モアレトポグラフィー

理化学研究所 出澤 正徳
谷田 貝 豊彦

モアレトポグラフィーによれば、物体表面形状を示す等高線画像が非接触で容易に得られ、工学、医学、人間工学などの広範な分野で利用されている。ごく最近になって、従来の光学的技法のみでなく、テレビ技術や電子計算機技術などの電子工学的技法が導入され、解析手法の確立、さらには計測の自動化が進められている。

1. ま え が き

3次元物体の表面形状を非接触で計測する方法としては、従来から写真技術を用いた光学的方法が広く使用されている。特に写真計測法は地図の作成など大規模に使用されている。2枚の写真を異なった位置から撮影し、それらの写真上での対応点を求め、いわゆる三角測量の原理に基づいて、その点の3次元座標値を求めるものである。

実際にはステレオコンパレーターと呼ばれる装置により、異なった位置から撮影された2枚の写真をそれぞれ左右の目で観測し、対象物を実(立)体視し、その空間内の3次元の位置を示す浮標を同様な方法で表示し、それによって実体視された対象物表面上を指示して、そのときの両眼視差より3次元座標値を算出するものである。かなり精度の高い計測が可能であるが、2枚の写真上の対応点を機械によって自動的に検出することが困難であるため、計測の自動化が遅れている。

また1枚のフィルム上に立体像が記録できる技術としてホログラフィーがあるが、特殊な光源が必要であるとか、対象物の大きさがかなり制限されるとか、特に、その立体像から定量的な情報を得る簡単な方法がないなどの理由により、あまり形状計測には利用されていないようである。

モアレトポグラフィーは、これらの計測法を相補う形で発展してきている。この方法によれば、対象物の表面形状を示す等高線画像を非接触で容易に得ることができる。前述のステレオ写真による計測法においては、接触

法における深触針に相当する浮標によって、実体視された対象物の像をあたかも実際の物体を計測するようにして、3次元座標値を計測するものである。しかし実際の物体の計測と異なり、3次元の自由度を持っている浮標に対して物体からの反力に相当するものがないため、計測作業には、高度な技術が要求される。

これに対して、モアレ縞等高線画像は、奥行き方向に等高線で目盛りが付されているのと同様であり、計測作業は、縞次数の割振りが必要であるが、2次元の座標値を求めることに帰属され、計測に際してさほど高度な技術は必要とされない。前述の写真計測のように計測精度を高めることは困難ではあるが、このように計測の作業が簡単であるのと、直観的にもわかり易いため、急速に普及してきている。最近では、工学のみでなく、医学、人間工学、被服学などの広範な分野において使用されるようになっている。

しかし、このようにしてモアレ縞等高線画像から定量的な情報を得る作業は、立体写真による計測にくらべかなり容易であるとはいえず、必ずしも簡便であるとはいえず、この作業の自動化の必要性が叫ばれ、テレビ技術や電子計算機を利用したモアレ画像の解析処理が各所で試みられている。

本稿においては、モアレトポグラフィーにおける等高線画像の生成原理とモアレトポグラフィーの種々の技術、テレビ技術、電子計算機技術を応用したモアレ縞等高線画像の解析処理と計測自動化の方法を紹介し、モアレトポグラフィーの今後の課題について検討する。

2. モアレトポグラフィーの原理

2.1 モアレ縞と立体計測

"Moiré Topography" by Masanori Idesawa and Toyohiko Yatagai
(The Institute of Physical and Chemical Research, Saitama)

2つ以上の規則的な模様を重ね合せたときに、元の模様とはまったく異なった縞模様が現われる現象をモアレといい、この縞模様はモアレ縞と呼ばれている。身近な例としては、レースのカーテンの重なり合った部分、ゴルフ練習場のネットの重なり合った部分などに観測できる。

