

仮想移動格子法によるモアレ縞形成とその画質改善効果†

有 沢 正 和^{††}

近年、医療分野をはじめとして3次元物体の形状計測の必要性が増大しており、その計測法の1つにモアレ法がある。モアレ法は、モアレ縞形成の手法により、光学的モアレ法と電子的モアレ法に大別される。

電子的モアレ法は、光学的モアレ法の写真カメラの代りにテレビカメラ、撮像格子を電子的手段で実現するもので、凹凸判定の自動化が可能になっている。電子的モアレ法は、光学的モアレ法と比較して、操作性、融通性に優れているが、物体面が基準面に対して大きく傾斜している所では高次モアレなどの不要縞を消去できず、画質を著しく劣化させる欠点を持っていた。

本論文では、物体の変形格子像1枚から投影格子を移動させたときにできる投影側移動格子を計算機上で補間法により作成し、それとソフトウェアにより作成した撮像格子との論理演算によりモアレ縞形成する仮想移動格子法を提案し、不要縞を消去できることを示した。仮想移動格子法は、光学的な移動格子法と異なり、等高モアレ縞形成における撮像格子の制御、物体の変形部を表わす等変形モアレ縞形成にも適用可能であることを示した。仮想移動格子法の原理及びその画質改善効果を実験例により示し、その基本的動作を空間周波数領域で解析している。

1. ま え が き

近年、医療分野をはじめとして3次元物体の形状計測の必要性が増大している。その計測法の1つとしてモアレ法がある。モアレ法は、モアレ縞形成の手法により、光学的モアレ法¹⁾と電子的モアレ法^{2),3)}に大別される。

光学的モアレ法は、簡単な光学系で瞬時に等高モアレ縞が得られるため、すでに医学・服飾分野など多方面に利用されている。しかし等高モアレ縞の凹凸判定が難しいため計測の自動化は困難になっている。

一方、電子的モアレ法は、写真カメラの代りにテレビカメラ、光学的な撮像格子の代りに電子的に発生させた撮像格子を用いるもので、位相の異なる複数の撮像格子により発生した複数の等高モアレ縞を擬似カラー表示することにより凹凸判定を自動化している^{2),3)}。

電子的モアレ法は、光学的モアレ法と比べ操作性、融通性に優れているが、物体面上、基準面に対して大きく傾斜している所では高次モアレなどの不要縞を消去できず、画質を著しく劣化させる欠点を持つ。

これに対し光学的モアレ法では、写真露光中に、投影格子と撮像格子をその面内で、格子のピッチ比と等しい速度比でゆっくり移動させる移動格子法により不要縞を消去できる⁴⁾。

著者らは、さきに変形格子像1枚から投影格子を移

動させたときにできる投影側移動格子を計算機上で補間法により作成し、それとソフトウェアにより作成した撮像格子との論理演算により等高モアレ縞を形成する仮想移動格子法を提案し、不要縞を消去できることを示した⁵⁾。

本論文では、仮想移動格子法の原理及びその画質改善効果を実験例を使って示す。次に仮想移動格子法を等高モアレ縞形成のみならず、物体の変形部検出に適用できることを示す。最後に仮想移動格子法の基本的動作を空間周波数領域で解析する。

2. 仮想移動格子法の原理

等高モアレ縞は、点光源によって投影格子 G_1 を物体に投影して得られる変形格子をテレビカメラ等の撮像装置により入力し、この変形格子とソフトウェアで作成した撮像格子 G_2 との論理積により形成できる^{3),5)}。

この場合には、等高モアレ縞成分に重畳して①変形格子、②撮像格子、③両格子の周波数の和、④高次モアレ縞、などの不要縞成分が含まれている⁶⁾。等高モアレ縞は、変形格子と撮像格子の周波数の差の成分であるので不要縞成分のうち、①、②、③は、ローパスフィルタにより消去できる。しかし④の高次モアレ縞成分は、物体の大きな傾斜面において等高モアレ縞と同程度の周波数になるため消去できない。

これに対し光学的な移動格子法を計算機上で仮想的に実現させることにより不要縞成分すべてを消去できる⁵⁾。図1は、仮想移動格子法によるモアレ縞形成の

† Moiré Contouring by Means of Virtual Moving Gratings and Its Effect on Picture Enhancement by MASAKAZU ARISAWA (Yokosuka Electrical Communication Laboratory, N. T. T.).

