メッシュ状布帛における糸密度及び糸交差角度の高精度計測手法

福井大学大学院工学研究科 小形憲弘・西門秀人・桜井哲真
セーレン株式会社技術開発部門 高木進・城崎敦志

High Precision Measurement Technique of Yarn Density And Yarn Crossover Angle in Mesh Cloth

Norihiro Ogata^{*1,*2}, Hideto Nishikado^{*1}, Tetsuma Sakurai^{*1}, Susumu Takagi^{*2}, and Atsushi Shirosaki^{*2}

^{*1}Graduate School of Engineering, University of Fukui, 3-9-1, Bunkyo, Fukuishi, Fukui 910-8507, Japan

^{*2}Technical Development Section, SEIREN Co., Ltd., 1-10-1, Keya, Fukuishi, Fukui 918-8560, Japan

Abstract: Recently, the size of plasma display panels (PDPs) has been increasing, bringing about a need for a mesh cloth that can function as an electromagnetic shielding material for these new, larger PDPs. A cloth which serves as an electromagnetic wave shield for a PDP is known as a PDP-mesh.

The purpose of the present research was to propose a method of measuring yarn density and yarn crossover angle in mesh cloth. Although conventional trials of automatic measurement of yarn density in which one dimensional fast Fourier transform (FFT) was applied were carried out, it was difficult to verify the design value of a mesh cloth with a single trial. In the present method, a measured value is provided mathematically by connecting a texture feature of the mesh cloth with a characteristic of two dimensional FFT. PDP-mesh was used as an example of a measuring cloth. The measurement error of the yarn crossover angle with this method was found to be 0.1 degrees; additionally, we show that there is little measurement error of yarn density. Furthermore, the accuracy of the measurements obtained by the present method does not depend on the installation state of the measurement sample.

(Received 4 October, 2004; Accepted 24 January, 2005)

1. ま え が き

近年、大型化が進展しているプラズマディスプレイパネル（以下、PDP と表記）の電磁波シールド材として、メッシュ状布帛に注目が集まっている（以下、PDP における電磁波シールド用メッシュ状布帛を PDP メッシュと表記）。

PDP メッシュは PDP の前面パネルに装着され、PDP の発光素子に対して鑑賞者側に設置される。PDP の映像劣化を抑えるために、PDP メッシュの構成糸は十分な細さが要求される。PDP メッシュは、糸の直径が 30 μm 、糸密度がたて糸、よこ糸共に 52.0 本/cm という緻密な織物を基材としている。PDP メッシュを配置した PDP 表面の拡大図を Fig. 1 に示す。

従来の PDP メッシュの出荷検査は、デンシメーターを用いて糸密度を測定していた。また、糸交差角度は、標準測定試料が刻まれたフィルム上に PDP メッシュを設置し、これを投影させることで比較測定していた。どちらも肉眼による目視評価であることからバラつきが大きく、信頼性に乏しかった。

糸密度の計測に関する研究として、今岡らは 1 次元フーリエ変換を応用した自動測定[1]を試みているが、糸の配列方向については検討しておらず、計測時における測定試料の厳密な位置合わせが計測結果の精度を左右する。ここで、「測定試料の厳密な位置合わせ」とは、測定する矩形領域の x 軸または y 軸と、測定対象の糸の配列方向が成す角度を指す。

本論文では、測定試料の設置状態が計測結果に影響を及

ぼさない、2 次元フーリエ変換を応用したデジタル的な数値処理による糸密度及び糸交差角度の高精度計測手法を提案する。

2. メッシュ状布帛における糸密度及び糸交差角度の計測手法

2.1 アルゴリズム

PDP メッシュは、たて糸及びよこ糸が空間的に規則正しく配列されていて周期性を有する。このことから、PDP メッシュの空間的なテクスチャ特徴を抽出すれば、糸密度及び糸交差角度を数学的に求めることが可能であると考えた。PDP メッシュにおけるテクスチャ特徴の抽出アルゴリズムを以下に示す。

- ① PDP メッシュのデジタル画像をコンピュータに入力
- ② 画像を高速フーリエ変換（以下、FFT : Fast Fourier Transform と表記）し、フーリエスペクトルを取得
- ③ フーリエスペクトルのピークを抽出
- ④ ピーク情報（周波数、角度）を PDP メッシュのテクスチャ特徴（糸密度、糸交差角度）に変換

2.2 シミュレーション

PDP メッシュにおけるテクスチャ特徴の抽出アルゴリズムに基づいて、PDP メッシュの画像をモデル化し、そのテクスチャ特徴抽出のシミュレーションを行う。

Fig. 1 Photomicrograph of the PDP-mesh.

