

布地間の擦過音を用いた布地の識別

Identification of Fabrics by Using Frictional Sounds between Fabrics

菊植亮, 田淵文人, 山本元司 (九州大学)

Ryo Kikuuwe, * Fumihito Tabuchi, and Motoji Yamamoto (Kyushu Univ.)

This study aims to develop a handheld-type sensor comprised of microphones covered by fabrics that capture frictional sounds between the device fabrics and a target fabric for quantitatively evaluating mechanical properties of the target fabric. The data obtained through an experimental device were analyzed through a modified version of principal factor analysis. The analysis revealed that some combinations of device fabrics were useful for efficiently distinguishing target fabrics.

Key Words: Fabric, Tactile sensing, Sound

1. はじめに

布地は細い繊維がいくつもの階層構造を持って絡まりあって構成する極めて複雑な力学系であり、その物理特性を少数のパラメータで定量的に記述することは非常に難しい。また、布地を触ることによって人が感じる「触感」あるいは「手触り」も定量的で客観的な数値で記述することが非常に困難である。布地の触感は消費者が繊維製品を選択するときの重要な判断基準であり、これを定量的・客観的な数値で表現することは製品の品質・信頼性や生産効率の向上のために重要な課題であるといえる。布地の力学特性と主観的な触感との関係については古くから研究が行われており、力学特性を精密測定するための装置も開発されている⁽¹⁾。しかし、制御された変位・力を加える精密測定装置は、一般に高い導入コストや位置決め・初期設定作業の煩雑さなどの難点があり、生産現場への導入には課題が残っている。

本研究では、繊維織物の生産・検査工程で使用できる安価で操作が簡単なハンドヘルド型の測定装置の開発を目的としている。既報⁽²⁾においては、マイクロホンに布地(以下「装置布」)を取り付けた構造の測定装置を提案した。これは、装置布を検査対象である布地(以下「対象布」)と摺り合わせるときに発生する音をマイクロホンによって測定し、そこから対象布の特性に関する情報を取得しようというものである。布地の摺り合わせによって発生する音は、双方の布の力学特性に由来する情報を豊富に含んでいると考えられる。そのため、この音の情報を適切に処理することによって、対象布の力学特性に関する情報を比較的単純な装置で取得できる可能性がある。

本稿では、既報で述べた手法の有効性をより厳密に検証するために、データ数を増やした上で統計学的な解析を行う。そして、使用者(操作者)の動作の揺らぎに由来する測定値の変動を考慮した上で、装置布の選定等について留意すべき点などを明らかにする。

2. 実験

2.1 問題設定

本研究では、Fig. 1のように、異なる装置布で覆われた複数(N_D 個)のマイクロホンで構成される測定装置を想定している。この装置で対象布をなぞると、それぞれのマイクロホンによって異なった音が測定される。一

つの装置布(で覆われたマイクロホン)で得られる音から N_F 個の実数値が得られるとすると、ある対象布 T をなぞったとき、ある装置布 D から得られるデータは N_F 次元ベクトル $x(T, D) (\in \mathbb{R}^{N_F})$ で表せる。また、全ての装置布から得られるデータは $N_F N_D$ 次元ベクトル $y(T) = [x(T, D_1)^T, \dots, x(T, D_{N_D})^T]^T$ で表せる。

ここで得られるデータ $y(T)$ を低次元化して得られる何らかの指標 $z(T) = \Phi(y(T)) \in \mathbb{R}^k (k < N_F N_D)$ が T の情報をよく反映し、操作者のなぞり方やその他の誤差要因の影響をあまり反映しないことが望まれる。また、装置の小型化・低コスト化のためには、装置布(およびマイクロホン)の数 N_D は少ないほうが望ましい。

2.2 実験

実験では単一のコンデンサ型マイクロホンを用いた。装置布は厚さ $10\mu\text{m}$ の両面テープでマイクロホンに接着し、装置布を貼り替えて複数回の計測を行った。作成した装置の概略図を Fig. 2 に示す。実験では操作者がこの装置を手で持って対象布の上で往復運動させ、その際の音を記録した。実験は異なる $N_P = 5$ 人の操作者によって行った。その際操作者には

- 片道約 15cm の距離を片道約 1 秒で走査
- 装置の側面を持ち、装置の自重のみで布地表面を擦るように走査

という条件のみを与えた。対象布としては Fig. 3 に示す $N_T = 9$ 種を用い、装置布としては Fig. 3 の (a) ~ (e) の $N_D = 5$ 種を用いた。なお、一人の測定者の同一条件(T と D の対)での測定回数は $N_M = 5$ 回とした。

