ナイキスト周波数以上の2次元画像再現の理論とシミュレーション

非会員 木村 孝之 (茨城大学)

非会員 高塚 昇 (茨城大学)

非会員 荒野 隆則 (茨城大学)

正員 白木 廣光 (茨城大学)

Principle and Simulation for Reconstruction of Two-dimensional Image beyond Nyquist Frequency

Takayuki Kimura, Non-member, Noboru Takatsuka, Non-member, Takanori Arano, Non-member, Hiromitsu Shiraki, Member (Ibaraki University)

Principles of the two-dimensional image reproduction including frequency components higher than Nyquist frequency of an image sensor were considered, and resolution progress of an image sensor by digital signal processing was simulated on computer. Simulated imaging device is the two-dimensional (area) image sensor. After the simulation, it is difficult to find the differences between the original and the reproduced image by the naked eye. The reproduced images that have frequency components twice higher than Nyquist frequency were successfully obtained. Using this method, it is possible to enhance the resolution of conventional image sensor twice as high as its inherent resolution without any modification to the image sensor.

キーワード：イメージセンサ、高解像度化、デジタル信号処理、ナイキスト周波数

1. ま え が き

CCD (Charge Coupled Device) イメージセンサは商業的に成功し、その画素数は今や数百万画素になった。近年のマルチメディア指向により、さらに高解像度な撮像素子が求められてきている。これまで、撮像素子の高解像度化は主に画素サイズの微細化によって実現されてきた。しかし、画像を CCD 等のイメージセンサで取り込む場合、画素サイズの減少は蓄積電荷数を減少させ、結果的に画質低下を引き起こす。撮像面積が一定である場合、解像度と画質はトレードオフの関係を持っている。このような画素サイズの微細化による撮像素子の高解像度化には限界が見えている。

画素サイズの微細化にともなう蓄積電荷を補償する方法として、信号読み出し回路上部への光電変換膜の積層⁽¹⁾やレンズアレイがある。このような方法により開口率を上げることが可能である。しかし、たとえ開口率が100%となったとしても、画素サイズが小さくなると受光部の面積が減り、光電変換膜に低雑音な増幅機能を持たせない限り、画素サイズ縮小時の画質劣化は避けられない。そこで、従来の高解像度化とは異なる、全く新しい手法の開発が急務である。

木内他は光学フィルタ、デジタル信号処理を用いた新しい方法による高解像度化を提案した⁽²⁾⁽³⁾。木内他の提案で注目すべき点はイメージセンサに手を加えず、その撮像可能な解像度よりもさらに高い解像度の撮像ができることである。ただし、これらは1次元画像に対してのみ適用できるものである。木内他の研究ではシミュレーションにより、1次元画像での高解像度化が議論された。そのシミュレーションは実際の画像を用いるのではなく、サーキュラーゾーンプレート (CZP) よりもさらに簡略化された1次元の縞状のパターンによる物であった。このことから、シミュレーション段階における画像の高解像度化の評価は十分では無いと考えられる。また、CZP を入力画像として高解像度化の実験は行われているが、その方法は実際の画像に高解像度化に適用できる方法では無く、結果も高解像度化の確認をできる物では無かった⁽²⁾。1次元画像の処理の方法と2次元の画像に対する処理は全く異なる。それは2次元画像の場合、エリアシング発生の仕方が1次元画像の場合より複雑になるためである。このため、2次元画像の高解像度化をデジタル信号処理により行うためには理論の構築とその検証を行うためのシミュレーション方法の確立が不可欠である。

本研究では、木内他が行っていない、2次元画像を高解

図 1 1次元撮像素子における、デジタル信号処理を用いたナイキスト周波数以上の解像度を持つ画像再構成の原理

Fig. 1. Principles of the resolution progress of the image sensor by digital signal processing in the case of linear CCD.

