

〔原著〕 松本歯学 2 : 122~128, 1976

等高線モアレ縞による立体計測法の 歯学への応用について

鷹股哲也, 橋本京一

松本歯科大学 補綴学教室第1講座 (主任 橋本京一 教授)

The Application of Moiré Topography to Dentistry
TETSUYA TAKAMATA and KYOICHI HASHIMOTO
*Department of Complete and Partial Denture Prosthodontics,
Matsumoto Dental College
(Chief: Prof. K. HASHIMOTO)*

Summary

Formation of Moiré patterns was described by Lord Rayleigh, who used it first for study of grating irregularities. Recently, the generation of surface contours by Moiré pattern techniques has been described. The generation of contour for three-dimensional objects by noncoherent methods is considerably interesting. Severe limitations and difficulties in the coherent methods are well known and will not be discussed here.

Moiré topography, which is a new technique of the three-dimensional measurements by the utilizing Moiré fringe, is most welcomed by those who wish to study the shape of three-dimensional objects, because of the simplicity, high accuracy and real time advantage.

The basic theory of the Moiré topography to the measuring and analysing three-dimensional objects in the field of prosthetic dentistry is described in this paper.

Principle

This arrangement has been suggested by Dykes (1970) and uses a point source of light located at the same distance from the Moiré grid as the camera or eyes. The Moiré fringe is formed by the grid and its distorted shadow on the objects. Generally, the depth of Moiré fringe at Nth is obtained as follows :

$$h_N = \frac{bNp}{(1-Np)}$$

where b is the distance of point source of light and eyes or camera from the grid surface, p is the pitch of the grating, and 1 is the distance between a point source of light and eyes or camera.

Application to Prosthetic Dentistry

本論文の要旨は第2回松本歯科大学学会 (昭和51年6月26日) において発表された。(1976年10月16日受理)

Moiré topography has been utilized in an extend over a wide range, for example, medicine, dentistry, fashion industry, engineering and scientific criminal investigation.

In prosthetic dentistry, this method has not been utilized in contour generation of three-dimensional objects. So we have interested in Moiré topography for the study of the contour of the patients faces before and after insertion of denture and the contour generation of the edentulous upper and lower casts. And also, this method is useful to observing the contour of natural teeth, and the change of the ridge form after extraction. And it remains that the orientating plane of the patients faces and/or casts which are generated the contour must be established. We are considering how to settle these problems.

I. 緒 言

物体の3次元的な形状を測定する手段として、従来より写真測量法により等高線を図化する方法や、比較的小さな物体では表面の凹凸を顕微干涉する方法、あるいは、繰返し反射干渉法等の光波を利用して表面の凹凸上に等高線となる干渉縞を現わして観察する方法等が行われてきた¹⁾。モアレ現象については、Lord Rayleigh (1874) が2つの周期的な構造をもつ直線群を重ねるとモアレ縞が発生するという最初の報告をし、Righi (1887) は、モアレ縞の形成について詳述し、格子を利用することにより変位測定が可能であることを述べた²⁾。

Tolenaar (1945)³⁾ は、これを測定分野に応用し、物体の変位測定や歪測定を行った。これ以後、モアレ縞は理工学の分野で盛んに利用されるようになり、P. S. Theocaris (1969)⁴⁾ らにより、微小長さの測定を2次元的に拡張した応力変形の測定が可能となった。モアレ縞がこのような分野で利用されている反面、同時期に、P. S. Theocaris (1969)⁴⁾ は、Shadow Moiré 法を開発し、初めて物体の形状測定に応用し、今日の Moiré Topography の基礎を築いた。

高崎, D. M. Meadows (1970)⁶⁾ らは、大きな粗面物体の3次元形状測定に格子照射法による Moiré Topography, すなわち等高線モアレ縞計測法を発表し、吉沢ら⁷⁾、鈴木ら⁸⁾ (1971) は、格子投影型 Moiré Topography を開発し、応用分野をさらに拡大した。その後、吉野⁹⁾、J. D. Hovanesian (1971)¹⁰⁾ らによる応用等も発表され、モアレ縞による3次元パターン計測法の実用化が具体化されてきた。

