

画像微小回転の高精度検出手法

High Accuracy Detection of Image Rotation

佐藤 孝宗† 磯貝 博子† 伊藤 稔†
Takamune Sato Hiroko Isogai Minoru Ito

1. はじめに

微細加工技術の進展に伴って画像を用いたワークの高精度位置調整や撮影系の精密校正等の需要が高まってきており、特に LSI 分野におけるアライメントや検査等において高い回転補正精度が望まれている。

筆者らは、位相差スペクトル分析法 (PSA) [1,2] を画像間の微小回転角検出に利用し、更に処理に用いる周波数点を設定することにより回転検出精度を従来の位相限定相関法 (POC) を利用した方法に比べて飛躍的に高めることができることを既に提案した。[3,4] しかし、より微小な回転角度の検出精度の検討や雑音による検出精度への影響が課題となっていた。

本論文では、PSA を利用した回転角検出手法による微小回転検出精度を明らかにし、更に、周波数分布と振幅の異なる雑音を検査画像に加算して雑音による検出精度への影響を検討する。

2. 検出原理

検出対象画像サイズを $M \times N$ とする。画像の実平面上に、その画像上の周波数点 (u, v) に対応した波長 λ の波があるとすれば、

$$u = \lambda^{-1} \cdot \cos \theta \cdot M \quad (1)$$

$$v = \lambda^{-1} \cdot \sin \theta \cdot N \quad (2)$$

が成り立つ。但し、 θ は波の進行方向を表す。これらは (u, v) から (θ, λ^{-1}) への変換を意味している。画像が回転するとそれに伴って波の進行方向が画像回転分だけ回転する。このため、波の回転角度を検出することにより、画像の回転角度を算出することができる。基準画像と検出画像の振幅スペクトルを極座標変換した 2 枚の極座標画像上での横方向位置ずれ量を Δx とすれば、回転角度 $\Delta \theta$ は

$$\Delta \theta = \Delta x \times \frac{\pi}{M} \quad (3)$$

で与えられる。このため、画像をフーリエ変換して得られる周波数スペクトル (u, v) を (θ, λ^{-1}) の極座標系に変換し、横軸方向の移動量を検出してから、検出画像の回転角度に換算することができる。

3. 検出実験および結果

3.1 微小回転検出実験

図 1 に画像回転検出実験の対象画像例を示す。画像のパターンには異なる性質を有する代表的な 3 種類を用いる。パターン (a) は濃淡の変化は単純であるが、ある程度の複雑性を持つ文字列パターン、(b) は黒地に白線が縦横等間隔で描かれ、鋭いエッジが特徴の格子パターン、また、(c) は縦横方向それぞれ単一低周波数の正弦波により構成され、濃淡値の変化が滑らかな特徴を持つスポンジパターンである。

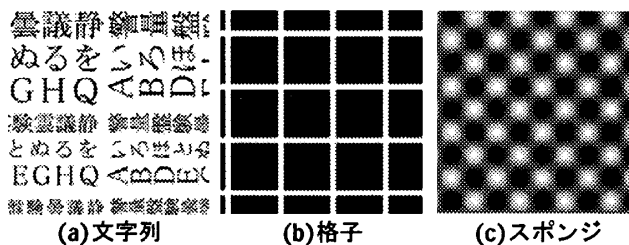


図 1 検出対象パターン

各入力画像から生成される基準画像、検査画像の組み合わせに 3 通りの比較モードを用意した。比較モード SS では、計算機上で基準画像を合成しそれを計算機上で回転させて検査画像とした。比較モード RS では、CCD カメラにより撮影した基準画像を計算機上で回転させて検査画像とした。また、比較モード RR では、基準画像、検査画像ともに CCD カメラにより撮影した実画像を使用した。画像サイズは 256×256 画素、階調は 8 ビットである。

比較モード SS 及び RS における検査画像の回転はアフィン変換により座標を得、各画素の補間値を DFT 補間によって求めたが、比較モード SS の格子パターンのみ補間に線形補間を用いた。これは、格子パターンの合成画像において DFT 補間を用いた回転では高調波成分などによる縞状雑音が入り込み、正確な精度評価を行えないためである。

