

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560442

研究課題名(和文) DCT領域における超解像度処理に関する研究

研究課題名(英文) Study on Super Resolution in the DCT domain

研究代表者

伊藤 泉 (ITO, Izumi)

東京工業大学・社会理工学研究科・助教

研究者番号：90583435

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：超解像度処理の結果の良好さは、画像位置合わせの精度に大きく依存するため、離散コサイン変換(DCT)係数の正負符号(+1, -1)と信号の位相の関係を解析的に導出したDCT符号位相相関による画像間の位置ずれ量推定について、実画像の推定精度を明らかにし、基礎的な研究を完成させた。民生用カメラ、および産業用カメラで測定することにより、その用途に応じた選択を可能とした。また、従来のシミュレーションによるサブピクセル移動量と実画像との差異を明らかにした。DCT領域におけるノイズ・ボケ修正についての解析の結果、信号およびその反転信号を同時にマッチング可能な、二重相関法という、新たな相関法を発見した。

研究成果の概要(英文)：The results of super resolution using multiple images depends on the accuracy of translational displacement between images. For this reason, the accuracy of the discrete cosine transform (DCT)-sign phase correlation which uses only signs of DCT coefficients was clarified using the images that are captured by a commercial-off-the-shelf product camera and an industrial product camera. and the fundamental study for super resolution in the DCT domain was completed. Also, the difference of the accuracy between simulated images and captured images was clarified. Through theoretical analysis of the correlation between signals, the double correlation was developed, which is useful for matching of a reversed signal.

研究分野：信号処理

キーワード：相関 離散コサイン変換 サブピクセル推定 マッチング

1. 研究開始当初の背景

超解像度処理とは、信号処理の技術を用いて、複数の低解像度画像から一枚の高解像度画像を生成することである。サブピクセル移動量を持つ超解像度画像があれば、超解像度処理は可能である。超解像度処理の中でも MAP (最大事後確率推定) に基づく超解像度処理は 1) 画像の位置ずれ量推定, 2) 高解像度グリッドへの位置合わせ, 3) ノイズ除去・ボケ修正, 三つの過程からなる。これらの処理は、一般に空間領域において実行され、最適解を求めるための繰り返し計算が必要となる。また、高解像度処理の結果の良好さは、低解像度処理の位置ずれ推定精度に大きく依存することが知られている。

2. 研究の目的

本研究では、離散コサイン変換 (DCT) 係数の正負符号 (+1, -1) と信号の位相の関係を解析的に導出した DCT 符号位相相関による画像間の位置ずれ量推定について、実画像における精度を明らかにし、その応用展開として、各過程 (1. 画像の位置ずれ量推定, 2. 画像の位置合わせ, 3. ノイズ除去とボケ修正) をすべて DCT 領域で行う、高速な超解像度処理を確立する。

3. 研究の方法

3.1 サブピクセル推定精度

実際の物体の移動を撮影した画像における DCT 符号位相相関 (DCT-SPC) の画像間の位置ずれ量推定精度の測定を行う。DCT-SPC のサブピクセル移動量推定には、二つのフィッティング関数 (単峰型・双峰型) を用いる。高精度なサブピクセル推定手法として知られる位相相関のフィッティング関数の手法と比較した。

固定カメラから、マイクロステージ上の木材キューブ (90 [mm] × 90 [mm] × 90 [mm]) を、0.05 [mm] ずつ動かし、固定カメラから各位置での木材面を撮影した。カメラは、民生用カメラ、Nikon 社製 D7000, AF-S Micro NIKKOR 60mm F2.8 G ED, および、産業用カメラ PointGrey 社製 FL3-GE-03S2M-C, ミュートロン CCTV レンズ FV0622 を用いた。民生用カメラでは、マイクロステージの移動範囲を 0.00 [mm] から 0.60 [mm] とし、産業用カメラでは、0.00 [mm] から 2.00 [mm] とした。各位置において一枚の画像を撮影し、これを 1 セットとし 10 セット、民生用カメラでは、計 130 枚を、産業用カメラでは、410 枚の画像を生成した。撮影した画像の中心から、サイズ 128 × 128, 64 × 64, および 32 × 32 の画像を抽出し、各画像サイズにおける精度を比較した。図 1 に撮影し抽出した画像例を示す。