日常眼で見る3次元物体を従来の1枚の写真

から正確に表示することは困難であるが、最近ホログラフィ記録法により比較的正確に表示することができるようになった。しかし、特殊なコヒーレント光源を必要とし、利用する範囲が限局している。これに比較して Moiré Topography は、比較的容易に光源が利用でき、写真記録法によって容易に3次元物体を等高線パターン図化することができ、無接触計測法としての最大の利点をもって、従来測定が困難であった領域への利用が行われるようになった。

モアレという言葉はフランス語で、“波形をつけた” という意味であり、日常2枚のスタレが重なり合った場合や、ゴルフ練習場のネットの重なりなどに見ることができる。一般に2種類以上の格子状のものを重ねるとできる新しい縞模様に対してモアレ縞という言葉が使われている。

著者らは、等高線モアレ縞計測法の歯科補綴学への利用を試みるに先立ち、その原理・測定装置・解析方法・応用領域、ならびに歯学への応用について概略述べる。

II 原 理

Moiré Topography の方法には、前述したように、格子照射型 Moiré Topography と格子投影型 Moiré Topography とがあり、以下にその原理を説明する³⁾。

1. 格子照射型 Moiré Topography

図1に示すように、物体の直前においた透過部および不透過部が黑白等間隔にできた基準格子Gを、この基準格子より距離bにおかれた点光源Sで照射すると光源は黑白の明暗をもった放射状の光束となり、物体上の表面に黑白のパターンを形成する。このパターンは、物体の形

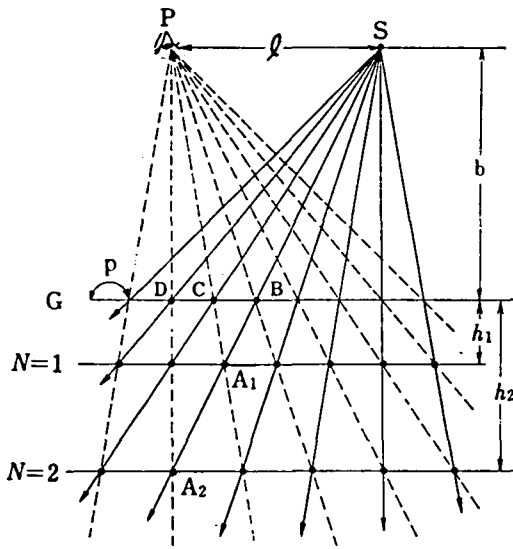


図1：格子照射型原理図

状に応じて変形を受けた変形格子となり、この変形格子を、基準格子より距離 b で、点光源より距離 l の位置で観察すると基準格子の透明部と物体上の変形格子の白線部が交わった点が見える。この変形格子と基準格子の重なりによって見えるのが等高線モアレ縞である。

ここで、等高線モアレ縞は、どのような式で表わされるかを幾可学的に考えてみる。図1において、基準格子のピッチを P 、モアレ縞次数を N とすると基準格子から N 次の等高線モアレ縞までの距離 h_N は次のようにして求められる。 $N=1$ のうちの一点を A_1 とすると、 $\triangle A_1BC \sim \triangle A_1SP$ であるので、対応する辺の比は一定となり

$$PS : CB = SA_1 : BA_1 = (b + h_1) : h_1$$

$$l : p = (b + h_1) : h_1$$

これを解くと、

$$h_1 = \frac{pb}{(l-p)}$$

となる。

一般に、基準格子から N 次のモアレ縞までの距離は、同様にして求められ、式(1)のようになる。

$$h_N = \frac{bNp}{(l-Np)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

2. 格子投影型 Moiré Topography

図2において、まず基準格子 N は、投影レンズ L_1 により物体 Ob 上に投影され、物体上に格子像を形成する。さらにこの格子像は、レンズ L_1 から距離 l 離れた位置に置かれた結像レンズ L_2 により撮影すると物体形状に応じて変形を受けた変形格子像として、結像系の基準格子 G_2 上に結像される。この変形格子と基準格子の重なりによって、物体形状を示す等高線モアレ縞が形成される。