比較モード RR における基準画像の回転は、印刷画像をメカニカルステージに載せ、付属のマイクロメーターを手動回転することによって与えた。その際に、画像上の回転中心ができるだけ撮影画像の中心座標付近になるようにカメラ位置を予め調整している。従来の実験での低い検出精度の要因として回転角度の校正精度が考えられるため、今回の実験では、ステージ上の目盛りとマイクロメーターの目盛りの関係を測定の度に繰り返し校正することにより回転角校正精度を高めた。ステージのバックラッシュの影響を避けるために回転は 1 方向のみと限定した。

実験では使用周波数点を 700 点に設定し、回転角度を 0.05 度から 0.50 度までを 0.05 度刻み、0.50 度から 1.00 度までを 0.25 度刻みに回転させた画像を作成し回転検出実験を行った。

図 2 に各パターンの回転検出結果の誤差のグラフを示す。横軸は回転角度、縦軸は真値との誤差である。(a) はモード SS、(b) はモード RS、(c) はモード RR における結果である。モード RR については、実験を 3 回繰り返した結果を平均している。図より、誤差は最大でも絶対値で 0.017 度であり、回転角度 1.00 度まで安定した精度を保っている事がわかる。また、画像パターンの依存性も少なくモード RR に於いても良好な精度が得られた。

3.2 雑音を加算した回転検出実験

各モード、各パターンの画像に雑音を加算し、雑音が検出精度に与える影響について実験を行った。まず、ランダム関数を使って計算機上でランダム雑音を作成した。この

† 工学院大学

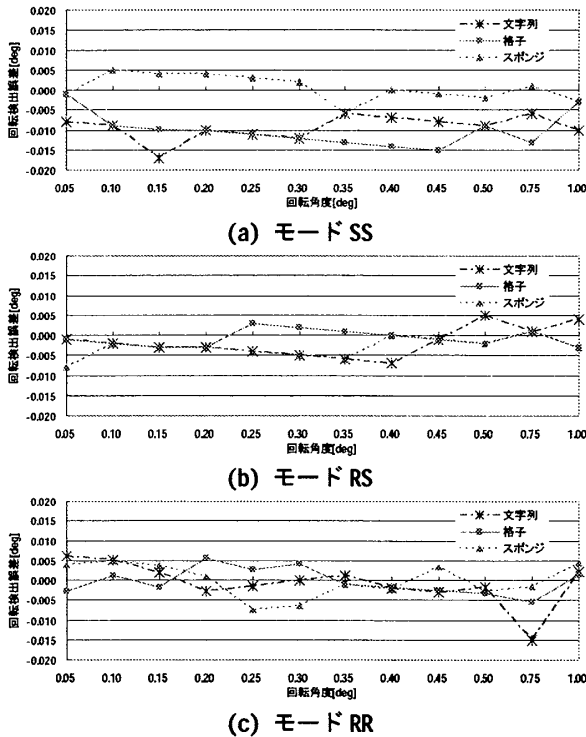


図2 回転角度検出誤差

ランダム雑音を周波数変換し周波数平面上でマスクをかけることにより三種類の周波数特性をもつ雑音を作成した。低周波雑音は周波数 0~32、中周波雑音は 32~64、高周波雑音は 64 以上の周波数範囲を有する。雑音の最大振幅は画像 256 階調に対して 13, 26, 38, 51 とし、画像に単純加算した。その加算時に飽和した画素についてはその画素の濃度値を 255 にした。図 3 に作成した雑音画像の例を示す。ただし、見やすくするため最小値 0、最大値 255 となるようにデータを変換して示している。

