

部分的な織り方の違いを利用した加圧位置検出織物の設計

寺田 貴雅^{1,a)} 豊浦 正広¹ 佐藤 隆英¹ 茅 暁陽¹

概要：導電性織物を使用した圧力センサは、電子デバイスと布製品が一体化した e-テキスタイルの一種であり、生体信号の測定や電子デバイスへの入力インターフェースとして応用されている。導電性織物の場合、絶縁体によって被膜された垂直方向及び水平方向の導電性糸の間の静電容量の変化を検出することで圧力の大きさや位置を検出するが、検出位置が増えるごとに検出回路の入出力チャンネルの数も増加する問題がある。本研究では、織り方が異なる 3 枚の織物を組み合わせた加圧位置検出織物を提案し、実際に作製した織物から入出力 3 チャンネルで位置と外力の大きさが検出可能かを検証する。

1. はじめに

コンピュータの小型化・省力化や IoT を含む情報通信網の発展、実世界ビッグデータ収集の需要増加に伴い、e-テキスタイルが注目を集めている。e-テキスタイルは、electronic Textiles の略称で、“電子デバイスがテキスタイルに装着され、テキスタイルと統合一体となって情報授受機能を持つシステムであり、通常のテキスタイルと同様な取り扱いが可能なもの”と定義されている [1]。通常のテキスタイルと同様に扱えることは折り曲げたり洗濯したりすることが可能であることを意味しており、衣類や布団などの身近なテキスタイルをセンサとして活用が試みられている。これらのセンサからは人の生体信号や人の挙動が検出可能であり、様々な分野での応用が期待されている。

導電性の素材を使用して作られた織物である導電性織物は e-テキスタイルの一種である。経糸 (たていと) と緯糸 (よこいと) に導電性の素材からできた糸を使用し、導電性糸の交点間の静電容量の変化を検出することで圧力センサとして機能する。このとき、圧力の検出は導電性織物に接続された外部の信号処理回路で行うため、センサと信号処理回路を繋ぐ信号の入出力チャンネルの数は交点を作る経糸と緯糸の数によって変化する。しかし、空間的な分解能を上げるために導電性糸の交点を増やすと、駆動信号を入力する入力チャンネルと静電容量を検出するための出力チャンネルも増加し、織物と外部の回路を接続するためのコストが増加する問題がある。そこで本研究では、導電性織物に、加圧位置を検出する構造と圧力を検出する構造を持たせることで、入出力チャンネル数を合計 3 つに絞

りつつ、圧力と位置を検出できるような織物の構造を提案する。そして、実際に提案した導電性織物を作製し、出力チャンネルから異なった静電容量が検出できることを実験的に示す。

2. 関連研究

人と電子デバイスの入力インターフェースとして作られた e-テキスタイルとして、Lee ら [2] はポリマーによるコーティングを行ったケブラー繊維を使用した圧力センサを提案した。この圧力センサはコーティングされた糸を交差させて服や手袋に縫い付けることによって、糸を複数チャンネルのスイッチとしており、圧力が加えられたときに変化する静電容量を使用することで六脚のロボットやドローンの操作を可能にしている。また、Wicaksono ら [3] は、ニットやメッシュなど複数の布地を組み合わせることで、触れたことや圧力がかかったこと、生地が伸張したことなどを検出する布製のキーボードを提案した。Poupyrev ら [4] は、導電性繊維を非導電性糸で被膜した導電性糸を経糸と緯糸に使用し、衣類に組み込むことで、スマートフォンのような電子機器が操作可能な衣類を提案した。提案されている織物の動作原理は投影型静電容量タッチパネルの原理と同様で、静電容量の変化を検出する IC に導電性の経糸と緯糸を接続することによって、人が織物に触れた位置を検出する。