マイクロホンからの信号は AD 変換器を介してパソコンに入力し記録した。一回の測定においては、得られた

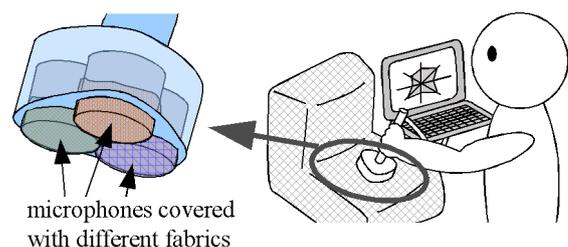


Fig. 1: Basic concept of the proposed device structure.

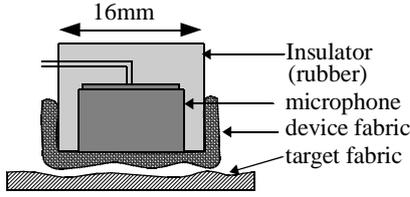


Fig. 2: Experimental setup.

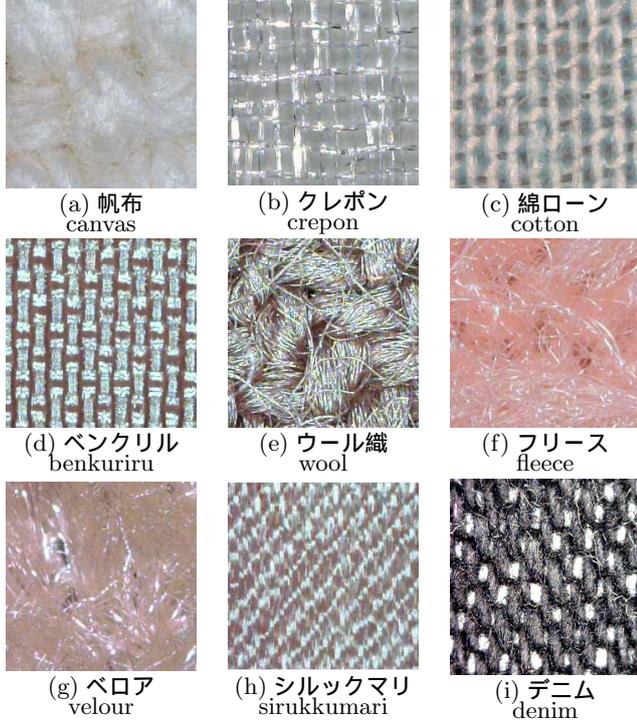


Fig. 3: Fabrics used in experiments.

電圧情報を高速フーリエ変換 (FFT) し, $30 \times 2^{n-1}$ Hz ($n = 1, \dots, 10, 30$ Hz ~ 15320 Hz) におけるデシベル値を記録した. なお, サンプリングレートは 40,000 Hz とし, FFT に用いたデータ点数は 4096 点とした. 操作者 P が装置布 D で対象布 T を i 回目になぞったときに得られる $N_{\mathcal{F}}$ 点 (= 10 点) のデシベル値をベクトル $\mathbf{x}(T, D, P, i)$ ($\in \mathbb{R}^{N_{\mathcal{F}}}$) で表す.

3. データの分析

3.1 数学的準備

記述を簡潔にするため, データの集合 $\{\mathbf{x}(\mathcal{X})\}$ ($\mathbf{x}(\mathcal{X}) \in \mathbb{R}^N$, $\mathcal{X} \in \{\mathcal{X}_1, \dots\}$) の平均と不偏共分散行列を求める演算子を下記のように定義する.

$$\text{ave}_{\mathcal{X}} \mathbf{x}(\mathcal{X}) = \frac{\sum_{\mathcal{X}} \mathbf{x}(\mathcal{X})}{\sum_{\mathcal{X}} 1}$$

$$\text{var}_{\mathcal{X}} \mathbf{x}(\mathcal{X}) = \frac{\sum_{\mathcal{X}} (\mathbf{x}(\mathcal{X}) - \text{ave}_{\mathcal{X}} \mathbf{x}(\mathcal{X})) (\mathbf{x}(\mathcal{X}) - \text{ave}_{\mathcal{X}} \mathbf{x}(\mathcal{X}))^T}{(\sum_{\mathcal{X}} 1) - 1}$$

