

## Fiber-Based Sensors: Enabling Next-Generation Ubiquitous Textile Systems

### 8.1 Introduction

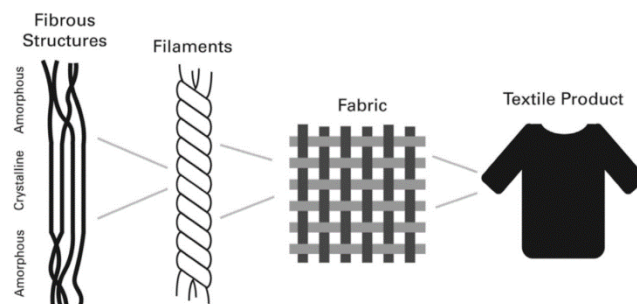
健康監視のためのウェアラブル電子システムは、一般的な市販の手首装着システムから、より高度なワイヤレス包帯、ソックス、フィットネスシャツに至るまで、さまざまな形態をとることができる。センサーとアクチュエーターを別個のウェアラブル・エンティティとしてではなく、身体に装着されたテキスタイルに直接統合することの主な利点としては、快適性の向上、およびより広いセンシング・エリアが挙げられる [1,2]。センシング機能を統合したテキスタイルは、遠隔地や過酷な場所でのヘルスケア・モニタリングを大幅に改善する可能性があり、身体全体の表面でセンシングされたデータは、問題を迅速に特定するのに役立つ可能性がある。このような埋め込み型ユビキタスセンサーは、テキスタイルから測定された健康管理パラメータと、身体に装着された追加の環境センサーや健康センサーとの間に新たな洞察と相関関係を提供する可能性がある。宇宙服、極寒の衣服 [3] や軍服 [4] に使用される繊維には、鈍器による衝撃、過度の出血、異常な心拍数などのイベントを同時に検出するためのセンシング・ファイバーを装備することができる。センシング・ファイバーのアレイによって提供される追加の空間情報は、そのようなイベントの発生だけでなく、それが身体のどこでどの程度発生しているかを示すことも可能である。

本章では、センサーの繊維統合への課題、統合センサーの要件、および潜在的な繊維ベースのセンシング・モダリティを検討する。この論文の動機として健康への応用を強調しているが、我々の議論は環境モニタリングやエネルギーハーベスティングなどの他の応用にも拡張可能である。また、ベンチトッププロトタイピングから大規模生産までの繊維のセンシング生産の方法のいくつかを簡単に議論し、繊維ベースのセンサーがどのように対応するセンシング回路を持つテキスタイルに統合できるかを検討する。

### 8.2 Conventional Textile Wearable Integration Techniques

繊維は階層構造で構成されており、多くの加工工程を組み合わせることで、異なるサイズとスケールのビルディングブロック（最も一般的には繊維／糸）が組み合わされ、その結果、ユニークな物理的・機械的特性を示すことができる構造になっている。図 8.1 は、センシングを可能にするために設計された可能性のあるテキスタイル内の異なる階層構造を示しています。繊維はポリマーまたは高分子でできている。繊維製造の過程で、これらの高分子は結晶相と非結晶相からなるフィブリル構造に配置され、高いアスペクト比を持ち、ナノメートルからミクロンの範囲の直径（または同等の寸法）を持つ構造を作り出す [5]。これらの繊維の連続した長さと離散した長さは、その後、数百ミクロンの範囲の寸法を持つ糸に組み立てられます。その後、これらの糸を織物構造（織布、編物など）に組み合わせて、織物を製造する。言うまでもなく、織物は、不織布プロセスを介して繊維から直接製造することもできる。所与の用途のための望ましい特性は、階層的なレベル（分子、繊維、糸など）のいずれかにおいて、織物において強化されるか、または生じさせることができる。電子テキスタイル(e-テキスタイル)を製造するために行われた作業のほとんどは、センシングおよび信号伝送が可能なテキスタイルを作成するために、

バルクのテキスタイル生地またはヤーンの電気的特性を変更することに焦点を当ててきた[2,6]。これらの方法の中には有利なものもあるが、主に複数の追加処理工程を必要とするため、商業アプリケーションへの移行には至っていない[7]。おそらく、次世代の e-textile はセンシングおよび作動機能を実行するように設計された繊維で構成され、標準的な繊維製造技術を用いて製造することができるだろう[8]。ここで説明する方法は、e-テキスタイル統合のより従来の方法を説明するものである。



**Figure 8.1**

“Textile structures are enabled by hierarchical integration of components ranging in size from nanometer scale fiber structures, to macroscale textile products.”

