2台のカメラを用いる超高精細画像取得法の提案とその理論的解析

正会員 小 松 隆[†], 正会員 相 澤 清 晴^{††}, 正会員 斎 藤 隆 弘[†]

Proposal of A New Method for Acquiring Super High Definition Pictures with Two Cameras and Its Theoretical Analysis

Takashi Komatsu[†], Kiyoharu Aizawa^{††} and Takahiro Saito[†]

Abstract The method of image acquisition is one of the principal problems for handling super high definition pictures. This paper proposes a new method for acquiring high resolution pictures by processing two images taken with two different cameras. The method integrates two images into a higher resolution image. Compared to an imaging device with equivalent resolution, it will be less sensitive to the shot noise which becomes more dominant at the pixel size is reduced. Our theoretical analysis clearly shows the improvement in the high frequencies and details. The aperture effect determines the upper bound in the performance using this method. When the aperture ratio is 100%, the resolution improvement is limited to twice the original sampling frequency. Additionally, using more than two cameras, SNR of the reconstructed image improves even in the case of 100% aperture ratio. This means that the pixel size can be further reduced when extra cameras are used.

1. ま え が き

画像メディアはこれまでは通信、放送、印刷、出版の各々の分野で別々の形態で発展を遂げてきたが、今後、画像エレクトロニクスの進展および広帯域 ISDN の実現とともに、これらメディアの境界が次第に曖昧化し、融合して行くと予想される。その際、融合の核となる新しい画像電子メディアは、少なくとも非電子系映像のひとつの基準と考えられる 35 mm カラーフィルム画品質を保持しなければならない。そのため

解像度としては、空間解像度で 3000×4000 画素、時間解像度で 30～60 Hz 程度の超高精細画像が要求される¹⁾。

このような超高精細画像メディアを実現するためには、撮像系から伝送、処理、表示系にいたるまで問題が山積している。特に、撮像系の問題は深刻である。高解像度撮像素子としては、固体撮像素子が有望である。これまでのところ固体撮像素子は主に微細加工技術により高解像度化を達成してきており、現在、動画像用として 200 万画素、静止画像用として 400 万画素

キーワード：超高精細画像，高解像度化，対応点決定，不等間隔標本点，座標変換

1990 年 10 月 2 日，1990 年電子情報通信学会秋季全国大会 (D-227) で発表

1991 年 4 月 26 日受付

[†] 神奈川大学 工学部 (〒221 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1, TEL 045-481-5661)

^{††} 東京大学 工学部 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1, TEL 03-3812-2111)

[†] Faculty of Engineering, Kanagawa University (3-27-1, Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama 221, Japan)

^{††} Faculty of Engineering, The University of Tokyo (7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan)

の撮像素子が試作されている．しかし，高密度化は画素面積の縮小によりダイナミックレンジの低下を生じるため，1画素約 $50\ \mu\text{m}^2$ が物理的な高密度化の限界とされている²⁾．よって，新たな高解像度化のためのアプローチが必要となっている．

これまでに，高解像度化のため数種のアプローチが提案されている．例えば多面体ミラーを用いて入力光を分割し複数の固体撮像素子で各々画像の一部分を撮像し領域合成する方法³⁾，固体撮像素子を機械振動させ空間解像度を向上させる方法⁴⁾，光学的異方体の複屈折現象を利用して光学的にイメージシフトを行い空間解像度を上げる方法⁵⁾等が提案されている．しかし，これらの方式はいずれも入力光を空間的あるいは時間的に分割するため，超高精細動画の撮像のように露光時間に制限がある場合には，原理的に露光量の減少による SN 比の低下を生じてしまう．

本論文では，以上の観点から新たな超高精細動画の撮像方式を提案する．この方式は，既存の撮像素子を用いて撮像した複数の画像を信号処理手法により統合化することによって超高精細画像を生成するものである．以下，本論文では，2章で提案方式の概要と画像の統合化の処理手順について述べ，3章で提案方式による高解像度化および SN 比の改善の理論的な可能性について述べる．また4章では，Zone Plate および実画像データを用いた予備的な計算機シミュレーションの結果を示し，提案方式によって画像の高解像度が実際に可能であることを示した．

2. 提案方式の概要

複数のカメラにより撮影した画像には，各々の画像に共通して含まれる情報と，互いに他の画像には含まれていない情報とを有している．したがって，これらの情報を統合化することによって1枚の画像を再構成すれば，個々の画像よりも解像度の高い画像が得られる．例えば，カメラ2台の場合，この方式は図1に示したようなものとなる．なお，カメラの配置方法としては，図のように輻輳を付けずに配置する方法と輻輳を付けて配置する方法とが考えられるが，対象物体が平面の場合には，図のように輻輳を付けずに配置する方が有利である．本論文では，この複数の画像から，より解像度の高い1枚の画像を再構成するための信号処理手法を提案する．

本方式では，この情報統合化処理を2段階の処理手順により実現する．すなわち，まず初めに，(i)おのの画像の標本点の対応関係を求め，対応する位置に標本点を挿入して不均一間隔標本点信号列を生成

図1 カメラ2台の場合の方式の概要
The schematic diagram of our proposed method using two cameras.