像度化するための理論を構築し、その検証のためにシミュレーションを行い、イメージセンサのナイキスト周波数よりも高い空間周波数を持つ画像を再現することを第1の目的とする。さらに将来の、デバイスを用いた実験に使用可能な撮像後のデジタル信号処理システムを構築し、これによって光学フィルタとデジタル信号処理を使用する方式の利点、欠点を解析可能にすることが第2の目的である。本論文ではまず、木内他の提案した1次元画像を高解像度化する理論を2次元に適用するための理論を構築する。続いて、この理論を基にFFT（高速フーリエ変換）、IFFT（逆高速フーリエ変換）、光学フィルタをシミュレートするデジタルフィルタ、そしてサンプリングモジュール（詳しくは後述）からなるプログラムを作成し、シミュレーションを行う。シミュレーションでは、イメージセンサのナイキスト周波数より2倍高い空間周波数を含む画像を再構成する。そして、再構成された画像と原画像の比較から、ナイキスト周波数の2倍の空間周波数を持つ画像の、再構成の可能性を実証する。

2. 1次元画像の高解像度化原理

1次元画像のナイキスト周波数よりも高い周波数成分（以下高周波成分と略す）を復元するための原理を図1に示す⁽²⁾。CCDなどのイメージセンサで画像を撮像する場合、イメージセンサのフォトダイオードセルピッチによって画像は空間的にサンプリングされる。図1(a)に示される周波数成分を持つ画像に対してサンプリングを空間サンプリングレート $\pm f_s$ で行う場合を考える。この画像にはイメージセンサのフォトダイオードセルピッチによって決まるナイキスト周波数（ $\pm f_n$ ）よりも高い空間周波数成分が

含まれている。この画像を何も手を加えず撮像すると、高周波数成分はエリアシングとなり $\pm f_n$ 以下の周波数へ折り返る。従って、画像のナイキスト周波数よりも低い周波数成分（以下低周波成分と略す）と折り返った成分が区別できなくなり高周波成分を復元することはできない。次に高周波成分を復元する原理（高解像度化原理）を説明する。高解像度化原理では、まず入力画像は2つの特性の異なる光学フィルタによりフィルタ処理される。フィルタの特性はLPF（Low Pass Filter：低域通過フィルタ）とBPF（Band Pass Filter：帯域通過フィルタ）である。それぞれの通過域はLPFが $0 \sim f_n$ 、BPFが $f_n \sim f_s$ である。フィルタ処理後の画像は図1(b)、(c)に示されるような、ナイキスト周波数以下のバンド幅の空間周波数成分（ $0 \sim f_n$ 、 $f_n \sim f_s$ ）を持つ2つの画像になる。これらの画像は独立に、 f_s でサンプリングされる（図1(d)、(e)）。サンプリング後、図1(c)にある、低周波成分には、折り返りは起きない（図1(e)）。一方、高周波成分を持つ図1(b)の画像は図1(d)のように、低周波成分に折り返る。この時、BPFにより、低周波成分（ $0 \sim f_n$ ）はすでに除去されているため、高周波成分が折り返っても信号の重なりは生じない。サンプリングされた2つの画像は、FFTにより周波数領域の画像に変換される。周波数成分に変換された画像は、その周波数領域での位置を移動する、つまり $0 \sim f_n$ へ折り返った周波数成分を $f_n \sim f_s$ へ戻すことにより高周波成分を復元することが可能である。この原理から、図1(d)の低い周波数へ折り返った周波数成分は、ナイキスト周波数より高い元の周波数に移動され、図1(e)の低周波成分と合成される（図1(f)）。最後にこれらの復元された周波数成分はIFFTにより空間領域の画像へ変換される。以上の原理から、イ

メーセンサのナイキスト周波数以上の周波数成分を持つ1次元画像を再構成できる。

3. 2次元画像の高解像度化原理

前節で述べた原理を2次元画像に適用するために拡張する。原信号とエリアシングとの関係を式(1)に示す。

$$C'_{mn} = \sum_{t=-\infty}^{\infty} \sum_{u=-\infty}^{\infty} C_{m+tP, n+uQ} \cdots \cdots \cdots (1)$$