### 8.2.1 Rigid Component Integration

初期のセンシング・テキスタイル・システムは、テキスタイル内にセンサーおよび対応する電子機器を固定するための縫製などの方法を使用して、テキスタイルに統合された剛体の市販の (COTS) コンポーネントで構成されていた[6]。硬質コンポーネントを統合する多くの例では、導電性繊維／ヤーンが、コンポーネントを所定の位置に縫い付け、他の硬質コンポーネントへの電気的接続を提供するための相互接続体として使用されている。同様の縫製技術は、柔軟なポリマー基材上に作製されたセンサーを織物に組み込むために使用されてきた[9,10]。例えば、ポリイミド上で開発された温湿度センサーは織物に縫製され、安定した応答を持つことが示されている[11]。このような統合形態はプロトタイピングやデモンストレーションには有効であるが、加工性や快適性などの問題には対応できないため、商用アプリケーションへの応用には向かない。

### 8.2.2 Printing

スクリーン印刷やインクジェット印刷などの印刷方法は、必要な導電性材料を繊維表面に直接印刷するために使用されてきた[12,13]。スクリーン印刷はすでに繊維生産に頻繁に使用されているため、商業的なエテキスタイル生産のための潜在的な手段を提供している。印刷導体は、柔軟でコンフォーマルなセンサーおよび相互接続を可能にすることができるが、より小さい印刷導体がより高い電気抵抗を生成するため、これらのシステムはサイズの制限に悩まされる。これは、一部では、これらの材料が一般的に印刷されている布地の気孔率に起因している。これらの印刷された導電線の安定性もまた、基材生地の繰り返しの曲げ／伸縮の影響を受けやすく、長期的な使用は制限される可能性があります[14]。銀／塩化銀に基づくスクリーン印刷された導電性ペーストが最も一般的に使用される。これらの材料は、電極と配線の両方として印刷することができ、それらが印刷される織物基材と一緒に十分に曲げ伸ばしすることができます。炭素質および銀ナノ材料からなる新規な印刷可能なインクは、印刷

された導体／センサーの品質の改善を可能にする可能性がある。印刷された電子テキスタイルを製造する利点は、センサーのサイズおよび形状が異なる用途に合わせて調整できることである。例えば、電位測定イオンセンシング[15,16]を可能にするために、または生体電位センシングのために電極表面を機能化するために、Ag/AgCl インク上に後続の層を印刷することができる。

### 8.2.3 Conductive Yarns/Fibers

高導電性糸もまた、特に織物を組み込んだインターコネクトとして、e-テキスタイルの実現に有望である。導電性ヤーンは、5  $\Omega/\text{m}$  から数  $\text{k}\Omega/\text{m}$  の範囲の導電性を持つものが開発されている[1]。最も優れた電気特性を持つ導電性フィラメント／ヤーンは、金属繊維の全体または一部で構成されており、ステンレス鋼が最も一般的に使用されている材料である。これらの導電性ヤーンは一般的に絶縁されておらず、その代わりに、所望の領域のみが露出するようにテキスタイルに包装する必要があります。これらの糸は、生体電位を測定したり [17]、ひずみを感じたり [18]、タッチイベントを検出したり [19] できる大きな電極を形成するために織られてきました。Google の Jacquard は、外部デバイスを制御するための織物内蔵タッチインターフェースで使用するために、このような糸を製造することを目的とした商業的な取り組みの一例です。

### 8.3 Textile Requirements for Integrated Sensors

多くの柔軟性のあるコンフォーマルなセンサーが繊維インテグレーション用に開発されてきましたが、これらのセンサーの平面形状は、しばしば大きな活性表面積を必要とします。これらのセンサーはしばしばアスペクト比が低く(長さが幅にほぼ等しい)、繊維ベースの統合にはあまり適していません。従来の織物システムを模倣した形状のセンサーの初期設計では、有望な結果が得られており、複数のタイプのセンサーを高いアスペクト比(長さが幅よりもはるかに大きい)にスケーリングして、ファイバーベースのセンシングに適した候補となることが示されています。繊維に埋め込むように設計された繊維ベースのセンサーは、一般的に、従来の繊維と組み合わせて組み込まれる。従来の織物繊維は、綿やウールなどの天然繊維、またはポリエステルやナイロンなどの合成繊維を含むことができる。これらの繊維の機械的特性は大きく異なることがあり、理想的な繊維ベースのセンサーは、繊維の機械的および物理的特性と密接に一致していることが望ましい。さらに、伸縮および屈曲は、センサー出力に変化を生じさせないようにすべきである(歪みセンサーのように所望されない限り)。