†† 日本電信電話公社横須賀電気通信研究所

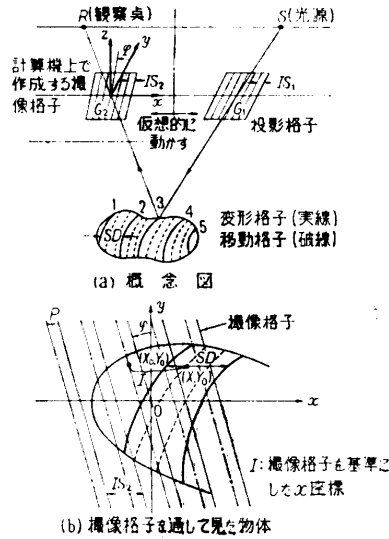


図 1 仮想移動格子法の概念図

Fig. 1 General virtual moving grating method idea.

概念図である。投影格子，撮像格子の x 方向のピッチをそれぞれ IS_1, IS_2 とする。

処理手順は次のようである。

- 1) 観測点 R の撮像系により変形格子像 (図では実線) を入力する。
- 2) この変形格子から投影格子を x 方向に $IS_1 \cdot l/n$ (n は格子の移動回数， l は 0 から $n-1$ までの整数) 移動させたとき* にできるであろう投影側移動格子 (図では破線) を 1 次式による補間法で求める。
- 3) 次に撮像格子を x 方向に $IS_2 \cdot l/n$ 移動させ，これと投影側移動格子との論理積によりモアレ縞を作成する。
- 4) l が 0 から $n-1$ まで 2), 3) の処理を行い，得られるモアレ縞画像 n 枚の論理和により等高モアレ縞が形成される。

等高モアレ縞は格子の移動により変化しないのに対し，不要縞はお互に相殺し合うので仮想移動格子法により等高モアレ縞画像の品質が向上する。

光学的な移動格子法が，投影格子と撮像格子のピッチ比が 1 でない場合，工作精度の関係で不要縞の消去を満足にできないのに対し²⁾，仮想移動格子法はソフトウェアあるいは簡単な電子装置によって実現でき容易に不要縞を消去できる。仮想移動格子法は，撮像格子のピッチの変化・回転・投影格子との相対的位相の変化に対して適用できるだけでなく，撮像格子が不規則

* 投影格子の基本波の位相を $2\pi l/n$ 変えたことに相当する。

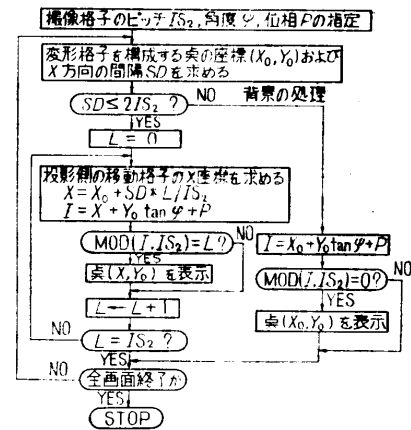


図 2 仮想移動格子法のフローチャート (撮像格子が等間隔格子の場合)

Fig. 2 Virtual moving grating method flow-chart, observing gratings being equispaced.

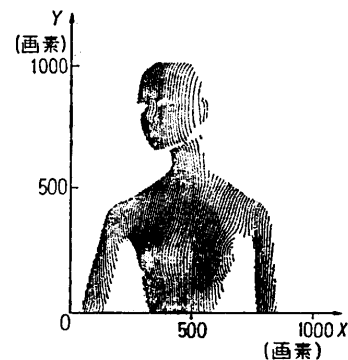


図 3 変形格子像

Fig. 3 Deformed grating pattern.

