

解 説

最近のモアレ応用計測

吉 澤 徹

東京農工大学工学部機械システム工学科 〒184 小金井市中町 2-24-16

(1990年11月19日受理)

The Recent Trend of Moiré Metrology

Toru YOSHIZAWA

Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of
Agriculture and Technology, 2-24-16, Naka-cho, Koganei 184

1. はじめに

二つの類似した模様を重ね合わせたときに、一見思いがけない別のパターンが生じることがある。これはモアレ現象として古くから多くの人々の興味を引いてきたようだ¹⁾、これを科学的な見地から検討した記述は古くは Lord Rayleigh によっても残されている（1874年）。また、各種のモアレパターンを楽しむキットが Oster による解説書²⁾などとともに現在でもエドマンド社から販売されている。さらにモアレ縞の性質についてはわが国でも横閥らによる興味深い報告がなされている³⁾。こうしたモアレ現象が科学的な計測手段として盛んに利用されるようになるのは 1950 年代に至ってからのことである。

モアレの応用はこれまで三段階を経てきた。その第一は 1 次元的な変位の計測である。直線状の格子 2 枚をミスマッチさせて図 1 のように重ね合わせ、その一方を移動させる。このとき次々と生じるモアレ縞を検出すれば相対的な変位量の検出が可能となる⁴⁾。わが国においてもジグボーラの位置決めなどに応用され、現在で測長機における変位量の読み取りのためにこの考えが利用されている。ただし、単純に幾何学的なモアレ現象を利用しただけではその計測の精度は 1 μm、どう頑張っても 0.1 μm 程度にすぎない。このために、機械加工精度の向上が著しい最近では、モアレ方式での測長はやや精度的に不十分といわれる。このためにモアレスケール、というよりは回折格子あるいはホログラフィックな格子によって生じる回折光を積極的に利用することによって、

より高分解能での変位検出を行うことが 1970 年代から試みられ始め^{5,6)}、現在ではこの原理に則った製品がいくつか市場に見られるに至っている。

また、第二の展開としては二次元的な変位検出へのモアレの適用がある。とくに塑性加工学の分野において歪の計測にモアレ法が盛んに用いられている。これは試験片上に基準となるパターン（その多くは直線状の格子あるいは直交する直線格子模様である）を焼き付けておき、これに応力が加わって変形したときにできたパターンとともに基準パターンとを重ね合わせることで生じるモアレを利用して、歪の二次元的な分布をとらえようというものである。この手法に関してはすでに成書^{7,8)}がまとめられており、以後手法としては新しく発展が少ないのでここでは省略させていただく。

さて、こうしたモアレ現象がとくに注目を集めたのは高崎による三次元形状の測定法⁹⁾、いわゆるモアレトポグラフィ法の影響が大きい。図 2 のように、等高線によって見事に三次元形状をとらえることができる。この原理は周知の部分が多いので詳細^{1,9)}は略すが、装置としての実際の光学系は図 3 のように実体格子型と投影格子型とに大別される。製品化されたものは外観上の体裁などの点から投影格子型が多いが、測定精度に関していえば、光学系がはるかにシンプルであることから（アライメント誤差およびレンズ収差による影響を含めて）、実体格子型がはるかに優っている。モアレ等高線法の具体的な応用としては、“非接触で短時間にモアレ画像がえられる、また等高線表示により直観的に全体的な三次元形状が理解できる”などの利点があるために、まずは從

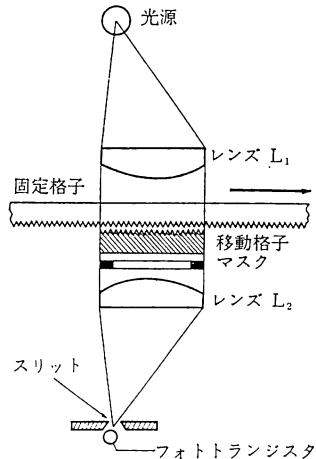
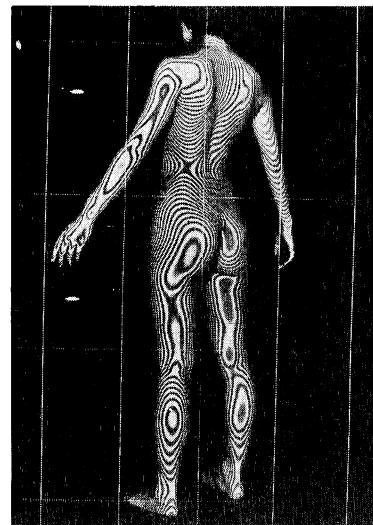