このモアレ現象はかなり古くから知られていたものと思われる。思いがけない模様が現われてくるため、美学的な見地から、模様の生成に重宝がられていることはよく知られた事実である。しかし意外なことに計測に応用する試みは比較的新しく、1940年代頃からであるといわれている¹⁾。モアレトポグラフィーはさらに新しく、1970年に Meadows²⁾ らや高崎³⁾によって、比較的大きな粗面物体の形状測定への応用があいついで報告されるや否や各方面から大きな注目を集めることになった。特に高崎によって報告された移動格子法による不要縞除去手法を適用したマネキンの鮮明な等高線モアレ縞写真は、これ以降のモアレトポグラフィーの発展の端緒となった。

この方法は Theocarís⁴⁾ の Shadow Moiré 法を発展させたもので、被測定物体直前に基準格子をおき、これを点光源で照明し、物体上にできた基準格子の影と基準格子とのモアレ縞を観測するものである。格子照射型あるいは実体格子型モアレトポグラフィーと呼ばれている。

その後、吉野ら^{5)~7)}によって、基準格子を投影レンズと結像レンズの像面の2つに分割した投影型モアレトポグラフィーが考案され、運動中の物体の計測や十数mもの大物体の計測など測定対象物の範囲が拡大された。また投影格子と観測格子とを独立に変化できることから、後述するような新たな計測への可能性がひらかれた。

モアレトポグラフィーの実際的な方法としては、ここで述べた格子照射型および格子投影型の2つの方式が基本となっている。

2.2 格子照射型モアレトポグラフィーの原理

格子照射型モアレトポグラフィーにおいては、図1のように被測定物体直前に平行等間隔の直線格子（基準格子）を配置し、これを点光源Sで照明して放射状の光束を作り、被測定物体上に基準格子の影を投射する。この影を同一の基準格子を通して観測し、基準格子およびその影とのモアレ縞として等高線画像を得る。

いま点光源Sおよび観測点Oが基準格子面より距離 b の位置に格子線に直角方向に l だけ離れて配置されており、格子のピッチが p であるとすると、 n 番目の等次数モアレ面（等高線の切断面に相当する面）の基準格子面からの距離 h_n は次式で表現できる。

$$h_n = \frac{bnp}{l - np} \quad (1)$$

図1 格子照射型モアレトポグラフィー原理図

ここで次数 n は基準格子の1つの透過部を通った光束が、その部分から何ピッチずれた透過部を通して観測されているかを示している。(1)式は、点光源Sと観測点Oを結ぶ直線および基準格子面を示す直線と点光源から出て格子を通過する光束の直線とそれが通過した位置から n ピッチ離れた透過部を通して観測点に達する光束の直線とが作る2つの三角形、たとえば $n=2$ においてQ点に注目すると、 $\triangle SQO$ および $\triangle AQB$ とが相似（すなわち $\overline{SO} : \overline{AB} = l : 2p = (b + h_2) : h_2$ の関係が成り立つ）であることから簡単に求められる。

この(1)式の h_n は基準格子面内で平行移動しても変化しない。すなわち、モアレ縞は格子を移動しても動かないことを示しており、後述の不要縞除去において利用している重要な性質である。

2.3 投影型モアレトポグラフィーの原理

図2に示すように、格子投影型においては基準格子が投影レンズおよび観測レンズの像面の2つ（投影格子および観測格子）に分割して配置される。格子照射型では被測定物体と同程度の大きさの基準格子を被測定物体前面に配置する必要があり、測定物体の大きさ、適用状態、格子の製作などに制約があった。これに対し投影型では配置の自由度が増し、計測誤差を起こす要因が多くなりはあるが、格子照射型の場合の制約が緩和され、その適用範囲が拡大された。

モアレ縞等高線画像生成の原理は格子照射型の場合と基本的にはほぼ同じである。投影格子の影は投影レンズの節点 L_F を中心に放射状に投射され、これが物体表面にぶつかる部分に光の帯が投射され、観測格子面上では物体の形状に応じて変形された変形格子像が観測される。

物体が球状の面の場合、変形格子像は図3(a)のようになる。これを観測格子を通して観測すると同図(b)に

(a) 投影型モアレトポグラフィーの原理と観測格子位相変化による等次数モアレ面の変化
(b) 観測格子位相変化による等高線の変化

図2 投影型モアレトポグラフィーの原理図

示すモアレ縞が得られる。同図で変形格子線と観測格子線とが交差し、白いモアレ縞が観察される部分は、観測格子も投影格子と同様に節点 L_o を中心に放射状に投影されたと考えると、これと投影格子との影が物体表面上で重なり合う部分に相当する。このような部分は図2(a)のように一定高さの平面群 ($-4, -5, \dots$) を形成する。