隔格子の場合 (例えば変形格子) にも適用できる。このため観測方向を変えた等高モアレ縞を，不要縞なしで観察できる。

3. 実験的検討

3.1 等高モアレ縞への適用

図 2 は，撮像格子が直線等間隔格子である場合の仮想移動格子法のフローチャートである (図 1 (b) 参照)。処理の特徴は次の 4 点である。①撮像系により入力された変形格子像 (1024×1024 画素のビットパターン) に対してスキャンライン順次に処理する ②変形格子の座標値が整数であること，撮像格子が等間隔格子であることを利用して撮像側の移動格子を剰余関数 (FORTRAN の組み込み関数 MOD) により構成する ③格子の移動回数を撮像格子のピッチと一致させる ④入力された変形格子の格子間隔が投影格子のピッチ

の2倍以上であればその部分を背景として仮想移動格子法を適用しない。

仮想移動格子法は、ディスク (容量 2.4 MB) 付ミニコン (TOSBAC-40 C 主記憶 64 kB) 上で実現した。プログラムは、主に FORTRAN 言語により作成されているが、変形格子像の 1/4 画面 (32 kB) の情報を主記憶に常駐させ、その情報をアセンブリ言語で作成されたサブルーチンでアクセスすることにより処理を高速化した。

図3は、撮像系 (3次元物体形状入力システム⁸⁾)

により入力したマネキン人形の変形格子像である。投影格子のピッチ IS_1 は、撮像面上で7画素に相当し、duty factor は 1/7 である。図4(a)はこの変形格子と直線等間隔撮像格子との論理積により得たモアレ縞画像である。(b)図は、(a)図に対してFFTによる1次元ローパスフィルタリング処理した画像である。(c)図は、仮想移動格子法の適用例である。図5(a),(b),(c)は、撮像格子のピッチ IS_2 を投影格子のピッチより小さくする ($IS_2=5$ 画素, duty factor 1/5) ことにより、基準面を傾けた (左右に 30° 回転したことに相

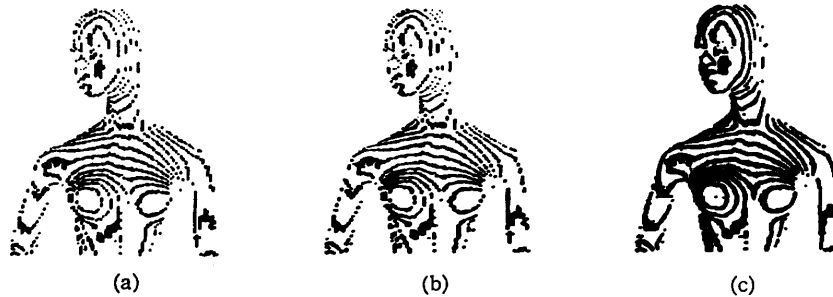


図4 各種方法による等高モアレ縞画像の比較

Fig. 4 Picture quality comprison among several methods ($IS_1=IS_2=7$, $\varphi=0$, $P=0$).

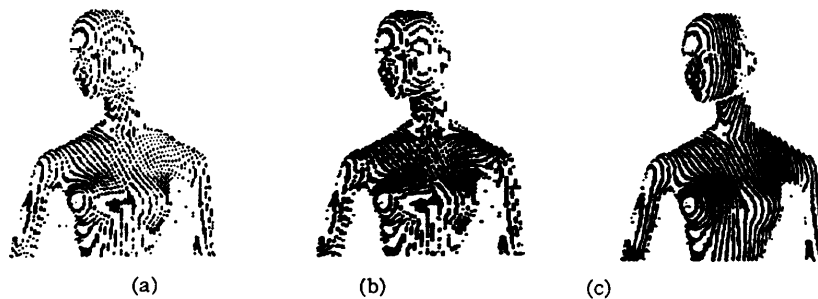


図5 各種方法による基準面を傾けたときの等高モアレ縞画像の比較

Fig. 5 Picture quality comprison among several methods ($IS_1=7$, $IS_2=5$, $\varphi=0$, $P=0$).



図6 撮像格子の位相推移による等高モアレ縞

Fig. 6 Moiré pattern obtained by shifting the phase of an observing grating ($IS_1=IS_2=7$, $\varphi=0$, $P=4$).