2.2.1 PDP メッシュのデジタル画像をコンピュータに入力

PDP メッシュのモデルを線画で作成し、それを糸密度及び糸交差角度が既知の標準測定試料とする。この標準測定試料の糸密度及び糸交差角度の測定精度を評価することで、本アルゴリズムの妥当性を検証した。Table 1 に PDP メッシュモデルの設計値を示す。なお、本論文において糸密度は、1 cm 当りの糸の本数で示す。Fig. 2 に PDP メッシュモデル画像を示す。

2.2.2 画像を FFT し、フーリエスペクトルを取得

画像は平面であることから、水平方向と垂直方向の2つの周波数成分を有する。また、画像の場合、周波数の配置は、中心が直流分、右端が $f_x/2$ 、左端が $-f_x/2$ という形式にすることが常套とされている。水平周波数を u 、垂直周波数を v とした際の2次元的な周波数成分の分布が(2次元)フーリエスペクトルである。フーリエスペクトルと実際の画像の関係を Fig. 3 に示す。縞模様が細くなるにしたがって周波数が高くなる。また、斜め方向の縞は、図のように水平周波数と垂直周波数の両方の成分を有するプロットになる。フーリエスペクトルの計算には、次式 (1) に示す2次元のFFT[2]を使用する。

$$F(u,v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} G(m,n) \exp \left\{ -2\pi j \left(\frac{um}{M} + \frac{vn}{N} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、

G : 画像の濃淡レベル

m : 画像の x 軸座標

n : 画像の y 軸座標

M : 画像の x 軸画素数

N : 画像の y 軸画素数

F : フーリエスペクトル

u : フーリエスペクトルの x 軸座標

v : フーリエスペクトルの y 軸座標

j : 虚数単位

Fig. 2 に示す PDP メッシュモデル画像のフーリエスペクトルを Fig. 4 に示す。ここで、フーリエスペクトルを計算する前に、スペクトルの先鋭度を向上させる目的で、画像に窓関数を施す。窓関数の効果については、第4章で詳細を述べる。

2.2.3 フーリエスペクトルのピークを抽出

Fig. 4 のフーリエスペクトルにおいて、上位 25 位 (経験的に設定) までのレベルの周波数座標を残し、残りをレベル 0 とする閾値処理を施す。閾値処理を式 (2) に示す。

Table 1 Design value of the PDP-mesh model.

Image size	512×512 pixel
PDP-mesh size	2.54×2.54 cm
Yarn density of the warp : D_{warp}	25.2 number of yarns /cm
Yarn density of the weft : D_{weft}	50.4 number of yarns /cm
Angle of the warp : θ_{warp}	115.0 °
Angle of the weft : θ_{weft}	35.0 °
Yarn crossover angle : θ_{cross}	80.0 °

Fig. 2 Image of the PDP-mesh model.

Fig. 3 Fourier spectrum and relation of an image.

Fig. 4 Fourier spectrum of the PDP-mesh model.

$$F'(u,v) = \begin{cases} F(u,v) & F(u,v) \geq t \\ 0 & F(u,v) < t \end{cases} \quad (2)$$

ここで、

F : 閾値処理前のフーリエスペクトルのレベル

F' : 閾値処理後のフーリエスペクトルのレベル

t : 閾値

閾値処理されたフーリエスペクトル $F^*(u,v)$ において、原点を中心に、偏角 θ と動径 r (r は空間周波数に対応) で表される極座標 $F^*(\theta, r)$ に変換する。次に、各偏角におけるフーリエスペクトルのレベル総和を式 (3) で算出する。

$$F'_{\text{total}}(\theta) = \sum_{r=1}^{r_{\text{max}}} F^*(\theta, r) \quad (\theta = 0.0, 0.1, 0.2 \dots, 180.0) \quad (3)$$