等高線モアレ縞深さ h_N を与える式を幾可学的に求めてみる。図2において、基準格子

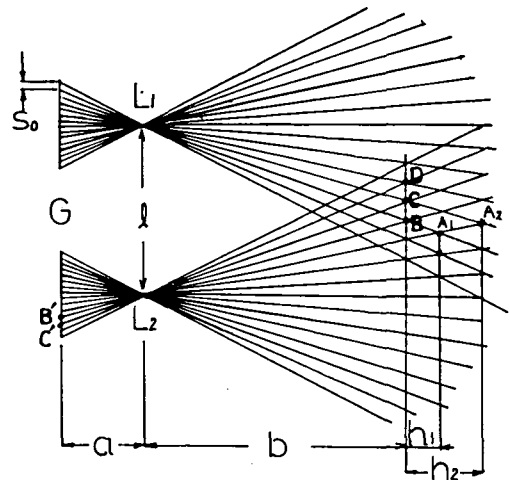


図2：格子投影型原理図

よりレンズ後主点までの距離 a 、レンズ前主点より物体上基準点までの距離を b 、投影および結像レンズの焦点距離を f 、投影レンズと結像レンズの主点間距離を l 、基準格子ピッチを P_0 とすると、

$\triangle A_1BC \sim \triangle A_1L_2L_1$ であるので、

$$BC : L_1L_2 = BC : l = h_1 : (h_1 + b)$$

また、 $\triangle BCL_2 \sim \triangle B'C'L_2$ より、

$$BC : B'C' = BC : P_0 = b : a$$

上記式を計算すると、

$$h_1 = \frac{P_0 b (h_1 + b)}{a l}$$

ここで、レンズ倍率 $\frac{b}{a}$ を焦点距離 f で示すと、

$$\frac{b}{a} = \frac{(b-f)}{f}$$

となるので、

$$h_1 = \frac{b(b-f)P}{f l - (b-f)NP_0}$$

となる。

一般に、モアレ縞深さ h_N は、式(2)のように求められる。

$$h_N = \frac{b(b-f)NP_0}{f l - (b-f)NP_0} \dots\dots\dots(2)$$

また、おのおのの等高線間隔 Δh_N は、式(3)で与えられる。

$$h_N = \frac{b(b-f)f/P_0}{f l - P_0(b-f)(N+l) \times f l - (b-f)NP_0} \dots\dots\dots(3)$$

III. Moiré Topography 計測装置³⁾

図3は、格子投影型を利用した装置で、装置

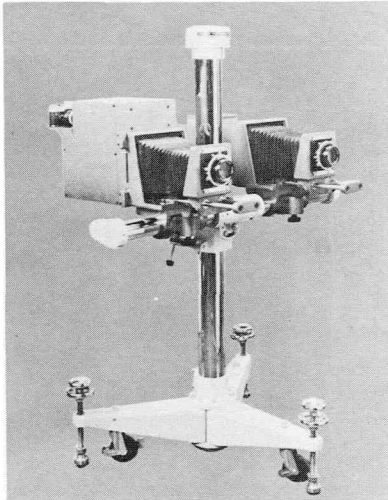


図3：格子投影型 Moiré Topography 計測装置
と被写体との距離の調節は装置下部のキャスターで行い、測定感度はレンズ主点間距離を変えることによって調節できる。図のタイプでは、1.0 mm の等高線間隔で 30 mm × 30 mm 以上の面積が一度に測定でき、比較的大きい物体の3次元的な形状測定に有利である。