ここで, $\text{ave}_{\mathcal{X}} \mathbf{x}(\mathcal{X}) \in \mathbb{R}^N$, $\text{var}_{\mathcal{X}} \mathbf{x}(\mathcal{X}) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ となる. 一回の測定で得られるデータは $\mathbf{x}(T, D, P, i)$ ($\in \mathbb{R}^{10}$) と表される. これは様々な要因により変動するが, それは 1) 対象布の相違による変動 (T 間変動), 2) 装置布の相違による変動 (D 間変動), 3) 測定者の相違による

変動 (P 間変動), 4) 同一条件下での測定間変動 (M 間変動) の 4 種に分類できる. 本研究の目的は T 間の差異の情報を取得する技術を確認することであり, P 間変動と M 間変動は測定誤差とみなされる. また, D 間の変動は特に重要ではないが, ある装置布 D_1 における T 間変動と別の装置布 D_2 におけるそれとの相関がより小さければ, D_1 と D_2 を用いることで T についてより多くの情報が得られるということになる.

9 種の対象布 \times 5 種の装置布 \times 5 人の操作者 \times 5 回の測定から得られた 1125 個の 10 次元ベクトル $\mathbf{x}(T, D, P, i)$ を下記のように整理する.

$$\bar{\mathbf{x}}(T, D, P) = \text{ave}_i \mathbf{x}(T, D, P, i) \quad (1)$$

$$\bar{\mathbf{U}}(T, D, P) = \text{var}_i \mathbf{x}(T, D, P, i) \quad (2)$$

$$\bar{\mathbf{y}}(T, P) = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}(T, D_1, P) \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{x}}(T, D_{N_D}, P) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N_{\mathcal{F}} N_D} \quad (3)$$

$$\bar{\mathbf{V}}(T, P) = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{U}}(T, D_1, P) & & \mathbf{O} \\ & \ddots & \\ \mathbf{O} & & \bar{\mathbf{U}}(T, D_{N_D}, P) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\bar{\mathbf{y}}(T) = \text{ave}_P \bar{\mathbf{y}}(T, P) \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{V}}(T) = \text{var}_P \bar{\mathbf{y}}(T, P) \quad (6)$$

$$\mathbf{V}_T = \text{var}_T \bar{\mathbf{y}}(T) \quad (7)$$

$$\mathbf{V}_P = \text{ave}_T \bar{\mathbf{V}}(T) \quad (8)$$

$$\mathbf{V}_M = \text{ave}_T \left(\text{ave}_P \bar{\mathbf{V}}(T, P) \right) \quad (9)$$

ある操作者 P によってある対象布 T から得られた測定データは, 50 次元空間における点 $\bar{\mathbf{y}}(T, P)$ を中心として行列 $\bar{\mathbf{V}}(T, P)$ で表される形状を持つ超楕円体

$$\mathcal{C}(T, P) = \{ \mathbf{y} \in \mathbb{R}^{50} | (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}(T, P))^T \bar{\mathbf{V}}(T, P)^{-1} (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}(T, P)) < 1 \}$$

で表すことができる. この実験によって合計 45 (= $N_T N_P$) 個の超楕円体を得られたことになる. 点 $\bar{\mathbf{y}}(T)$ はある対象布 T について得られた 5 個 (N_P 個) の超楕円体の中心点の平均であり, 行列 \mathbf{V}_T は 9 種の対象布についての点 $\bar{\mathbf{y}}(T)$ の分布を表す共分散行列である. また, $\bar{\mathbf{V}}(T)$ は同一対象布 T について得られる 5 個 (N_P 個) の超楕円体の中心の分布を表す共分散行列であり, \mathbf{V}_P は 9 個 (= N_T 個) の $\bar{\mathbf{V}}(T)$ の平均である. 行列 \mathbf{V}_M は 45 個の超楕円体の平均的な形状を表す共分散行列である.

以下の議論で重要であるのは \mathbf{V}_T , \mathbf{V}_P , および \mathbf{V}_M の 3 つの 50×50 行列である. それぞれが, T 間, P 間, および M 間の変動に対応する共分散行列である. 行列 \mathbf{V}_T が行列 $\mathbf{V}_P + \mathbf{V}_M$ に比べて十分に大きければ, 対象布の差異を反映した情報が得られているということになる.