これらそれぞれの平面上では、重なり合う観測格子線および投影格子線の番号の差 ($n = n_m - n_g$: モアレ縞の次数) が等しくなり、これらの面は等次数モアレ面と呼

ばれ、等高線の切断面に対応している。したがって、モアレ縞はこれらの平面群で物体を切断したときの切口に相当し、図2(b)のようにモアレ縞は等高線画像となる。

図2(a)に示す投影型モアレトポグラフィーの基本配置において、 n 次の等次数モアレ面の高さ z_n は、モアレ縞次数を n 、格子ピッチを p 、投影・観測両光学系の節点間距離を l 、両光学系における節点から像面までの距離を a 、投影・観測両格子間の位相差 ($\delta_m - \delta_g$) を δ で表すと、格子投射型の場合と同様式、

$$z_n = -\frac{al}{p(n+\delta)} \quad (2)$$

で与えられる。さらに観測面上で n 次のモアレ縞が観測される点の座標を (x_m, y_m) とすると、物体空間での3次元座標 (x_n, y_n, z_n) は(2)式と、

$$x_n = \frac{x_m z_n}{a}, \quad y_n = \frac{y_m z_n}{a} \quad (3)$$

で与えられる。位相項 δ を変化させることにより、等次数モアレ面は図2(a)に示すように高低方向に連続的に移動でき、等高線の内挿、物体の凹凸判定が行える。また逆に位相項 δ を一定に保って投影・撮影両格子を各格子面上で平行移動しても等次数モアレ面は変化しない。この性質は格子投射型の場合と同様に、不要縞の除去に利用されている。

2.4 投影型モアレトポグラフィーの一般式と等次数モアレ面⁹⁾

モアレ縞が等高線となるのは、ある特定の条件が満足されている場合のみである。格子照射型では点光源および観測点(カメラレンズの節点)が基準格子面から等距離の位置に配置されることが必要である。また格子投射型では、投影・観測両光学系の光軸が平行で、2つの基準格子は各光軸に垂直で等価ピッチ ($p_m/a_m, p_g/a_g$) は等しいなどの条件が満足されなければならない。

前述のモアレトポグラフィーの式は、このような特殊

図3 変形格子像とモアレ縞²⁷⁾

図 4 一般的な配置における等次数モアレ面の一例⁹⁾

な条件の下に導出されたものである。

一般的な配置における理論式も導出され (かなり複雑なのでここでは省略する)、種々の検討がなされているが、ここでは等次数モアレ面 (次数の等しいモアレ縞に対応した物体空間における面) の形態を示す鳥瞰図の一例のみを図 4 に示した。

モアレトポグラフィーの基本配置では等次数モアレ面は観測面に平行な平面となるが、一般には平面とはならず図に示したようにゆがみを生じて、モアレ縞は等高線とはならない。また等次数モアレ面の間隔は一定とはならないことに御注意いただきたい。

2.5 モアレトポグラフィーの技術

モアレトポグラフィーは、前述の格子照射型および格子投影型が基本になっているが、画像の質の改善や凹凸情報の付与などのため種々の技法が使用されている。以下では、これらのうちの主なものについて紹介する。

(1) 不要縞の除去法

格子照射型、格子投影型のいずれにおいても、条件によっては、モアレ縞等高線画像以外に基準格子、変形格子あるいはこれらの高次項どうしで生成される偽モアレなどが現れて、モアレ縞等高線画像が見にくくなる。

前述のように基準格子を格子面内で移動しても、モアレ縞等高線は移動しないが、これらの不要縞は移動する。したがって、撮影中に基準格子を格子線に直角方向に移動させると平均化され、不要縞が除去される。この方法は移動格子法と呼ばれている³⁾。