図4は、格子照射型の Moiré Topography 装置で FM 3011 と呼び、本学補綴学教室にあるものと同型で、次の各部よりなる¹¹⁾。

- 1) 型式：準暗室操作型
- 2) 投影方式：線光源照射型
- 3) 測定感度：1.0 mm¹・1.5 mm・2.0 mm 可変

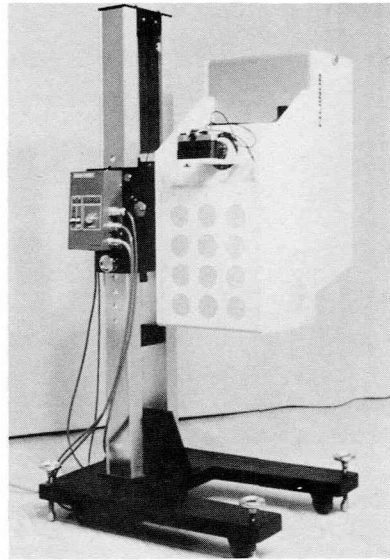


図4：格子照射型 Moiré Topography 計測装置

- 4) 格子サイズ：260 × 410 mm
- 5) 計測面サイズ：250 × 300 mm
- 6) 光源：ハロゲンランプ (AC 100 V, 1 KW)
ファンによる強制冷却
- 7) 撮影部回転：水平, 垂直 90° 回転
- 8) 電源：AC 100 V (50/60Hz)

このタイプは被写体サイズに制限がつき、大きいものでは、ほぼ顔面の大きさ、小さいものでは、3.0 cm × 3.0 cm の大きさまでが有効撮影範囲といえる。感度は投影型に比較して高いという利点があるが、被写体と格子位置をあまり離せないという制限がつく。

図5は図4と同様に格子照射法を用いており、

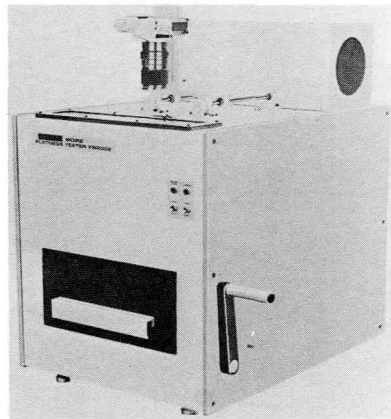


図5：平坦度測定装置

特に測定感度を高めて、平坦度測定装置（フラットネステスター）としたもので、金属部品の形状測定に用いられ、載物台上に試料を置き、基準格子面にソフトコンタクトさせるものである。

Ⅳ. Moiré Topography 解析法の概説³⁾

モアレ縞は、被験体上に高低の情報をもったパターンとして形成され、これを被験体とともに写真撮影することにより、人間の知覚で十分認識できる高低の情報をもった等高線を得ることができる。この写真から地図のような線画にしたり、あるいは被験体の断面形状、表面積、断面積、断面線長を求めたりするときにはかなり複雑な操作が

必要であり、また時間もかかる。

たとえば、図6のようなモアレパターンから断面形状を描く場合には次の事柄に注意しなければならない。

- 1) 被験体の凹凸に注意する。
- 2) モアレ縞の縞次数を間違えないようにする。
- 3) モアレ縞で1つの連続した縞は同じ高さ（または深さ）を示している。特に断面を描くような場合には、この点に注意する。
- 4) モアレ縞は光学的につくった縞であり、幅をもっているため、この広がりの中のどの点を選んでプロットするかに注意する。