人の生体信号を取得する e-テキスタイルとして、Liu ら [5] は、導電線が均等に配置された布を組み合わせることで、圧力分布を検出するベッドシーツを提案した。このベッドシーツは、水平方向に 128 本の導電線が配置された布と垂直方向に 64 本の導電線が配置された布を使用しており、外力が加えられたとき、直交した導電線間で変化する

¹ 山梨大学
4-4-37 Takeda, Kofu, Yamanashi, 400-8510 Japan
^{a)} g17tk016@yamanashi.ac.jp

る電気抵抗から圧力分布を検出する。導電線を交差させることで圧力分布を取得する研究は多く、Baldoli ら [6] による圧縮療法のための脚にかかる圧力の分布や Xu ら [7] によるマットに座った際にかかる圧力分布の取得に関する研究が行われている。一方で Enokibori ら [8] は、芯となる導電性糸を絶縁体で被膜したガバリング糸を経糸と緯糸に使用することで、人の寝姿を検出可能なベッドシートを提案した。ベッドシートには約 1cm 四方の圧力検出部が縦方向に 88、横方向に 45 配置されており、合計 3,960 箇所ですべて圧力検出する。圧力検出のためのセル 1 つは複数の経緯方向の導電性糸から構成されており、圧力が加えられたときに変化する導電性糸間の距離の変化によって変化する静電容量を検出する。

いずれの研究も、織物に触れたときや圧力が加えられたときに変化する静電容量の変化を検出するため、織物と検出のための装置に対して駆動信号を入力する入力チャンネルと、静電容量を検出するための出力チャンネルを必要とする。これらの入出力チャンネルは、静電容量の変化を検出するために使用した導電性糸と緯糸の数だけ必要となる。我々は、従来の導電性織物に使用されている織り方には経糸と緯糸が交互に交差する織り方(平織)が使用されており、どの交点においても導電性糸の距離が同じであることに着目した。つまり、導電性糸が形成するどの交点においてもキャパシタの静電容量が等しく、多数の出力チャンネルを用意して複数箇所の静電容量の変化を検出する必要があった。本研究では、圧力が加えられたとき、位置によって静電容量が変化する構造と圧力の大きさによって静電容量が変化する構造を組み合わせ、図 1 に示すような 2 チャンネルの出力で圧力の大きさと圧力が加えられた位置を検出可能である織物を設計する。

3. 加圧位置検出織物の設計

3.1 位置を検出する織物の構造

図 2 に示すように、織物は経糸と緯糸が交差することによって布を形成する。図 2 中の破線部分は経糸と緯糸の交点の 1 つを示しており、織物は交点が平面状に連続してい