3.2 変動の分布

まず, 共分散行列 \mathbf{V}_T , \mathbf{V}_P , および \mathbf{V}_M の性質を調べるために, それぞれの対角成分を Fig. 4 に示す. これら

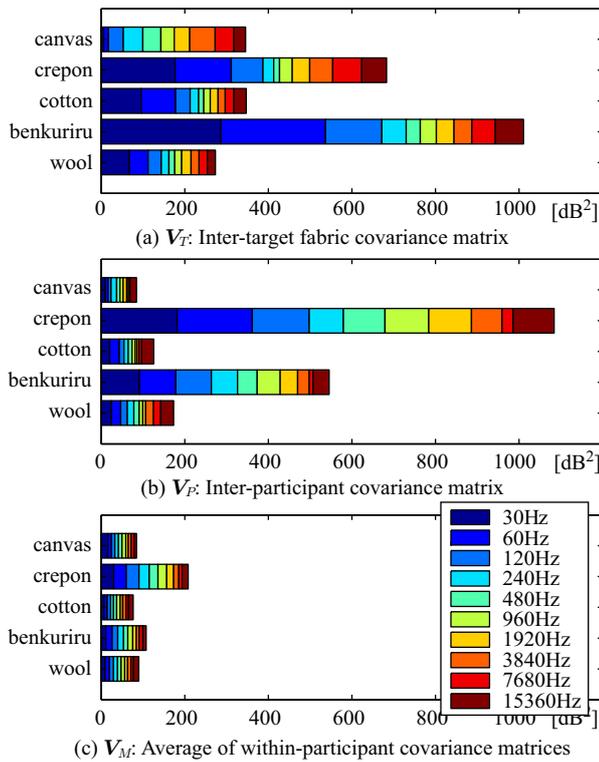


Fig. 4: Diagonal components of V_T , V_P , and V_M .

の行列は 50×50 行列であり、それぞれの対角成分はある装置布のある周波数成分に対応する分散の値である。 V_T 中の対応する成分が大きい装置布ほど、対象布についての情報量を効率よく取得できることになる。また、 V_P および V_M 中の対応する成分が大きい装置布ほど、対象布以外の要因（操作者の動作およびその他の誤差）の影響を受けやすいことになる。

Fig. 4(a) および Fig. 4(b) より、対象布の種類や操作者の動作の差異による影響の受けやすさは、装置布の種類によって大きく異なるということが分かる。たとえば、ベンクリルはクレポンよりも対象布の影響を受けやすく、クレポンはベンクリルよりも操作者のなぞり方の影響を受けやすいということがわかる。また、Fig. 4(b) と Fig. 4(c) の比較により、操作者間の変動の方が単一の操作者内の変動よりも大きいということが読み取れる。

3.3 測定間・操作者間変動を考慮した対象布間変動の主成分分析

実験では 50 次元空間内に分布する 45 個の超楕円体 $\mathcal{C}(T, \mathcal{P})$ が得られたことになるが、対象布間の差異はより少ない次元で表現できるようにすることが望ましい。このために、これらの超楕円体の分布をよく表現できる部分空間を探す。この部分空間は、対象布間の差異の変動をよく反映し、操作者間・測定間の差異をあまり反映しないことが望まれる。

いま、ある k 次元部分空間の基底を $\{\alpha_1, \dots, \alpha_k\}$ とする。これらは互いに直交する 50 次元の単位ベクトルである。この部分空間への V_T の射影が $V_P + V_M$ の射影に比べて十分に大きくなるように直交基底を選ぶ必要がある。この問題は下記の問題に帰着する。

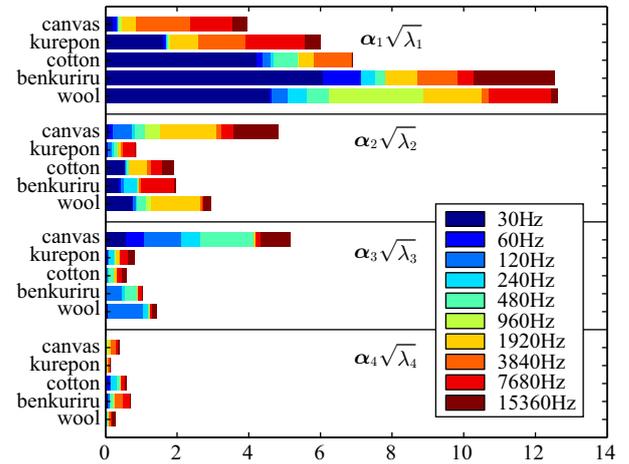


Fig. 5: Generalized eigenvectors of $\{V_T, V_P + V_M\}$ weighted by their correspondent eigenvalues.