### 8.4 Spatial Sensing using Fiber-Based Sensors

繊維ベースのセンサーをウェアラブルシステムに組み込む利点は、これらのセンサーを繊維内のさまざまな場所に簡単に配線したり、統合したりできることである。ファイバーベースのセンサーは、単一のファイバーが何らかのセンシング能力を実行できることを意味する独立したセンサーであってもよいし、あるいは、ファイバーが別のファイバーまたはシステムと連携して動作してセンシングを可能にすることを意味する従属的なセンサーであってもよい。記載されている感知モードのうち、ひずみ、生体電位、および温度感知は、一般に、独立した繊維ベースの感知モードを表し、一方、圧力および湿り気は、

依存した感知モードを表します。独立した感知モードは、通常、ひずみ感知モードのように、繊維の全長にわたって感知し、繊維の全長の抵抗応答がひずみレベルを決定するために使用される。このような独立した感知ファイバーは、必要とする信号伝送チャネルが少なく、したがって相互接続が少ないので有利であるが、その空間感知能力には限界がある。例えば、ファイバーは、ファイバー長全体のごく一部に沿ってしか歪んでいないかもしれませんが、抵抗センシングは、歪の位置、またはファイバー長全体の何パーセントが歪んでいるかについての情報を提供してくれません。この制限は、繊維をセンシングファブリックに組み込む方法を決定する際に説明されるべきである。図 8.2 に示すように、繊維の編み方や織り方は、より大きなセンシングファブリックの特定の部分での繊維のひずみを可能にしたり、制限したりするために使用することができる。センシング繊維のほとんどのウェアラブルな用途では、センシング繊維の密度が極端に高くなくてもよいことに留意することが重要である。

さらに、アレイベースのセンサーは、複数のセンシングポイントから来る情報が平均化されている場合に、センシングされた情報の精度と冗長性を高めるのに役立つために好ましい。このようなセンサー構成からのデータを解決するために、多重化回路が最も一般的に使用される。この回路は、アレイから一度に1つのセンサーからデータを取り出すために、回路が各センサーを個別に選択することを可能にする。テキスタイル内のすべてのセンシングポイントのアレイを高速で掃引することにより、完全なアレイの必要なサンプリングレートに到達することができます。

### 8.5 Fiber-Based Sensing Modalities

繊維ベースのセンサーを使用した繊維アプリケーションにおいて、複数のセンシング・モダリティが可能になる可能性がある。ここに記載されているセンシング機構は、従来の織物製造方法を調整することによって可能になり得る方法を示す。ここに記載されている繊維センサーのほとんどはまた、繊維断面設計に限られた数の異なる材料を組み込んでいる。他のより複雑な繊維ベースのセンシング構造は、生化学的センシングやガスセンシングのために探究される可能性がある。また、ここでは繊維ベースのセンサーが議論されているが、ウェアラブル繊維システムにおいて有用であり得る他の構成要素もまた、繊維構造体に直接組み込まれ得る。これらには、繊維ベースのエネルギー・ハーベスタ、スーパー・キャパシタ、アンテナ、および電池が含まれる [8,20]。

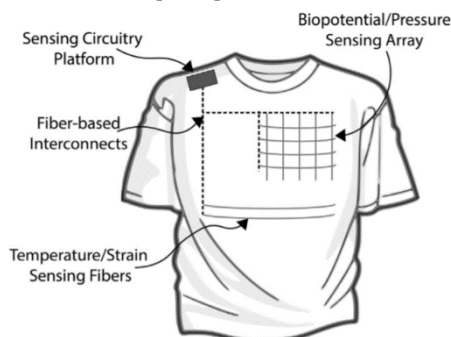


Figure 8.2

“Sensing textiles may include different component sensing fibers at different locations for highly customized healthcare sensing applications.”

