しわの非接触 3-D 測定システムの開発とその応用

川口由起子†¹, 金子 治†¹, 小松原良平†², 吉澤 徹†³

株式会社資生堂 ビューティーサイエンス研究所†¹

有限会社テクノアーツ研究所†²

東京農工大学 工学部機械システム工学科†³

Development and Application of a New Non-Contact 3-D Measurement System for Assessment of Wrinkles

Yukiko Kawaguchi†¹, Osamu Kaneko†¹, Ryohei Komatsubara†²

and Toru Yoshizawa†³

Institute of Beauty Sciences, Shiseido Ltd.†¹

TechnoArts Laboratory†²

Department of Mechanical Systems Engineering,

Tokyo University of Agriculture and Technology†³

The skin surface is characterized by small ridges, prominences and furrows that change with aging and degree of sun expose. Quantifying such geometric characteristics as the ridges and furrows on the skin surface can provide cosmetic researchers with a means of assessing changes in wrinkles and understanding the wrinkling process.

Many attempts have been tried to analyze the features of wrinkles in order to evaluate the efficacy of anti-wrinkles preparations. However, measurement systems proposed up to now have been unable to provide 3-D information about wrinkle shapes. The authors have developed a new non-contact 3-D measurement system to profile wrinkles based on a fringe scanning method using a sinusoidal grating pattern instead of interference fringes generated by laser. The grating projection system makes it possible to capture the three-dimensional nature of the objective. Another feature of the new device is that fringe scanning is introduced to the grating projection system. The system provides a greater density of measurement points and eliminates the influence of skin surface anomalies such as spots, freckles, moles, etc. Using this system, the depth of wrinkles can be obtained within 1.0 second with a depth accuracy of less than $\pm 14\mu\text{m}$ over an area of $12.5\text{mm} \times 15\text{mm}$.

3-D measurements of wrinkles were taken on the external corners of the eyes of 599 Japanese women ranging in age from 20 to 67. A mathematical model is proposed which aims to assist in understanding the effects of aging and the efficacy of cosmetic products.

1. 緒 言

加齢とともに生じるしわは美容上の大敵とされ、その発生・成長の機序に関する研究が、様々な学問領域で進められている。

一方、しわの予防・維持・改善を目的とした商

†¹ 〒141 東京都品川区西五反田3-9-1; 3-9-1 Nishigotanda, Shinagawa-ku, Tokyo 141 Japan

†² 〒183 東京都府中市寿町 3-10-7; 3-10-7 Koto-buki-cho, Fucyu, Tokyo 183 Japan

†³ 〒184 東京都小金井市中町 2-24-16; 2-24-16 Nakacho, Koganei, Tokyo 184 Japan

品を開発するにあたって、しわの発生・成長の過程や、気になるしわの深さ・その幅を3次元形状データとして把握することも、化粧品技術者に課せられた基本的な課題の一つである。

今までのところ、生体を、しかもしわという小さな凹凸を、非接触で瞬時に形状計測する適当な方法は開発されていない。そのような中で、しわレプリカを対象とした触針による形状計測法¹⁾や、しわレプリカの落射照明像を画像解析することによって形状データを得る方法^{2),3)}などが提案されてきた。

しかしながら、触針法では計測時間の長さや測定面積の制約が、画像解析法では深さ方向の情報を輝度でみる、あるいは2値化して数量化するという曖昧さが、問題点として指摘される。

著者らは、上記した課題解決のために、しわの3次元形状を非接触で瞬時に計測できる方法と装置を開発し、日本人女性の目尻のしわの形状計測を行うとともに、得られたデータからしわの形をビジュアル化したしわマップとしわ形状パラメータの作成を試みたので報告する。

2. しわの非接触3次元形状計測装置の開発

3次元形状計測法として提案されている方法は数多くあるが、いずれの場合も生体のしわの計測に適さない。生体のしわの3次元形状計測を目的とした場合、以下の条件を満たす方法・装置であることが必要である。