この他には、ローパスフィルターによる方法もある。

(2) 凹凸情報の記録法

等高線画像に符号 (物体の凹凸) も記録するために、モアレ縞等高線画像をステレオ撮影する等高線モアレ縞ステレオ法¹⁰⁾、格子投影型において、一方の格子の位相を部分的にずらしておき、その部分における縞のずれ具合から物体の凹凸を知る方法¹¹⁾、色格子を用いてモアレ縞の色の順序によって凹凸情報を記録する方法などが試みられている^{12)~14)}。

(3) 物体の変形 (形状差) のモアレ縞の生成

物体の変形前後のモアレ縞等高線画像を重ね合せ、2 次モアレを発生させて変形を計測する方法¹⁵⁾、格子投影型において、観測格子あるいは投影格子の代りに、物体変形前の変形格子像を用いて、物体の変形前後の形状差を示すモアレ縞を生成する方法などがある¹⁶⁾¹⁷⁾。

(4) その他の技術

以上の他に、投影・観測両格子の傾きを変えて等高線間隔を変化する方法、観測系の格子をも投影して等高線を物体表面に作る方法、一方の基準格子のピッチあるいは格子の光軸まわりの回転角を変化して、等次数モアレ面を傾斜させ傾斜切断モアレ縞写真を得る方法¹⁸⁾¹⁹⁾、回転体表面形状を展開したモアレ縞等高線画像を得る展開記録法などがある²⁰⁾。また写真フィルムの代りにテレビカメラで撮像し、モアレ縞等高線画像を実時間で得るテレビ記録法も試みられている。

2.6 新しい型のモアレトポグラフィーの試み

従来のモアレトポグラフィーでは、モアレ縞等高線画像を写真フィルムに記録するのが主であったが、電子技術との融合あるいは計測の自動化に関連して種々の新しい試みがなされている。以下では、これらのいくつかを紹介する。

(1) レーザービーム走査型モアレトポグラフィー^{22)~24)}

投影型モアレトポグラフィーにおいて、投影格子の代りにレーザービーム走査によって物体表面に変形格子を描き、これと観測格子とを重ね合せてモアレ縞等高線画像を得るもので、従来法における光の強度の限界を克服し直径が数十 m もの大物体の計測をも可能ならしめた。

(2) 格子ホログラム²⁵⁾²⁶⁾

格子投影型において、観測格子を使用し、変形格子像 (格子ホログラム: ホログラフィーのホログラムに対応する) のみを撮影し、これに参照用格子を重ね合せてモアレ縞等高線画像を得るものである。参照用格子のピッチ、傾き、位相などを変更することにより、1 枚の格子ホログラムから種々のモアレ縞等高線の生成および凹凸の判定が可能である。

(3) 走査モアレ法²⁷⁾

モアレ縞は規則的な模様を規則的にサンプリングした

図 5 走査モアレ法によるモアレトポグラフィ装置

場合にも生成される。走査モアレ法は像走査手段により変形格子像を観測格子に相当する仮想格子線上の点でサンプリングして、モアレ縞等高線画像を得るもので、モアレ縞の生成と計測とが同時に行える。走査モアレ法によるモアレトポグラフィ装置の概念図を図5に示した。仮想格子線の位相を変化させて凹凸の自動判定を行い、計測の自動化が可能である。

(4) 電子格子モアレ法²⁸⁾²⁹⁾

変形格子像をテレビカメラで撮像し、観測格子を電子的に発生し、ビデオ信号レベルで変形格子像に重ね合わせてモアレ縞等高線画像を得るものであり、原理的には走査モアレ法と同じである。上田はこの方法により、断面形状や変位、変形の実時間連続表示などを行っている³⁰⁾。

(5) 振動格子法³¹⁾

格子投影型で投影・観測両格子を電気的手段で独立に振動させ、不要縞の除去、凹凸の判定などを行うもので、テレビカメラで撮像することにより実時間観測が可能である。図6に振動格子法によるモアレトポグラフィ装置の原理図を示した。