図2 情報統合化の様子
The process of image data integration.

し，(ii)引き続き，この不均一間隔標本点信号列を均一間隔標本点信号列に変換する処理を施す．標本点信号列が1次元の場合，これらの処理の様子は図2のようになる．以下では(i)，(ii)の各々の処理について説明する．

(i) 対応関係の推定処理

対応関係の推定処理では，個々の画像の標本点のずれの量を数分の1画素の精度で求める必要がある．このための手法としては，動画像符号化や動き解析等を用いられているブロックマッチング法と勾配法の2方式が有力である．

ブロックマッチング法は，動画像の2つのフレーム(フレームA，フレームB)において動物体の動きを

図 3 ブロックマッチング法
Block-matching method.

推定するための画像処理手法である。フレーム A の小ブロック X_A と、フレーム B の同一位置の小ブロック X_B およびその周辺の小ブロックに対して対応する画素どうしの差の 2 乗和をとり、その最小値を与えるブロックの位置ずれの量をブロックの中心の画素の動き量とするものである(図 3)。一般に、ブロックマッチングは 1 画素精度で行われるが、本方式では数分の 1 画素の精度で推定を行う必要がある。よって、画像をあらかじめ数倍の大きさに拡大・補間したのちにブロックマッチングを行い、数分の 1 画素精度の推定を行う必要がある。

一方、勾配法はフレーム A とフレーム B との輝度勾配から動き量を推定する手法である。フレーム A の位置 (x, y) における信号値を $g_A(x, y)$ 、フレーム B の位置 (x, y) における信号値を $g_B(x, y)$ 、動きベクトルを (u, v) とすると、

$$g_A(x-u, y-v) = g_B(x, y) \quad (1)$$

が成り立つ。この式をテーラー展開すると、1 次近似として次式を得る。

$$g_A(x-u, y-v) \sim g_B(x, y) - u \frac{\partial}{\partial x} g_A(x, y) - v \frac{\partial}{\partial y} g_A(x, y) \quad (2)$$

ここで、フレーム間差分を、

$$d(x, y) = g_A(x-u, y-v) - g_B(x, y) \quad (3)$$

とすると

$$u \frac{\partial}{\partial x} g_A(x, y) + v \frac{\partial}{\partial y} g_A(x, y) + d(x, y) = 0 \quad (4)$$

この式をブロック内の各画素に対する 2 乗誤差最小の条件のもとで解くと、 u, v が求まる。勾配法は本質的に非整数の精度で動きを求められるので、対象画像に直接適用可能である。

(ii) 不均一標本点から均一標本点への変換

不均一標本点を均一標本点に変換する方法は、これ

図 4 座標変換法
Coordinate transformation method.

までに座標変換による方法やエネルギー最小条件による方法等が提案されているが、本方式への適用を考える場合、各標本点はある程度の雑音成分を含んでいると考えられるので、比較的雑音の影響を受けにくい座標変換による方法が今のところ適した方式であると考えられる。以下に、1 次元の信号系列を例として座標変換法を説明する。

座標変換法

座標変換法は、Clark らにより提案された不均一標本点を均一標本点に変換する方法である⁹⁾。図 4 は 1 次元の場合の座標変換の処理を図示したものである。図中の横軸の●と□は 1 次元の不均一標本系列を表している。座標変換法では、まずこの不均一標本系列を図中央の変換関数により、縦軸の均一標本系列●と□に変換する。●と□とは均一標本系列となるので、 $f(t)$ が帯域 $-\omega_0 \sim \omega_0$ の有限帯域信号と仮定すれば、帯域制限信号の標本化定理を適用でき、結局(5)式、

$$f(t) = \sum f(nT) \frac{\sin[\omega_0(t-nT)]}{[\omega_0(t-nT)]} \quad (5)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{T}$$