即ち、

1. 非接触で計測可能
2. 短時間（目標1秒以内）で計測できること（生体のゆらぎに対処するため）
3. 小じわも計測可能（深さ方向10 μ m単位の感度が必要）
4. しみ・そばかすなど、凹凸に関係のない色情報が形状計測結果に影響を及ぼさないこと
5. 30mm×30mm位の面積が計測対象となり得ること
6. その他、明るい部屋で計測可能、測定操作

が簡単

といった事が挙げられる。

上記した中で最も基本的な条件である、非接触で瞬時に3次元形状計測を行う方法の一つとして、格子パターン投影法⁴⁾がある。

格子パターン投影法では、物体に格子状の縞パターンを投影し、これを投影方向とは異なる軸方向上の点から観測する。この場合、対象物体が平

(a) original pattern

(b) deformed grating pattern

Fig.-1 Deformed grating pattern.

面であればもとの格子間隔は変化しない。もし立体的な凹凸をもつ物体であれば、Fig.-1 に示したように、その形状に応じて格子パターンは湾曲して観察される。

このことは、その湾曲の度合いが立体情報を持つことを意味しており、3角測量の原理を利用して形状データを得ることができる。

重合剤と混練した SILFLO (Flexico, England) を用いて採取した目尻のしわのレプリカの3次元形状を、この格子パターン投影法で計測してみたところ、非接触で瞬時に計測できる可能性は見いだすことができたが、上記した条件3., 4. を満たさないことがわかった。

また、原理的に、細線化した格子パターン上しか計測値を得ることができず、それ以外の部分については数学的に補間してデータを得ることになる。

そこで、格子パターン投影法が持つ長所はそのまま生かしながら、3., 4. の条件を満たし、かつ計測密度を向上させる方法として、格子パターンを投影するとともに縞を走査させることを考えた。

2.1 縞走査法の計測原理

縞走査法⁵⁾は、正弦波状の強度分布を有する光の縞を縞の位相を3通り以上変えて測定対象に投

影しつつ、投影方向とは異なる方向から位相の変化に同期させてそれぞれ撮影した縞投影画像を解析し、3次元形状値を得る方法である。

この方法は、測定点が細線化された線上のみにあるのではなく、縞全体にわたって測定値が得られるという利点を有している。また、位相を光の強度変化の比から算出するため、色や色むらの影響を受けない。

目尻のしわの計測のための基本的な光学配置をFig.-2 に示す。

上記したように、正弦波状の強度分布を有する縞を測定対象に投影し、投影方向とは異なる方向から観察するとき、測定対象の形状に応じて縞の位相が変調して観察される。

観察する2次元平面上の各点(x, y)における変調分、即ち位相量 α は、

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{I_3 - I_1}{I_0 - I_2} \quad (1)$$

により2次元平面上の各点(x, y)における強度 I_0, I_1, I_2, I_3 から算出される。ただし、 I_0, I_1, I_2, I_3 は縞の位相を 90° ずつずらした時の各点(x, y)における強度である。算出された α の値を使って、各点(x, y)に対応する測定対象上の点の3次元座標値X, Y, Zは、

$$\mathbf{X} = \mathbf{b} + \mathbf{s}(-\mathbf{c} - \mathbf{x} \cdot \cos \phi) \quad (2)$$

Fig.-2 Optical arrangement for wrinkle shape measurement.

$$Y = -s \cdot y \quad (3)$$

$$Z = a + s(-d + x \cdot \sin \phi) \quad (4)$$

$$s = (-b \cdot \cos \theta) / u \quad (5)$$

$$\theta = \tan^{-1}(p \cdot a / a) \quad (6)$$

$$u = (-c - x \cdot \cos \phi) \cos \theta + (-d + x \cdot \sin \phi) \sin \theta \quad (7)$$