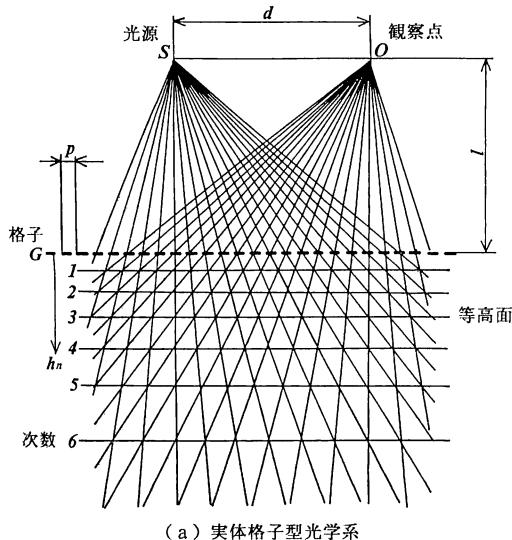
図 1 モアレによる変位計測

図 2 実体格子型モアレトポグラフィ法による撮影例
(高崎教授にいただいたステレオペアの1枚)

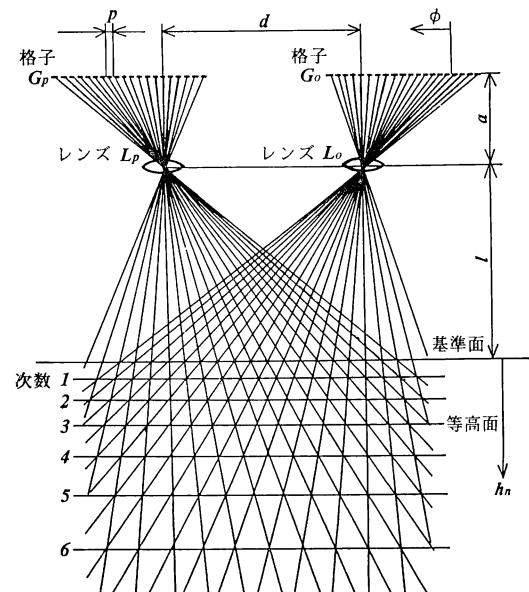
来の接触式測定法が適用しにくかった生体関連の計測への応用が行われた。整形外科における側弯症検診に代表される医学的な応用、口腔内および顔貌に関する歯学での利用、あるいは人類学、被服学などの研究が活発に行われた。その成果はこうした研究の発表の場として大きな役割を果たしたモアレ研究会によって主要な成果がまとめられている¹⁰⁾。

さて、こうして活発な研究が行われたモアレ計測に関しても80年代の後半からはややかけがりがさしてきたというのが正直な感想である。よくいわれることではある

が、計測の原理が確立し、製品化が行われ、さらにユーザーが製品を利用してそれぞれの分野での研究を行うようになると、きわめて特化した研究が対象となるために、多数の人の目にはつきにくくなることや、この段階に至ると、基礎的な研究を行っていた光学分野の研究者にとっては、原理の解明が終わってしまうために目新しさがなくなってしまう。さらに製品も一巡してしまって販売が停滞するといった事態が生じてくる。モアレ技術



(a) 実体格子型光学系



(b) 投影格子型光学系

に関してもこうして状況が生じており、近年はいさか伸び悩み気味である。製造現場にあっても工業的に使用するためには、モアレ計測の精度がややもの足りず、とくに最近の機械加工の精度にいさか追い付けていかなくなっている面もある。