3. モアレトポグラフィによる立体形状計測

モアレ縞等高線画像は人間にとって直観的に理解し易く、定性的な判断には十分な役目を果たしている。近年、

図 6 振動格子法による実時間モアレトポグラフィ装置³¹⁾

種々の分野において、モアレ縞等高線画像から定量的な情報を得ることが要求されるようになり、電子計算機を利用したモアレ縞等高線画像の解析が各所で試みられている。しかし、1枚の等高線画像のみから物体の凹凸情報を得ることは原理的にも困難であり、この不確定性を除くためには何らかの補助情報が必要である。

処理の対象を変形格子像にすれば、これには凹凸の情報も含まれているので、機械による自動計測が可能となる。すでにモアレ縞等高線画像として蓄積されているものについては、人と機械との対話形式での入力法が实际的である。

以下においては、著者らが開発した対話型モアレ縞情報入力システムおよび走査モアレ法による立体形状自動計測システムを中心に、モアレ縞による立体形状の自動計測法、について紹介する。

3.1 モアレ縞情報の対話型入力システム³²⁾³³⁾

ここでモアレ縞情報の入力とは、モアレ縞等高線画像から被測定物体の3次元形状のモデルを電子計算機内部に作り上げることである。

モアレ縞が与えられたとき、これから3次元形状のモデルを得るために必要とされる入力情報と処理過程との関係を図7に示した。すなわちモアレ縞情報の入力には、④ モアレ縞の位置(座標値)とそれらの結合関係の入力、⑤ 縞次数の指示、⑥ 計測空間から実空間への変換係数の指示などが必要とされる。

おのおのの過程は最終的に得ようとする3次元形状のモデルの形式によって、それぞれに適した方法を採用すべきである。たとえば何本かの切断線に沿った断面形状による3次元形状モデルを構成する場合には、各切断線上でのモアレ縞の位置と等高線の符号の変化および互いに交差する切断線間の次数の整合条件などを与える。

3次元形状のモデルは位相幾何学的な構造(点、線、面とそれらの結合関係)などを定める部分と、幾何学的形状を拘束する部分(座標値など)から構成されるのが

図 7 モアレ縞情報の入力³²⁾

図 8 モアレ縞対話型入力システム構成の一例³²⁾

一般的であり、計測空間から実空間への変換は、幾何学的形状を拘束している座標値に対して座標変換を行う。

これらの入力作業のうち、⑥の縞次数の指示については人手を煩わせざるを得ないが、他の部分についてはかなりの程度自動化できる。モアレ縞情報の対話型入力装置の基本構成を図 8 に示した。

このシステムは、側弯症診断用のモアレ縞写真の解析に使用されており、この場合、縦方向 1 断面、横方向 10 断面について解析され、他の部分の形状は内挿によって求められる。各横断面間の次数の整合は中央の縦断面を解析し、それとの次数差を指示して行っている。

縞位置の検出ミスや凹凸情報の入力ミスを速やかにチェックできるよう、検出された縞の位置、入力された凹凸情報などを解析中のモアレ縞等高線画像と重ね合わせてモニター画面上に表示できるようにしている。画面上の位置の指示、凹凸情報の入力、縞位置の追加、削除、位置補正、さらには処理手順の制御などのほとんどの指令を写真 1 に示すように画面上に設けられたコマンド領

写真 1 モニター画面およびコマンド領域³³⁾(a, b, ..., h で示した部分がコマンドキーである)

図 9 入力された 3 次元モデルの一例

域をライトペンで指示して行える。

このように、ほとんどの作業をモニター画面上からの指示で行えるようにしたことにより、対話処理の操作性を著しく向上できた。このシステムで入力された背面の断面形状およびこれを内挿処理して得られた 3 次元モデルの透視図の一例を図 9 に示した。

入力に要する時間は側弯症診断用のモアレ写真の場合、1 データあたり約 15 分程度であり、整形外科医によってすでに 200 例に近いデータが入力され、種々の定量的解析が試みられている³⁴⁾。

3.2 走査モアレ法による立体形状の自動計測

前述したように、モアレ縞等高線情報の入力においては物体の凹凸の判定が大きな問題であり、これが自動化に際してのひとつの障害となっていた。走査モアレ法では、格子投影型の観測格子に相当する仮想格子線の位相を変化させることによって、この問題を解決できる。