$$\phi = \tan^{-1}(b/a) \quad (8)$$

$$c = a \cdot m \quad (9)$$

$$d = b \cdot m \quad (10)$$

ただし

a : 基準点 (X=0, Y=0, Z=0) から光源までの距離

b : 光源から CCD カメラの主点までの距離

m : 観測系における画像の長さとその画像の長さの基準上での実長との比

p : 基準面に投影された格子のピッチ

から算出できる。

上記した計測原理に基づくしわの3次元形状計測装置を開発するにあたり、以下の2点に特に留意した。

1. 生体に安全な白色光源と正弦格子からなる新たな縞投影装置を製作すると共に、格子を高速に、かつ距離的に正しく駆動させる機構と、この機構と同期させて撮像した4枚の画像を逐次メモリーへ転送する方法・装置を考案製作する。
2. 目尻周辺の形状は曲率を持ち、その明度の平均値は、日本人女性の場合、V=6.3前後である。従って、焦点深度の深い光学系を構

築して、測定面全域においてボケのない縞が得られるようにするとともに、V=6.3前後の明度を持つ測定面においてもコントラストの高い縞を発生させることのできる濃度階調をもつ正弦格子を新規に開発する。

この詳細は、特許願^{6),7)}に記したので、ここでは省略する。

2.2 開発した装置のシステム構成

Fig.-3 に開発した装置のシステム構成を示す。

また、Fig.-4 は装置の外観写真である。

以下、測定手順の概略を記す。

1. 測定部位と CCD カメラ (ソニー・xc-75) の幾何学的位置関係を常に正しく保つ目的で設けた測定窓枠 (Fig.-4 参照) に、軽く目を閉じた状態で計測領域 (目尻) を合わせ、静止させる。
2. パソコン (PC-9821AP/M7) 制御により、正弦格子をモーターで横方向 (光源と非測定物とを結ぶ軸方向と直交する方向) に3回駆動させ、その都度、測定部位上の縞投影画像を CCD カメラで取り込み (合計4画像、輝度8ビット)、画像入出力装置に転送する。4画像の取り込みに要する時間は、1/2秒である。データベースのための各種属性データがつけられた個々の画像は、光磁気ディスク (PC-OD101) に格納される。
3. 取り込まれた画像は、512×480の画素から構成されている。通常は、取り込まれた画像中の任意の領域 (256×256画素、縦12.5mm

Fig.-3 Schematic diagram of the measurement system.

Fig.-4 Photograph of SHISEIDO 3-D WRINKLE ANALYZER II.

×横15mmに相当)を切り出して、形状データ算出領域としている。

なお、しわレプリカを測定する場合は、Fig.-4に示した測定窓枠の位置に別途作製したレプリカ測定用サンプル保持台を配置して行う。但し、この場合のレプリカはネガレプリカであるため、得られた3次元座標値X, Y, Zのうち、X座標を左右に入れ換えるとともにZ値の正負の符号を換え、本来の深さ方向のデータとしている。

4. 計測結果は、数値データとしてプリンター出力される。X, Yの任意の方向の断面図や、3次元形状のワイヤフレーム表示なども、各種の出力ソフトを介して得ることができる。なお、特に細かい計測点のデータを必要としない場合は、12.5mm×15mmの測定領域に対して128×128(X方向;117 μ m間隔, Y方向;98 μ m間隔)の計測点のデータを算出している。この場合3次元座標値の計算から後述するしわマップのモニター出力まで、所要時間は4秒である。

Fig.-5 Sketch of the test piece specimen.

2.3 計測値の正確さと計測精度

位置マーカーを貼りつけたSSE型標準片(榑小坂研究所)のレプリカを、重合剤と混練したSILFLOで採取し、これに測定対象として深さ方向の計測値の正確さを調べた。

Fig.-5に模式的に図示した測定対象(標準片のレプリカ)上の、左右の位置マーカーを結ぶ線にある凸部中央の幅±1mmの部位を計測領域とし、この部分を接触式表面粗さ計で走査したときに得られる Δd をここでは正確さをみるための真値とした。なお、接触式表面粗さ計での計測場所と開発した装置での計測場所を、厳密に一致させることは困難である。そこで計測そのものは、左右の位置マーカーを結ぶ線を中心にはば0.5mm間隔の平行線5本を想定して、それぞれ各1回計測を行い、その平均値を求め、得られた両者の平均値の差を正確さをみる目安とした。