画像間のシフト量 t_0 [pixel] とマイクロステージの移動量 [mm] の関係

$$t_0 = \frac{\text{移動量}}{\text{ピクセルサイズ}} \quad (1)$$

から関係係数 k を求めるために、DCT-SPC 単峰型モデル、双峰型モデル、位相相関を用いて推定したシフト量を t_0 として、最小二乗法により各手法による k を推定した。民生用

カメラでは、DCT-SPC 単峰型モデル、双峰型モデル、および位相相関の k は、それぞれ、15.3888, 15.3931, および 15.3588 であり、産業用カメラでは、2.1998, 2.1915 および、2.1857 であった。すなわち、マイクロステージの一移動 (0.05 [mm]) は、画像上では、民生用カメラでは、0.7694, 0.7696, および 0.7679 [pixel], 産業用カメラでは、0.1100, 0.1096, および 0.1093 [pixel] のシフトに相当する。

求めた k から (1) を用いて、グラウンドトゥールズ t_0 を設定し、各手法による推定値との絶対誤差を比較した。

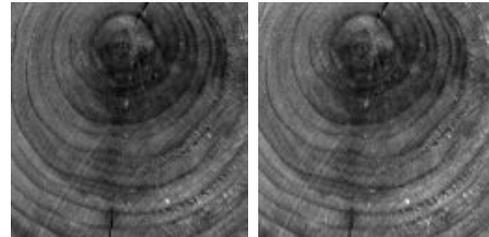


図 1 撮影した画像例 (128 × 128)

従来のサブピクセルシフト画像の生成方法である周波数領域における位相項の乗算による手法、および高解像度画像からの間引きによる手法が、実際の物体の移動を撮影した画像と、どのような差異があるか比較した。

3.2 二重相関法

DCT 領域における位置ずれ推定およびノイズ除去・ボケ修正を行う上で、相関およびその対称となるたたみ込みに関して、理論解析を行った。

4. 研究成果

4.1 サブピクセル推定精度

図 1 に民生用カメラを用いて撮影した画像 (サイズ 128 × 128) のサブピクセル移動量推定の絶対誤差を示す。各シンボルは全ての画像の DCT-SPC 単峰型モデル、双峰型モデル、および位相相関の推定値とグラウンドトゥールズとの絶対誤差を示している。

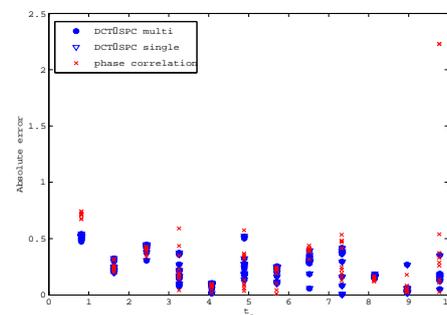


図 2 絶対誤差 (民生用カメラ)

サイズ 128 × 128 の画像において、単峰型モデル、双峰型モデル、および位相相関では、絶対誤差の平均が、それぞれ、0.2887, 0.4115, および 0.3217 [pixel] であり、標準偏差が、

0.1574, 0.2269, および 0.2208 であった。これより、位相相関や単峰型モデルに比べ、DCT-SPC 双峰型モデルの精度が高いことが確認された。表 1 に各大きさの画像における絶対誤差の平均および標準偏差を示す。

表 1 絶対誤差 (民生用カメラ)

	128 × 128	64 × 64	32 × 32
DCT-S μ	0.4115	0.4350	0.4601
DCT-S	0.2269	0.2553	0.2429
DCT-M μ	0.2887	0.3163	0.3320
DCT-M	0.1574	0.1834	0.1680
PC μ	0.3217	0.3906	0.4417
PC	0.2208	0.2581	0.2427