走査モアレ法の実際的な方法としては、図 5 のように物体上に投影された変形格子像を走査手段で直接読取って処理する方法、および変形格子像をフィルムに撮影し、それを像走査手段で読取って計測する方法とがあるが、処理の手法はいずれの場合でも同様である。

写真 2 (a) は人の背に直線格子を投影して得られた変形格子像の一例である。これを 3 種の位相の仮想格子線に沿ってサンプリングして各位相ごとに異なった色（白黒写真のため色は濃淡の違いとなっている）で表示したものが同図 (b) である。

写真 2 (b) にはさらに図 10 に示す流れ図に従って処理して得られた断面形状の例が重ねて表示してある。走査モアレ法ではモアレ縞画像の生成は必ずしも必要とされない。いくつかの解析線に沿った断面形状を求める場

(a) 背面の変形格子像

(b) 符号情報を含んだ等高線画像および断面形状

写真 2 走査モアレ法による断面形状の構成³⁵⁾

写真 3 立体形状自動計測装置

合、各解析線に沿った領域についてのみ、変形格子像を仮想格子線上の点でサンプリングして処理することで充分である。

図 11、写真 3 に、像走査装置として 1728 素子の線状の固体撮像素子を使用して開発した立体形状自動計測システムの系統図および写真を示した³⁵⁾³⁶⁾。また図 12 に

図 10 断面形状計測プログラムの流れ図²⁷⁾

図 11 立体形状自動計測装置系統図³⁶⁾

図 12 背面形状の計測例

は、この装置で計測した背面形状の透視図の一例を示した。

4. む す び

モアレトポグラフィーによる計測は、個々の点ごとに行ういわゆる点計測ではなく、物体全体の形状がモアレ縞等高線パターンとして平面的に得られるため、全体的な性質を把握す[●]うえできわめて有効であるが、得られたパターン情報をいかにして解析し、定量化するかが大きな課題であった。

本稿で述べたように、ごく最近になって、従来の光学的技法のみでなく、テレビ技術や電子計算機技術など電子工学的技法との融和がなされ、解析手法の確立、さらには自動計測への道がひらかれてきた。基本となる技術についてはほぼ完成されたものとなりつつあるので、これらを個々の応用分野における具体的な問題へ適用してゆく段階にある。

今後の課題としては、個々の応用分野における利用法の開発の他に、人体などの全周計測の問題、陰となる部分の処理の問題、大物体の計測法の開発、微小物体の計測法の開発、実時間計測の問題、計測精度向上の問題、入力された3次元形状モデルの処理手法の開発などがあり、計測から最終的な処理に至る一貫したシステムの開発が望まれる。今後、このような計測技術がますます発展してゆくことが期待され、本稿が何らかの意味で役に立てば幸いである。

(昭和55年5月6日受付)

