20 の解像度とし，カメラの1ピクセルは原画像の 5×5 に対応するものとする．図4(a)の赤枠を拡大したものを(b)とし，撮像素子をそれぞれコード化したものによる受光分布を表したものを(c)，(d)とする．

まず(b)はコード化していない一般的なカメラと同様の撮像素子で，このまま横にずらし画像をキャプチャーしていくと原画像のすべてのピクセルを通過することができるが，先に述べたようにピクセルの幅に対応した高周波成分が失われることになる．それに対し(c)のピンホールコードの撮像素子では，積分範囲が小さいために高周波成分が残りやすいが，このまま横にずらし画像をキャプチャーしていくと，3行目以外の原画像の情報を得ることができない．つまり(b)，(c)の方法では縦方向の解像度を向上させることができない．そこで(d)のようにランダムにコード化した撮像素子を用いてキャプチャーすることで，高周波成分の損失を減らしながらも，原画像のすべてのピクセルを通過することができ，かつ(b)，(c)に比べて情報損失の少ない観測画像が得られると考えられる．よって，カメラの動きが横や斜めなどに制限された場合，ランダムにコード化した撮像素子を用いる意義は大きい．

3.2 Richardson-Lucy deconvolution

本研究では既存の超解像アルゴリズムの一つである Richardson-Lucy deconvolution (以

下 RL 法)を用いて超解像を行う．

RL法は，既知のPSFによって畳み込まれた原画像を復元するための反復処理である． p_{ij} をPSF， u_j をピクセル位置jにおける原画像のピクセル値， d_i を観測された画像のピクセル位置iにおけるピクセル値としたとき，観測画像 d_i は

$$d_i = \sum_j p_{ij} u_j \quad (1)$$

のように表すことができる．基本的な考えは， d_i が観測され p_{ij} が既知であるときに尤も確からしい u_j を推定するものである．ここから，

$$u_j^{(t+1)} = u_j^{(t)} \sum_i \frac{d_i}{c_i} p_{ij} \quad (2)$$

ただし，

$$c_i = \sum_j p_{ij} u_j^{(t)} \quad (3)$$

として，反復的に u_j を求めることができる．初期高解像度画像 $u_j^{(0)}$ は任意の値でよく，式(3)による推定観測画像 c_i と観測画像 d_i との比から式(3)のように高解像度画像を求めることになる．この反復が収束すれば高解像度画像 u_j の最尤解に収束することが経験的に示されている．

PSFである p_{ij} が一つ以上の未知パラメータに依存する問題では，RL法を利用することができないため，より一般的なアルゴリズムであるEMアルゴリズムによりこの種の問題

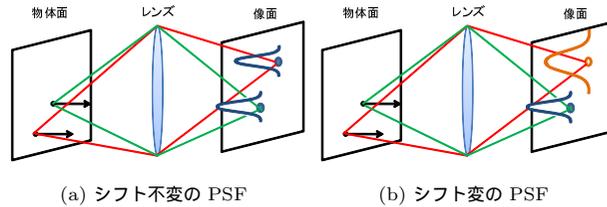


図 5 シフト変化における PSF

の解法を示しているが、本研究では p_{ij} がコードにあたり、その値は既知となるため RL 法を利用することができる。

3.3 コードにおけるシフト不変とシフト変

一般的な撮像素子ですべて同じ輝度値を持つ点光源を受光した場合、図 5 のようにすべて同じ PSF となる。本稿ではこのようなコードをシフト不変と呼び、後で述べるピンホールコードのように撮像素子のそれぞれのピクセルに対してすべて同じコードとなるものがシフト不変となる。これに対し、撮像素子全体をランダムにコード化した場合は図 5 のように各ピクセルにおける PSF が異なる値となり、このようなコードをシフト変（時刻に関するシステムの時変に相当）と呼ぶ。シフト不変なコードでは PSF がすべて同じなため、PSF の総和 $\sum_j p_{ij}$ が一定の値となる。

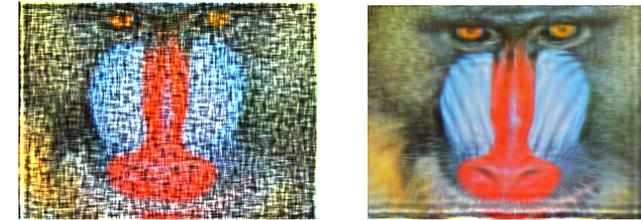
しかし、RL 法では PSF がシフト不変であることを仮定しており、シフト変な PSF で RL 法を行うと図 6(a) のようになる。これは撮像素子全体をランダムにコード化した場合の結果であり、不自然なアーチファクトが発生し、復元画像が劣化していることが分かる。そこでシフト変な PSF を用いての高解像度画像の推定も行えるように、RL 法を拡張する。

