

論文

モアレトポグラフィと画像処理を応用した表面形状測定

澤近洋史*

中条知和*

Measurement of surface profiles by moiré topography and image processing

Hirofumi SAWACHIKA and Tomokazu NAKAJYO

Abstract This paper describes the measurement equipment of surface profiles by moiré topography and image processing. The equipment was made mainly to measure surface flatness of soft materials such as plastics and paper by means of non-contact method. It consists of a projection unit, a CCD camera, and an image processing unit (personal computer). When the measurement area was 80mm(X)×80mm(Y)×3mm(Z), the average coordinate error of the equipment was 0.05mm as compared with results measured by a coordinate measuring machine. We also studied about an effective method of importing moiré fringes. As a result, high quality moiré pictures are obtained by means of analyzing optical characteristics on the surface.

Keywords Measurement of surface profiles, Non-contact method, Moiré topography, Image processing, Moiré fringes

1. 緒言

プラスチック、紙などの軟質材料や中空部品の表面形状を測定するとき、従来からの接触方式では測定子圧力によるキズや変形等の問題があるために、非接触による測定・評価の手法が求められている。

非接触測定方法の一つにモアレトポグラフィ法(以下モアレ法)があるが、これまで数cm以上の形状測定に用いた例はあるものの、数mm程度の測定領域に適用し、測定値の妥当性をも含めて検討した事例はほとんどない。

本研究では、画像処理を組み合わせたモアレ法による測定装置を試作して、数mm程度の高低差をもつ軟質部品表面の形状測定を精度よく行うための検討を行った。その結果、幾つかの知見を得たので報告する。

2. モアレ法による形状測定原理

測定物の直前に置いた格子を点光源で照明すると、測定物上に形成される格子の影と格子の間でモアレ縞が生成される。図1は格子照射式モアレ法の原理図であり、観察点Oにおいてこれをカメラで観察すると、測定物表面の凹凸形状に対応した等高線状の縞図形が得られる。

いま、第n番目(第n次)のモアレ縞が生成されたとき、格子面から縞までの距離 h_n は次式で示される。

$$h_n = nsl / (d - ns) \quad (1)$$

ここで、sは格子のピッチ、dは光源と観察点の間隔、lは光源及び観察点と格子面との距離である。

得られた2次元の縞図形と(1)式の条件を対応づける(縞次数を決定する)ことによって、測定物表面の3次元

凹凸形状を算出することができる。

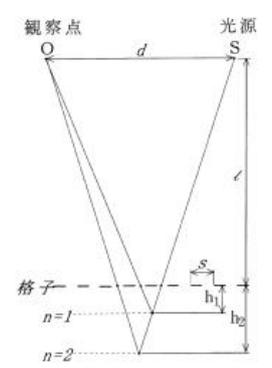


図1 測定原理図

3. 実験方法

3.1 試料表面の性状とモアレ縞の品質

本測定においては、縞図形を抽出し、その位置を数値化する手法をとるので、生成され、取り込まれる縞の画質が測定精度に大きな影響を与えるものと考えられる。そこで、測定物表面の性状と縞画像の鮮明さとの関係について調べた。

3.1.1 実験試料

実験試料はプラスチックおよび紙を使用した。鏡面反射面と拡散反射面の双方の性質をもつこれらの試料の表面性状を特徴づける指標として、鏡面光沢度(JIS Z 874 1)、明度、色度および彩度(以上JIS Z 8729)を考え、光沢度計および分光測色計による測定を行った後、プラスチック8種類、紙11種類の試料を選定した。また縞の生成条件を統一するために、試料は全てシート状のものとした。

*精密加工技術グループ

3.1.2 実験方法

図2に示すような実験装置を製作した。わずかに傾斜させた試料に近接した格子(ピッチ0.254mm)は直線状であり、点光源によりこれを照明すると、直線状のモアレ縞が生成する。この縞のパターンを、CCDカメラにより画像処理装置のメモリに取り込んで、縞の画像濃度(256階調)を測定した。また画像取り込みのフィルタモードをカラー(R,G,B)に設定し、各モード別に5色(赤, 緑, 青, 黒, 白)の色画用紙の画像を取り込み、濃度を測定した。

