伸縮による抵抗変化を利用した組紐センサの基礎検討

並川 真也^{1,a)} 榎堀 優^{1,b)} 間瀬 健二^{1,c)}

概要:ウェアラブル生体情報計測で衣類へのセンサを組み込む場合において,布や糸そのものでセンサ機 能を実現する手法が衣類の特徴を損なうことなく,また,既存の製品作成手順から大きく乖離せずにセン サ機能を組み込めることから,発展が期待されている.本稿では,新たに開発した組紐をベースとした伸 縮センサの基礎検討結果について報告する.本センサは伸縮によって抵抗値が変化し,旧来の布をベース とした伸縮センサと異なり,細身であるために,計測部位に複数本を並行配置することも可能である.そ れらの計測結果を結合することで,衣類型センサの課題の一つである位置ずれ問題に対応できる可能性 がある.本基礎検討では,モーションキャプチャを正値として,組紐センサの出力値から伸縮量や関節角 度を推定し,性能を検討した.単純な伸縮については,最小二乗誤差 4.58 ± 0.37mm であり,変化量約 40mm に対して,11.25 ± 0.3%で推定できた.肘サポータと着圧型ウェアの肘部に組紐センサを取り付 け,肘関節角度を測定した結果では,肘サポータで最小二乗誤差 16.88 ± 2.74 度,着圧型ウェアで 37.88 ± 28.53 度で推定できた.また,複数本のセンサを併用することで,着圧型ウェアの精度を 37.88 ± 28.53 度の精度から 26.42 ± 4.88 度まで改善できた.

A Trial of Elastic-Braid-Based Stretch Sensor using Resistance Change

Shinya Namikawa^{1,a)} Yu Enokibori^{1,b)} Kenji Mase^{1,c)}

Abstract: The market of wearable sensing is glowing up and garment sensor interests many stake holders. Methods to implement garment sensor, e-textile and e-dried based approaches, are also attracting interests because this approach do not omit garment advantages and have good adaptability for common garment production process. In this paper, we introduced a new e-dried-based stretch sensor, and its basic performance. This new sensor is thinner than our e-textile-based stretch sensor has been reported. Therefore, several sensors can be installed into narrow parts; such installation can reduce errors depending on garment displacement. The e-dried-based sensor showed 4.58 ± 0.37 mm in rooted-mean-square error (RMSE) for sensor length changes measured by motion capture system. It is $11.25 \pm 0.3\%$ for 40 mm stretchable range. In elbow angle estimation, it showed 16.88 ± 2.74 degrees for an elbow supporter and 37.88 ± 28.53 degrees for a compression ware in RMSE. In addition, the RMSE for the compression ware able to be improved into 26.42 ± 4.88 degrees using multiple e-dried-based sensors which are installed into the almost same place.

1. はじめに

スポーツやものづくり技術,日常生活行動などをウェア ラブルセンサを用いて解析する研究が盛んである.また, ウェアラブルセンサで生体情報を取得する手法では,衣類 ヘセンサを組み込む試みも行われている.衣類へセンサを 組み込む場合,従来のマイクロセンサを衣類へ付加する方 法以外に,布や糸そのものでセンサ機能を実現する方法が あり,今までの衣類の特徴を損なわず,製品作成手順から 大きく乖離せずにセンサ機能を組み込めることから,その 発展が期待されている.また,スポーツや技能,日常行動 を計測する上でも,余分な違和感や負荷を増やすことなく, 自然なデータが計測できることも特徴の一つである.我々 のプロジェクトでも布をベースとした伸縮センサを開発し てきた[1]が,幅広であり設置箇所が限られるなどの問題 が発生していた.そこで,我々は,新たに組紐をベースと

¹ 名古屋大学大学院情報科学研究科

Nagoya University

a) namikawa@cmc.ss.is.nagoya-u.ac.jp

^{b)} enokibori@is.nagoya-u.ac.jp

 $^{^{\}rm c)} \quad {\rm mase@nagoya-u.jp}$

した伸縮センサを開発した.本稿では,その基礎検討結果 について報告する.組紐センサは,細身であるため,計測 部位に複数本を並行配置することも可能であり,それらの 計測結果を統合することで,衣類型センサの課題の一つで ある位置ずれ問題に対応できる可能性もある.同事項に対 する検討結果も合わせて報告する.