ここで、

F'_{total} : 偏角 θ におけるレベル総和

r_{max} : 空間周波数 r に関して計測する最大値

r_{max} は空間周波数 r の最大値であり、画像サイズの半分 (ここでは 512 pixel の半分: 256) となる。また、 $F^*(\theta, r)$ は原点に対して対称であることから、 θ の値域は $0.0^\circ \sim 180.0^\circ$ とする。角度分解能は 0.1° とした。各偏角 θ におけるレベル総和 $F'_{\text{total}}(\theta)$ の分布を Fig. 5 に示す。図より、レベル総和の分布にはいくつかの鋭いピークが現れることがわかる。フーリエスペクトルの各ピークは、1 つのデータ点で形成されることが望ましいが、実際には複数の点で形成されるため、微小な幅を有するものとなる。ここで、フーリエスペクトルの各ピークを形成するデータ点の集合体をクラスターとし、同図中にナンバリングを施す。

2.2.4 ピーク情報 (周波数, 角度) を PDP メッシュのテクスチャ特徴 (糸密度, 糸交差角度) に変換

フーリエスペクトルのピーク抽出で得られた各クラスターにおいて、それを形成する角度におけるレベル総和の合計 (クラスターの面積に相当) を次式 (4) で算出する。

$$F_{\text{cluster}}(k) = \sum_{i=\theta_1(k)}^{\theta_2(k)} F'_{\text{total}}(i) \quad (4)$$

ここで、

F_{cluster} : クラスターにおけるレベル総和の合計

k : クラスター番号

θ_1 : クラスターの始点の偏角

θ_2 : クラスターの終点の偏角

算出結果を降順に並べ替え、各クラスターにおける角度の平均値 θ_{mean} を次式 (5) で算出する。

$$\theta_{\text{mean}}(k) = \{\theta_2(k) + \theta_1(k)\} / 2 \quad (5)$$

Table 2 に結果をまとめて示す。Table 2 より、クラスター⑤及びクラスター②におけるクラスター平均値 $\theta_{\text{mean}} = 125.0^\circ$ とクラスター平均値 $\theta_{\text{mean}} = 25.0^\circ$ の方向にレベル総和の合計 $F_{\text{cluster}}(k)$ が大きいことがわかる。 θ 方向において、レベル総和の合計 $F_{\text{cluster}}(k)$ が大きいということは、その方向における空間周波数成分が大きいということであり、画像上で、その方向における濃淡変化が大きいことを示唆している。PDP メッシュのたて糸及びよこ糸方向に対して直角を成す方向は、糸部分と空隙部分の繰り返しの頻度が最も大きい部分であり、これが画像の大きな濃淡変化に対応する。上記理由から、レベル総和の合計 $F_{\text{cluster}}(k)$ における上位 2 位までのクラスターにおける偏角の平均値と直角を成す角度を、たて糸方向及びよこ糸方向に対応させることが可能であると考えられる。Table 2 より、レベル総和の合計における偏角の平均値 θ_{mean} の上位 1 位を θ_{sum1} とし、2 位の偏角の平均値を θ_{sum2} とし、たて糸の角度及びよこ糸の角度を次式 (6) で算出する。

$$\left. \begin{aligned} &\theta_{\text{sum1}} \geq \theta_{\text{sum2}} \text{ の場合} \\ &\quad \theta_{\text{warp}} = \theta_{\text{sum1}} + 90 \\ &\quad \theta_{\text{weft}} = \theta_{\text{sum1}} - 90 \\ &\theta_{\text{sum1}} < \theta_{\text{sum2}} \text{ の場合} \\ &\quad \theta_{\text{warp}} = \theta_{\text{sum2}} + 90 \\ &\quad \theta_{\text{weft}} = \theta_{\text{sum2}} - 90 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここで、
 θ_{warp} : たて糸の角度
 θ_{weft} : よこ糸の角度

式 (6) より、たて糸の角度 θ_{warp} は 115° 、よこ糸の角度 θ_{weft} は 35° となる。なお、糸の交差角度 θ_{cross} は次式 (7) で計算する。

$$\left. \begin{aligned} &\theta_{\text{cross}} = |\theta_{\text{weft}} - \theta_{\text{warp}}| \\ &\theta_{\text{cross}} > 90 \text{ の場合} \\ &\quad \theta_{\text{cross}} = 180 - |\theta_{\text{weft}} - \theta_{\text{warp}}| \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

閾値処理されたフーリエスペクトル $F^*(u,v)$ と、たて糸の角度 θ_{warp} 、よこ糸の角度 θ_{weft} 及び糸の交差角度 θ_{cross} の対応を Fig. 6 に示す。ここで、フーリエスペクトルにおけるピーク位置は、視認性のために膨張処理を施した[3]。

Fig. 5 Distribution of total level (①-⑥: Cluster number).

