

[研究助成 (A)]

柔軟触覚センサによって浮腫の状態を計測する ウェアラブルデバイスの開発

2241006



研究代表者
(助成金受領者)

神戸大学 大学院工学研究科

助教

大西 鮎美

共同研究者

神戸大学 大学院保健学研究科

教授

石井 豊恵

[研究の目的]

浮腫は、組織間隙に過剰な水分が貯留した状態であり、身体の「むくみ」として日常生活でもよく経験される症状である。とくに心不全、腎不全、リンパ浮腫など慢性疾患患者においては、急激な浮腫悪化が全身状態悪化の兆候となるため、日常的なモニタリングが重要である。

一方、従来の浮腫評価法は診断時に限られ、指で皮膚を押した際の戻り速度や圧痕、あるいは据え置き型機器による測定が主流であり、常時モニタリング可能なウェアラブル型デバイスは存在しない。

本研究では、柔軟触覚センサを用いて浮腫状態を推定するウェアラブルデバイスを開発し、日常生活でのモニタリングを実現することを目的とした。提案デバイスにより、たとえば「日常生活の中で着けていて、急激なむくみの悪化を検知した際に受診行動を促す」といった活用が期待される。

[研究の内容, 成果]

本研究では、皮膚を傷つけにくい柔軟な触覚センサを用いて脚部の周径変化を取得することで浮腫を計測するウェアラブルデバイスを設計、実装した。

1. 柔軟触覚センサを備えたリング型デバイスの開発

提案システムの要件としては、皮膚を傷つけないこと、脚などの身体の浮腫が出やすい部分の体積変化を取得できることが挙げられる。本研究では、これらの要件を満たすように、皮膚を傷つけにくい柔軟な触覚センサを用いて脚部の周径変化を取得することで浮腫を計測するウェアラブルデバイスを設計した。

提案デバイスを図1に示す。提案デバイスには、図2のような接触部の3次元変位を取得可能なスポンジ状の柔軟な触覚センサが8つ、直径約12cmのリング状に等間隔で配置されている。この柔軟な触覚センサは、スポンジ内部



図1 柔軟な触覚センサを備えたリング型デバイス

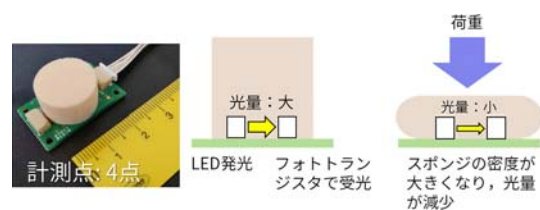


図2 柔軟な触覚センサと3次元変位の計測方法

にLEDとフォトトランジスタを備えており、図2に示す計測原理で、スポンジ部の密度変化による光量変化量から、スポンジの形状変化を計測できる。1つのセンサにつき4チャンネルの値が取得可能で、提案デバイスでは8つのセンサにより合計32個の値を取得できる。

リング状の外装は、ABS樹脂を3Dプリントしたもので、デバイス自体に伸縮性はない。提案デバイスで取得したセンサ値は、モバイル端末に送信され、端末では得られたセンサ値に基づき装着部の周径の状態を機械学習で推定する。

2. 計測方法の検討

本研究で対象とする身体がむくんだ状態の計測には、日常生活での常時モニタリングが必要である。図3に提案デバイスを脚に装着して、座位で静止、歩行、座位で静止という行動をそれぞれ10秒ずつ行った際の左脚の計測データを示す。この図の8つのセンサ値は、図3のセンサ配置での計測時に各センサの4チャンネル分のセンサ値を平均したものである。図3のような歩行時に加え、提案デバイスの装着時には、足首の角度を変えるとといった動作時にも脚の形状が変化するため、動いている状況を排除した着座・静止時のような、安静時の状態から状態を推定する必要がある。