表 1 は基準画像及び回転角度 0.75 度の検査画像に雑音を加算し、使用周波数点を 700 点に設定して回転検出を行った結果の誤差である。誤差の絶対値が 0.030 度以上の値を網掛けで示している。雑音の強さは (雑音最大値/画像階調 256) で表しており、S/N の逆数に相当している。表から、雑音の強さ 0.10 以下であればスポンジパターンに一部例外はあるが雑音 0 とほぼ同程度の精度が得られていることがわかる。また、強さ 0.15 以上においても文字列及び格子パターンでは良好な結果が得られた。スポンジパターンの特に低周波雑音加算画像検出において誤差が拡大する傾向が認められるが、これは検出に採用される周波数点に関係があると考えられる。本検出手法ではクロススペクトルの強さによって周波数点を選択するが、スポンジパターンは低周波成分を強く有しているため低い周波数点が回転検出処理に多く使われる。そこに低周波領域において位相の乱れている雑音成分が入り込むことにより位相差スペクトルが乱れ誤差が拡大していると予想される。

4. おわりに

本論文では、より微小な回転角度においても本手法が有効であることを示し、雑音を検出精度に与える影響を確認した。典型的な 3 種類のパターン画像について、0.05 度か



図3 作成した雑音画像

表 1 雑音加算画像の検出誤差

モード	パターン	雑音の強さ [N/S]	低周波雑音 [deg]	中周波雑音 [deg]	高周波雑音 [deg]
SS	文字列	0.05	-0.006	0.001	-0.006
		0.10	-0.020	-0.013	-0.006
		0.15	-0.006	-0.013	-0.020
		0.20	-0.013	-0.006	0.008
	格子	0.05	-0.013	-0.013	-0.013
		0.10	-0.013	-0.020	-0.020
		0.15	0.001	-0.020	-0.013
		0.20	-0.027	-0.020	-0.013
	スポンジ	0.05	0.008	-0.006	0.001
		0.10	0.039	-0.027	0.001
		0.15	-0.006	0.015	0.015
		0.20	0.029	0.034	0.029
RS	文字列	0.05	0.001	0.001	0.001
		0.10	0.008	0.001	0.001
		0.15	-0.013	0.022	-0.013
		0.20	0.001	-0.013	-0.006
	格子	0.05	-0.006	0.008	-0.006
		0.10	0.008	0.001	-0.013
		0.15	0.015	-0.006	-0.006
		0.20	0.008	-0.006	0.001
	スポンジ	0.05	0.008	-0.013	0.001
		0.10	0.043	-0.027	0.008
		0.15	0.029	0.001	-0.027
		0.20	0.069	0.034	-0.020
RR	文字列	0.05	-0.020	-0.013	-0.015
		0.10	-0.008	-0.013	-0.015
		0.15	-0.020	0.020	-0.022
		0.20	-0.003	-0.006	-0.015
	格子	0.05	-0.017	-0.005	-0.010
		0.10	0.009	-0.008	-0.012
		0.15	-0.001	-0.024	-0.017
		0.20	0.031	-0.003	-0.001
	スポンジ	0.05	0.015	-0.011	-0.004
		0.10	0.022	0.010	0.001
		0.15	0.080	0.017	0.034
		0.20	0.151	0.020	-0.006

ら 1.00 度までの回転検出の平均誤差 (誤差の絶対値の平均) は比較モード RR では 0.003 度、RS では 0.003 度、SS では 0.007 度となり、共に 0.01 度以内であった。雑音に対しては概ね安定した精度が得られたが、一部の画像パターンと雑音の周波数特性に依存性が見られた。今後の課題として、対象画像の種類を増やし、検出精度の安定性、対象画像の適用性等の検討と、雑音による誤差要因のより詳しい検討が残されている。

文献

- [1] 幸月、藤山、鈴木、金子、伊藤:「位相差から画像シフト量検出精度の検討」,映像メディア学会技術報告, Vol.26, No.7, pp.31-36, IPU2002-7 (Jan. 2002)
- [2] I.Kouzuki, T.Kaneko and M.Ito : "Precise and reliable image shift detection by a new phase-difference spectrum analysis (PSA) method," IEICE Trans.Inf.&Syst., Vol.E87-D, No.1, pp.58-65, 2004
- [3] 浅田、金子、時岡、伊藤:「画像間微小回転・倍率の高精度検出法と雑音の影響」,画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004),論文集 I,pp.1-350-355,2004
- [4] 磯貝、佐藤、浅田、伊藤:「画像間微小回転の高精度検出法」,2005 画像電子学会第 33 回年次大会,予稿集,pp.159-160,2005