Table 2 Calculation results.

Cluster k	$F_{\text{cluster}}(k)$	$\theta_{\text{mean}}(k)^\circ$
5	1292.5	125.0
2	421.5	25.0
1	368.9	0.1
4	236.8	90.0
3	218.6	45.0
6	218.6	135.0

Fig. 6 Correspondence between the peak information and the texture feature of the PDP-mesh model.

次に、糸密度の算出手順を示す。たて糸方向に対して直角を成す角度、よこ糸方向に対して直角を成す角度がそれぞれ既知であることから、その方向における空間周波数 r に関するフーリエスペクトルのレベル総和 $F_{\text{total}}(r)$ 分布を算出すればよい。用いた計算式を式 (8) に示す。

$$F'_{\text{total}}(r) = \sum_{\theta'=\theta-\Delta\theta}^{\theta+\Delta\theta} F'(\theta', r) \quad (8)$$

ここで、 $\Delta\theta$ は、 θ に関する計測幅であり、 $\Delta\theta = 0.2$ とした。ある空間周波数 r において、レベル総和 $F'_{\text{total}}(r)$ が大きいということは、画像上において、その空間周波数 r に相当する規則的な濃淡の繰返しが、頻繁に現れていることを示唆している。たて糸方向に対して直角を成す角度である 25° 方向における計算結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より、ピークが複数存在し、複数のクラスターを形成していることがわかる。各クラスターにおける空間周波数 r の平均値 r_{mean} を次式 (9) で算出する。

$$r_{\text{mean}}(k) = \{r_2(k) + r_1(k)\} / 2 \quad (9)$$

ここで、

- k : クラスター番号
- r_1 : クラスターの始点の空間周波数
- r_2 : クラスターの終点の空間周波数

結果を Table 3 に示す。PDP メッシュのモデル画像は、糸が有るか無いかの離散信号であり、離散信号を FFT 処理した場合、得られるフーリエスペクトルは倍周波数の位置にピークが観測される。したがって、同一角度に複数のピークが存在する。ここで、同一角度における最も小さいクラスターである空間周波数 r の平均値 $r_{\text{mean}} = 64$ が求めるべき値であり、これがたて糸における糸の本数に対応する。

次に、よこ糸方向に対して直角を成す角度である 125° 方向においても上記と同様の処理を施す。結果を Fig. 8 と Table 4 に示す。Table 4 より、クラスター①における空間周波数 r の平均値 $r_{\text{mean}} = 128$ が求めるべき値であり、これがよこ糸における糸の本数に対応する。本論文において糸密度は、1 cm 当りの糸の本数で示すので、次式 (10) で変換する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{たて糸密度の場合} \\ D_{\text{warp}} = r_{\text{mean}} / S \\ \text{よこ糸密度の場合} \\ D_{\text{weft}} = r_{\text{mean}} / S \end{array} \right\} \quad (10)$$

ここで、

- D_{warp} : たて糸密度 (number of yarns/cm)
- D_{weft} : よこ糸密度 (number of yarns/cm)
- S : PDP メッシュのサイズ (cm)

上記結果を Table 5 にまとめる。Table 5 の計算値と Table 1 の PDP メッシュモデルの設計値とを比較すれば明らかに、本提案手法により高精度な計測が達成されたと言える。また、PDP メッシュのたて糸及びよこ糸が画像に対して傾きを有する場合、糸交差角度が直角でない場合、たて糸とよこ糸の糸密度がそれぞれ異なる場合でも、正確な測定が可能であることがわかる。

Table 3 Calculation results.

Cluster k	r_{mean}
1	64.0
2	128.0

Table 4 Calculation results.

Cluster k	r_{mean}
1	128.0

Table 5 Calculation results.

Yarn density of the warp: D_{warp}	25.2 number of yarns /cm
Yarn density of the weft: D_{weft}	50.4 number of yarns /cm
Angle of the warp : θ_{warp}	115.0°
Angle of the weft : θ_{weft}	35.0°
Yarn crossover angle : θ_{cross}	80.0°

Fig. 7 Distribution of total level in 25° (①, ②: Cluster).

Fig. 8 Distribution of total level in 125° (①: Cluster).