3.4 RL 法の拡張

RL 法による高解像度画像の推定において、理想的な推定結果は原画像と同一のものである。このとき、推定した高解像度画像から式 (3) で生成した観測画像 c_i は実際に観測された画像 d_i とまったく同じものになっているはずである。つまり、 $d_i = c_i$ となるため、次の式 (4) が言える。

$$\frac{d_i}{c_i} = 1 \quad (4)$$

このとき



(a) 拡張する前の RL 法を使用した場合 (b) 拡張した RL 法を使用した場合

図 6 シフト変な観測画像の超解像結果

となり、復元画像 u_j は更新する必要がないため式 (6) のようになる必要がある。

$$\sum_i p_{ij} = 1 \quad (6)$$

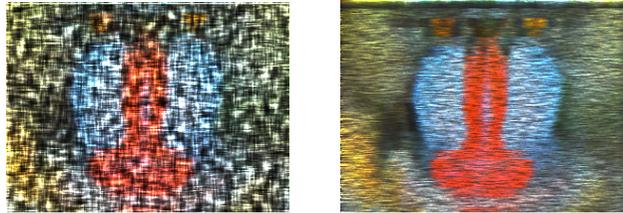
しかし、シフト不変な PSF の場合では式 (6) は成り立つが、シフト変の PSF の場合では成り立たない。そこで、RL 法を拡張して (7) のように再定義し、シフト変の PSF の場合においても式 (6) が成立するようにする。

$$u_j^{(t+1)} = u_j^{(t)} \sum_i \frac{d_i}{c_i} \frac{p_{ij}}{\sum_i p_{ij}} = \frac{1}{\sum_i p_{ij}} u_j^{(t)} \sum_i \frac{d_i}{c_i} p_{ij} \quad (7)$$

さらに、ゼロ除算を防ぐため式 (8) のように分子・分母に定数 $Const$ を足し合わせる。

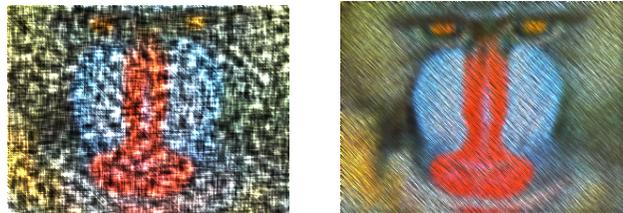
$$u_j^{(t+1)} = \frac{1}{\sum_i p_{ij}} u_j^{(t)} \sum_i \frac{d_i + Const}{c_i + Const} p_{ij} \quad (8)$$

式 (8) はゼロ除算を防ぐだけでなく、推定画像 c_i と観測画像 d_i の黒色成分が大きくそれぞれのピクセル値が 0 に近くなるときにも、 $\frac{d_i}{c_i}$ が小さすぎる、または大きすぎる値になることを防ぐことができる。本研究では、定数 $Const = 10$ とした。このように RL 法を拡張したとき、図 6(a) と同様の条件でシフト変な PSF に対し超解像を行った結果を図 6(b) に示す。これより図 6(a) に比べて不自然なアーチファクトがなくなり、復元画像の劣化を抑えていることが分かる。よって、シフト変な PSF に対しても RL 法の使用が可能となる。



(a) 拡張前の RL 法を使用した場合 (b) 拡張した RL 法を使用した場合

図 7 カメラの移動方向を横方向のみに制限した場合の超解像結果



(a) 拡張前の RL 法を使用した場合 (b) 拡張した RL 法を使用した場合

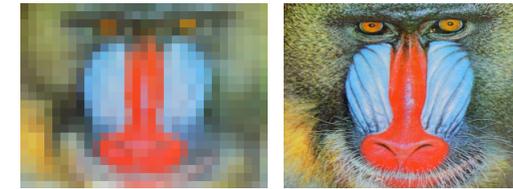
図 8 カメラの移動方向を斜め方向のみ制限した場合の超解像結果

また、カメラの移動方向を制限し、観測画像の枚数が減っている場合でも同様に拡張した RL 法を使用することができる。図 7, 8 に撮像素子全体をランダムにコード化した場合におけるカメラの移動方向を横、または斜めに制限した場合の超解像結果を示す。これより、カメラの移動方向を制限した場合においても高解像度画像を推定でき、RL 法を拡張する前に比べても精度が上がっていることが確認できた。