接触式表面粗さ計(Surfcorder SE-3300を用いて榑小坂研究所にて計測)で得られた Δd の最大値は407.8 μ m, 最小値は404.8 μ mであり、平均値は406.2 μ mであった。

一方、開発した装置で同様に測定した時の Δd の最大値は404.2 μ mで、最小値は394.5 μ mであり、平均値は401.6 μ mであった。

従って平均値で比較すると、開発した装置で得られる深さの計測値は、真値より1.1%浅い計測値といえる。

また、同一しわレプリカの12.5mm×15mmの領域を連続10回計測した時得られる計測面中心近傍4点の計測値の標準偏差の大きさを求め、深さ方向の計測値の再現性の目安とした。個々の計測

点 (12.5mm×15mm を 128×128 に分割した時の座標点) に対して得られた深さ方向の計測値の標準偏差は、以下の通りである。

(65, 51)=8.5 μ m (65, 76)=5.3 μ m

(51, 72)=6.3 μ m (76, 72)=6.9 μ m

従って、深さ方向の計測精度として $\pm 14\mu$ m (2 σ) 程度の精度を持つといえる。

3. しわマップの作成

Fig.-6 に計測対象とした30代日本人女性の目尻の写真を、**Fig.-7** に開発した装置で得られた3次元形状計測結果をワイヤーフレームで表示したが、**Fig.-7** においては目尻周辺の骨格・肉付きなどのしわ以外の形状情報が含まれている。

そこで、個人ごとに異なる骨格・肉付き形状の

Fig.-6 Example of a wrinkle in the external corner of the eye (Japanese woman in her 30's).

Fig.-7 Measurement results of the wrinkle shown in **Fig.-6** (Wire-frame representation).

違いを計測データから除去し、しわ形状データだけを抽出・表示する方法を考えた。

Fig.-8 は **Fig.-7** に示した計測結果からしわ形状だけを抽出・表示したもので、著者らはこれを“しわマップ”と名付けた。**Fig.-8** は128×128の測定点から構成されている。各測定点の色の違いは深さ（Z）に対応する。この深さは、目尻に対して垂直方向（Y）の128個の生データから構成されている128本の点列個々を対象に算出した高次回帰式から得られた推定値を、個々の点列の基準値（深さゼロ）としたときの深さである。回帰式の次数は、赤池の情報量基準（AIC）に準拠して決定している。この例では、AIC からみた最適次数として一番出現頻度が高かった10次式を用いている。なお、しわの深さを9段階に区分し、青～黄～赤のグラデーションで浅い部分から深い部分の色分けをおこない、肉眼で観測されるしわのイメージが再現できるように設定している。

4. しわ形状のパラメータ化

しわ形状の位置づけ・分類を行うためのパラメータとして、しわの深さに関するパラメータと、これと直交する量としてのしわの数とサイズに関するパラメータを定義することを考えた。用いたデータは、装置の開発途上での性能チェックや形状パラメータ化の基礎的検討のために採取した目尻のしわレプリカ（日本人女性599人、20代=57、代=145、40代=206、50代=144、60代=47）の3次元形状計測データである。

前述したように、通常は12.5mm×15mmの測定領域に対して128×128、即ち、16,384の3次元座標値 X, Y, Z を算出している。このことは、深さについて16,384の計測値があることを意味しており、このデータ群をどのように整理して当該被験者の目尻のしわの深さとするかが、しわの深さのパラメータ化の課題である。

Fig.-8 A wrinkle shape map of the representation in **Fig.-7**.