以下,本稿は第2章で関連研究を紹介し,第3章で伸縮 組紐センサのについて述べる.第4章で衣類に組み込んだ 組紐センサによる肘関節角度推定について述べ,第5章で まとめる.

2. 関連研究

伸縮によって人の動きを取得するセンサとして,カー ボンナノチュープを利用したものがある.hayamizuら[2] は,絆創膏型,タイツ型,手袋型のカーボンナノチューブ を利用したセンサを作成し,それぞれ呼吸や発声などの喉 の動き,膝の動き,各指の動きを測定している.Morteza ら[3]はよる指,手首,肘の動きとセンサを3本使うこと によって3方向の伸縮を測定している.Jungら[4]はシー ル型のセンサで喉の動き,肘サポータ型で肘の動き,手袋 型で指の動きをそれぞれ測定している.

上記のようにカーボンナノチューブを使用したセンサの 研究は数多くなされている.しかし,カーボンナノチュー ブは高性能な反面コストが高くなりがちである.また,旧 来から衣類へ使われていた素材では無いため,衣類への自 然な結合に手間がかかるという問題もある.

Guido ら [5] は, ISO 規格 4915 のステッチ形式に分類される 602 のステッチ方法を利用して膝部の曲げを検知する センサを開発した.このセンサは縫い目の底カバー糸を導 電性の糸に替え,屈曲による抵抗値の変化を測定している. 自動走行マネキンと人に対して実験を行った.その結果, 膝の屈曲との相関係数 0.88 と高い相関を示した.しかし, 示されているのはセンサ特徴と相関係数のみであり,角度 の推定は行われていない.後述するとおり,我々の組紐セ ンサでも肘の屈曲と相関係数 0.92 を確保しているが,角度 ベースの誤差に直すと 16.88 ± 2.74 度の誤差が出ている. 相関係数のみの議論は不十分である.

3. 伸縮組紐センサ

図1に今回新たに作成した伸縮組紐センサを示す.本セ ンサは導電性繊維とゴム繊維を用いて伸縮する組紐として 構築したものである.組紐全体に導電性がある.伸縮に伴 い,導電性繊維間に隙間が発生し,電気抵抗値が増加する. 従って,組紐の電気抵抗値を計測することによって,組紐 の伸縮量が推定可能である.

3.1 計測回路

作成した回路の外観を図2,図3,図4に示し,回路図を

161C58

2016/3/2



図 1 組紐センサ Fig. 1 Elastic-braid-based stretch sensor





図 2 正面からの外観 図 3 後ろからの外観 Fig. 2 appearance from front Fig. 3 appearance from back



図 4 横からの外観 Fig. 4 appearance from side



図 5 計測回路 Fig. 5 measurement circuit

5 に示す.本回路は Intel Edison をベースに構築した.図 5 に示す計測回路から電圧で計測結果を出力し, SparkFun 製の Intel Edison Blocks の ADC block で量子化する.定 電流回路は抵抗 RL(組紐センサ)に定電流 Vin/R1 が流れ る回路である.R0 には同じ抵抗を用いる.このままでは, 電圧が小さく抵抗の変化による電圧の変化量の計測が困難 なため計装アンプで電圧を増幅した.

3.2 組紐センサの基礎検証

モーションキャプチャを用いて組紐センサの長さを計測 し、センサ出力値と比較して、組紐センサの基礎性能を検 証した.図6に検証時の外観を示す.モーションキャプ チャのマーカーは組紐センサの両端に取り付けた.実験で は、90mmの組紐センサを使用した.モーションキャプ



図 6 組紐センサとマーカー Fig. 6 Elastic-braid-based stretch and marker



チャのサンプリングレートは 120Hz , 組紐センサのサンプ リングレートは 30Hz である .