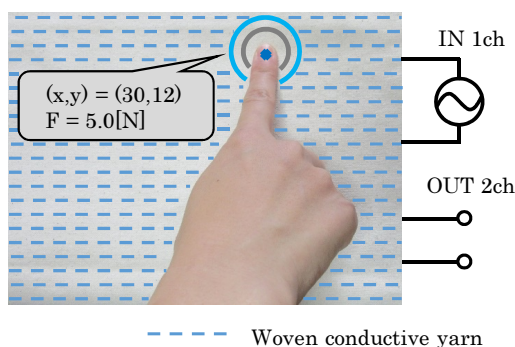


図 1 導電性織物の概要

Fig. 1 Concept of the proposed sensing fabric

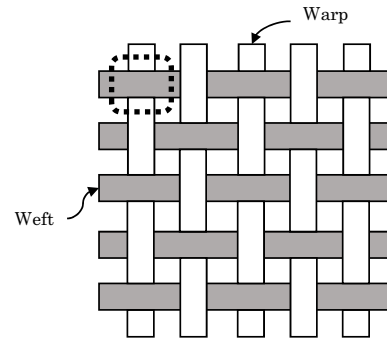


図 2 平織における経糸と緯糸の関係

Fig. 2 Relationship between warp and weft in plain pattern

る物体だと捉えることができる。そこで、この交点の構造を利用し、経糸もしくは緯糸のどちらかに導電性糸を使用した織物を重ねることで、織物同士の交点でキャパシタの静電容量を変えることが可能になることを示す。織り方が異なる織物を重ねたときの各交点の織り方に注目すると、交点における織り方は 4 種類に分類できる。このとき、使用する導電性糸は、導電性の繊維に非導電性素材の被膜がされていることを想定した場合、図 3 の交点における 4 種類の織り方の断面図では、黒の太線部分が導電性の繊維を、それ以外の部分が非導電性素材を示す。図 3(a) は導電性糸同士の距離が最も小さくなる織り方であるのに対し、図 3(b) では下側となる層、図 3(c) では上側となる層の導電性糸が交点とは逆向きに現れる織り方のため、図 3(a) よりも導電性糸同士の距離が大きくなる。また、図 3(d) は上下どちらの層でも導電性糸が交点とは逆向きに現れる織り方のため、導電性糸同士の距離が最も遠くなる。これらの織り方をキャパシタとして示したものが図 4 であり、白色で示した部分は導電性繊維の被膜、灰色で示した部分は非導電性糸によるキャパシタであることを示す。最も距離が近い図 3(a) は、図 4(a) のように導電性糸に使用された導

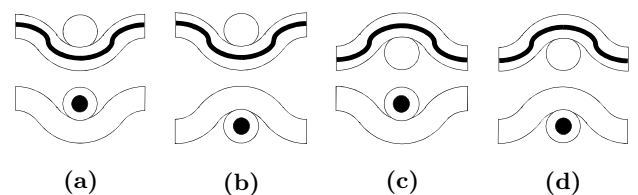


図 3 織物を重ねたときの交点の断面図

Fig. 3 Cross-sectional view at grid points when fabrics are overlapped

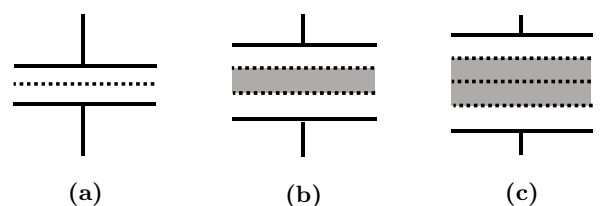


図 4 図 3 に対応するキャパシタの構造

Fig. 4 The structure of the capacitor corresponding to Fig. 3

電性繊維の被膜のみによってキャパシタが形成されるのに対し、最も距離が遠い図 3(d) は、図 4(c) のように導電性繊維の被膜と非導電性系 2 本分の距離によってキャパシタが形成される。なお図 3(b), 図 3(c) は導電性系同士の距離が変わらないため、どちらも導電性繊維の被膜と非導電性系 1 本分の距離による図 4(b) のキャパシタが形成される。これらの 3 種類のキャパシタを組み合わせた織り方によって部分的に容量値が異なる織物とすることが可能になる。

3.2 圧力を検知する織物の構造

織物に圧力が加えられた際に変化する容量値は、重ねた織物間の容量値を測定することで検出可能である。そのため、あらかじめ容量値の変化を測定し記録しておけば、容量値から織物上のどこに圧力が加えられたか特定することができる。しかし、織物にかかる圧力は一定ではないため、我々は位置を検出する織物の構造に加え、図 3 の織り方の種類が 1 種類だけになるような織物、もしくは織り方の種類の分布が均等になっている織物を圧力検出用の織物として使用する。

3.3 位置および圧力を検出する織物の構造

提案する織物の構造を図 5 に示す。図 5 における各平面は 1 枚の織物を表し、平面内の実線は導電性糸が表に出現することを、破線は非導電性糸が裏に出現することを示す。以降、図 5 の上側の織物から順番に第 1 層、第 2 層、第 3 層と呼ぶ。図 5 に示した織物は、使用された複数の導電性糸の端が短絡されている。また、図 5 内の導電性糸は導電性繊維の周りに非導電性素材による被膜がされていることを想定し、層が異なる導電性系同士が短絡することはない。第 2 層の導電性糸は他の層の導電性糸と垂直に交わっていることから、第 1 層と第 2 層及び、第 2 層と第 3 層の間には導電性糸の交点数の面積を持ったキャパシタを形成しているとみなせる。第 1 層と第 3 層は第 2 層とは異なる方向に導電性糸を使用しており、第 1 層の織り方は、図 5 の右側に近づくほど導電性糸の表に出現する頻度が減る。つ