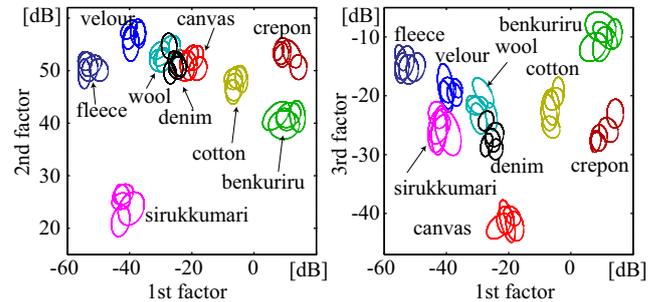


Fig. 6: Distribution of $\mathcal{C}(T, \mathcal{P})$ in the subspace $\text{span}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$.

問題 1. $N \times N$ 正定対称行列の対 $\{X, Y\}$ が与えられたとき、 N 以下のすべての自然数 k について

$$\prod_{i=1}^k \lambda_i = \max_{A \in \mathbb{R}^{N \times k}} \frac{\det(A^T X A)}{\det(A^T Y A)} = \frac{\det(A_k^T X A_k)}{\det(A_k^T Y A_k)} \quad (10)$$

$$A_k = [\alpha_1 \ \dots \ \alpha_k] \in \mathbb{R}^{N \times k} \quad (11)$$

$$\alpha_i^T \alpha_k = \begin{cases} 0 & \text{if } i < k \\ 1 & \text{if } i = k \end{cases} \quad (12)$$

を満たす正の実数の列 $\{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$ と N 次元ベクトルの列 $\{\alpha_1, \dots, \alpha_N\}$ を求めよ。

ここでは、 X および Y がそれぞれ V_T および $V_P + V_M$ に対応する。また、 λ_k および α_k を対 $\{X, Y\}$ の第 k (一般化) 固有値および第 k (一般化) 固有ベクトルと呼ぶことにする。これらは下記の手順で計算できる。

- (1) $Y^{-1/2} X Y^{-1/2}$ の固有値および固有ベクトルを求め、それぞれ λ_k および β_k ($k = 1, \dots, N$) とする。 λ_k はそのまま対 $\{X, Y\}$ の一般化固有値となる。
- (2) $\gamma_k \triangleq Y^{-1/2} \beta_k$ ($k = 1, \dots, N$) を計算する。
- (3) $\alpha_1 = \gamma_1 / \|\gamma_1\|$ とする。
- (4) $k = 2, \dots, N$ について、 $\alpha_k := (I_N - A_{k-1} A_{k-1}^T) \gamma_k$, $\alpha_k := \alpha_k / \|\alpha_k\|$ を計算する。

上記の手順により、対 $\{V_T, V_P + V_M\}$ の一般化固有値 $\lambda_k (\in \mathbb{R})$ と一般化固有ベクトル $\alpha_k (\in \mathbb{R}^{50}, k = 1, \dots, 50)$ を求めた。第4固有値・固有ベクトルまでの $\alpha_k \sqrt{\lambda_k}$ の各成分の2乗を Fig. 5 に示す。ベクトル α_k の各成分は、 α_k が張る部分空間における、ある装置布のある周波数成分の貢献の大きさを表している。第1固有ベクトルではベンクリルとウール織の貢献が大きいので、これらの布を装置布として用いたときに、対象布間の差異が最もよく反映されるということが読み取れる。また、5種の装置布のうち、ベンクリル・ウール織・帆布は対象布の情報を取得するために有効であることが読み取れる。

45個の超楕円体 $\mathcal{C}(\mathcal{T}, \mathcal{P})$ を部分空間 $\text{span}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ へ射影した図を Fig. 6 に示す。ここで、ベクトル $y (\in \mathbb{R}^{50})$ の第 k 主成分 (k th factor) とは、ベクトル y と第 k 固有ベクトル α_k との内積を意味する。Fig. 6 より、50次元空間内に分布する45個の超楕円体が、この3次元部分空間上で9個のクラスターに適切に分離されていることが読み取れる。少なくとも5種類の装置布と10点の周波数におけるデシベル値の情報によって、Fig. 3の9種の対象布を識別することができるということが分かる。