のシャノンの内挿公式により¹⁰⁾、標本化系列 $f(nT)$ から帯域制限波形 $f(t)$ が復元できる。さらに、復元波形 $f(t)$ を変換関数で横軸に変換したときに、横軸の標本点列●の中間にくる標本値△を横軸に逆変換し、最終的に横軸で●と△との均一標本間隔の信号列を得る。ただし、この方式では、座標変換後の復元波形は、(5)式によって復元された帯域制限波形と同様に帯域 $-\omega_0 \sim \omega_0$ の間に帯域制限されるわけではない。この方式の 2 次元の場合の変換法は文献 6) を参照されたい。

3. 解像度および SN 比の改善の理論的解析

この章では、本論文で提案する方法による高解像度の理論的な可能性について述べる。以下では説明の都合上、1次元の信号を例に説明する。

2つの1次元標本化系列を統合化して解像度が最も向上するのは、各々の標本化系列が1/2標本間隔ずれている場合である。標本化関数が理想的なインパルスの場合、図5(b)に示すように、2つの標本化系列の統合化により時間領域では標本化間隔が1/2倍とな

図 5 各標本化の時間領域および周波数領域における様子
Relations between time-domain description and frequency domain description of several sampling processes.

り、逆に周波数領域の標本化間隔は2倍となる。よって、解像度は個々の標本化系列の2倍となる。しかし、固体撮像素子による撮像では、受光面はある面積を有しているためアパーチャ効果を考慮しなければならない。特に最近の固体撮像素子の高密度化技術の方向は、受光面積の縮小に伴うダイナミックレンジの減少を防ぐため開口率を100%に近づける方向に向かっている。よって、以下では、アパーチャを100%と仮定して解析する。

標本化が理想的なインパルスの場合の標本化は原信号を直接標本化することに相当する。これに対してアパーチャ t_0 を有する標本化の場合には、図6(b)のようにアパーチャ t_0 により定まる低域通過フィルタにより原信号を帯域制限した後に標本化することに相当し、各周波数成分は $t_0/2$ の遅れと、

$$\frac{\sin(\omega t_0/2)}{\omega t_0/2} \quad (6)$$

の振幅の減少を生じる。したがって、アパーチャ100%の場合、標本化間隔 T とアパーチャとの時間軸および周波数軸における関係は図5(d)のようになる。ここで、これらの標本化系列を1/2標本化間隔だけずらして統合化する場合について考える。アパーチャは図5(d)と同じなので低域通過フィルタの部分は同じである。これに対し標本化間隔は統合化により $T/2$ となるので、周波数領域での様子は図5(e)のようになり、2倍以内の周波数成分まで高解像度化が可能であることがわかる。

次に、統合化する標本系列の数をさらに増加させた場合について考える。仮りに、いずれの標本系列も100%のアパーチャを有し、互いに1/4標本間隔ずつずれた4つの標本化系列を統合化するものとする。アパーチャ100%の仮定より低域通過フィルタの部分は図5(d)と同じである。一方、時間軸上での標本化間隔は1/4倍、逆に周波数軸上では4倍となる。しか

図 6 理想的な標本化とアパーチャがある場合との違い
Difference between the ideal sampling process and the real sampling process with the aperture effect.

し、アパーチャ効果によって2倍以内の周波数成分に帯域制限されているため、解像度は2倍までしか改善できない。

ここで、SN比の観点から本方式の解析を行ってみる。上記の4つの標本系列が40dBのノイズを含んでいると仮定する。4つの標本系列を互いに1/2標本間隔ずつずれたものどうし2つに分け、各々に対して統合化を行う。統合化された系列は標本点数が2倍となるので、SN比は40dBのままである。次に、この統合化された2つの系列どうしの統合化を行う。ただし、統合化を行っても解像度の改善は得られないので、標本点数を増やさずに統合化する。この統合化処理は互いの標本点どうしの算術平均をとるのと等価である。また、この統合化処理は物理的には固体撮像素子の受光面積を2倍したことに相当する。固体撮像素子は受光面積を2倍にするとショットノイズによるSN比の劣化は約3dB改善される。よって、この統合化により得られた標本系列はもともとの標本系列の2倍の解像度を有し、約43dBのノイズを含むものとなる。統合化によりSN比が改善されるということは、逆に同一のSN比の標本系列を得るために、より受光面積を小さくすることができることを意味しており、結果的に高解像度化に有効となる。