実験は以下の手順で行った.

- (1)5秒に10mm ずつ伸ばす
- (2) 140mm まで伸ばしたら 5 秒に 10mm ずつ縮める
- (3) 90mm まで戻す
- (4)1~3を4回実地する

3.3 基礎検証結果

図7に計測例を示す.組紐センサの出力値は,5点メディ アンフィルタで平滑化している.

3.3.1 組紐センサの計測範囲

図7より組紐センサは、センサ長が約130mmになるまではセンサ出力値がセンサの長さに良く追随していることが分かる。一方で、130mm以上に伸ばした場合、出力値の変化が鈍くなり、センサ出力値は130mmの時と大きな差が無い。従って、測定可能伸縮量は約90mmのセンサの場合で約40mmであり、基礎センサ長に対して約44%であると考えられる。

3.3.2 組紐センサの基礎検討

3.3.1 節の結果から、本実験に用いた組紐センサの計測 限界長は約130mm だと考えられるため、計測データから 130mm 以下のデータを抽出して精度を検証した。図8に 抽出後の計測例を示す.

本検証では、基礎センサ長である 90mm から伸縮し、再 び 90mm に戻ってくるまでを 1 回として、図 8 に示すデー タを 4 分割して 4 試技として取り扱う。各試技に対して、



161C58 2016/3/2



(赤:線形回帰式による推定値,
 青:モーションキャプチャによる計測結果)
 図 10 線形回帰式による推定結果
 Fig. 10 estimating result by linear regression

センサ出力値とセンサ長のスピアマン相関係数を計算した ところ、最小で 0.94, 最大で 0.97 (全て p < 0.01) となり、 高い相関を示した。

また、線形回帰式を構築して、センサ出力値から組紐センサ長を推定した。用いた式は以下の通りである.

Y = aX + b, where X はセンサ出力 X は組紐センサ長(1)

線形回帰の学習結果と、線形回帰で求めたパラメータを 用いて長さを推定した結果を、それぞれ図 9 と図 10 に示 す。各試技で学習した時の精度は 4.50 ± 0.12 mm, 4 分割 交差検定を行った結果の精度は 4.58 ± 0.37 mm であり、 変化量約 40mm に対して, それぞれ 11.25 ± 0.3%, 11.45 ± 0.93%であった。

4. 衣類型センサ化と肘角度推定制度検証

本節では,組紐センサを縫いつけ衣類化した上で肘の角



図 11 肘サポータに縫い付けた組紐センサ Fig. 11 sensor sewed supporter



図 12 着圧ウェアに縫い付けた組紐センサ Fig. 12 sensor sewed wear

度推定を行った結果を示す.本実験では,肘サポータ及び 着圧ウェアを用いた.作成した2つの衣類型センサを図11 及び図12に示す.図11及び図12では,組紐センサ3本 縫い付けてある.これは,後述する位置ずれ対策のためで あり,本節の実験では,中央のセンサを用いた.また,3.2 節の実験と同様にモーションキャプチャによって取得した 肘関節角度を正値とした.

図 13 にモーションキャプチャマーカーの配置を示す. 被験者の肩,肘の内側,肘の外側,手首の内側,手首の外 側にモーションキャプチャのマーカーを装着した.内外の 肘のマーカーの中点から内外の手首のマーカーの中点まで を前腕ベクトル,内外の肘のマーカーの中点から肩のマー カーまでを上腕ベクトルとした.前腕ベクトルと上腕ベク トルから肘関節角度を求めた.

4.1 単純な曲げ動作における性能

4.1.1 実験方法

実験は以下の手順で行った.

- (1) 腕が伸びきった状態から 5 秒ずつ肘を 135 度,90 度, 曲がる限界の順で曲げる
- (2) 腕が曲がりきった状態から 5 秒ずつ肘を 90 度, 135度, 180 度の順で曲げる
- (3) 上記の動作を5回行う

上記を被験者2人に対して1セットとして着圧ウェアと 肘サポータの2種類の衣類型センサも組み合わせの組み合 わせのそれぞれに対して,3回ずつ計12回実施した.