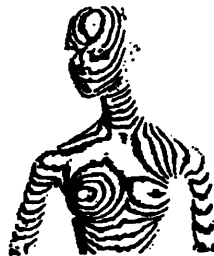


図7 撮像格子の傾斜による等高モアレ縞

Fig. 7 Moiré pattern obtained by inclining an observing grating ($IS_1=IS_2=7$, $\varphi=10^\circ$, $P=0$).

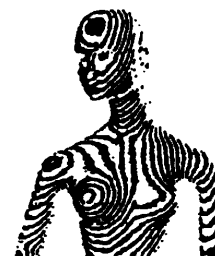


図8 撮像格子の傾斜とピッチの変化による等高モアレ縞

Fig. 8 Moiré pattern obtained by inclining an observing grating and changing its pitch ($IS_1=7$, $IS_2=6$, $\varphi=10^\circ$, $P=0$).

当) モアレ縞であり, その処理方法は, 図 4(a), (b), (c) に対応する. 論理積のみによるモアレ縞形成では, 等高モアレ縞が不連続であり, 特に図 5(a) では, 等高モアレ縞成分と高次モアレ縞成分を区別できない. 一次元ローパスフィルタリング法である図 4(b) では等高モアレ縞でなお不連続な領域が残る, 図 5(b) では等高モアレ縞が消滅し, 高次モアレ縞が一層顕著になる領域が生じる. 仮想移動格子法を適用した図 4(c), 図 5(c) では, 完全に不要縞が消去されて等高モアレ縞が連続している.

以上の処理時間は, 一次元ローパスフィルタリング法で約 120 分に対して, 仮想移動格子法では約 2 分と非常に短い.

従って仮想移動格子法は処理時間, 性能とも優れており, 通常のローパスフィルタでは得られない高品質の等高モアレ縞を得る手法と言えらる.

仮想移動格子法はソフトウェアによる撮像格子の制御により観測方向を変えたモアレ縞を容易に形成できる. 図 6 は, 撮像格子の位相のみを変えて得た画像であり, 図 4(c) と比較して基準面が前後に移動しているのがわかる. 図 7 は, 撮像格子を回転させて得た画像であり基準面を 20.6° 上下に回転したことに相当している. 図 8 は, 撮像格子のピッチを変え, なおかつ回転させた例で, 基準面を左右に 19.6° , 上下に 20.6° 回転したことに相当する.

3.2 等変形モアレ縞への適用

3次元物体がある状態から他の状態に変形するとき, 変形部分のみをモアレ縞として取り出すことができる. 変形部検出法として, 物体のある状態の変形格子を写真乾板に現像処理し, 他の状態の変形格子を写真乾板上にできている変形格子を透して観察する方法がある¹⁾. ここで得られるモアレ縞は, 2つの形状の標高差に関する等高線 (以下等変形モアレ縞と呼ぶ) となる. しかし光学的方法では, 移動格子法を適用できないので不要縞を消去できず, 等変形モアレ縞のみを抽出することは困難である.

これに対し, 仮想移動格子法は, 等変形モアレ縞形成にも適用できる. 撮像格子を直線等間隔格子でなく物体のある状態の変形格子とすれば, 得られるモアレ縞は等変形モアレ縞である. 直線等間隔撮像格子は, 投影格子を平行光線により平面 (基準面) に投影したときの変形格子と考えることができる. また撮像格子のピッチの変化, 回転は, 平面を傾けたときの変形格子の変化に対応する.

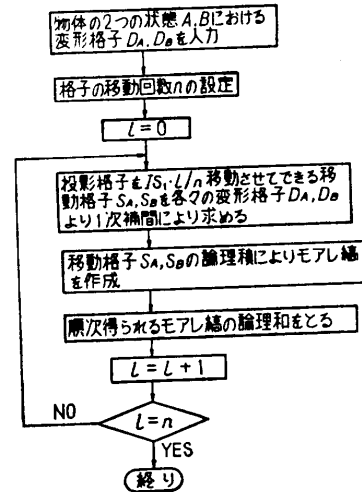


図 9 等変形モアレ縞形成のフローチャート
Fig. 9 Flowchart for moiré contouring representing deformation degree of an object.