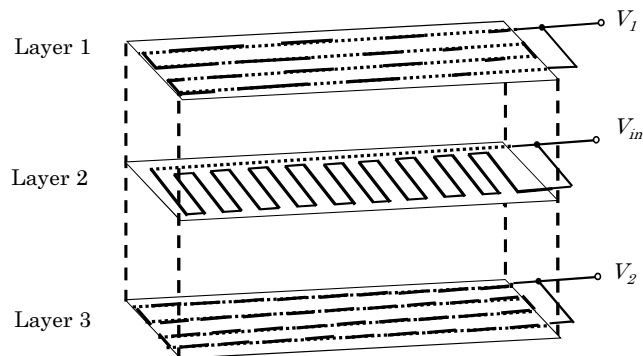


図 5 提案する織物の構造

Fig. 5 Structure of the proposed fabric

まり、左側に近づくほど図 4(c) のキャパシタの数が増加する織り方で、右側に近づくほど図 4(a) のキャパシタの数が増加する構造であり、圧力が加えられた位置によって容量値が変化する。一方で、第 3 層の織り方はどの位置においても織り方が変化しないため、圧力が加えられた位置に関わらず圧力の大きさだけで静電容量が変化する。位置と圧力の検出には、加えられた位置と、圧力の大きさによって異なる静電容量の組み合わせが得られる必要がある。次章では実際に図 5 の構造を持つ織物を作製し、押した位置と圧力の違いによって異なる静電容量の変化が得られるか検証を行う。

4. 加圧位置検出織物の機能検証

4.1 織物の作製

機能検証に使用した導電性織物は図 6 に示す卓上手織機によって作製した。導電性糸は銀メッキ導電性繊維にポリエステル被膜による絶縁処理が行われている AGposs T1 を使用した。この糸に施された絶縁処理によって、導電性繊維を重ねても導電性繊維同士が導通せず、糸の交点でキャパシタを形成することが可能となる。実際に卓上手織機で作成した織物を図 7 に示す。図 7 は表側となる面を撮影したものであり、図 7(a), 図 7(b), 図 7(c) はそれぞれ第 1 層から第 3 層に対応している。第 2 層と第 3 層である図 7(b) と図 7(c) はどの位置においても導電性糸が表に出現する頻度は変化しないが、第 1 層である図 7(a) は導



図 6 使用した卓上手織機

Fig. 6 Desktop weaving machine

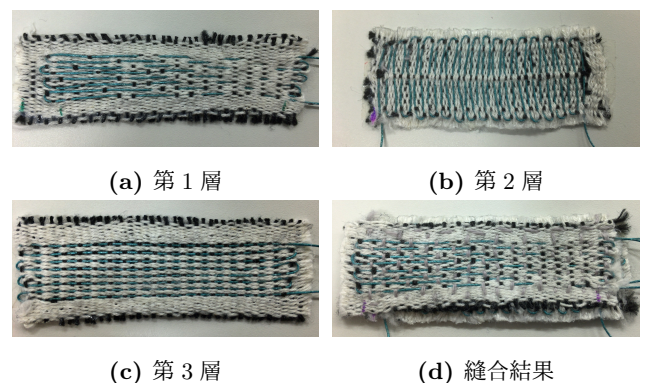


図 7 作製した織物

Fig. 7 Produced fabric

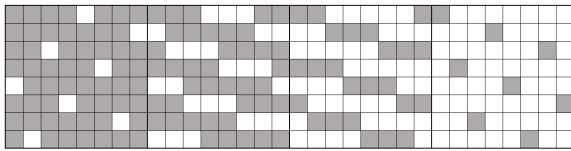
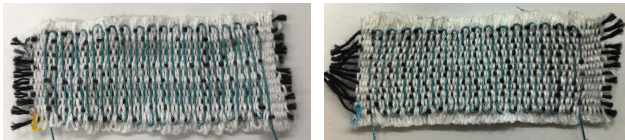