### 8.5.1 Pressure Sensing

ファイバーを用いた圧力センシングは、複数の構成で行うことができる。ファイバーからの容量性圧力センシングだけが望まれる場合は、図 8.3A のように、導線をファイバー自体の中に完全に封入することができます。この構成を使用すると、2 本のファイバーが互いに垂直に交差する点が、ファイバーを被覆するために使用される絶縁材料がコンデンサの誘電体媒体として機能し、感知位置として機能することになります。絶縁材料の材料特性、特にその弾性率は、圧力が印加されたときに繊維が受ける圧縮の量を決定します。圧縮が発生すると、交差する導体の近接性が増加し、結果としてキャパシタンスが増加します。このタイプのセンシング用のファイバーは、ファイバーの導電セグメントが露出しており、空気が誘電体として作用するように設計することもできます[21]。この構成が使用される場合、ファイバーは他のインピーダンスベースのセンシング・モダリティを同時に行うことができます。高感度ファイバーベースの静電容量式圧力センサーは、すでに繊維システム用に開発されている [22]。これらのシステムは、呼吸数のモニタリング、心電図測定、衝撃の検出、およびタッチベースの入力を使用するユーザー・インターフェースとして有望であることを示している。

### 8.5.2 Wetness Detection

繊維の導電性セグメントの一部を完全に露出させるか、多孔質の絶縁材料を使用することで、繊維内の特定の流体の存在をインピーダンス測定で検出することができる [23,24]。健康モニタリングに関心のある多くの生体流体には比較的高濃度のイオンが含まれているため、インピーダンスに基づいた方法を用いて流体を検出することができます。2 本の検出ファイバーが互いに交差する空間にイオン性の流体が存在する場合、流体が存在しない場合のインピーダンス(空気の高いインピーダンスのため)と比較して、電気インピーダンスは桁違いに低くなる。図 8.3B に示すような多成分繊維を用いた湿潤検出の一例である。

濡れを検出することが可能な繊維は、出血、発汗、排尿の位置および程度を検出するために使用することができる。繊維が、制御された量の流体が各検出交差点に入るように設計されていれば、センサーを透過している流体の塩分濃度に関するより具体的な情報が、潜在的に抽出される可能性がある。繊維材料および幾何学的設計の選択は、繊維交差点への流体の取り込みを助けるか、または抑制することができる。例えば、より親水性および／または濡れ性の高い繊維材料表面は、流体をより容易にクロスオーバー点に運び込む。繊維の高いアスペクト比は、毛細管作用を促進するように繊維を設計することを可能にし、これはまた、感知クロスオーバー点への流体の取り込みを増加させる。マルチモーダルセンシング用に設計されたファイバーは、流体が 2 つの導体間に存在する場合、容量性センシングモードを不正確なものにしてしまうため、容量性とインピーダンスベースのセンシング機能の両方を同時に実行することはできません。

### 8.5.3 Biopotential Monitoring

繊維電極を用いた生体電位記録は、研究開発の大きな焦点となっている。導電性糸を使用して心拍数をモニターし、心電図波形を生成することができるマクロ電極を製造することは、多くの研究者によっ

て報告されている。適切な生体電位信号を得るためには、スキン電極の親密な接触が必要である[25]。電極繊維を皮膚表面に近づけるのを助ける適切な織物統合技術は、繊維が乾いた電極として使用される場合、機能的なセンシングを確実にするのに役立つ。電極ゲルまたは保湿剤を繰り返し塗布することは、長期的かつ反復的な記録のためには実用的ではないので、乾燥電極は、織物センシングシステムに望まれている[26]。不適切な電極界面は、皮膚-電極界面での接触インピーダンスの増加をもたらし、不十分な信号記録につながる可能性があります。生体電位記録は、図 8.3C に示すような構成で、少なくとも 2 つの導電性繊維セグメントが皮膚と接触している必要があります。ファイバーベースのセンサーを使用して生体電位を記録する際の大きな課題は、細いファイバーの固有のインピーダンスである。一般的な織物繊維を模倣したセンサーを製造するために繊維サイズを小さくすると、導体断面積の減少は、導電性繊維の抵抗率の増加につながります。この課題は、柔軟性のある繊維のような特性を持つ導体が必要とされるため、さらに悪化します。導電性繊維セグメントを製造するためにポリマー材料と導電性材料を組み込むことにより、金属導体よりも本質的に抵抗率が高い繊維が得られる。抵抗率が増加した繊維は、特にミリボルトのオーダーの振幅を持つ生体電位信号を記録し、増幅しようとする場合に、電氣的ノイズの影響を受けやすくなります。