各機器の仕様は次のとおりである。

- ・格子 : ピッチ0.254mm
- ・光源 : ハロゲンランプ150W
- ・カメラ : 2/3インチ CCD(画素数 H768× V493) f=11.5~69mm (ソニー(株)XC-711)
- ・画像処理 : 画像入出力ポート
512×480×8ビット×3(RGB)×2面
(川崎製鉄(株)・画像博士)
- ・光沢度計 : VGS-1001DP(日本電色工業(株))
- ・分光測色計 : MSC-5N(スガ試験機(株))

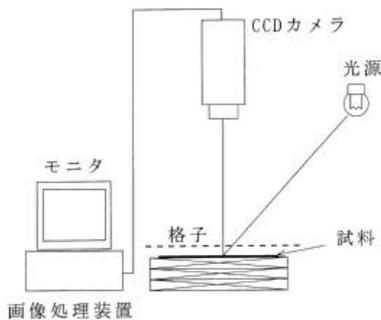


図2 装置構成図

3.2 モアレ法による測定操作・手順

3.1の結果をふまえ、目的の測定領域をカバーするための装置を製作し、一連の測定操作・手順の検討を行った。

3.2.1 測定試料

次のような2種類の硬質プラスチック製試料を用意した。表面の色は双方とも白色系である。

試料 : T字型溝付き凸形状成形部品
(最大外径77mm, 厚さ2mm)

試料 : 凸形状成形部品(最大外径22mm, 中実)

3.2.2 測定方法

図2に示すように試料, 直線格子, 光源, カメラ等を配置した。各試料は専用の治具を介して鋼製ブロックの平面部分に固定し, ブロックの一つの角を基準原点に設定した。使用した機器類の仕様は, 3.1項のものと同様である。

生成したモアレ縞をカメラにより画像処理装置に取り込む(図3)。これらの図形に対し, 以下のような画像解析等の操作を行った。

- 縞の抽出
- ノイズ除去, 二値化, 細線化, ラベリング

- 縞位置の数値化 基準の設定
- 縞次数の決定 2次元平面座標系への変換
- 表示 3次元空間座標系への対応づけ
- データテーブル作成
- 断面図, 鳥瞰図(ワイヤフレーム), 等高線図等

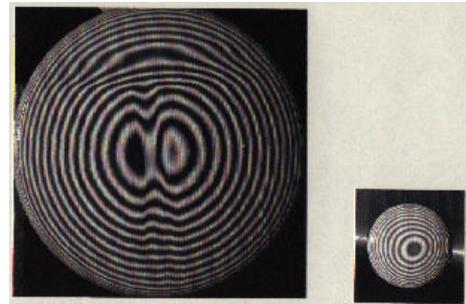


図3 生成したモアレ縞

3.3 測定結果の評価

モアレ法により測定した試料と同一の試料を, 精度が既知である三次元座標測定機を用いて X, Y 方向0.5mmピッチで輪郭測定し, 両手法による測定結果を比較した。三次元座標測定機の仕様を以下に示す。

- ・機種名 : (株)ミットヨ LEGEX707
- ・指示誤差(E) : (0.48+L/1000) μm [JIS B 7440-2による]
- ・あいまい線り返し精度 : 0.5 μm
- ・測定力 : 0.2N
- ・プローブ径 : 4mm

4. 結果及び考察

4.1 縞の鮮明さに影響を与える要因

取り込まれた縞の明暗濃度差の最大値を「縞の鮮明さ」と定義し, これを目的変数として, 試料表面の各特性値を説明変数とした線形モデルによる重回帰分析を行った結果を表1に示す。

表1 重回帰分析による縞の鮮明さの解析結果

	明度指数 L*	彩度 C*	光沢度 Gs(60°)	定数項 a0	重相関係数 R	決定係数 R ²
プラスチック (n=8)	1.11	—	-0.297	-12.3	0.97	0.94
	7.20 **	—	-3.07 **	-1.40		
紙 (n=11)	0.564	-0.0530	—	13.5	0.87	0.76
	4.87 **	-0.503 **	—	1.74		