図 8 導電性糸 (灰色) と非導電性糸 (白) の関係

Fig. 8 Relationship between conductive yarn(gray) and non-conductive yarn(white)



(a) (b)

図 9 織り方が異なる第 2 層の織物

Fig. 9 2nd layer fabrics with different weave

電性糸が表に出現する頻度が変化している。この頻度は、図 8 に示すようなパターンに基づき、 8×8 マスの領域内で経糸と緯糸が必ず一度交差し、織物としての形を保つ構造となっている。実際に作製した織物は、導電性糸同士の間非導電性糸を含み、非導電性糸 3 本毎に導電性糸が出現する。そのため、図 7(a) や図 7(c) の織物は図 8 に示した 8×8 マスの領域内で、導電性糸 8 本、非導電性糸 21 本、計 29 本の糸が緯糸として使用されている。これらの織物は、上から図 7(a)、図 7(b)、図 7(c) と重ね、図 7(d) に示すように非導電性糸の部分を縫合することで、一つの織物とした。

また本検証では、静電容量が交点の数によって変化することを確認するために、図 7(b) とは織り方が異なる第 2 層の織物を用意し、計 3 枚の織物に対して検証を行った。織り方が異なる 2 枚は図 9(a) と図 9(b) に示す通りであり、図 9(a) は導電性糸の交点が中央からずれた織物、図 9(b) は導電性糸が裏側にも表れるようにした織物である。なお図 9(a) と図 9(b) に対する第 1 層、第 3 層の織物は図 7(a)、図 7(c) と同様の織物を作製し縫合した。以降、第 2 層が図 7(b)、図 9(a)、図 9(b) の織物を順に織物 1、織物 2、織物 3 と呼ぶ。

4.2 測定環境及び測定条件

静電容量の測定は図 10 に示すように、デジタルフォースゲージ RZ-10 を使用して織物に外力を加え、LCR メータ ZM2371 を使用して静電容量の測定を行う。静電容量の測定は、第 1 層と第 2 層の間、第 2 層と第 3 層の 2 つに分けて行い、測定を行わない第 1 層または第 3 層の出力チャンネルは GND に接続した。外力を加えた位置と圧力の大きさによって静電容量の変化量が変化するを確認するために、まずは織物に対して外力を加える領域を 4 つに分割した。4 つの領域は図 11 に示す領域であり、各領域は図 8 の 8×8 のマトリックスに対応する。各領域の高さと幅