通常のモアレ方式にあっては、その感度（等高線間隔）はせいぜい $10 \mu\text{m}$ 程度までである。またそれほど高い精度が要求されない生体関連計測にあっては、いわゆる「一例計測」によるパイロットスタディではなく、「多数例を対象とした計測による普遍的な結果」が求められるに至り、このためにはモアレ縞のコンピュータによる（できうれば自動的な）解析処理が求められるようになってきた。

ところがこのコンピュータ処理という問題に対してはモアレ縞はきわめて不向きな性質を備えている。その一つはモアレ縞は等高線を形成しているために、物体が凸面であっても凹面であってもパターンが同一であることから、人間であればきわめて容易になしいうような物体表面の凹凸形状の判定がコンピュータでは（1枚のモアレ画像からでは）不可能であるという事態である。しかもモアレ縞のビジビリティは画像全面にわたって必ずしも均一ではなく、かなりのむらが伴っている。このためにコンピュータ処理にあたっての良好な画像の取込みや二値化また細線化作業がきわめて行いにくく、また測定面の傾きが大きくなるにつれてモアレ縞が密になってしまい縞の分離が困難になるといった事情がかなりの障害となってくる。「モアレ縞は画像処理するためではなく、写真として眺めるものである」とか「もともとフラットに近い物体を対象としているのだ」といった冷やかし（?）があるとはいえ、モアレ愛好家にとってはかなり深刻な問題となっている。

なお、モアレ縞のコントラストに関しては「測定面が格子から離れるとき格子の影が落ちなくなるために縞が見えにくくなる」という素朴な解釈では不十分であり、面の傾き具合が影響していること、すなわちモアレ縞の局在が大きく関与している¹¹⁾ことを指摘しておきたい。

このように、モアレ技術の普遍化のためにはこうした問題の解決が目下の課題となってきてはいるのだけれども、まずは最近の実験的な応用をみるとこととしよう。

2. モアレ計測の実例

3次元計測という立場から最近の実用例を拾ってみよう。モアレ縞による等高線表示は立体形状の把握にきわめて直観性に富んでいるところから、製品のセールスプロ

モーション用の写真として利用されることが今もって行われている。たとえばP化粧品会社は女性用下着を訪問販売する際に着衣前後の差異とその効果とをモアレ写真によって示したり、あるいはM自動車では昨年発売した乗用車のやや丸みを帯びたボディが女性のヌードや仏像のイメージから派生したコンセプトであることをモアレ写真によるプロモーションフィルム（ヨーロッパ向けであるそうだが）で暗示させている。こうした応用では、とくにモアレ計測というレベルに至ってはいないが、モアレのもつ直観性や芸術性が巧みにいかされているといえよう。

さて工業的な計測という立場からこそ2, 3年の具体的応用例を見るならば、その対象は平面性の計測が多いようである。鋼板などの大物体の平面性を $\pm 0.5 \text{ mm}$ 程度の精度でとらえる装置（新日本製鐵・平坦度計）が最近市販された。これに凹凸判別のために、モアレ等高面に傾斜をもたせて一種の光切断の考えを取り入れてあるようである。また粗面をもつ各種素材の平面性をモアレで観察しようという試みが数社で行われているが、どういう理由からか対象は磁性材料が多いようである。

また種々のディスク類など反射面を対象とした平面度計測もいくつか行われている。かつて IC ウエハの計測にモアレ法が試みられたが、その後は平面性があまり問題視されなくなったようである。しかし最近になってウエハの大面積化に伴い再び平面性が問題にされだしている。ただし、この場合には粗面ではなく鏡面を対象とするケースが多い。このために小さい格子定数による回折効果を積極的に利用することが可能となる¹²⁾。

この考え方によれば微細なルーリングを行った格子を用い、高次回折光を利用することによってモアレの感度を数 μm にまで高めることが容易となる。さらにコヒーレント光源を使用してフィゾー干渉縞をモアレ縞にあわせてのせることもできる。また、さらに深い凹凸を対象したいわゆる3次元計測に関しては、相変らず生体を対象とする報告が多く、工業的な目的で三次元形状を測定したという優れた成果は筆者の狭い見聞ではとらえられていない。