C_{mn} はサンプリング前の2次元画像を、そして C'_{mn} はサンプリング後の2次元画像をそれぞれフーリエ級数に展開したさいのフーリエ係数を示す。 P は水平、 Q は垂直の画素数である。 m, n は整数で、それぞれ水平、垂直方向の周波数に対応する。ここで、 C_{mn} が $-P/2 \leq m < P/2, -Q/2 \leq n < Q/2$ の範囲に収まっていないとき(つまり $m < -P/2, P/2 \leq m, n < -Q/2, Q/2 \leq n$ で0でない場合)エリアシングが発生する。図2では、画像が f_{xs} と f_{ys} でサンプリングされたさいに、どのようにナイキスト周波数より高い成分がナイキスト周波数内に折り返るかを領域毎に示している。図2(a)の通り、サンプリング前の画像は水平方向では $-f_{xs}$ から f_{xs} まで、垂直方向では $-f_{ys}$ から f_{ys} までのそれぞれナイキスト周波数の2倍の周波数成分を持つとする。この画像がイメージセンサにより、 f_{xs} と f_{ys} でサンプリングされると、式(2)~(5)の様に折り返りが発生する。

$$A'_1 = A_1 + B_1 + C_1 + D_1 \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$A'_2 = A_2 + B_2 + C_2 + D_2 \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$A'_3 = A_3 + B_3 + C_3 + D_3 \cdots \cdots \cdots (4)$$

$$A'_4 = A_4 + B_4 + C_4 + D_4 \cdots \cdots \cdots (5)$$

この式で A' はサンプリング後に領域Aに現れる周波数成分であり、領域A, B, C, Dはサンプリング前の周波数成分である。(それぞれの領域は図2に示される、1~4の添え字でさらに区別される。)式(2)~(5)では、ナイキスト周波数よりも高い周波数成分(領域B, C, D)がナイキスト周波数よりも低い周波数成分(領域A)に折り返り、サンプリング後の周波数成分(領域 A')にはエリアシングが含まれていることを表している。

ここで、BPFまたはLPFを表1の様に組み合わせ、画像の周波数成分を帯域制限した後に画像をサンプリングすると、図2(c)~(e)の領域B, C, Dはそれぞれ独立に、かつ、重なりなしに領域Aに折り返えされる。つまり、フィルタ特性を変え独立にサンプリングされたこれら4つの画像において、ナイキスト周波数より高い周波数成分は、エリアシングとして領域Aから取り出すことができる。この様に2次元画像に於いてXY方向でフィルタ特性を変え、画像の持つ周波数成分を分割し、そのエリアシング成分が重ならぬようにサンプリングする方法は本研究で初めて提案された。サンプリング後ではナイキスト周波数よりも

表1 エリアシングとして取り出される周波数成分とフィルタとの関係

Table 1. Relationship between characteristics of optical filters and frequency components obtained as aliasing after sampling.

サンプリング後に領域 A に 取り出される領域	X 方向フィルタ	Y 方向フィルタ
A	LPF	LPF
B	BPF	LPF
C	LPF	BPF
D	BPF	BPF

フィルタ特性 (X 方向)		
LPF: 通過帯域	$-f_{xn} \sim 0 \sim f_{xn}$	
BPF: 通過帯域	$-f_{xs} \sim -f_{xn}, f_{xn} \sim f_{xs}$	
フィルタ特性 (Y 方向)		
LPF: 通過帯域	$-f_{yn} \sim 0 \sim f_{yn}$	
BPF: 通過帯域	$-f_{ys} \sim -f_{yn}, f_{yn} \sim f_{ys}$	