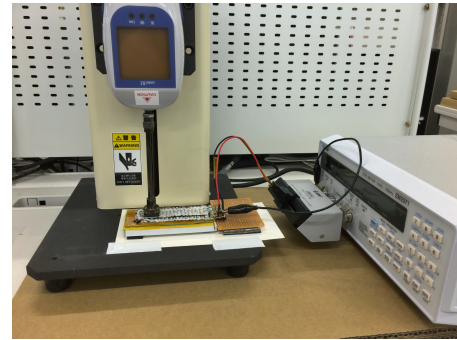


図 10 静電容量の測定環境

Fig. 10 The environment of capacitance measurement

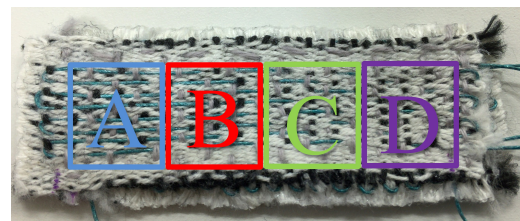


図 11 外力を与える領域

Fig. 11 Areas given external force

表 1 織物 1 と織物 2 の各領域における図 3 の交点の数

Table 1 The number of grid points of fabric 1 and 2 shown in Fig. 3

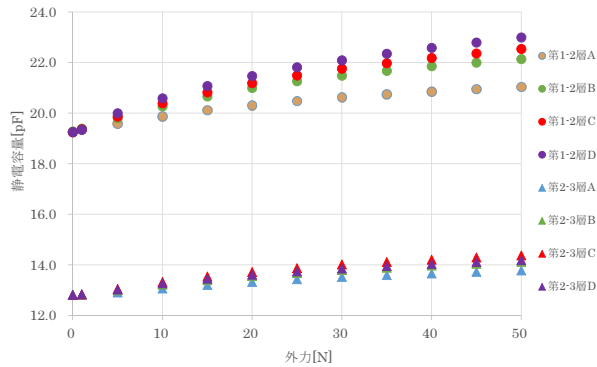
交点の種類	第 1-2 層				第 2-3 層			
	A	B	C	D	A	B	C	D
図 2(a)	8	24	40	56	0	0	0	0
図 2(b)	0	0	0	0	0	0	0	0
図 2(c)	56	40	24	8	32	32	32	32
図 2(d)	0	0	0	0	32	32	32	32

表 2 織物 3 の各領域における図 3 の交点の数

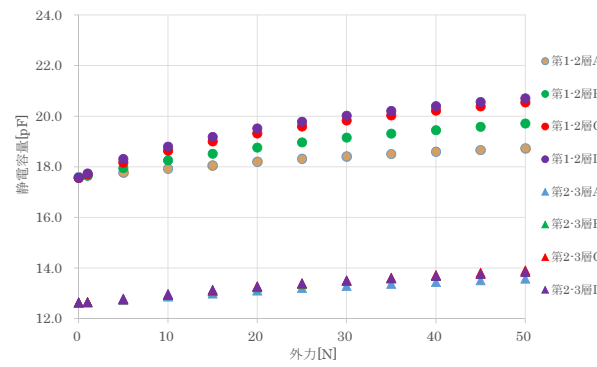
Table 2 The number of grid points of fabric 3 shown in Fig. 3

交点の種類	第 1-2 層				第 2-3 層			
	A	B	C	D	A	B	C	D
図 2(a)	4	12	20	28	24	24	24	24
図 2(b)	4	12	20	28	8	8	8	8
図 2(c)	28	20	12	4	8	8	8	8
図 2(d)	28	20	12	4	24	24	24	24

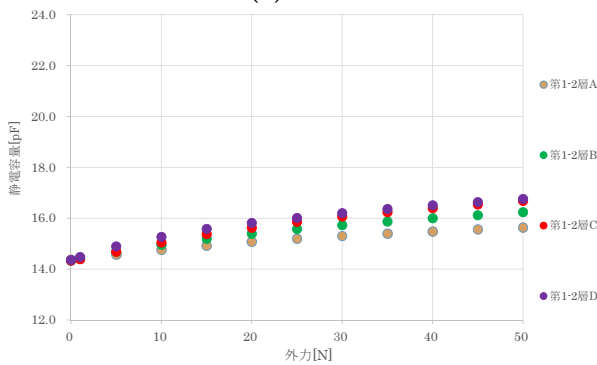
はそれぞれ 1.5cm であり、織物 1 から 3 の各領域に対する織り方の組み合わせは表 1 と表 2 に示す通りである。加えた外力は一つの領域に対して、1, 5, 10, 15, ..., 50N の大きさの外力を順番に与えており、1N の外力を加えた後はフォースゲージの位置を元に戻さず、フォースゲージの値が 5N になるまで外力を加えた。このとき、外力を加える前の静電容量を 0N として記録した。50N まで加えた後はフォースゲージ位置を測定前と同じ位置に戻し、LCR メータに表示される静電容量が外力を加える前と同じ値に戻ってから再度測定を行った。同じ位置に対して決められた外力を 5 回加え、平均の値を結果とする。その他の測定