なお、ハードウエアとしてのモアレ計測装置は多く販売されたにもかかわらず、モアレ画像を処理するためのソフトが不足していたが、先年モアレ解析用のソフトウェア（ニコン・Cosmozone）が発売された。マニュアルによるディジタル化が必要ではあるが、入力データに基づいての三次元座標の算出、面積・体積計算やワイヤフレーム、サーフェイスモデルによる三次元表示が図4の

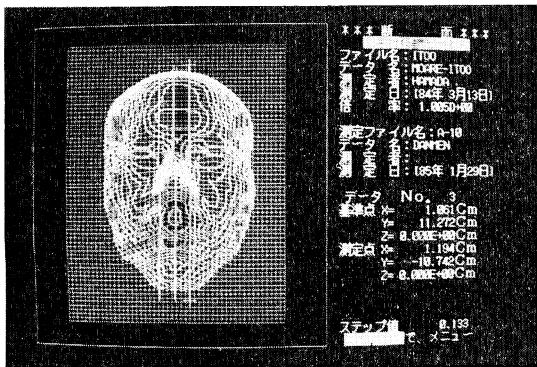


図4 モアレ縞解析用ソフトウェア

ように手軽に行える¹³⁾。

3. モアレ計測の新しい展開

このようにさらに技術的なブレークスルーが必要とされるモアレ技術ではあるが、ごく最近に至って急激な展開をみせる気配がある。その一つとしてはモアレ応用干渉法としてとらえられるような、主として位相物体を対象とした計測法が喧伝されている。基準格子が位相物体を通して変形した様子を検出する手法であるが、これに関しては横関による報告¹⁴⁾があり、また（あまりフェアな内容とは思われないが）Kafri らによる著書¹⁵⁾もあるので参照いただきたい。また Kafri らのいうモアレデフレクトメトリの考えに基づいた計測装置が製造され（Rotlex 社）、わが国にも紹介されてはいるが、一種のベンチャービジネスとしてその評価は今後をまつしたい。

またさらにモアレ三次元計測に関しても技術の高度化を目指す動きがある。さきにも触れたように、三次元計測法としてのモアレ技術には“感度不足（等高線間隔が

粗い）、コンピュータ解析に向かない”という弱点があった。最近これをカバーする試みが積極的に行われている。具体的にはモアレ計測への位相シフト法の導入と、モアレ法の延長上にあるというべきパターン投影法という二つのアプローチである。

3.1 位相シフト法の導入

従来のモアレトポグラフィにあっては、縞上の点についてしか測定ができないために、測定点が粗くなり、位置の特定を含めて精度が低いという欠点があったが、いわゆる位相シフトを行うことによって縞走査法の考え方を取り入れれば、面の凹凸の自動判別を含めて、こうしたモアレ法の欠点を補うことができる。さきの投影格子型の場合にはモアレ縞の移動は容易であり、2枚の格子の一方を移動することによってモアレ縞を移動し、見かけ上の感度を高めることができる。その結果、極端な例としては、紙幣の透かし模様の凹凸やタイプ印字による紙面の窪みなどサブミクロンの感度でとらえられている¹⁶⁾。

また Gu らは図5のようにフーリエイメージを利用し、一方の格子を機械的に送ることによってモアレ縞の位相をずらして、縞走査の原理を適用している¹⁷⁾。また新井らは CCD カメラ受光面の画素を巧みに利用することによって、見かけ上1枚のモアレ画像を使っただけでもこの考え方を実現できることを示している¹⁸⁾。

さて投影格子型ではこのような位相シフトが可能となるが、光学系がシンプルでないこと、あるいは格子移動法（露光中に格子を面内移動させること）による格子ピッチの平均化¹⁹⁾ができないといった問題から、見かけ上の感度はあがっても、真の精度は高められないおそれがあった。ところが実体格子型においては格子が1枚であるために、格子移動法を行いつつ、縞の位相をきちんとシフトさせることは厳密には不可能（だからこそ高峰