高い周波数ではなく、ナイキスト周波数以下の周波数成分のみが含まれるが、情報の欠落はない。続いて、折り返って低くなった周波数を元に戻すため、サンプリングされた画像はFFTにより周波数成分に変換され、それぞれ図2(a)で示されるナイキスト周波数よりも高い元の周波数成分に戻され、サンプリング周波数までの成分を含む一つの周波数領域の画像に再構成される。最後にIFFTにより空間領域の画像に変換され、イメージセンサのナイキスト以上の周波数成分を持つ画像を、折り返し雑音なしで復元することができる。図2では、復元する周波数をナイキスト周波数の2倍迄としているが、式(1)から明らかなように、理論的にさらに高い周波数成分の復元が可能である。ただしその場合には、一度に撮像できる空間周波数のバンド幅はイメージセンサのナイキスト周波数の帯域で決まるため、フィルター処理を含む撮像回数の増加で対処する必要がある。

4. シミュレーション方法

シミュレーション用プログラムの開発とシミュレーションの実行はパーソナルコンピュータ上で行った。全てのシミュレーションプログラムはC++言語により作成した⁽⁴⁾。図3にシミュレーションの概略と各プロセスで生成される画像を示す。図3(a), (b), (c), (g)は空間領域、図3(d), (e), (f)は周波数領域の画像である。入力として用いられる画像(図3(a))は512×512画素からなるデジタル画像で、8 bit グレイスケールとした。(カラー画像に対応するためには画像を3原色(赤, 緑, 青)に分け、各色に対して別な画像と考えて処理を行えばよい。)画像にはCZPと実際に撮像した場合の効果を見るために、デジタルカメラで撮影した景色をモノクロにした画像をそれぞれ用いた。このCZPは512×512画素の画像中心からの距離に応じて空間周波数が高くなり、画像の端部でイメージセンサの空間サンプリング周波数と等しくなるよう設定した。一方、イメージセンサの撮像解像度は256×256画素とした。イメージセンサの画素数を原画像の1/4としたため、原画像はイメージセンサが持つ水平、垂直方向のナイキスト周波数の2

図2 原画像を f_{xs} , f_{ys} でサンプリングしたさいに折り返しの発生する関係

Fig. 2. The relation between the original and replicant image. Area B, C, and D with the same subscript number is aliased to area A.

倍までの空間周波数を持つ画像である。周波数領域の画像は、その複素数の振幅成分を求め、正規化して画像化している。また、画像の周波数の座標は図2と同じとした。つまり、画像中心の周波数が0で画像の端がそれぞれイメージセンサのサンプリング周波数になるようにした。(ただし、図3(d)はサンプリングにより空間周波数がその他の画像に比べて1/2になっているので、イメージセンサのナイキスト周波数までの周波数成分のみ含まれる。)

はじめに原画像は表1の特性を持つ4つのフィルタによりフィルタ処理される。表1の特性を持つLPFとBPFを実現するために、周波数領域でのフィルタ処理を用いた。これは画像をFFTにより周波数成分に変換し、その周波数成分に対して係数(通過帯域では1.0, 阻止帯域では0.0)を掛け、IFFTで空間領域の画像に戻す事によりフィルタ処理を実現する方法である。この方法により、周波数特性を直接制御でき、急峻な遮断特性を実現できる。ただし、このような周波数領域でのフィルタ処理において急峻な遮断特性を実現しようとする場合、ギブス現象(Gibbs phenomena)⁽⁵⁾が生じ、IFFT後の画像にノイズが発生する点に注意する必要がある。フィルタ処理後は、図3(b)の画像が得られる。入力画像として使用されているCZPの特徴から、画像を見ただけでその画像の周波数成分を推定することができる。図3(b)の4枚の画像は右からそれぞれ、図2(a)に

示した領域AからDに対応することが確認できる。

続いて、フィルタ処理された画像(図3(b))は、イメージセンサのサンプリングレートと同じピッチで4回独立にサンプリングされる(図3(c))。イメージセンサによる入力画像のサンプリングは、この512×512画素の原画像において水平、垂直方向にそれぞれ1画素飛ばし読みすることにより実現した。この1画素を読み飛ばす方法ではアパーチャ効果による高域低下を最小限に抑えることができる。