4.1.2 実験結果

図 14 及び図 15 に計測例を示す. グラフの横軸は時間 (ms), 縦軸は左側が組紐センサの抵抗値(), 右側が肘関



図 13 モーションキャプチャのマーカー位置 Fig. 13 markers position of motion capture



Fig. 14 value of supporter type sensor and elbow joint angle



図 15 着圧ウェア型センサの出力値と肘関節角度のグラフ Fig. 15 value of wear type sensor and elbow joint angle

節角度(度)である.また,グラフの赤い線は組紐センサの 抵抗値,青い線は肘関節角度を示す.表1に各センサ出力 値と肘関節角度のスピアマンの相関係数を示す.

図 14 に示した肘サポータ型センサの結果では, ノイズ もほぼなく, 肘関節角度と出力値はほぼ同様に変化してい る.一方,図15 に示した着圧ウェア型センサの結果では, サポータ型センサと比較してノイズとずれが大きい.しか しながら, 肘関節角度に対して一定の相関を持ちつつ変化 をしている.また表1のとおり,サポータ型センサで最 小0.92,最大0.97,着圧ウェア型センサで最小0.86,最大 0.92 と高い相関を示した.

3.3.2 節と同様に式(1)の線形回帰式を用いて,センサの

表 1 組紐センサ出力値と肘関節角度の相関係数

 Table 1
 correlation of value of braid sensor and elbow joint angle

衣類型センサ	最小相関係数	最大相関係数
サポータ型	0.92	0.97
着圧ウェア型	0.86	0.92

表 2 線形回帰による標準誤差

 ${\bf Table \ 2} \quad {\rm standard \ error \ by \ linear \ regression}$

衣類型センサ	学習 (度)	テスト (度)
サポータ型	16.22 ± 2.85	16.81 ± 4.68
着圧ウェア型	21.64 ± 8.27	37.88 ± 28.53



(赤:線形回帰による推定値, 青:モーションキャプチャによる計測結果)

図 16 回帰式によるサポータ型センサの学習結果

Fig. 16 learning result of supporter type sensor by linear regression



(赤:線形回帰による推定値 , 青:モーションキャプチャによる計測結果)

図 17 線形回帰式による着圧ウェア型センサの学習結果

 ${\bf Fig. \ 17} \ \ {\rm learning\ result\ of\ wear\ type\ sensor\ by\ linear\ regression}$

出力値から肘関節角度を推定した(だたし,Yは肘関節角 度とする).計測データを前半と後半に分割し,前半で学 習,後半でテストを行った.サポータ型センサと着圧ウェ ア型センサの線形回帰による学習結果を図16及び図17に テスト結果を図18と図19に示す.それぞれの場合の標準 誤差を表2に示す.サポータ型センサの推定誤差は16.81 ±4.86度と着圧ウェア型センサと比べて小さい.また,学 習結果の誤差16.22 ± 2.85度と,テスト結果の誤差16.81 ±4.86度に大きな差が無いことがわかる.一方,着圧ウェ ア型センサの推定誤差は,37.88 ± 28.53とサポータ型セ ンサの誤差と比べて大きく,加えて,学習結果としての誤 差21.64 ± 8.27度と比べて,テスト結果の誤差37.88 ± 28.53度が大きくなっているのが分かる.これは,着圧ウェ ア型センサでは,着衣ずれによってセンサの位置がずれた









青:モーションキャプチャによる計測結果)



Fig. 19 test result of wear type sensor by linear regression

ためだと考えられる.