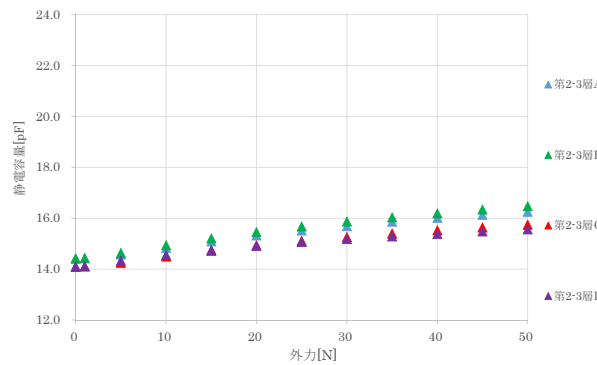
(a) 織物 1



(b) 織物 2



(c) 織物 3 (第 1-3 層)



(d) 織物 3 (第 2-3 層)

図 12 静電容量測定結果

Fig. 12 Measured capacitance of each fabrics

表 3 静電容量の測定条件
Table 3 Measurement condition of capacitance

外力 [N]	1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
領域面積 [cm^2]	1.5×1.5
入力信号電圧 [V]	1
入力信号周波数 [kHz]	100
LCR メータ接続方法	4 端子法

条件は表 3 に示す。

4.3 測定結果

静電容量測定結果を図 12 に示す。織物 1 の測定結果である図 12(a) からは、外力が大きくなるほど、第 1 層と第 2 層の静電容量の差が大きくなる結果が得られていることが分かる。一方で、外力が大きくなった場合でも第 2 層と第 3 層の間の静電容量の差は、第 1 層との静電容量に比べると小さいという結果が得られた。なお外力を加えていない時、織物 1 の静電容量は、第 1 層と第 2 層の間で約 19.2pF、第 2 層と第 3 層の間で約 12.8pF であった。外力を加えていない状態から与える外力を大きくしていくにつれてどの領域でも静電容量の値が増加し、第 1 層と第 2 層間の静電容量は、領域 D が最も大きく変化した。逆に静電容量の変化が最も小さかった領域は領域 A であり、50N の外力が与えられた時は静電容量の変化が位置 D よりも

約 2pF 低かった。静電容量の変化の関係は、表 1 に示した織り方の数と同じ傾向が得られており、導電性糸の距離が最も近くなる織り方の組み合わせが多いほど静電容量の変化が大きい結果が得られている。第 2 層と第 3 層の間の織り方は位置によって変化しないため、本来ならば同じ静電容量の値が得られるはずであるが、位置によって静電容量の変化に違いが見られ、織り方が同じであっても静電容量の値が変化する結果が得られた。また、第 2 層と第 3 層の間の静電容量は、全体的に第 1 層と第 2 層の間の静電容量よりも小さく、静電容量が小さくなる織り方を増やすことで全体の静電容量が小さくなる結果が得られた。

織物 2 の測定結果である図 12(b) においては、静電容量の変化が第 1-2 層では領域ごとに異なる変化が見られ、第 2-3 層では領域ごとに似たような静電容量の変化が見られる。外力を加えていないときの静電容量は 2pF 程度低いが、この測定結果は織り方の組み合わせが同じである織物 1 と同様の結果が得られているといえる。

織物 3 の第 1-2 層の測定結果である図 12(c) では、静電容量が小さくなる織り方が増えたことで織物 1 や織物 2 の結果よりも静電容量の値が小さく、領域 C と D の静電容量の差が小さくなっているが、静電容量の変化は領域ごとに異なる変化が得られた。また、図 12(d) の第 2-3 層では、領域 AB と CD の間に差が見られるが、静電容量の変化は第 1-2 層とは異なる傾向が得られた。また、織り方を変え