上段: 偏回係数, 下段: t値(**有意水準1%)
線形モデル: $Y = a_0 + \dots + a_i X_i + \dots + a_n X_n$

さらに, 各説明変数間での寄与の度合いを比較するために, 標準化(平均0, 分散1)した回帰式を算出した結果が(2)式及び(3)式である。

プラスチック : $Y = 0.819L^* - 0.349Gs(60^\circ)$ (2)

紙 : $Y = 0.898L^* - 0.093C^*$ (3)

両式より, プラスチック及び紙とも「明度」の説明力が大きくなっている。またプラスチックにおいては,

「光沢度」は縞の鮮明さを低下させる要因としてはたっていないことがわかる。

次に、表2は各種色画用紙を照明し、これを3種類のカラーモードで取り込んだときの試料面濃度の測定結果である。縞の暗線の色に近い黒の濃度は各モードで大きな差がないのに対し、他の色では取り込みモードによって試料面濃度は異なっている。縞の鮮明さは、格子によってできる影部分と背景(試料面)との濃度差に比例するので、試料面の色に応じて、取り込みモードを適切に選択すれば、より鮮明な縞画像を得ることができるものと考えられる。

表2 画像取り込みモード別試料面濃度の比較

試料名	明度	色度		画像取り込みモード別試料面濃度		
	L*	a*	b*	Ret-t'	Gr-t'	Br-t'
色画用紙(赤)	51.6	47.9	32.6	53	25	29
色画用紙(緑)	55.5	-37.4	6.1	37	46	48
色画用紙(青)	46.6	-3.1	-38.4	36	42	61
色画用紙(黒)	25.7	-0.3	1.6	18	15	19
色画用紙(白)	96.6	-2.1	4.3	59	65	68

4.2 モアレ法による形状測定結果

試料表面の形状測定結果を、空間座標点群のデータテーブル(ファイル)として作成した。これを表示ソフトウェアに取り込むことにより、立体形状表示(ワイヤーフレーム)、断面形状表示、等高線表示などのカラー図形による表示や各図形の任意位置における座標表示などがパソコンのマウス操作により可能となる。

図4は試料表面のワイヤーフレームで、Z/X=6の倍率で表示させたものである。

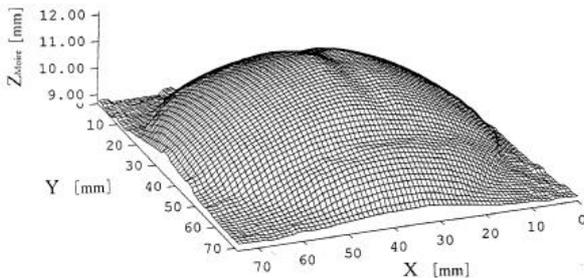


図4 試料の表面形状(モアレ法)

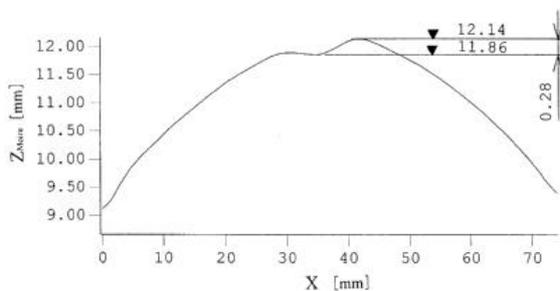


図5 試料の断面形状(モアレ法)

次に、図5は図4において、XZ平面(Y=35.5mm)で図形を切断したときの切り口の断面図であり、倍率はZ/X=9で表示している。この図で、試料表面のT字型溝凹部の段差を測定し、その結果を表示した。