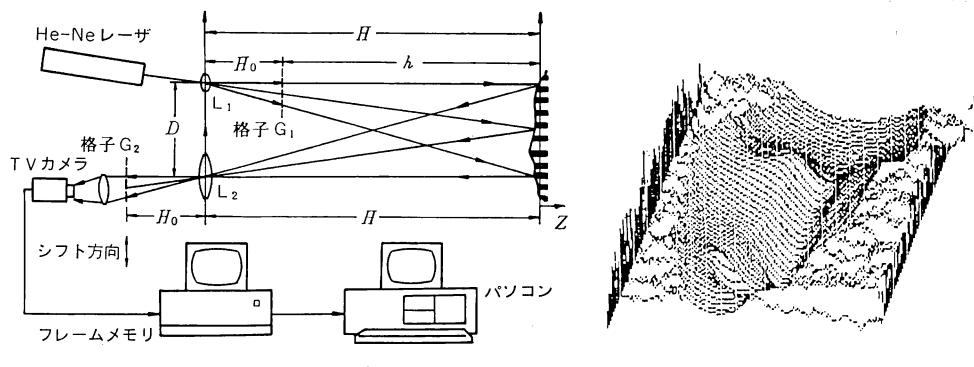


図5 位相シフトを導入したモアレ法

による格子移動法での美しいモアレ写真がえられる)である。しかし、近似的には格子および光源を同時に動かし、さらに格子の面内移動を加えることで有効な結果がえられる。

図6において、コイン表面の凹凸(約0.25 mm)は等高線間隔(この場合0.65 mm)の間に埋もれてしまう。しかし、さきの考えでえられた図7のような4枚のモアレ画像(当然のことながら等高線らしきものは黑白模様としてしか見えない)を処理することで、図8の結果がえられる。ちなみに格子を面内移動させて格子ピッ

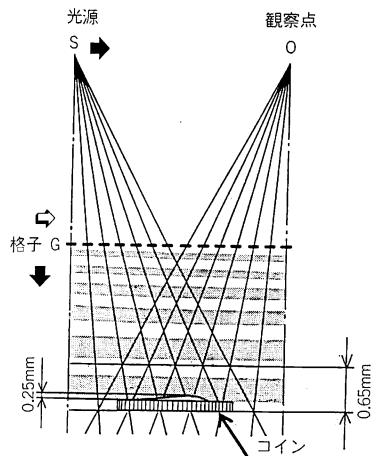


図6 実体格子型モアレ法における位相シフト
(光源は格子面に平行に、格子は面に直角および面内方向に移動する)

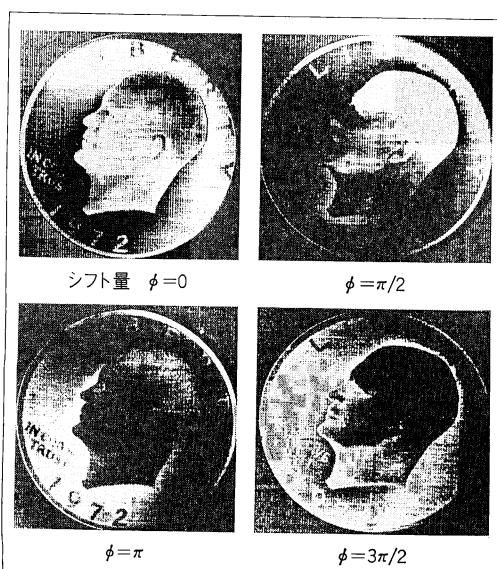


図7 位相シフトによるモアレ画像

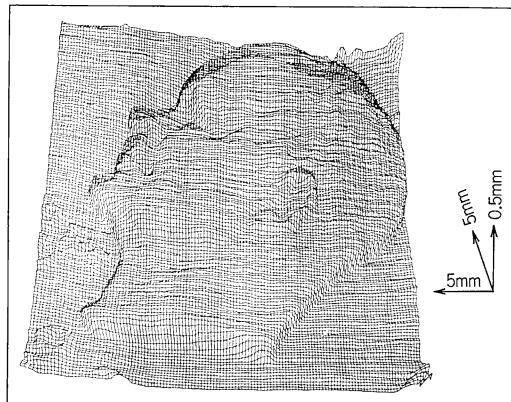


図8 モアレ画像(図7)の解析例

チの平均化を行った場合にえられる微妙な効果を図9に示しておくる。二つの結果を注意して比較していただきたい。このようにしてえられた結果は目下検討中であるが、本来の等高線間隔を少なくとも30分割した程度の精度が達成されていると思われる。