4. シミュレーション

まず、画像の統合化により解像度が改善されることを確かめるためのシミュレーションを行った。アパーチャ100%の2つの撮像素子を、水平方向にそれぞれ0.5、0.4、0.3、0.2画素だけ等間隔にずらしてZone Plateを撮像する条件を仮定して、計算機シミュレーションにより撮像画像を作成し、座標変換法により水平方向に1次元の統合化を行った。写真1(a)～(d)はその結果の統合後の画像、(e)は統合前の画像である。この結果より、画素のずれが0.5画素のとき水平方向の解像度が最も改善され、ずれが0.4画素の場合もほぼ2倍近くまで改善されている。ずれが0.3画素の場合、折り返し歪みの影響がやや目立ちはじめ、0.2画素の場合、解像度の改善はわずかとなった。

次に、実画像データを用いて、高解像度化の計算機シミュレーションを行った。実験にはSCIDの画像“自転車”の2048画素×2560ライン、256階調のモノクローム画像を用いて、以下の手順でシミュレーションを行った。まず、2048画素×2560ラインの解像度を有する原画像を図7の実線で示すように、8画素×4ライン内の画素の輝度値の算術平均をとり、256画素×640ラインの解像度を有する256階調のモノクロ

図7 シミュレーションのための2枚の画像の生成方法
The way of making two images used for the simulation.

ーム画像を生成する。同様に、図7の点線で示すように、先の画像とは算術平均する画素が水平方向に8画素ずれた256画素×640ラインの画像を生成する。2台のカメラを水平方向に配置した場合、水平方向の解像度は最大2倍まで改善されるが、垂直方向の解像度は改善されない。したがって、本方式に用いる撮像素子は垂直方向の解像度が水平方向の解像度の約2倍のものが望ましい。シミュレーションでは、このことを考慮して8画素×4ラインの長方形の領域内の画素の平均値をとった。これらの画像をアパーチャ100%の2台のカメラで撮像された画像データとみなし、ブロックマッチング法により対応点の推定を行い、不均一間隔標本点系列を生成し、さらに座標変換法により均一間隔標本点に変換して高解像画像を生成した。なお、対象物体が平面の場合には、ブロックマッチングによるずれの推定において、特定の画素のずれの値が近傍の画素のずれの推定値と比較して著しく大きな値を示すことはないので、ずれの値の推定の際にはこのことを考慮した処理を行っている。

この高解像度化処理により水平方向の画素数は2倍となるので、統合後の画像は512画素×640ラインの画像となる。写真2(a)にはその一部分を示した。また、比較のため、統合化前の解像度256画素×640ラインの2枚の画像のうちの片方を、水平方向のみ2倍に拡大して写真2(b)に示した。写真2の(a)と(b)を比較すると、統合化前の画像(b)では水平方向の解像度の低下により自転車のスポークなどの垂直方向のエッジ部分がぼけた画像となっているが、統合化後の画像(a)では改善されていることがわかる。また、統合化により水平方向の解像度がほぼ2倍まで改善されたため、スポークの中心部分は水平方向、垂直方向とも同程度の解像度となっていることがわかる。なお、写真2(b)では垂直エッジの左右にエイリアジングを生じているが、これは3章で述べたようにアパーチャ $t_h = T$ の場合 $1/T$ の周波数成分まで持つことにより生じたものである。従来の撮像では、エイリアジング

(a) 水平方向 0.5 画素ずれの場合

(b) 水平方向 0.4 画素ずれの場合

(c) 水平方向 0.3 画素ずれの場合

(d) 水平方向 0.2 画素ずれの場合

(e) 合成前のゾーンプレート

写真 1 本方式により水平方向に高解像度化されたゾーンプレート (含む原図)
Reconstructed zone plates where horizontal resolution is improved. (including a original zone plate)

(a) 水平方向に高解像度化された画像

(b) 高解像度化前の画像

写真 2 本方式により水平方向に高解像度化された画像と高解像度化前の画像
A reconstructed image where horizontal resolution is improved and one of the original images.

のない画像を得るため、あらかじめフィルタリングにより高周波数成分をカットしているが、本方式では、この成分を用いて高解像度化を行っている。

本方式を実現するためには、今後、以下のような課題について検討して行かなければならない。

まず、シミュレーションでは正確に0.5画素ずれた画像を用いているが、実際に2台のカメラを0.5画素ずらせて配置するためには、かなりの高精度の位置制御機構が必要となろう。しかし、本方式の処理の過程で算出される画素ずれの値を位置制御に用いれば、ある程度の高精度の位置制御が可能となるであろう。