図6は試料表面のワイヤーフレームで、Z/X=3の倍率で表示してある。

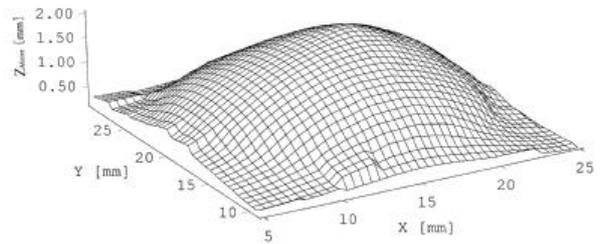


図6 試料の表面形状(モアレ法)

4.3 測定値の評価

4.3.1 モアレ法による測定の誤差

モアレ法で測定した試料と同一のものを三次元座標測定機で輪郭形状測定し、その結果を基にデータテーブルを作成した。試料及びの表面形状をワイヤーフレーム表示したのが図7及び図9であり、試料表面のT字型溝凹部の段差表示したのが図8(Z/X=9)である。

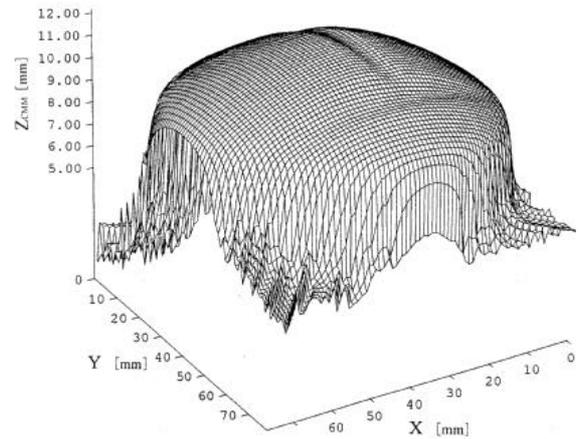


図7 試料の表面形状(三次元測定機)

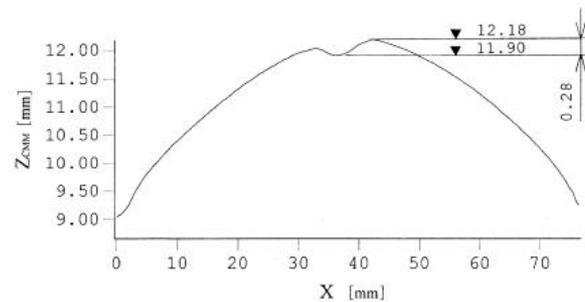


図8 試料の断面形状(三次元測定機)

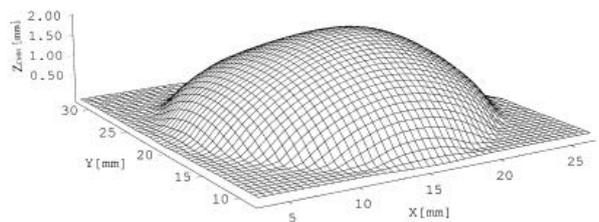


図9 試料の表面形状(三次元測定機)

いま図4及び図7において、座標系を重ね合わせ、三次元座標測定機による測定座標値 Z_{CMM} からモアレ法による測定座標値 Z_{Moire} を差し引いた値を「座標値の誤差」と定義する。試料のXY平面内における中央点と考えられる点(撮影の時カメラレンズの真下にくる点)を中心とする11mm四方(以下 11mm と表記する)の矩形領域を考え、この領域内の0.5mm ピッチの各点(合計529点)において誤差を計算し、平均値、総和等の統計量を求めた。試料 についても同様な領域を設定し、誤差を算出した。これらの結果を表3に示す。

表3 モアレ法による座標値の測定誤差

	試料 I	試料 II
平均値	0.047(mm)	0.039(mm)
標準偏差	0.049(mm)	0.023(mm)
信頼区間(95%)	0.004(mm)	0.002(mm)
総和	24.61 (mm)	20.62 (mm)
標本数	529	529

誤差の平均値は、試料 Ⅰでは0.047mm であり、試料 Ⅱでは0.039mm であった。測定に使用したモアレ縞の縞間隔(Z方向)は、試料 Ⅰでは0.257mm(平均値)であり、試料 Ⅱでは0.256mm であることから、それぞれ縞間隔の18%及び15%の誤差で測定されたことになる。