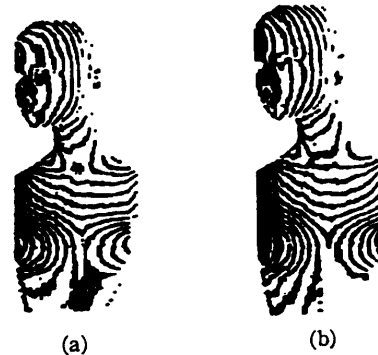


図 10 基準物体からのマネキン人形の等変形モアレ縞
Fig. 10 Moiré pattern for a manikin doll, representing deformation from a reference object.

図 9 は, 等変形モアレ縞形成のフローチャートである. 投影側の移動格子 S_A, S_B は図 2 における投影側移動格子と同様に 1 次補間により求める. 移動格子 S_B を撮像格子とみなせば, 等高モアレ縞形成の場合と同様の処理により等変形モアレ縞を形成できる. このときの格子の移動回数は, 投影格子の duty factor の逆数程度でよい.

図 10(a), (b) は, 変形格子 D_A をマネキン人形の変形格子, 変形格子 D_B をそれぞれ楕円柱・円柱の変形格子として得た等変形モアレ縞である. 楕円柱及び円柱の変形格子は, 投影格子を平行光線により楕円柱及び円柱に投影したと仮定して計算により求めた.

仮想移動格子法によって得られる等変形モアレ縞は, 光学的方法の場合と異なり, 不要縞が消去された

変形度を表わす等高線として観察される。

4. 空間周波数領域における解析

仮想移動格子法の基本的動作を実験例を使って空間周波数領域で解析する。図 11 は、変形格子像(図 3)の $Y=500$ における x 方向信号のパワースペクトルである。変形格子は、投影格子が物体の深さ(z 方向)により位置変調を受けたものである。また投影格子の光強度透過分布は正弦波状でなく矩形である。

したがって変形格子のスペクトルは、投影格子の基本周波数 $1/7$ (画素⁻¹) およびその高調波成分の両側にその強度が Bessel 関数的に変化する側波帯を有すると考えられる。投影格子の duty factor が $1/7$ であるので高調波成分の強度がかなり大きい。

図 12(a) は、変形格子と撮像格子の論理積により得たモアレ縞(図 4(a))のパワースペクトルである。この場合撮像格子は、通信方式における乗積復調の局部発振器と類似の働きをする。等高モアレ縞成分は、 $1/14$ (画素⁻¹) 以下の低周波成分であるが、この場合折り返し雑音も含まれている。最初に変形格子のスペクトルを投影格子の基本周波数を中心にその周波数の $1/2$ 以下に帯域制限しておけば、乗積復調によってモアレ縞の抽出が可能である。しかし乗積復調は、空間周波数軸における重畳積分が必要なので処理時間が長い。

図 12(b), (c), (d) は、2相、4相、7相の仮想移動格子法によるモアレ縞のパワースペクトルである。 n 相とは、格子の移動回数をさし、格子ピッチ当り仮想移動格子を n 個設定することを示す。(a) 図の論理積法は、1相の仮想移動格子法とも言える。(b) 図より、2相の仮想移動格子法により撮像格子の基本波成分及びその側波帯が減衰している様子がわかる。その理由は2相の仮想移動格子のスペクトルが、撮像格子の基本波及びその周辺でお互い逆相の関係になり相殺されることによる。(c) 図より、4相の仮想移動格子法により撮像格子の第2高調波成分及びその側波帯がさ

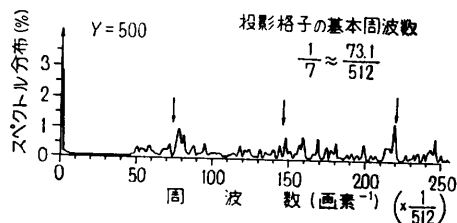


図 11 変形格子像のパワースペクトル
Fig. 11 Deformed grating spatial power spectrum.