本論文で示したシミュレーションは、いずれも対象物体が平面の場合の結果であるが、実際の対象物体は奥行きを持っているため撮像方向によって陰面を生じ、対応点の決定ができない部分が生じることがある。この部分の処理方法について検討する必要がある。また、距離の離れた撮像素子で近くの物体を撮像すると、物体と照明との関係が個々の撮像素子で異なるため輝度が異なってしまう。本方式の適応可能な物体と撮像素子との距離の関係についても検討する必要がある。

さらに、本方式は撮像素子数を増やすことによりSN比が改善され、結果的に高解像度化に有効となることを示したが、画像中に含まれる雑音に対応点の推定精度に及ぼす影響について検討し、対応点推定のための雑音の許容限界を求め、本方式による真の高解像度化の限界を明らかにして行く必要がある。

5. む す び

本論文では、将来超高精細画像メディアを実現するうえで重要な問題点のひとつである超高精細画像の撮像の問題を、これまでの高密度化の技術とは異なる観点から解決するひとつの方向性を提示した。すなわち、既存の複数の撮像素子を用いて撮像した画像の情報統合を行い、より解像度の高い画像を取得する方式を提案し、このために必要となる信号処理手法および本方式による高解像度化の理論的可能性について述べた。また、2つのシミュレーションを行い、解像度改善の実例を示した。

本方式を実現するためには、対象物体が奥行きを持ち対応点の決定ができない場合の処理、本方式が適応可能な対象物体と撮像素子との距離との関係、画像中

に含まれる雑音と対応点推定精度との関係等について今後検討して行く必要がある。

さらに、本方式の将来の発展方向として、対応点決定の際に物体の形状認識手法を導入して行くことが考えられる。対象物体の形状認識が正しく行えれば、撮像方向により陰面を生じた場合の対応点決定処理も可能になるとともに、画像中に含まれる雑音に対しても頑健な方式を実現しうると期待される。

〔参 考 文 献〕

- 1) 小野, 斎藤, 相澤: “超高精細画像通信の実現に向けて”, 1990年画像符号化シンポジウム, pp. 145-146 (Oct. 1990)
- 2) 安藤: “画像入力デバイス技術の現状—撮像デバイス技術—”, テレビ誌, 44, 11, pp. 1526-1533 (Nov. 1990)
- 3) 上平: “4枚静止画像用カラーカメラ”, 第2回画像入力シンポジウム, 5.6 (Nov. 1990)
- 4) 原田, 遠藤, 林元, 江川, 田沼, 横山, 吉田: “スイング CCD イメージセンサー”, テレビ誌, 37, 10, pp. 826-832 (Oct. 1983)
- 5) 上平, 松木: “複屈折現象を利用した高精度細静止画像入力技術”, 1990年信学秋季全大, D-244 (Oct. 1990)
- 6) J. J. Clark, M. R. Palmer, P. D. Lawrence: “A Transformation Method for the Reconstruction of Functions from Nonuniformly Spaced Samples”, IEEE Trans. Acoustics Speech and Signal Processing, ASSP-33, 4 (Oct. 1985)
- 7) 小松, 斎藤, 原島: “ステレオ画像を用いた高解像度化の一検討”, 1990年信学秋季全大, D-227 (Oct. 1990)
- 8) 相澤, 斎藤, 小松: “超高精細画像取得のための基礎検討”, 信学会画像工学会研究会技術報告, IE 90-54 (Oct. 1990)
- 9) 小松, 相澤, 斎藤: “超高精細画像の取得法の一検討—高解像度化の理論限界—”, 1991年信学春季全大, D-389 (Mar. 1991)
- 10) (例えば) 宮川: “情報理論”, コロナ社, pp. 239-243 (1979)

こまつ たかし
小松 隆 昭和58年, 神奈川大学工学部電気工学科卒業。60年, 同大学院修士課程修了。同年, 神奈川大学工学部助手となり現在に至る。画像信号の高効率符号化に関する研究に従事。正会員。

あいざわ きよはる
相澤 清晴 昭和58年, 東京大学電子工学科卒業。63年, 同大学大学院博士課程修了。現在, 同大学電気工学科専任講師。日本学術振興会の派遣により, 米国イリノイ大学に滞在中。画像符号化, 信号処理, 知能符号化の研究に従事。工学博士。正会員。

さいとう たかひろ
斎藤 隆弘 昭和51年, 東京大学工学部電気工学科卒業。56年, 同大学院博士課程修了。同年, 神奈川大学工学部電気工学科専任講師。同大学助教授を経て, 平成3年, 同大学教授。画像通信, 信号処理, 医用応用などの研究に従事。工学博士。正会員。