一方、しわの数とサイズのパラメータ化は、しわのパターンにも配慮したパラメータ化が必要となり、さらに問題は複雑になる。著者らは、この課題解決のために以下に述べる方法の適用を試みた。

Fig.-9 は **Fig.-8** のデータを用いて、横軸に深さ (**X1**~**X9** については **Table-1** 参照)、縦軸に当該深さを持つ定点の数をとった頻度曲線で、その曲線のかたちはしわを主体とする深さ情報を持つ。

日本人女性の個々のしわの深さに関するデータの頻度曲線を同様に作成した場合、概ね **Fig.-9** にみられる右下がりの曲線になるなら、個々の被験者のしわの深さの違いは、この頻度曲線を構成する縦軸方向の量的差異としてとらえることができる。この場合、この縦軸方向の量的差異を一つの数字で表現できれば、16,384の深さの計測値が一つのパラメータに置き換えられることになる。

上記した事柄の可能性を確認する目的で、個々の被験者間のしわの深さの頻度に関するなまの平方和・積和行列の固有値解析を行った。得られた固有値、固有ベクトルと寄与率を **Table-1** に示す。

Fig.-9 Distribution of wrinkle depths in **Fig.-8**.

結果として、第1主成分に対応する固有ベクトル **V₁** から推定される頻度曲線のかたちは予想通り右下がりであり、かつ、寄与率は96.6%というきわめて高い値を示した。つまり、第1主成分はしわの深さの典型的な分布パターンを意味し、この第1主成分に対する成分得点が個々の被験者のしわの深さの違いを意味している。従って、個々の被験者について得られたしわの深さに関する128×128からなる計測データは、この第1主成分に対する成分得点で、即ち、一つの数値で代表させることができるといえる。

しわの数とサイズのパラメータ化については、次のように考えた。**Fig.-8** からわかるように、目尻のしわの場合、その成長に伴って当初数個からなる深さ情報を持つ測定点(画素)の塊が横長のパターンに成長し、かつ幅広になるとともにその塊の数が増加する傾向をとる。

従って、個々の独立した塊を形成する深さ方向の測定点の数(画素数)を数え、次いで個々の塊を構成する測定点の数によって塊をクラス分けし、最後にクラス分けした塊個々について頻度を求め、その頻度曲線を書くこと結果として、しわの数とサイズを表現できると考えた。

Fig.-10 は、**Fig.-8** のデータを用いて作成したしわの数とサイズに関する頻度曲線 (**X1**~**X8** に

Table-1 Eigenvalues and eigenvectors.

Wrinkle depth	Eigenvectors		
	V1	V2	V3
20μm ≤ X1 < 30μm	0.7616	0.4249	0.3498
30μm ≤ X2 < 40μm	0.5044	-0.0787	-0.2645
40μm ≤ X3 < 50μm	0.3095	-0.2905	-0.3611
50μm ≤ X4 < 60μm	0.1901	-0.3395	-0.2662
60μm ≤ X5 < 70μm	0.1197	-0.3045	-0.1578
70μm ≤ X6 < 80μm	0.0776	-0.2539	-0.0547
80μm ≤ X7 < 100μm	0.0868	-0.3645	0.0445
100μm ≤ X8 < 130μm	0.0548	-0.3107	0.1962
130μm ≤ X9	0.0517	-0.4765	0.7335
Eigenvalue	0.170E 7	0.485E 5	0.774E 4
Proportion	96.63	2.76	0.44
Cum. prop.	96.63	99.39	99.83

については **Table-2** を参照) であり, 日本人女性の個々のデータの頻度分布曲線も概ねこのような右下がりの曲線をとると予想される。従って, 被験者間のこの頻度に関するなまの平方和・積和行列の固有値解析を行い, 得られた第1主成分に対する寄与率が大きければ, 上記したしわの深さのパラメータと同様に一つの数値でしわの数とサイズが表示できることになる。

Table-2に前記した599人のデータについて得られた固有値, 固有ベクトルならびに寄与率を示す。

この場合も第1主成分に対応する固有ベクトル V_1 から推定される頻度曲線のかたちは右下がりであり, かつ寄与率は, 98.0%ときわめて高い。つまり, 第1主成分はしわの数とサイズの典型的なパターンを意味し, この第1主成分に対する成分得点が個々の被験者のしわの数とサイズの違いを意味している。従って, しわの数とサイズについても一つの数字で, 即ち, 第1主成分に対する成分得点で表せることがわかった。