4. シミュレーション実験

提案手法を実機で行うためには、まず撮像素子の上に細かい黒色粉末（レーザプリンタのトナーなど）を振りかけて各画素形状をランダムにコード化が必要があるが、本研究ではまず提案手法により高解像度画像が得られるか以下のシミュレーション実験を行い、さらにランダムコードの有効性についても調べる。

- 異なるコードにおける超解像結果の評価
- 異なるノイズにおける超解像結果の評価



(a) 低解像度画像 (b) 高解像度画像

図 9 超解像の使用画像（低解像度画像）と目的画像（高解像度画像）

4.1 超解像のシミュレーション

提案手法を用いて、図 9(a) のような観測画像から高解像度画像 (b) を推定するシミュレーション実験を行った。ただし、図 9(a) は撮像素子の画素形状をコード化していない場合の観測画像であり、コード化したときに得られる観測画像はこれとは異なる。本稿では、画素値は 8bit フルスケール RGB とする。実験ではカメラを水平、および垂直方向にそれぞれ 0.1 ピクセルずつ移動させ、100 枚の観測画像を撮影した場合を仮定してシミュレーションを行った。

4.2 コードの種類

シミュレーションは図 10 の 6 種類のコードを使用して行った。これは撮像素子の各ピクセルを 10×10 のサブピクセルに分割して考え、その各ピクセルをコード化したものである。

図 10 のコードについて表 1 に示す。本研究ではランダムコードを提案するが、黒色粉末の量や位置によってランダムなコードにも種類が分かれるため、図 10(c),(d),(e) のように 3 種類のランダムコードを用意した。また PSF は点光源を置いて検出器で検出した時の計測データに相当するものであり、2 次元のガウス関数で近似されることが多いため、図 10(f) のように分散 3.0 のガウスコードを作成した。

4.3 ノイズの付加とコードに対応するノイズ量の変化

本研究では観測画像に対してガウスノイズを重畳した。また撮像素子の画素形状をコード化すると一部の光を遮断することになり、それにより露光量が減少することから相対的にノイズも増加する。つまり、コードの種類によっても観測画像におけるノイズ量を変化させる必要がある。実験では PSF の総和 $\sum_j p_{ij}$ を 1 に正規化しているため、撮像素子の 1 ピクセルの大きさに対して通過する光量が少ないほどそれに反比例して大きくなるような係数 C_{noise} を定義し、ガウスノイズの標準偏差に乘じることでコードによってノイズを変化さ

表 1 コードの種類

コード名	図番号	コードの内容
no_code	図 10(a)	コード化を行っていない一般の撮像素子
pinhole	図 10(b)	10 × 10 のうち 1 サブピクセルのみ光を通すコード
rand_all	図 10(c)	撮像素子全体で各サブピクセルの通過光量をランダムにコード化したコード
rand_part	図 10(d)	ランダムコードであるが各ピクセルの通過光量配置が同一であるコード
rand_pos	図 10(e)	通過光量を一定にし黒色粉末の位置のみをランダムにしたコード
gauss	図 10(f)	ピクセルの中心が最も光を通すようにガウス分布でコード化したコード

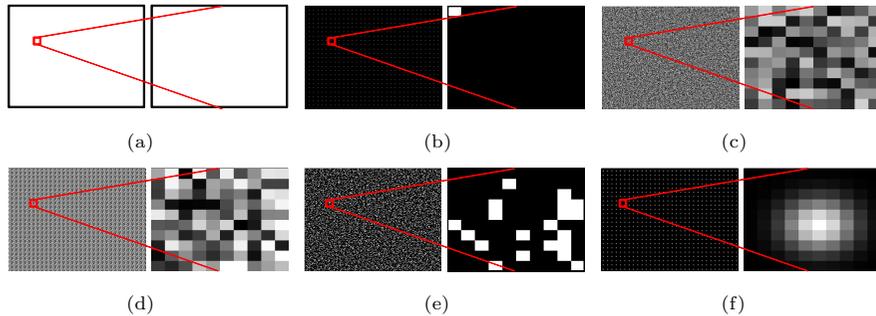


図 10 コードの種類

せる．例えば 1 ピクセルの分割数を N としたとき (実験では $N=100$)，ピンホールコードの場合 $C_{noise} = 1$ とし，コードなしの場合は光が遮断されることがないため $C_{noise} = \frac{1}{N}$ とする．