らに減衰している様子がわかる。 $\pi/2$ ずつ位相の異なる仮想移動格子のスペクトルが、撮像格子の第2高調波およびその周辺でお互いに相殺し合うからである。(d) 図より7相程度(撮像格子の duty factor の逆数)で不要な周波数成分が十分に減衰しているのがわかる。

また、(a) 図~(d) 図により不要成分が減衰されてくるのに反し、等高モアレ縞成分が増幅されてくる様子がわかる。すなわち格子の移動とともに等高モアレ縞画像の品質が向上したことになる。

以上により仮想移動格子法による不要成分除去の理由は、等高モアレ縞成分(低周波成分)が格子の移動により原理的に変化しないのに対して、不要成分が格子の移動によりその位相が変化し、相殺し合うことが示された。

5. むすび

仮想移動格子法を、①等高モアレ縞、②等変形モアレ縞、作成に適用した結果、不要格子縞、高次モアレ縞が消滅し、高品質のモアレ縞画像が得られることが

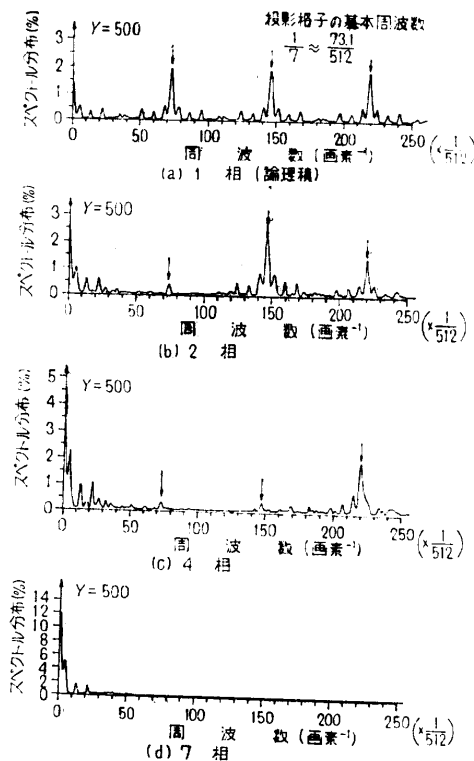


図 12 仮想移動格子法による等高モアレ縞のパワースペクトル
Fig. 12 Moiré pattern spatial power spectrum by virtual moving grating method.

明らかになった。特に②に対しては光学的方法では困難とされたものである。

本方法を運動物体に適用することも可能でこの場合には、ハードウェア化による実時間処理が必要である。その際の問題点は、仮想移動格子作成に要する演算時間である。しかしそれは次のように解決される。仮想移動格子は、乗算と加算で計算できる（除算は乗算に変更できる）。また乗算は、格子のピッチ、変形格子の格子間隔の組み合わせが少ないのであらかじめその答を計算しておき、ROM からその答を呼び出すことにより代用できる。したがって仮想移動格子法の実時間処理は十分に可能である。

最後に日頃より御指導頂く大和室長、熱心に討論して頂いた室員の皆様に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 鈴木, 他: モアレ縞による三次元計測, 精密機械, 40, No. 9 (1974).
- 2) 上田: 電子格子モアレの擬似カラー表示, 第7回画像工学コンファレンス, 8-2 (1976).
- 3) Idesawa, M., et al.: A Method for Automatic Measurement of Three Dimensional Shape, Proceeding of the Third International Joint Conference on Pattern Recognition (1976).
- 4) 高崎: モアレトポグラフィ, 画像技術, p. 27 (1971-01).
- 5) 有沢: 計算機によるモアレ縞形成の一方法, 情報処理全大, 80 (1976).
- 6) 吉野: 投影型モアレ等高線図化法, 光学, 1, No. 3, p. 128 (1972-06).
- 7) 吉野: 投影型モアレ等高線図化法の応用, 光学, 1, No. 5, p. 277 (1972-10).
- 8) 有沢, 浮田, 上田: 三次元物体の形状入力システム, 情報処理全大, 82 (1976).

(昭和 53 年 3 月 6 日受付)

(昭和 53 年 9 月 8 日採録)