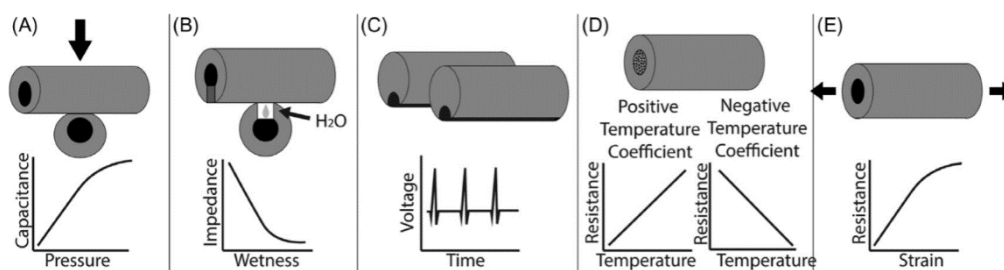
#### 8.5.4 Temperature Sensing

体温は、短期的な病気と慢性的な病気の両方の診断を助けるために頻繁に使用される臨床的に関連するヘルスケアパラメータです。炭素質ポリマー複合体は、熱伝導特性を有するように調整することができ、これにより、温度感知用途に使用することができます。熱伝導性ポリマーを用いた温度感知ファイバーは、図 8.3D に示すように、正の温度係数を持つ材料(温度上昇による抵抗値の上昇)と負の温度係数を持つ材料(温度上昇による抵抗値の低下)のいずれかで構成することができる[27]。温度感知ファイバーは、複数のファイバー間の相互作用を必要としないため、独立感知モードで機能する。繊維の長さ全体が発熱性材料で構成されている場合、繊維の長さは温度の変化を感知することになる。しかしながら、特定の場所での温度センシングが望まれる場合、繊維は、その場所でのみ熱伝導性材料で機能化され、他の非熱伝導性ポリマーがポリマーの長さ全体にわたって相互接続のために組み込まれた状態で、繊維を機能化することができる。温度感知ファイバーのファブリック集積化の課題は、独立したファイバーを用いたインピーダンスベースの感知では、ファイバーの両端で電氣的接続を必要とすることである。複数の繊維センシングタイプの繊維を織物生地に組み込む用途では、温度の変化に対する他のセンシング繊維の測定されたインピーダンスを補償するために、専用の温度センシング繊維を組み込むこともできる。

#### 8.5.5 Strain Sensing

ファイバーを使用して測定できるもう一つのパラメータは、ひずみです。ウェアラブルなひずみセンサーを使用して、呼吸や動きをモニターすることができます。導電性ポリマーは、導電体の長さに沿った面内ひずみによってインピーダンスが増加するように、圧電抵抗特性を示すように調整することができます。炭素質導体を組み込んだモノフィラメント繊維 [30] や一体型の糸 [28,29] が、織物の一体型

圧抵抗ひずみセンシング用に開発されてきた。エラストマー繊維を炭素でコーティングしたり、炭素と熱弾性ポリマーを組み合わせたりする方法が、糸や繊維の導電部を製造するために使用されています[31]。ウェアラブルアプリケーション用のひずみセンサーは、より低いひずみ領域で機能する必要がある、ウェアラブルアプリケーションでは、30%以上のひずみを受けることができる繊維を必要とするものはほとんどありません。カーボンベースの導電体は、カーบอนを添加すると機械的強度の低下を経験するため、より低いレベルのカーボンも一般的に好まれる[32]。カーボンブラックやカーボンナノチューブなどの炭素質材料の浸透ネットワークを含むポリマーベースの導電性複合材料は、ピエゾ抵抗性のひずみ感知繊維を作成するために使用されてきた。歪み検出用の繊維は、理想的には、歪みの増加に対して直線的な抵抗応答を示し、環境の温度および湿度の変化の影響を受けにくく、機械的なサイクリング後のヒステリシスをほとんど示さないことが望ましい[33]。このため、図 8.3E に示すように、センサーの安定性と機械的支持の両方のために、ファイバーの導電部を絶縁性ポリマーで封止するのが最善です。多くのひずみセンシング・ファイバーの研究では、センシングヤーンを発見しています。



**Figure 8.3**

Potential embodiments of fiber-based sensors/sensing modalities using multicomponent fibers. (A) Pressure sensing; (B) wetness detection; (C) biopotential recording; (D) temperature sensing; and (E) strain sensing.