4.4 結果と考察

表 2, 3 に表 1 で示したそれぞれのコードを用いて作成した超解像画像の拡大画像を示す．また図 11 は各コードにおける PSNR の最大値をノイズの大小で比較したものとなり，表 2, 3 にもその PSNR の値を記す．ただし，ノイズは平均 0 のガウス分布で近似し，標準偏差 1.0 のときをノイズ小，標準偏差 20.0 のときをノイズ大とする．

カメラを水平，および垂直方向に移動させた場合，ノイズ小のときは図 11 よりコード「pinhole」がもっとも PSNR が高いことがわかる．しかしノイズ大の場合では，コード「pinhole」がもっとも PSNR が小さくなっており，これは，ピンホールを通る光がごくわずかにしかならないために各ピクセルへの入射光量が少なくノイズの割合が大きくなるのが原因と考えられる．ここで 6 種類のコードにおいてコード「rand_pos」がノイズ大の

表 2 画素形状のコード化による超解像シミュレーションの結果 (1)

	マンダリル画像	
目標画像		
ガウスノイズの大小	ノイズ小	ノイズ大
no_code		
PSNR	23.476464	23.475282
pinhole		
PSNR	48.14048	22.231937
rand_all		
PSNR	24.271569	24.215759
rand_part		
PSNR	24.213412	24.667714

表 3 画素形状のコード化による超解像シミュレーションの結果 (2)

rand_pos		
PSNR	26.45202	26.311007
gauss		
PSNR	24.678302	24.628668

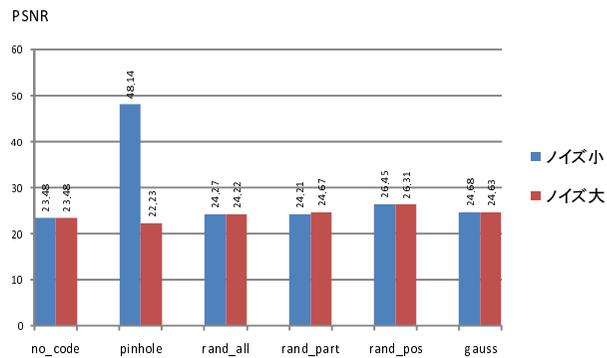


図 11 ノイズ大小における各コードの PSNR の比較

場合でも PSNR が高いことがわかる．特に一般の撮像素子であるコード「no_code」よりも PSNR が高く、期待されたランダムコードによる精度向上が確認できた．

また、コード「rand_pos」における拡大画像では、その他のコードに比べてマンドリルの髭の部分が発明になっていることが確認できる．コード「pinhole」の拡大画像においても髭の部分が発明になっていることが確認できるが、ノイズ大の場合ではノイズが目立つこ

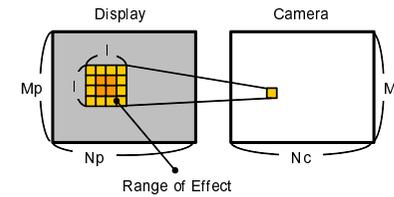


図 12 対応ピクセルを中心に設定する影響領域

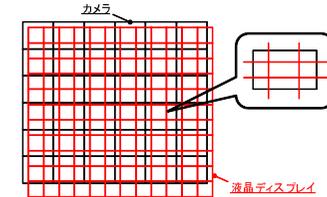


図 13 シーン上における液晶ディスプレイとカメラのピクセルのずれ

ともわかる．

5. 実機への実装に関する考察

本研究の提案システムを実機で実現するため、実装に伴うコードの推定について考察を行う．

5.1 コードの実装

実機で提案システムを確認するために、撮像素子の上に細かい黒色粉末（レーザープリンタのトナーなど）を振りかけて各画素形状をランダムにコード化することを考える．提案システムではコードを既知としているが、このようにコード化を行った場合、ランダムに黒色粉末をのせるためにどのようなコードになるか未知となる．そこでまずコードの推定を行うために、液晶ディスプレイ全体が映るようにカメラを正面に置き、まずグレイコードパターン投影法により液晶ディスプレイとカメラのピクセル間の幾何的な対応関係を求める．次に液晶ディスプレイに点光源を表示させ、それをカメラが受光したときの各カメラピクセルの輝度値からコードを求めるといった方法が考えられる．つまり液晶ディスプレイに点光源を表示させている部分に対応している撮像素子上の点に粉末がのっていれば輝度値は小さくなり、少なれば輝度値は大きくなることから粉末の有無が確認できる．

しかし、液晶ディスプレイに点光源を全ピクセル一つずつ表示させていくのは時間がかかり、さらに液晶ディスプレイの方が解像度が大きいため図 12 のように液晶ディスプレイとカメラの各ピクセルの対応関係が厳密に 1 対 1 対応とは限らない．また、実際は図 13 のように液晶ディスプレイとカメラのピクセルは投影面上で正確に重なっているとは限らないため、そのずれによって、ずれている領域に関しては一つのカメラピクセルが複数の液晶ピクセルからの影響を受けている可能性がある．