3. PDP メッシュにおける手法の評価

3.1 検査装置

Fig. 9 に検査装置の構成図を示す。測定光学系は、 45° 方向入射、 0° 方向受光である。白色板の上に計測対象である PDP メッシュを設置し、アクリル板でそれを挟む。ここで、アクリル板とカメラレンズとの距離は 15 cm であり、 45° 方向より、拡散照明された PDP メッシュの画像を 0° 方向に設置された CCD カメラで取得する仕組みとした。CCD カメラには、モノクロ冷却 CCD カメラを採用した。有効画素は 512×512 pixel である。また、CCD カメラの撮影位置の校正及び画素と実サイズの測定には、カメラ校正用グリッドを使用した。カメラ校正用グリッドのサイズが 5.1×5.1 cm であることから、本検査装置の検査対象領域の最大サイズは 5.1×5.1 cm となる。照明機器には、標準の光 D65 の常用光源である人工太陽照明灯に、D65 近似フィルタと拡散照明フィルタを装着したものをを用いる。

3.2 実験

実際の PDP メッシュを対象とした測定評価を行った。方法は、2.2 節のシミュレーションと同様である。Table 6 に計測対象とした PDP メッシュの設計値を示す。Fig. 10 に PDP メッシュの撮像画像を示す。また、測定結果を Table 7 に示す。

Fig. 9 Configuration of the inspection system.

Fig. 10 Original image of the PDP-mesh.

Table 6 Design value of the PDP-mesh model.

PDP-mesh size	5.10×5.10 cm
Yarn density of the warp: D_{warp}	52.0 number of yarns/cm
Yarn density of the weft: D_{weft}	52.0 number of yarns/cm
Yarn crossover angle: θ_{cross}	90.0°

Table 7 Calculation results.

Yarn density of the warp: D_{warp}	52.0 number of yarns/cm
Yarn density of the weft: D_{weft}	52.0 number of yarns/cm
Angle of the warp: θ_{warp}	123.9°
Angle of the weft: θ_{weft}	33.8°
Yarn crossover angle: θ_{cross}	89.9°

4. 結果及び考察

Table 6 と Table 7 とを比較することにより、糸密度は設計値通りに製造されていることがわかる。また、糸交差角度は 89.9°であり、設計値に対して 0.1°の差があるが、本検査装置の角度分解能を 0.1°としたことから、89.9°~90.1°を許容値の最小値とせざるを得ない。その範囲においては、設計値の許容内であると言える。また、よこ糸を基準とすれば、PDP メッシュは CCD カメラに対して 33.8°の傾きを有して白板上に設置されたことがわかる。このことは、実際のオンライン検査において、測定試料の厳密な位置合わせを必要とせずに、正確な測定値が得られることを示唆している。

次に、糸密度変化及び糸交差角度変化に対する測定精度への影響について述べる。糸密度と糸交差角度における測定誤差を次式 (11) で定義する。

$$\left. \begin{aligned} E_D &= \left| D_{\text{target}} - D_{\text{standard}} \right| / D_{\text{max}} \times 100 \\ E_\theta &= \left| \theta_{\text{target}} - \theta_{\text{standard}} \right| / \theta_{\text{max}} \times 100 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここで、

E_D : 糸密度の測定誤差
 D_{target} : 測定値
 D_{standard} : 標準値 (たて糸及びよこ糸の平均値)
 D_{max} : 測定可能な最大糸密度
 E_θ : 糸交差角度の測定誤差
 θ_{target} : 測定値
 θ_{standard} : 標準値 (たて糸及びよこ糸の平均値)
 θ_{max} : 測定可能な最大糸交差角度 (90°)

糸密度変化に対する測定精度への影響は、PDP メッシュモデルにおいて、糸交差角度を 90°に固定し、糸密度を 1.6 ~ 403.1 本/cm の間で変化させて測定試験を行った。Fig. 11 に結果を示す。糸交差角度変化に対する測定精度への影響は、同様に PDP メッシュモデルにおいて、糸密度を 50.4 本/cm に固定し、糸交差角度を 10°~90°に変化させて測定試験を行った。Fig. 12 に結果を示す。Fig. 11 及び Fig. 12 より、糸密度変化及び糸交差角度変化による測定精度への影響は、無視できる程度であることがわかる。