3.2 パターン投影法への発展

モアレ縞は本来基準となる直線模様のパターン(基準格子)と、これを物体へ投影したことによりえられる(物体の三次元形状に応じて変形してできた)変形格子像とを重ね合わせることにより生じるものである。ということは変形格子像を(モアレ等高線に変換せずに)そのまま直接解析しても対象物体の三次元形状が得られるはずである。

こうした立場にたってみると、近年いろいろと報告されているような、なんらかのパターン投影を行う三次計測法の多くは(当事者の発想が何に基づくかは別として)モアレ法の発展した形としてとらえることができそうである。その例のいくつかを表1に示す¹⁹⁾。

しかし、これらについて論じることは本稿の主題からはいささか逸脱してしまうこととなるので、一つの例のみを挙げることとして、これ以上の深入りを避ける。図10(a)は石膏像に格子パターンを投影することでえられる変形格子像である。このパターンの変形(いわゆる光切断像と同様である)あるいは変調の状態は光学系の幾何学的な配置に基づいて解析可能であり、もとの物体の形状は例えば図(b)のように表すことができる。このようにしてえられた三次元情報は、CADあるいはCAM用の入力データとしても利用することができる²⁰⁾。

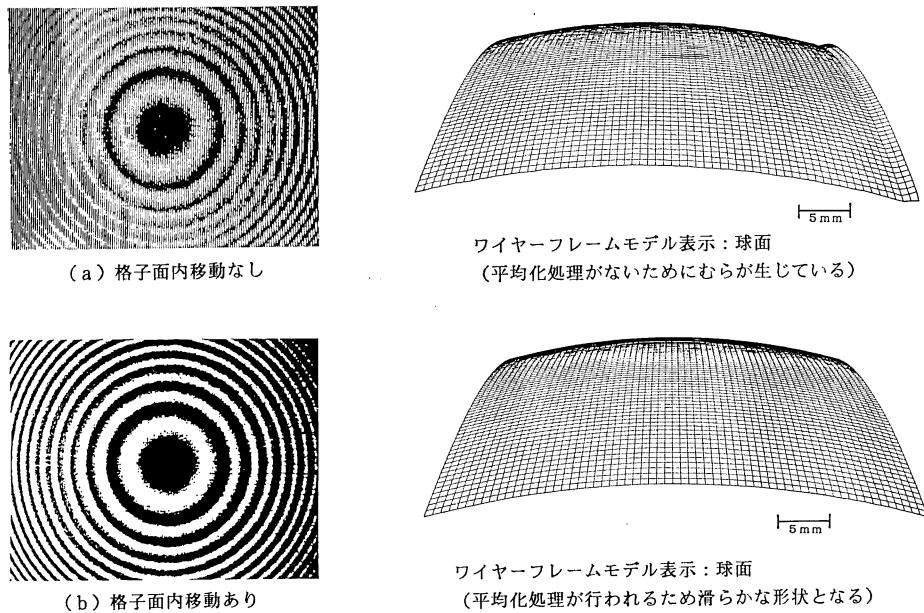


図9 格子の面内移動の効果 (滑らかな表面の球を計測。微妙な差異が生じている)

表1 パターン投影による三次元計測法の例

パターン投影法	バイナリー・パターンの投影	ラスター・ステレオ方式—ミュンスター大学
	変形格子像解析方式—東京農工大学	
	空間コード化方式—大阪大学	
	フーリエ演算方式—電気通信大学	
正弦パターンの投影	2光束干渉方式—ワイルコ社, ザイゴ社	
	偏光干渉方式—ニューヨーク工科大学	
カラー・パターンの投影	回折光方式—日本電気	