サンプリングの後、画像はFFTにより周波数成分に変換される(図3(d))。この図3(d)に示される周波数成分にはイメージセンサのナイキスト周波数以上の成分は含まれないので、図3(c)のサンプリングによりナイキスト周波数より高い周波数成分が、イメージセンサのナイキスト周波数内へ折り返っていることがわかる。つまり、図3(d)に見られる画像は、エイリアシングとして現れた図3(b)の高周波成分に他ならない。周波数成分に変換された信号は、図3(d)から図3(e)のように移動させることにより周波数を変えることが可能である。よって、図3(e)に示すとおり元の周波数成分に移動の後、画像は周波数領域で図3(f)のように結合される。最後にこの周波数成分はIFFTにより空間領域の画像へ変換される(図3(g))。

プロセス中に用いたフィルタ処理とサンプリング処理は木内他の研究では用いられていない。これらの手法は本研究で

図3 画像再構成プロセスにおける各画像
Fig. 3. Images produced in each process.

図 4 再構成された図の詳細

Fig. 4. Details of reproduce images. (a) Comparison between the original image and the reproduced one. (b) Frequency limited image to Nyquist frequency of image sensor.

初めて画像の高解像度化のシミュレーションに応用された。またこのプロセスにおいて、画像のサンプリング (図 3(c)) までは光学系のシミュレーションにあたる。それ以降の処理はシミュレーションではなく、信号処理プロセスそのものである。ここで光学フィルタとイメージセンサを用意し、この信号処理プロセスを用いればすぐにイメージセンサの高解像度化の実験を行うことが出来る。しかし、本研究では木内他の提案した 1 次元画像の高解像度化の手法を 2 次元画像に適用する理論を新しく構築する事が目的であるので、これら実験については追って報告する。

5. 結果と考察

図 4(a) には原画像と、再構成された画像である図 3(g) の詳細を、図 4(b) にはイメージセンサで撮像可能な空間周波数に帯域制限した CZP をそれぞれ示す。図 4(a) には画像の 1/4 を抽出し、かつイメージセンサのサンプリング周波数に対応する部分の拡大図を左側に示している。この拡大図が CZP の端部 ($2f_n$ の部分) を忠実に再現していることは明らかであり、原画像と再生画像の画質の違いを見いだすことは困難である。また、シミュレーションで設定したイメージセンサの解像度では、図 4(b) に示すように 3/4 の領域で画像が欠落してしまう。図 4(a), (b) を比較すると、イメージセンサで欠落してしまう周波数成分が、本研究の方法を用いることにより、 $2f_n$ まで再構成可能であることが明らかである。なお、図 4(b) の通過帯域と阻止帯域境界付近に見られる縦、横の縞は前節で述べたとおり、光学フィルタのシミュレーションに用いた理想的な通過帯域特性を持つフィルタにおけるギブス現象のために生じている。

図 5 には原画像として実際の景色を入力した場合のシミュレーション結果を示す。各画像の右上には屋根の一部の拡大図を示す。図 5(a) は原画像、図 5(b) は図 5(a) からイメージセンサで撮像できない空間周波数成分を除去した画

像、図 5(c) は再構成後の画像をそれぞれ示す。シミュレーション前の画像 (図 5(a)) とシミュレーション後の画像 (図 5(c)) の拡大図から明らかなように、両画像の違いは肉眼では分からない。シミュレートしたイメージセンサの解像度では、図 5(b) の画像しか得ることができない。よって図 5(c) から、本方法による高解像度化は実際の画像の撮像においても適用可能である。