以上の注意事項を考慮して断面を描いたのが図7である。このような断面図から体積・断面積を求めるには、基準面を設定し、図8のようなプラ

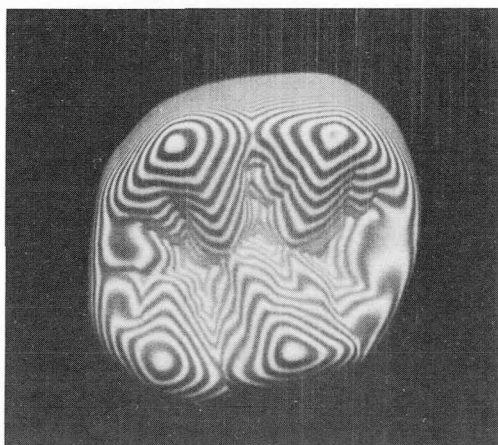


図6：上顎右側第一大臼歯拡大石膏歯牙模型の咬合面に現われたモアレ縞（縞間隔1.0 mm）

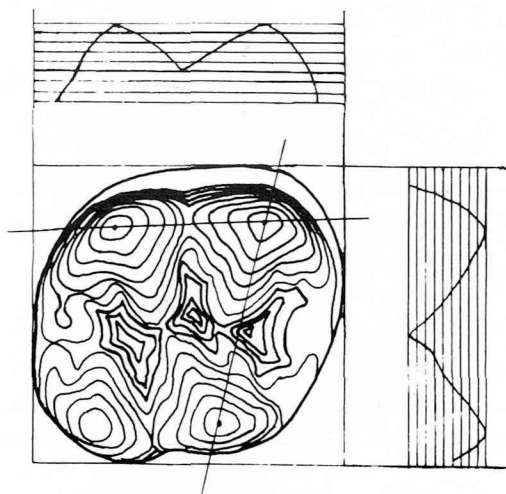


図7：図6をトレースしたものと断面図

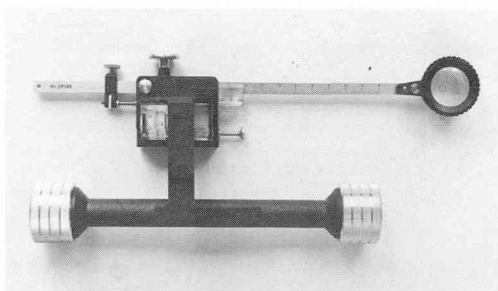


図8：プランメーター

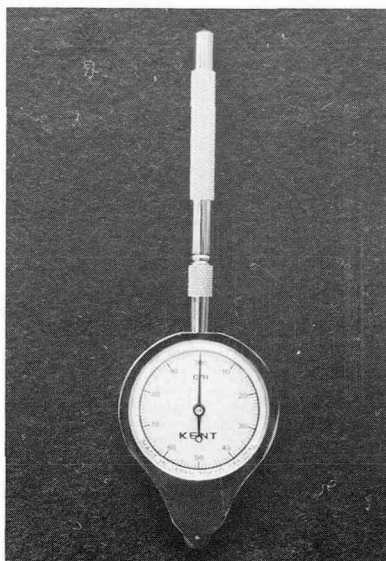


図9：curviメーター

ニメーターで被測定図の輪郭線に沿って測り、その数値を換算して求める。この断面積の和から体積が求められる。表面積は図9のような curviメーターによって、各断面の線長を計測して求め、その和から表面積を算出する。

V. Moiré Topography の応用

Moiré Topography の技術・装置が確立されるに伴い、応用範囲は各分野に広がっている。利用されている分野は、医学、歯学、ファッション、工学、科学捜査関係、その他、などで、その内容は次のようなものである³⁾。

A. 医学関係

1. 基礎医学

- a. 解剖学：人類学、骨計測
- b. 病理学：標本の形状記録

2. 臨床医学

- a. 外科：炎症、腫瘍の大きさ、形状、分布、手術時の記録
- b. 整形外科：骨格計測
- c. 産婦人科：妊婦検診
- d. 内科：腫脹、浮腫の定量化
- e. 神経科：運動機能、神経変性による筋の変化
- f. 呼吸器科：胸郭の変形
- g. 麻酔科：呼吸機能、ブロック前後の診断
- h. 眼科：乳頭部計測

3. 運動医学

動態解析

4. 予防医学

定期検診

B. 歯学関係

- a. 口唇・顎の形状計測
- b. 口蓋裂手術時の記録（手術前後の記録）
- c. 義歯による顔面変化の計測
- d. 矯正による顔面変化の計測
- e. 歯牙の計測
- f. 口蓋および歯槽堤の計測

C. ファッション関係

- a. 織布裁断および縫製加工における人体各部の生体計測（動的および静的測定）

- b. 被服着用時のフィット性、機能性、伸縮性などの測定
- c. 織布の防縮性、防しわ性などの物理的付加的価値の測定
- d. 縫製加工における布地の変形測定（縫製加工法の評価）
- e. 繊維製品の着用時における動的および静的な情緒的付加価値の測定（形状的价值、デザイン価値、ファッション価値）