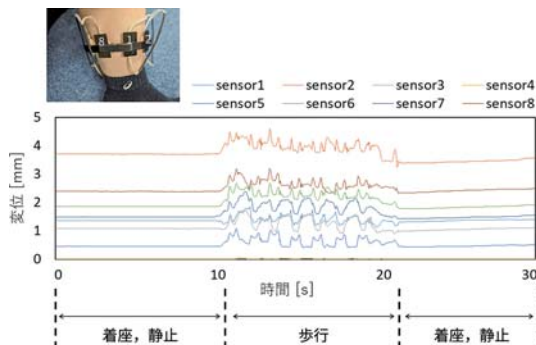


図3 装着した際のセンサデータ例

3. 浮腫の指標の検討

神戸大学大学院保健学研究科の専門家とともに、提案するウェアラブルデバイスにおいて推

定対象となる、浮腫の正解データとして使用可能な指標を検討した。

指標の候補として、真皮弾力計、筋硬度計、および柔らかさ計測用の押し込み試験機を用いて、軽度の浮腫傾向にある下肢と浮腫を認めない下肢、および浮腫モデルに対し、比較計測を行ったところ、浮腫モデルおよび下肢ごとに値が異なり、かつある程度専門家の診断とも一致したのは、柔らかさ計測用の押し込み試験機（テック技販製 YWS-50N）で測るヤング率であった。図4に、浮腫モデルに対して、押し込み試験機で計測したヤング率の値を示す。

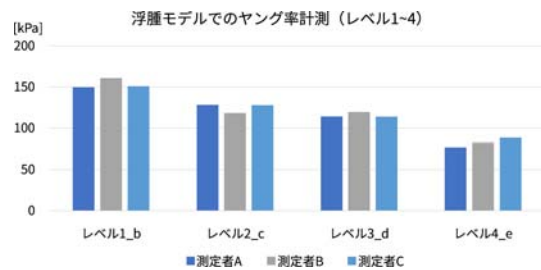


図4 浮腫モデルでのヤング率計測結果

浮腫は複合的な指標によって構成されると考えられ、このヤング率の値が浮腫と完全に対応しているわけではないが、図4の通り浮腫モデルの浮腫の度合いとの一定程度の対応及び計測者間の一貫性がみられたことから、本研究では、この下肢の柔らかさ・弾性が浮腫と関連すると仮定し、ヤング率を仮置きの正解データに決定した。また、この試験機ではヤング率と同時にヒステリシスも計測できるため、この値も同時に推定対象とした。

4. 浮腫状態推定アルゴリズム

浮腫の状態は通常「視診・触診」による定性的評価が一般的だが、本研究では下肢の柔らかさ・弾性が浮腫と関連すると仮定し、ヤング率およびヒステリシスを客観的指標として採用した。これは、むくみによる皮下組織の状態をある程度反映した数値と考えられる。図5に示す通り、この押し込み試験機の値と柔軟触覚センサの値を同時に計測して対応づけ、教師あり学



図5 柔らかさ計測機器と提案デバイスによる計測の様子

習を用いることで浮腫の状態を推定する。

提案システムの構成を図6に示す。提案システムでは、柔軟な触覚センサを取り付けたリング型デバイスで得られた値をモバイル端末に送信し、抽出した特徴量から装着位置のヤング率とヒステリシスを推定する。特徴量は、1つのスポンジ状センサの中の4チャンネルのセンサ値の瞬時値の平均値を合計8か所分（計8つ）である。推定アルゴリズムには、RandomForest回帰を用いた。

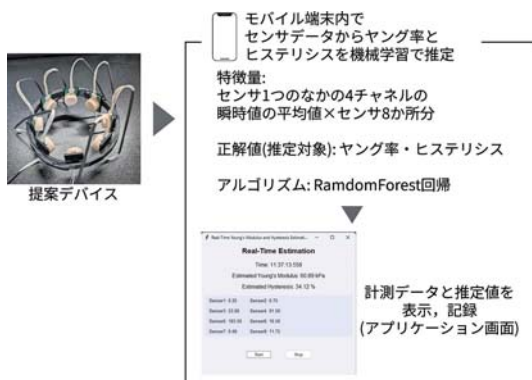


図6 システム構成

5. 長時間モニタリング実験

実験方法

実験では、健常被験者1名にデバイスを7時間連続装着し、約30分毎に押し込み試験機でヤング率・ヒステリシスを測定し、変化傾向を観察した。実験中、被験者はデスクワークを中心に通常の日常生活動作（座位作業・歩行・軽い外出）を行った。