3.4 少ない装置布からの情報の主成分分析

装置の小型化・低コスト化のためには、装置布（およびマイクロホン）の数は少ないほうが望ましい。Fig. 5より、3次元空間で対象布をよく分離するためには、ベンクリルとウールのどちらか一方 (α_1) と帆布 (α_2) が対象物の情報をよく反映することが見出せる。そこで、これらの装置布からのデータのみを用いて、上記と同様の演算を行った。その結果を Fig. 7 に示す。

Fig. 7(a) は (b) および (c) に比べて、対象布の分離があまりである。これより、対象布の情報をより詳細に捉えるためには、複数の種類の装置布を用いることが有効であるということが分かる。また、Fig. 7(b) および Fig. 7(c) の比較からは、対象布を精度よく分離するためには装置布の組の選び方にも注意する必要があるということがわかる。ベンクリルとウールはともに柔らかい布地であるが、帆布は表面に凹凸がある比較的硬い布地である。対象布の情報を取得するためには、対象的な性状の2種類以上の装置布を用いることが効果的であるということが読み取れる。

4. 結論

本稿では布地の触感を定量化するハンドヘルド型の測定装置の開発を目的として、布地同士の擦過音をマイクロホンにより測定することで布地の特性を測定する手法を考察した。本稿で得られた知見は以下のとおりである。

- 複数の対照的な性状の布地を装置布として用いることによって、対象布の情報を効果的に取り出すことができる。
- 5種の装置布と10点の周波数におけるデシベル値から定義される3つの主成分によって、10種の対象布を識別することがほぼ可能である。

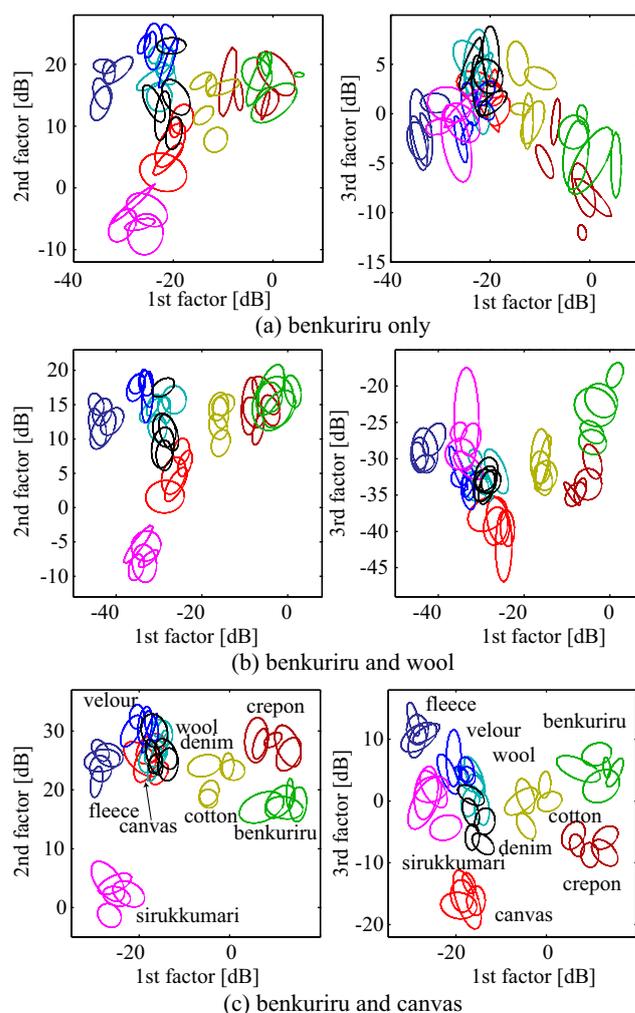


Fig. 7: Distribution of $\mathcal{C}(\mathcal{T}, \mathcal{P})$ in the subspace $\text{span}(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ from only a few of device fabrics.

- 操作者間の動作の差異の影響を大きく受ける装置布とそうでない装置布がある。

本手法によって10種の対象布は Fig. 6 に示すように3次元の空間ではほぼ明確に分離することができた。しかし、その空間内での位置関係が、対象布の物理的な性状や主観的な印象とどのように対応しているかは未だ不明であり、それを明らかにすることは今後の課題である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金（課題番号 18760187）の助成を受けて行われました。

文献

- (1) S. Kawabata. *The Standardization and Analysis of Hand Evaluation*. The Textile Machinery Society of Japan, 2 edition, 1980.
- (2) 田淵, 菊植, 山本. 布地の擦り合わせによる振動を用いた布地間の差異の定量化. 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2007) 論文集, 2A3-4, 2007.