D. 工学関係

1. 機械工業

- a. 溶接変形の計測
- b. 板金部品の計測
- c. 金型母型の計測
- d. バックリング現象の計測
- e. 精密部品平坦度の計測
- f. 金型部品計測
- g. 構造物体の歪み計測

2. 自動車工業

- a. 板金部品仕上がり状態計測
- b. 精密部品平坦度測定
- c. プレス部品計測
- d. 衝突変形計測
- e. クレイモデル計測
- f. 高速走行タイヤ変形計測
- g. タイヤ形状計測
- h. シート形状計測

3. 安全工学

- a. 耐圧タンク・販蔵タンク・プラント配管などの変形計測

b. 破壊現象計測

c. 破壊現象検証

4. オーディオ工業

レコード平坦度計測

5. プラスティック工業

成型品計測

E. 科学捜査関係

- a. 筆圧痕の計測（筆跡鑑定）
- b. 爆発漏斗口の計測
- c. 足跡痕の計測
- d. ライフルマークの計測

F. その他

- a. 歩行分析計測（リハビリテーション工学）
- b. 損傷度計測（損害保険）
- c. 美容形態計測

VI. お わ り に

以上のように Moiré Topography 計測法は各分野に応用されるに至り、立体計測法の一分野として重要な役割を演じている。

Moiré Topography 計測法の特徴³⁾は、

- 1) 多くの計測法が点の精度で測定しているのに比べ、Moiré Topography 法は面的に均一な精度で測定でき、全体を巨視的にパターンとして測定および観察ができる。
- 2) 画像を用いた測定であるので、平面的な広がり、2点間の長さ、面積、体積、傾斜などの関連的な各種の測定ができる。
- 3) 面像として記録されるので、時間的経過に関係なく再測定および物体の復元が容易にできる。
- 4) 無接触測定であるので、物体の材質に影響されことなく、瞬間的な状態、変形過程の状態などの動的な立体形状を測定することができる。

今後、Moiré Topography 計測法を歯科補綴学の分野で利用するに際し、前述した原理・装置・解析方法・特徴を十分活用して次に挙げる項目について準備をすすめている。

- 1) 総義歯装着前後の顔貌の変化
- 2) 上下顎無歯顎歯槽堤の立体的観察

3) 抜歯後顎堤の形態変化

4) 天然歯牙の形態観察

さらに、顔面の撮影に際してはその規格化が、模型の撮影には基準面の設定が、また歯牙の形態観察には歯軸の設定が重要な問題であり、これらの点も合わせて考慮している。

文 献

- 1) 高山 宏(1970)モアレ稿による等高線の図化—立体形状をとらえる新しい手段として—。科学朝日, 7:132—135.
- 2) Sayce, L. A. (1972) Gratings in metrology. J. Physics E. 5: 193—198.
- 3) 富士写真光機 光学機器部研究課編(1974)モアレトポグラフィ計測法. 1—19.
- 4) P. S. Theocaris (1969) moiré Fringe in Strain Analysis. 219—278. Pergamon Press, London.
- 5) Takasaki, H. (1970) Moiré topography. Appl. Opt. 9: 1457.
- 6) Meadows, D. M. (1970) Generation of surface contours by Moiré patterns. Appl. Opt. 9: 942
- 7) 吉沢 徹, 清水茂久(1971)投影法によるモアレトポロジーとその応用. 昭和46年度精機学会春季大会学術講演会前刷, 245.
- 8) 鈴木正根, 鈴木喜義(1971)モアレトポロジーによる球面の測定. 昭和46年度精機学会春季大会学術講演会前刷, 239.
- 9) 吉野洋一(1972)投影型モアレ等高線図化法 昭和47年度応用物理学会春季大会前刷32.
- 10) Hovanesian, J. D. (1971) Moiré contour-sum contour difference and vibration analysis of arbitrary objects. Appl. Opt. 10: 2734
- 11) 川崎泰右(1975)モアレカメラについて. 日大口腔科学, 1: 10—11.