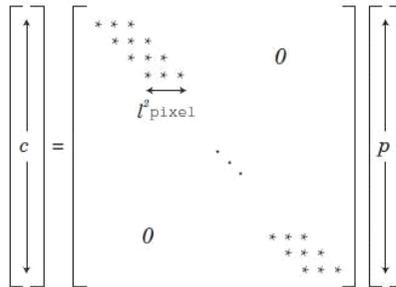


図 14 影響領域設定による疎行列

5.2 グレイコードパターン投影法とドットパターンを用いたコードの推定

液晶ディスプレイの1ピクセルとカメラの1ピクセルが1対1対応しているとき、5.1の方法は時間はかかるがコード推定は行えると考えられる。しかし、先に述べたように一般的には液晶ディスプレイとカメラの解像度は同じとは限らないことに加え、シーン上でそれらがずれている可能性もある。そこで、あるカメラピクセルは図12に示すように、カメラ解像度 $M_c \times N_c$ の中の1ピクセルに対して、液晶解像度 $M_p \times N_p$ の中で対応の取れた液晶ピクセルを中心とするある一定の領域内にある液晶ピクセルからのみ影響を受けるといように仮定し、各カメラピクセルごとに液晶ピクセル上に影響領域を設定する。影響領域外からは影響を受けないため、これに対応する行列の要素は0となる。つまり、影響領域の設定は図14に示すように0にする。コードの計測に当たってはこの行列の0以外の部分に着目する。影響領域の設定により、その領域外からの影響を受けないと考えることができるため、どのカメラピクセルに対応する液晶ディスプレイ上の影響領域においても点灯されている液晶ピクセルが一つに限定されるような、設定された影響領域よりも大きな間隔を取ったドットパターンを用いれば図15のように影響領域内のピクセルに限定することで点灯の中のどのピクセルからの影響かを識別が可能であるため1ピクセルずつ点灯する必要はなく複数のピクセルを同時に点灯することが可能となる。このことにより、投影回数を大幅に削減することができる。また、0要素をデータとして格納する必要はないので、データ量の削減にもつながる。

6. まとめ

本稿では超解像において、従来研究が撮像素子における各ピクセルを矩形（正方形）のま

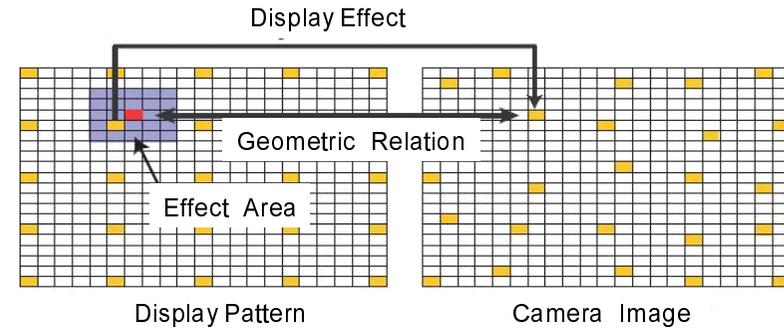


図 15 ドットパターンの投影

まで扱っていることから原画像の高周波成分を損失していることに着目した。各ピクセルのサンプリングが点サンプリングではなく有限の面積によるサンプリングとなっていることが原因で高周波成分を失っていると考え、撮像素子の上に細かい黒色粉末を振りかけて各ピクセルのサンプリング関数のコード化を行い、正方形の畳み込みによる原画像の高周波成分の損失を低減することを提案した。また、シミュレーション実験を通して提案手法の有効性を確認した。

参考文献

- 1) 川合康裕, 天野敏之: 固有空間を用いた bplp による super resolution, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, p.91 (2004).
- 2) M.C.Hong, T.S. and Katsaggelos, A.K.: Iterative regularized image restoration using local constraints, *Proc. IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, pp.145-148 (1997).
- 3) M.Ben-Ezra, A.Z. and Nayar, S.K.: Jitter camera: High resolution video from a low resolution detector, *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.135-142 (2004).
- 4) Mohan, A., Huang, X., Tumblin, J. and Raskar, R.: Sensing increased image resolution using aperture masks, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008*, pp.1-8 (2008).
- 5) 田中正行, 奥富正敏: 組合せ画素混合を利用した超解像処理, 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.90, No.8, pp.1948-1956 (2007).