図 2 には、産業用カメラを用いて撮影した画像の推定結果を示す。一つのシンボルは、各手法による各 t_0 における、それぞれ 10 枚の画像の平均絶対誤差を表している。

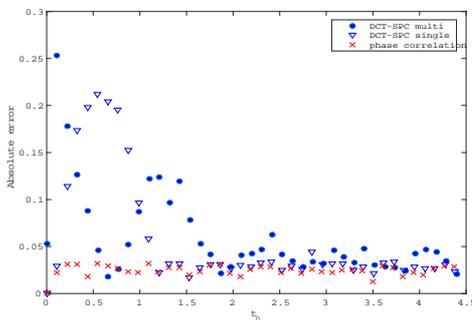


図 3 絶対誤差 (産業用カメラ)

サイズ 128 × 128 の画像において、単峰型モデル、双峰型モデル、および位相相関では、絶対誤差の平均が、それぞれ、0.0595, 0.0561, および 0.0244 [pixel] であり、標準偏差が、0.0467, 0.0586, および 0.0059 であった。表 2 に画像各サイズにおける絶対誤差の平均 μ および標準偏差を示す。表中の DCT-S, DCT-M, および PC は、それぞれ、DCT-SPC 単峰型モデル、双峰型モデル、および位相相関のフィッティングを表す。

表 2 絶対誤差 (産業用カメラ)

	128 × 128	64 × 64	32 × 32
DCT-S μ	0.0561	0.0632	0.0880
DCT-S	0.0586	0.0548	0.0423
DCT-M μ	0.0595	0.0680	0.1011
DCT-M	0.0467	0.0539	0.0545
PC μ	0.0244	0.0422	0.0469
PC	0.0059	0.0253	0.0156

民生用カメラおよび産業用カメラの結果が異なる原因の一つは、民生用カメラの解像度が高いことが考えられる。民生用カメラは解像度が 4928 × 3264、産業用カメラは 640 × 480 のため、同じ 0.05 [mm] のマイクロステージの移動量でも、画像上では、それぞれ、0.76 [pixel] および 0.11 [pixel] のシフト量となり、民生用カメラには微細な誤差が大きく影響を及ぼす可能性が高い。また、民生用カメラではカラー画像を濃淡画像に変換するため、変換時のノイズの影響が考えられる。

図 3 および図 4 に周波数領域の位相項乗算による画像生成手法および高解像度画像の間引きによる画像生成手法を用いたときの移動量推定の絶対誤差を示す。画像各サイズにおける絶対誤差の平均 μ および標準偏差を、それぞれ、表 3 および表 4 に示す。周波数領域の位相項乗算による生成画像では、位相相関、双峰型モデル、単峰型モデルの順に、高解像度画像の間引きによる生成画像では、位相相関、単峰型モデル、双峰型モデルの順に絶対誤差の平均値が小さかった。従来の画像生成手法と実際の物体の移動を撮影した画像の推定結果は異なり、周波数領域の位相項乗算による画像生成では双峰型モデルが、高解像度画像の間引きによる画像生成手法では、単峰型モデルがより良好であったにもかかわらず、実際の物体の移動を撮影した画像では、単峰型モデル・双峰型モデルともに 2.00 [pixel] よりも小さなシフト量において、誤差が大きくなり、2.00 [pixel] よりも大きいシフト量では、絶対誤差はおおよそ等しかった。

表 3 絶対誤差 (周波数領域の位相項乗算)

	128 × 128	64 × 64	32 × 32
DCT-S μ	0.0544	0.0545	0.0594
DCT-S	0.0721	0.0688	0.0670
DCT-M μ	0.0148	0.0205	0.0496
DCT-M	0.0248	0.0284	0.0352
PC μ	0.0075	0.0116	0.0251
PC	0.0045	0.0102	0.0145

表 4 絶対誤差 (高解像度画像の間引き)