〔参 考 文 献〕

- G. Oster: Moiré Optics; A Bibliography, J. Opt. Soc. Amer., **55**, 10 (1965) 1329
- D. M. Meadows, W. O. Johnson, J. B. Allen: Generation of Surface Contours by Moiré Patterns, Appl. Opt., **9**, 4 (1970) 942
- H. Takasaki: Moiré Topography, Appl. Opt., **9**, 6 (1970) 1467
- P. Theocaris: Moiré Fringes in Strain Analysis, Pergamon Press (1969)
- 吉野洋一: 投影型モアレ等高線図化法, 光学, **1**, 3 (1972) 128
- 鈴木正根, 鈴木喜義: モアレトポグラフィ, 高精度, **3**, 2 (1972) 25
- 吉沢 徹, 鈴木喜義, 清水茂久: 光学的パターンによる形状の測定, 機械の研究, **27**, 6 (1975) 5
- G. Oster, M. Wasserman, C. Zerling: Theoretical Interpretation of Moiré Patterns, J. Opt. Soc. Amer., **54**, 2 (1964) 169
- M. Idesawa, T. Yatagai: General Theory of Projection-Type Moiré Topography, sci. papers I. P. C. R., **71**, 3 (1977) 57
- H. Takasaki: Moiré Topography, Appl. Opt., **12**, 4 (1973) 845
- P. Benoit, E. Mathieu, A. Thomas: Sign Determination of Contour Lines, Opt. Commun., **15**, 3 (1975) 392
- 本田捷夫, 神谷公二, 辻内順平: 色格子を用いたモアレトポグラフィの凹凸判定, 光学, **5**, 3 (1976) 87
- 米沢 進, 玉邑嘉章: 符号化格子画像入力系の構成法, 信学会技術研究報告, **79**, 216 (1977) 63
- 玉邑嘉章: 符号化格子画像入力系と物体形状の抽出, 信学会技術研究報告, **77**, 272 (1978) 79
- Y. Yoshino, H. Takasaki: Double and Visibility Enhancement of Moiré Fringes of the Summation Type, Appl. Opt., **15**, 5 (1976) 2414
- 鈴木正根, 金谷元徳, 鈴木喜義: モアレの応用研究(5) モアレトポグラフィーにおける基準変形格子の利用, 昭和48年精機学会春季大会学術講演会前刷 (1973) 139
- T. Yatagai, M. Idesawa: Use of Synthetic Peformed Gratings in Moiré Topography, Opt. Commun., **20**, 2 (1977) 243
- 鈴木正根, 鈴木喜義: モアレの応用研究(8), 格子回転による切断面変化法, 昭和49年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1974) 367
- J. Wasowski: Moiré Topographic Maps, Opt. Commun., **2**, 7 (1970) 321
- 鈴木正根, 鈴木喜義: モアレの応用研究(9), スリットカメラによる等高線モアレの撮影法, 昭和49年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1974) 369
- B. Desses, M. Leblanc: The fringe method and its application to the measurement of deformations, Vibrations, Contour lines and differences of objects, Opt-electronics, **5** (1973) 369
- 古澤 徹, 米村元喜: 平行光光学系に適用した走査型モアレトポグラフィ法, 光学的形状測定の試み(第8報), 昭和51年度精機学会春季大学学術講演会 (1971) 293
- 有沢正和: 物体観測像の接続に関する検討, 信学会技術研究報告, **76**, 261 (1977) 73
- 鈴木正根, 鈴木喜義: モアレの応用研究(14), 光切断を応用した等高線モアレ法, 精機学会春季講演会 (1976) 299
- 高崎 宏: モアレトポグラフィの原理と発展, テレビ学会技術報告, **1**, 13 (1978) 97
- 古澤, 宮木, 永寿, 三上: モアレ・ビューアー・レーザ光線走査型モアレトポグラフィの適用, 精機学会春季大会学術講演会前刷 (1977) 411
- M. Idesawa, T. Yatagai, T. Soma: Scanning Moiré Method and Automatic Measurement of 3-D Shapes, Appl. Opt., **16**, 8 (1977) 2152
- 上田照夫: 電子格子モアレ法とその応用, テレビ学会技術報告, **1**, 13 (1978) 109
- 浜崎祐司, 丹羽 登: TV 技術を利用したモアレトポグラフィ, 精密機械, **43** (1977) 489
- 上田照夫: 変位・変形の実時間連続表示, 第5回モアレ研究会論文集 (1980) 17
- 吉田富士夫, 丹羽 登: TV 系によるモアレ等高線縞の実時間観測, テレビ学会技術報告, **1**, 13 (1978) 155
- 出澤正徳, 谷田貝豊彦: モアレ縞情報の入力法について, 第5回モアレ研究会論文集 (1980) 11
- 谷田貝豊彦, 出澤正徳: モアレ縞解析処理装置, 同上, 15
- 篠遠 彰, 大塚嘉則: モアレ法による脊柱側彎症背部変形の定量的分析, 同上, 37
- Masanori Idesawa, Toyohiko Yatagai: Scanning Moiré Method and Its Application to Automatic Measurement of 3-D Shapes and Deformations, Proc. 8th IMEKO Congress, Section II (1969) S 7-1
- 出澤正徳, 谷田貝豊彦: 走査モアレ法と立体形状の自動計測法, 日本機械学会講演論文集 No. 790-14 (1979) 260