次に、測定再現性について述べる。糸密度が異なる (39.4 ~ 131.1 本/cm) 9 種類の実際の PDP メッシュを用意し、それぞれ 30 回測定した際の測定再現性について調べた。測定再現性を次式 (12) で定義する。

$$\left. \begin{aligned} AveE_D &= \sum_{i=0}^n E_D(i) / n \\ AveE_\theta &= \sum_{i=0}^n E_\theta(i) / n \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここで、

$AveE_D$: 糸密度の測定再現性
 $AveE_\theta$: 糸交差角度の測定再現性
 n : 測定回数

測定毎に PDP メッシュを設置し直し、CCD カメラに対する角度調整は行っていない。結果を Fig. 13 に示す。ここで、図中の PDP メッシュの識別を糸密度で示す。試験結果は、糸密度に関する測定再現性の平均値は 0.06%，糸交差角度に関する測定再現性の平均値は 0.05%であり、誤差の少ない高い測定再現性が得られた。

Fig. 11 Measurement accuracy (Yarn density).

Fig. 12 Measurement accuracy (Yarn crossover angle).

Fig. 13 Measurement repeatability.

Fig. 14 Gibbs phenomenon.

Fig. 15 Normal input image.

Fig. 16 Effect of a window function.

Table 8 Specifications of PC and calculation time.

CPU	Pentium III 800 MHz
RAM	256 MB
Calculation time	1613 msec

次に、窓関数の効果について述べる。入力される画像は、その両端において不連続面が生じる。例として、 $x=255$ で不連続面が存在する周期が 512 の方形波を Fig. 14 に示す。不連続点の近傍では、大きなリップル（行き過ぎ量）が発生している事がわかる。この現象はギブス現象と呼ばれ、方形波のように不連続点を持つ周期関数をフーリエ級数で表した場合に生じる現象であり、測定精度に悪影響を及ぼす。ギブス現象を軽減する方法として、画像の打ち切り幅の両端で次第に小さな値になるように窓関数を乗じる方法がある[4]。本計測手法では、窓関数として、ハニング窓関数を採用した。式 (13) にハニング窓関数を示す。

$$W(m) = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi m/N) \quad (13)$$

窓関数を施さない状態で、Fig. 1 に示した PDP メッシュモデル画像に FFT を施したフーリエスペクトルを Fig. 15 に示す。Fig. 4 のフーリエスペクトルは、ハニング窓関数が施してある。Fig. 4 と Fig. 15 を比較すれば、窓関数を施したフーリエスペクトルは、より先鋭度の高いピークが得られていることがわかる。Fig. 16 に窓関数の効果を示す。ハニング窓関数の他に、ハミング窓関数及びブラックマン窓関数でも効果を確認したが、ハニング窓関数が最も効果的であった。

次に、実験に使用した PC のスペックと計算時間を Table 8 に示す。通常の PC スペックのレベルで、約 1.6 秒という実用的な範囲での計算時間を実現することができた。測定精度と測定時間が、PDP メッシュの糸密度及び糸交差角度の検査工程において十分実用的な範囲にあることから、本検査装置の工場検査ラインへの組込みは可能であると考えられる。

5. 結 論

デジタル画像処理による PDP メッシュの糸密度及び糸交差角度の計測手法を提案した。この手法では、2 次元 FFT と窓関数を生かしたアルゴリズムに特徴があり、試作装置により、大口径化が進むプラズマディスプレイパネルの電磁波シールド材として用いられる、メッシュ状布帛の糸密度及び糸交差角度の高精度で安定な測定が可能であることを示した。

謝 辞

本測定手法の確立にあたり、有益な助言を頂いた福井大学工学部の吉田俊之教授、同じく福井大学工学部の山口新司教授に深く感謝致します。

参 考 文 献

1. Haruki Imaoka, Shigeru Inui, Haruo Niwaya, and Atsuo Shibuya, "Trial on Automatic Measurement of the Density", *Sen'I Gakkaishi*, **32**, 1, pp. 32-39 (1988)
2. Jae S. Lim and Alan V. Oppenheim, "Advanced Topics in Signal Processing", Prentice Hall Signal Processing Series, pp. 385-389 (1988), ISBN 0-13-013129-6
3. 八木伸行, "C 言語で学ぶ実践画像処理", オーム社, pp.65-69, ISBN 4-274-07703-9
4. Andreas Antoniou, "Digital Filters : Analysis and Design", McGraw-Hill Book, pp. 226-253(1979), ISBN 0-07-002117-1