以上の結果から、木内他の方法の 2 次元画像撮像への拡張は成功した。これにより、2 次元画像でも同様に、高解像度化が可能であることが明らかになった。

本研究により初めて 2 次元画像に対するデジタル信号処理によるイメージセンサの高解像度化に関する理論と撮像後の信号処理プロセスは確立された。本研究のシミュレーションで使用した理想フィルタ特性を持つ光学フィルタを実現することは今のところ困難が伴うがフーリエ光学系⁽⁶⁾を用いれば不可能ではない。従って、2 次元画像において、1 次元画像の場合より複雑な折り返し成分を信号処理により元の周波数成分に戻すことが出来る可能性を示すことが出来た意味は大きい。さらに、本研究により撮像後の信号処理プロセスを確立できたので、光学フィルタとイメージセンサを用意すればイメージセンサの高解像度化に関する実験を行うことが可能である。

6. むすび

イメージセンサのナイキスト空間周波数以上の 2 次元画像再構成のための原理を導出し、デジタル信号処理によるイメージセンサの解像度改善をコンピュータ上でシミュレーションを行った。この 2 次元画像に対するデジタル信号処理によるイメージセンサの高解像度化に関する原理は、本研究により初めて導き出された。エリアシングを重なり無しに発生させるため 2 次元画像を周波数的に 4 分割する方法は 1 次元画像の場合よりも複雑であるが、光学 BPF や

図5 実際の景色を原画像として用いたさいの再構成画像

Fig. 5. Reproduced images in the case of the actual scene. (a) Original image. (b) Frequency limited image to Nyquist frequency of image sensor. (c) Re-produced image.

LPF を用いることにより比較的容易に実現できることは実用化を目指す上で重要である。シミュレーションの結果、想定したイメージセンサのナイキスト周波数よりも高い周波数成分を持つ2次元画像の再構成に成功した。原画像と再構成画像間の違いは肉眼ではほとんど見つからない。本研究ではイメージセンサのナイキスト周波数の2倍までの空間周波数を持つ画像の再構成を行ったが、原理的にはさらに高い空間周波数を持つ画像を再構成可能である。また、カラー画像に対しても、各原色に分けることで本方法を適用可能である。本方法により、イメージセンサ自身に手を加えることなく、その解像度を2倍以上上げることが可能となる。本研究に用いた理想特性を持つ光学フィルタを実現することは困難を伴うが、本研究により2次元画像のデジタル信号処理による高解像度化の可能性を示すことができた意味は大きい。

(平成11年9月27日受付, 同12年3月31日再受付)

文 献

- (1) S. Manabe et al.: IEEE Trans. Electron Devices **38** (1991) pp. 1765
- (2) 木内, 作佐部, 猿谷: テレビ技報 Vol. 18, No.67, (1994) pp. 1-6
- (3) 木内, 作佐部: 1995年テレビジョン学会 年次大会 予稿集 pp. 59-60
- (4) 八木, 井上他: “C言語で学ぶ実践デジタル映像処理”, オーム社 (1995)
- (5) 例えば, 樋口: “デジタル信号処理の基礎”, 昭晃堂 (1986) pp. 123
- (6) 例えば, 長谷川: “画像工学”, コロナ社 (1983) pp. 158

木村 孝之 (非会員) 1998年, 豊橋技術科学大学大学院博士後期課程修了。同年, 茨城大学工学部助手。撮像デバイス, 画像信号処理システム, デバイス材料などの研究に従事。博士 (工学)。

高塚 昇 (非会員) 1998年, 茨城大学工学部システム工学科卒業。現在, 同大学大学院理工学研究科博士前期課程在学中。(システム工学専攻)

荒野 隆則 (非会員) 1998年, 茨城大学工学部システム工学科卒業。現在, 同大学大学院理工学研究科博士前期課程在学中。(システム工学専攻)

白木 廣光 (正員) 1961年, 名古屋大学理学部物理科卒業。同年, 日本電気 (株) 入社。撮像素子, システムの研究に従事。1995年, 茨城大学工学部教授。工学博士。正会員。