たことで織物 1 と織物 2 の結果よりも 2pF 程度大きい結果となった。

以上の結果から、織物の織り方を変えることで領域ごとの容量値を変えることができることを示すことができた。さらに、圧力を加えたとき各層から得られる異なる容量値の組み合わせによって、加圧位置と圧力の大きさを一意に特定できる可能性を示すことができた。

4.4 考察

静電容量の測定により、導電性糸の織り方を変えた織物を組み合わせることで、外力が加えられたときに異なる 2 つの容量値の変化が得られることが分かった。容量値の変化量は織り方の組み合わせによって変化するため、あらかじめ織り方と容量値の変化を記録しておくことで、位置と圧力の検出に利用可能であると考えられる。しかし、どの織物においても第 2 層と第 3 層では得られる容量値が常に一定ではなく、誤差が生じている。この誤差が生じた原因としては、織物を手作業で作製したことにより、図 3 で示されているような織り方にずれが生じている可能性が高い。そのため、より確実に導電性糸同士が交差するような織物の織り方や構造を検討する必要があると考えられる。

5. おわりに

本研究は、回路に接続する入出力チャンネルを削減するために、織り方が異なる織物を重ねた構造の織物を提案し、機能検証を行った。提案した織物からは外力を加えたときに出力チャンネルごとに違った静電容量の変化が得られ、静電容量の変化から加圧位置と圧力の大きさを特定できる可能性を示した。今後は入力インタフェースとしての応用を考慮し、加圧位置及び圧力の検出精度を向上させる織り方を検討する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP16H05867 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 松尾達樹：テクニカル・テキスタイルのフロンティアを求めて、p.113, 繊維社 (2014).
- [2] Lee, J., Kwon, H., Seo, J., Shin, S., Koo, J. H., Pang, C., Son, S., Kim, J. H., Jang, Y. H., Kim, D. E., and Lee, T.: Conductive Fiber - Based Ultrasensitive Textile Pressure Sensor for Wearable Electronics, *Advanced materials*, 27(15), pp. 2433-2439, 2015.
- [3] Wicaksono, I and Paradiso, J.A.: FabricKeyboard: Multimodal Textile Sensate Media as an Expressive and Deformable Musical Interface, *New Interfaces for Musical Expression (NIME)* May 15-19, 2017. Aalborg University Copenhagen, Denmark.
- [4] Poupyrev, I., Gong, N. W., Fukuhara, S., Karagozler, M. E., Schwesig, C., and Robinson, K. E.: Project Jacquard: interactive digital textiles at scale, In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4216-4227, ACM, 2016.

- [5] Liu, J. J., Xu, W., Huang, M. C., Alshurafa, N., Sarrafzadeh, M., Raut, N., and Yadegar, B.: A dense pressure sensitive bedsheet design for unobtrusive sleep posture monitoring, In *Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, 2013 IEEE International Conference on (pp. 207-215), IEEE, 2013.
- [6] Baldoli, I., Mazzocchi, T., Paoletti, C., Ricotti, L., Salvo, P., Dini, V., Laschi, C., Francesco, D. F., and Menciassi, A.: Pressure mapping with textile sensors for compression therapy monitoring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 230(8), pp. 795-808, 2016.
- [7] Xu, W., Huang, M. C., Amini, N., He, L., and Sarrafzadeh, M.: ecushion: A textile pressure sensor array design and calibration for sitting posture analysis. *IEEE Sensors Journal*, 13(10), pp. 3926-3934, 2013.
- [8] Enokibori, Y., Suzuki, A., Mizuno, H., Shimakami, Y., and Mase, K.: E-textile pressure sensor based on conductive fiber and its structure, In *Proceedings of the 2013 ACM conference on Pervasive and ubiquitous computing adjunct publication*, pp. 207-210, ACM, 2013.