	128 × 128	64 × 64	32 × 32
DCT-S μ	0.0368	0.0436	0.0588
DCT-S	0.0667	0.0639	0.0544
DCT-M μ	0.0286	0.0336	0.0598
DCT-M	0.0256	0.0268	0.0305
PC μ	0.0035	0.0150	0.0344
PC	0.0029	0.0072	0.0195

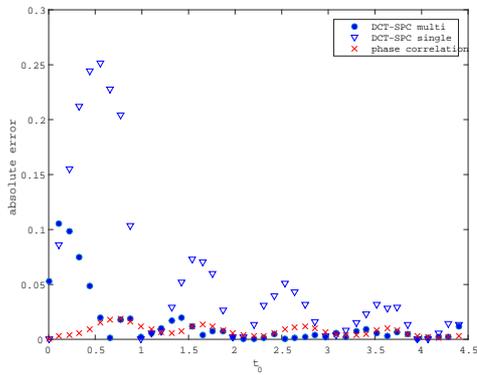


図 4 絶対誤差 (周波数領域の位相項乗算)

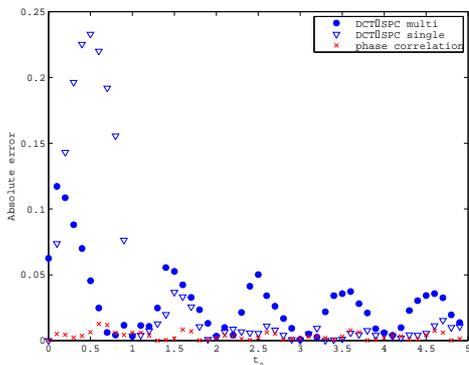


図 5 絶対誤差 (高解像度画像の間引き)

4.2 二重相関法

DCT領域における相関について解析した結果、DCTを用いることにより、参照信号と対称となる信号の相関を同時に見つけることができる新たな相関手法を発見した。

信号に零詰めをすると、相関・畳込みの結果の順序に二つの場合がある。

場合 1: 畳込み<相関<相関(逆)<畳込み(逆)

場合 2: 畳込み<相関(逆)<相関<畳込み(逆)

ここで、(逆)とは、信号のインデックスを昇順から降順に並べた信号、すなわち左右反転を意味する。信号前後の零詰め個数により、上記の二つの場合を制御し、所望の相関または畳込み、あるいはその両方を同時に取得できることを解析的に導出した。

M点信号 $x(n)$ および L点信号 $h(n)$ の畳込みの信号長 $L+M-1$ を n_{max} とする。これらの信号の前後に零詰めをすることにより信号長を N点にする。N点信号 $x'(n)$ および $h'(n)$ の零ではない最初のインデックス値を z_1 および z_2 とする。

$z_1 > (L-2)/2$, $z_2 > z_1 + M-1$, $N > z_1 + z_2 + n_{max}$ とすると、 $1 \leq n \leq n_{max}$ に相関、 $z_1 + z_2 + 1 \leq n \leq z_1 + z_2 + n_{max}$ に畳込みを得る(場合 1)。 $z_1 > z_2 + L-1$, $z_2 > (M-2)/2$, $N > z_1 + z_2 + n_{max}$ とすると、 $1 \leq n \leq n_{max}$ に相関、 $z_1 + z_2 + 1 \leq n \leq z_1 + z_2 + n_{max}$ に畳込みを得る(場合 2)。 $z_1 > (L-2)/2$,

$z_2 > (M-2)/2$, $N > z_1 + z_2 + n_{max}$ のとき、 $z_1 + z_2 + 1 \leq n \leq z_1 + z_2 + n_{max}$ に畳込みのみを得る。 $z_1 > (L-1)/2$, $z_2 = z_1 + M$, $N > z_1 + z_2 + n_{max}/2$ のとき、 $1 \leq n \leq n_{max}$, $z_1 = z_2 + L$, $z_2 > (M-1)/2$, $N > z_1 + z_2 + n_{max}/2$ のとき、 $1 \leq n \leq n_{max}$ に相関のみを得る。