標準偏差の値からみて両試料に共通していることは、誤差の大部分が正の値として測定されていることである。つまり、本試作装置による測定値は真の値よりも小さくなる傾向にある。生じる誤差が系統的なものであるならば、座標値から座標値を差し引くような、例えば段差の測定などでは、両者の誤差が相殺されるので、誤差の影響が小さくなるものと考えられる。(図5及び図8)

4.3.2 補正による誤差の低減

図10に示すように、格子照射法では、観察点から下ろした垂線から実際の物体表面上の点Aまでの距離aは、格子面上においては距離a'の点A'として観察される。したがって、観察された各縞の位置に対して補正係数Kなる値を乗じる補正を行うことにより誤差の低減が期待される。

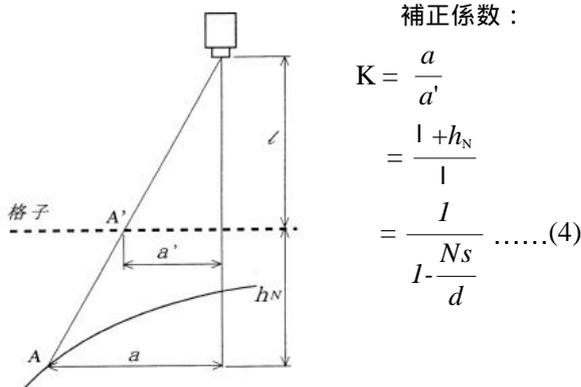


図10 投影による縞位置の補正

このような投影による位置の補正を実施し、前項と同様な領域において誤差の統計量を算出したところ、表4のような結果を得た。これによると、補正なしの場合と比較して、試料 Ⅰでは誤差の総和が5%程度減少したが、試料 Ⅱでは各項目ともほとんど差はみられなかった。

(4)式よりX,Y方向の補正では、縞の次数Nが大きくなるほど補正係数Kは大きくなり、補正の影響も大きくなる。試料 Ⅰにおいて補正の効果が現れなかったのは、今回のサンプリング領域(11mm)は投影面積の小さな試料 Ⅰに合わせて設定したものであり、この領域内では試料 Ⅰの測定に用いられた縞の本数が少なかったことによるものと考えられる。そこで試料 Ⅰに対して、40mmの領域で誤差の総和及び平均値を算出したところ、補正によりそれぞれ約5%減少した。これらのことから、縞の平面的な位置の補正によって誤差を低減できることを確認した。

表4 補正後における座標値の測定誤差

	試料 I	試料 II
平均値	0.047(mm)	0.037(mm)
標準偏差	0.049(mm)	0.023(mm)
信頼区間(95%)	0.004(mm)	0.002(mm)
総和	24.55 (mm)	19.75 (mm)
標本数	529	529

5. 結 言

モアレ法による形状測定装置を試作し、試料表面の測定を行った結果、次のような結論を得た。

- (1) プラスチックや紙などの軟質材料では、試料表面の明度によって生成するモアレ縞の鮮明さの程度が異なることがわかった。
- (2) モアレ縞を画像として取り込むとき、試料表面の色度に応じてカメラのカラーフィルタの種類を適切に選択すれば、鮮明な縞画像を抽出することができる。
- (3) 試料サイズが80mm 四方で、測定範囲が3mm 程度の表面形状の測定を行うときの装置類の構成、配置、データ処理手順等の諸条件を実験により把握した。
- (4) 上記測定領域内においては、三次元座標測定機との測定値比較の結果、生成する縞間隔(Z方向)の20%程度の誤差で座標値を測定できることがわかった。
- (5) モアレ縞投影面における位置の補正を行うことによって、誤差を低減できることがわかった。

以上から、本手法が軟質材料表面の高低差や平坦性の測定に適用可能であることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 可視化情報学入門編集委員会：可視化情報学入門、74-82、東京 電機大学出版局(1994)
- 2) 谷田貝豊彦：応用光学-光計測入門、135-138、丸善(1995)

(原稿受付 平成11年8月9日)