なお、押し込み試験機での計測方法は、保健学研究科の専門家との予備検討実験により、測

定条件を統一するために、膝は伸ばし、足首関節は被験者にとって自然な角度に設定した。提案デバイスを装着した足とは逆の足の同じ高さの位置で、脛骨前面に押し込み試験機を押し当てた。

実験結果

実験で取得したデータを図7に、そのときのセンサ位置を図8に示す。時間経過にともない、被験者の自己申告でも「むくみ感」が出現していた。浮腫傾向の指標としたヤング率（図中の青線）、ヒステリシス（図中の黄線）は、やや不安定であったものの、ヒステリシスは時間経過とともに低下していることが観測された。一方、歩行や姿勢変化時には一時的なノイズが生じたため、静止時データ選別アルゴリズムを取り入れることが課題である。

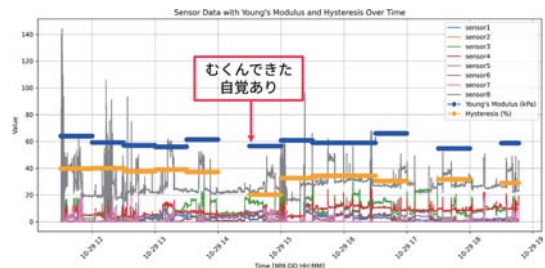


図7 取得した一日装着時のセンサデータとヤング率およびヒステリシス



図8 実験におけるセンサ位置

取得したデータを学習データ80%、テストデータ20%で分割してRandomForest回帰をかけ、ヤング率とヒステリシスを推定した結果を図9、10に示す。

図9、10の結果より、ある程度推定できる可能性が示唆されたものの、今後、同一被験者の別日のデータ、他の被験者データを集めて詳細

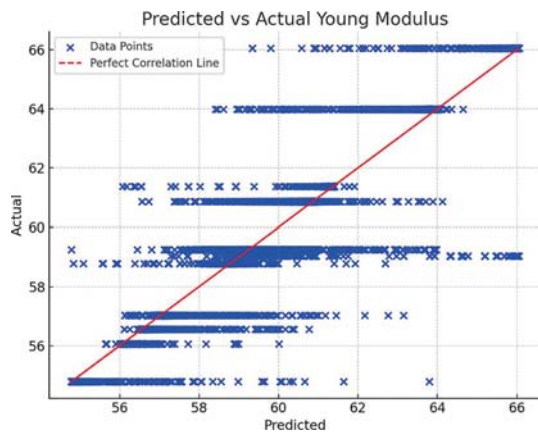


図9 ヤング率 (kPa) の推定結果

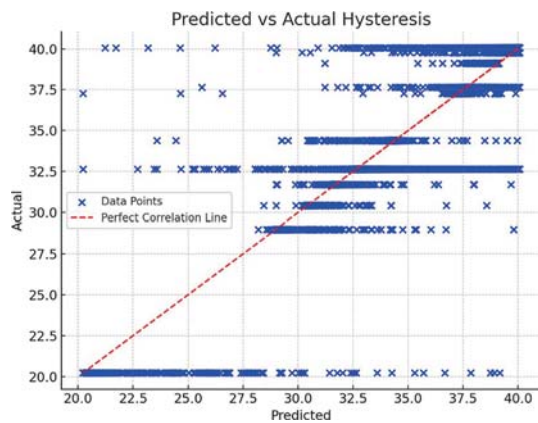


図10 ヒステリシス (%) の推定結果

に評価する必要がある。

5. まとめ

本研究では、皮膚を傷つけにくい柔軟な触覚センサをリング状に配置して脚部の周径変化を取得することで浮腫を推定するウェアラブルデバイスを設計、実装した。

浮腫の程度を定量的に計測する方法を検討したのち、機械学習を用いて浮腫の指標としたヤング率およびヒステリシスの推定アルゴリズムを実装し、日常生活での利用に向けた評価を行った。

今後は、推定精度を高めること、簡便な装着型デバイスへの発展（靴下型、衣服内蔵型）や、その他のセンサと組み合わせることの検討、および患者指導・在宅医療応用を目指す。

[成果の発表、論文など]

大西鮎美, 多鹿理絵, 石井豊恵, 寺田努: 柔軟な触覚センサによって浮腫の状態を計測するウェアラブルデバイスの設計と実装, 第35回看護理工学会年次大会 (2024年11月).