例として、 $M=21$, $L=3$ の信号の相関および畳込みの結果を図 6, 図 7, および図 8 に示す。シンボル \circ , \bullet , および \square は、それぞれ畳込み、相関、相関(逆)、および、畳込み(逆)を示している。シンボル \triangle は DCT で計算した二重相関の値を表している。図から、 \circ と \triangle および \bullet と \triangle が一致していることがわかり、それぞれの相関・畳込みが一致していることが確認できる。

畳込みは、二つの信号のうち、一つの信号のインデックスを逆順にした信号との相関として考えることができるため、ある信号がどこの位置にあるかを探索するとき、この二重相関法を用いてマッチングを行うことにより、信号および反転した信号の探索を同時に行うことができる。これは二次元においても同様で、その場合は左右反転および上下反転、合わせて 4 つの場合を同時に計算することが可能となった。

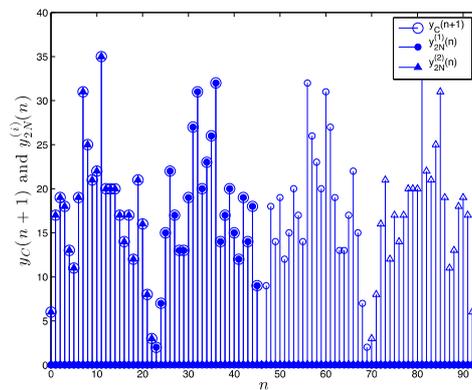


図 6 二重相関 (畳込み・相関)

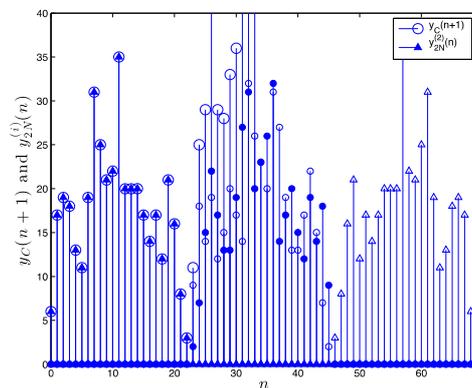


図 7 二重相関 (相関)

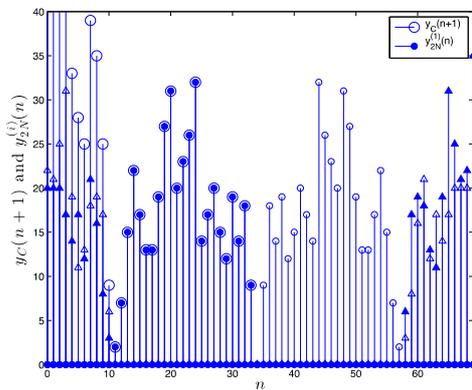


図 8 二重相関 (重ね込み)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1 I. Ito, A Computing Method for Linear Convolution and Linear Correlation in the DCT Domain, 電子情報通信学会論文誌, vol. E96-A, no.7, pp.1518-1525, 2013, 査読有 DOI:10.1587/transfun.E96.A.1518

〔学会発表〕(計 4 件)

1 I. Ito, K. Egiazarian, Double Linear Correlation using DCT and Its Application to Image Matching, Int. Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, pp.416-420, Sep. 2013, Trieste, Italy.

2 I. Ito, A Computing Method of Double Linear Correlation for Mirror Image Matching, IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP2014), pp.2818-2822, May, 2014, Florence, Italy.

3 I. Ito, Translational Displacement Estimation with Subpixel Accuracy of DCT Sign-phase correlation, Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, pp. 102-107, Sep. 2015. Zagreb, Croatia.

4 伊藤 泉, DCT符号位相相関の実画像を用いたサブピクセル移動実験, 電子情報通信学会技術研究報告, ITS2015-66, pp79-83, Feb. 2016, 北海道大学, 北海道札幌市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 泉 (ITO, Izumi)

東京工業大学・社会理工学研究科・助教

研究者番号: 90583435