以上二つのパラメータの成分得点の大小は, それぞれしわの成長度合いの順序づけを意味している。従来著者らは, 目尻のしわの拡大写真を対象

に, しわの成長度合いを5段階(1~5)で官能評価(肉眼)してきた。そこで, 今回得られたしわの深さに関するパラメータとしての成分得点 Z_1 と, しわの数とサイズに関するパラメータとしての成分得点 Z_2 を, 次式を用いて官能評価値 (Y_1 ; 1~5, Y_2 ; 1~4) に近似した値に変換した。

$$Y_1 = 1/200 Z_1 - 3 \quad (11)$$

$$Y_2 = -1/20 Z_2 + 7 \quad (12)$$

このようにして求めたしわの深さに関する評点 Y_1 を横軸に, しわの数とサイズに関する評点 Y_2 を縦軸にとり, 縦横の軸の交点にそれぞれ相当する値を取るしわマップを配置すると **Fig.-11** が得られた。**Fig.-11** にみられるしわマップの位置づけ・分類結果は, 肉眼で感じ取れるしわの成長度合いを良く反映しているといえる。

結果として, (11), (12)式で定義した線形変換で, しわの3次元形状計測値としての物理量 X, Y, Z を, 肉眼で感じるしわ形状の成長度合いの評価値に変換することができた。

5. ま と め

生体の目尻のしわのかたちを非接触で瞬時に計測する方法と装置の開発を, 格子パターン投影法に縞走査法を導入することで実現した。計測した

Frequency

Fig.-10 Distribution of numbers and sizes of wrinkle in **Fig.-8**.

Table-2 Eigenvalues and eigenvectors.

Number and size of wrinkle	Eigenvectors		
	V1	V2	V3
6 ≤ X1 < 20	0.9492	0.2710	0.1585
20 ≤ X2 < 30	0.2412	-0.3979	-0.7049
30 ≤ X3 < 40	0.1335	-0.3486	-0.2353
40 ≤ X4 < 50	0.0822	-0.2816	-0.0601
50 ≤ X5 < 70	0.0922	-0.4002	0.0796
70 ≤ X6 < 100	0.0635	-0.3545	0.1935
100 ≤ X7 < 150	0.0287	-0.1862	0.1358
150 ≤ X8	0.0542	-0.4969	0.5973
Eigenvalue	8335	93	34
Proportion	97.98	1.09	0.40
Cum. prop.	97.98	99.07	99.47

Fig.-11 Wrinkle Shape Parameter.

しわの3次元形状データには、被験者個々の骨格・肉付きの違いに基づく形状情報が乗っている。この形状情報を高次回帰式を当てはめて推定し、骨格・肉付きの違いに基づく形状の補正を行った。また、実測した深さの計測値とこの推定値との差を、しわの深さと定義した。さらに、しわの深さを9分類し、その分類に対応させて色分け表示を行い、しわ形状をビジュアル化したしわマップを作成した。

更に、しわの深さに関するパラメータと、これと直交する量としてのしわの数とサイズに関するパラメータの定義を試みた。

この二つのパラメータを用いることによって、肉眼で感じるしわの成長度合いと対応の良いしわ

形状の位置づけ・分類ができるようになった。

参 考 文 献

- 1) 尾沢達也, 西山聖二, 堀井和泉, 熊野可丸, 中山靖久, 加齢と皮膚, 清至書院, 329~350 (1986)
- 2) 高橋元次, フレグランスジャーナル, 34, 12 (1990)
- 3) 林 照次, フレグランスジャーナル, 11, 55~61 (1992)
- 4) 吉澤 徹, 鈴木賢策, 精密工学会誌, 53, 422 (1987)
- 5) 小松原良平, 吉澤 徹, 精密工学会誌, 55, 1817 (1989)
- 6) 特願平 2-215885
- 7) 特願平 4-7796

(1994年1月13日受理)