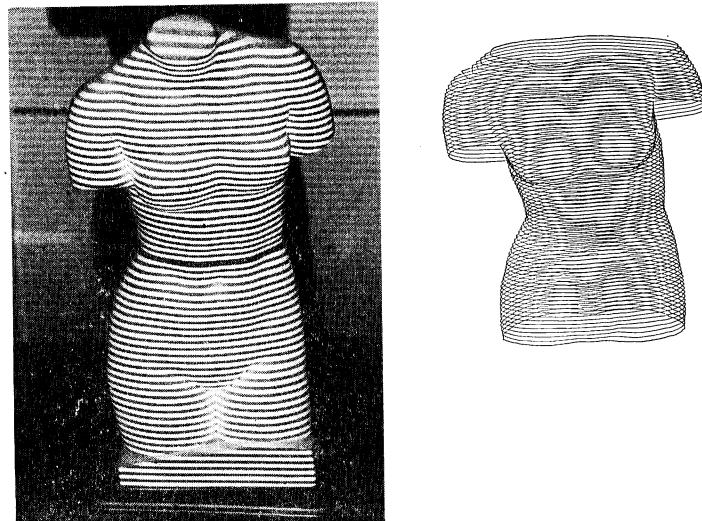


図10 パターン投影による石膏像の測定

4. おわりに

三次元計測への応用を中心として、最近のモアレ計測技術について記したが、より高度な技術としてモアレ法が定着するためには、従来のレベルになんらかの形でのグレードアップが要求されている。とくに工業的な応用のためには、計測の高精度化と縞画像の自動解析とが必須の条件である。モアレ現象自体はある意味できわめてなじみのある理解しやすい現象であるだけに、計測分野への応用がさらに進むことを期待したい。

文 献

- 1) 吉澤 徹：“モアレ”，画像計測入門（精機学会画像計測分科会編，昭晃堂，1979）pp. 72-92.
- 2) G. Oster: *The Science of Moire Patterns* (Edmund Scientific Co., Barrington, 1969).
- 3) S. Yokozeki, Y. Kusaka and K. Patorski: “Geometric parameters of moire fringes,” *Appl. Opt.*, **15** (1976) 2223-2227.
- 4) 清水嘉重郎：“モワレじまの光学とその応用”，精密機械，**32** (1966) 857-864.
- 5) G. Makosch: “Optical method for testing the precision of linear motions,” *Appl. Opt.*, **12** (1973) 2054-2056.
- 6) W. ハントレー：“格子干渉計”，O plus E, No. 17 (1981) 84-87.
- 7) P. Theocaris: *Moire Fringes in Strain Analysis* (Pergamon Press, Oxford, 1969).
- 8) A. Durelli and V. Parks: *Moire Analysis of Strain* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1970).
- 9) H. Takasaki: “Moire topography,” *Appl. Opt.*, **9** (1970) 1467-1472.
- 10) モアレ研究会記念論文集：モアレ計測とその応用（モアレ研究会，1984）。
- 11) T. Yoshizawa and H. Tashiro: “Localization of fringes in moire topography,” *Opt. Acta*, **29** (1982) 1073-1079.
- 12) W. Jaerisch and G. Makosch: “Optical contour mapping of surfaces,” *Appl. Opt.*, **12** (1973) 1552-1557.
- 13) 伊藤幹生：“CGによる立体像の構築…cosmozoneの実際的な応用”，O plus E, No. 90 (1987) 84-89.
- 14) 横関俊介：“モアレ応用干渉法とその応用”，O plus E, No. 128 (1990) 113-119.
- 15) O. Kafri and I. Glatt: *The Physics of Moire Metrology* (John Wiley & Sons, New York, 1990).
- 16) 吉澤 徹，大谷幸利：“サブミクロン感度をもつモアレトポグラフィ法”，精密工学会誌，**55** (1989) 152-159.
- 17) R. Gu and R. Zhou: “Talbot projection moire topography and its automatic fringe process using phase shift methods,” *Proc. SPIE*, **1230** (to be published) 638-640.
- 18) 新井泰彦，倉田忠雄：“縞走査干渉計の手法による高速かつ高分解能なモアレトポグラフィ法”，光学，**15** (1986) 402-406.
- 19) 吉澤 徹：“光による3次元計測技術”，O plus E, No. 126 (1990) 87-96.
- 20) 吉澤 徹，小松原良平：“3次元形状の非接触自動計測技術とデータ処理”，応用機械工学，**30** (1989) 68-72.