4.2 複数本配置による位置ずれ対策

組紐センサの幅が3mmと細いことを利用し,測定箇所 に複数本組紐センサを並べて同時に計測を行い,特定時区 間に対して最も変化量の大きいセンサのセンサ出力値を採 用することで位置ずれによる推定誤差の低減を試みた.セ ンサは最も変化量が大きい箇所に設置する事が多いため, 前述の手法により,位置ずれが発生しても複数本並べたセ ンサの内から,最も推奨測定位置に近いセンサを抽出する ことが可能となり,誤差を軽減できると考えられる.本実 験では,腕を伸ばしきった状態から腕を曲げきった状態及 び,腕を曲げきった状態から腕を伸ばしきった状態を一つ の時区間とし,その中で,最も変化量が大きいセンサの出 力値をその時区間の出力値とした.本稿では,3本の組紐 センサを着圧ウェア型センサに縫い付けたが,1本が動作 不良を起こしたため、2本のセンサの出力値を用いる.動 作不良を起こしたのは,図11における左のセンサと図12 における下のセンサである.

図 20 及び図 21 に 2 本のセンサを用いる前の線形回帰式 による学習結果とテスト結果を示す.図 22 及び図 23 に 2 本のセンサを用いることにより位置ずれ対策を行った場合 の線形回帰式による学習結果とテスト結果を示す.対策前 と対策後の標準誤差を表 3 に示す.図 20 より,学習結果 では極端な誤差は現れていない.しかし,図 21 では,途 中で値が大きくずれている.この時点で位置ずれが起きて いると思われる.図 22 には大きな変化は見られない.し



(赤:線形回帰による推定値 ,

青:モーションキャプチャによる計測結果)図 20 位置ずれ対策を用いる前の学習結果

Fig. 20 learning result before position gap measure











(赤:線形回帰による推定値 , 青:モーションキャプチャによる計測結果)

図 22 位置ずれ対策を用いた後の学習結果

 $Fig. \ 22 \quad {\rm learning \ result \ after \ position \ gap \ measure}$



(赤:線形回帰による推定値,
 青:モーションキャプチャによる計測結果)
 図 23 位置ずれ対策を用いた後のテスト結果
 Fig. 23 test result after position gap measure

かし,図23では,大きな改善が見られる.表3より対策 前と比較して,テスト時の標準誤差が37.88度から26.42 度まで改善されたことが見て取れる.

5. 考察と展望

本稿では,新たに開発した伸縮組紐センサの基礎性能に

表 3 位置ずれ対策後の標準誤差

 Table 3
 standard error after position gap measure

着圧ウェア型 (2本)	平均 (度)	標準偏差 (度)
学習時	21.41	2.8
テスト時	26.42	4.88

ついて検討した.本基礎検討では,モーションキャプチャ の値を正値として,組紐センサの出力値から伸縮量や関節 角度を推定し,検討した.組紐センサそのものの単純な伸 縮では,変化量40mmに対して,最小二乗誤差4.51mm ± 0.36mmの精度で推定できた.肘サポータと着圧ウェアの 肘部にセンサを縫い付け衣類化したセンサで肘関節角度を 計測した.結果として,肘サポータで最小二乗誤差16.88 ±4.86度,着圧ウェア型センサで37.88 ±28.53度で推 定できた.また,複数本のセンサを並行配置することで, 着圧ウェア型センサにおける位置ずれ発生時の精度37.88 ±28.53度をから26.42 ±4.88度まで改善できた.これに よって,衣類型センサの課題の一つとなっている位置ずれ に対応できる可能性が示唆された.

謝辞 本研究の一部は「知の拠点」あいち重点研究プロ ジェクト、並びに, JPSJ 科研費 15H02736, 26280074の 支援を受けたものです.

参考文献

- Enokibori, Yu, and Kenji Mase. "Human joint angle estimation with an e-textile sensor." Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers. ACM, 2014.
- [2] Yamada, Takeo, et al. A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection. Nature nanotechnology 6.5 (2011): 296-301.
- [3] Amjadi, Morteza, Yong Jin Yoon, and Inkyu Park. Ultrastretchable and skin-mountable strain sensors using carbon nanotubes? Ecoflex nanocomposites. Nanotechnology 26.37 (2015): 375501.
- [4] Park, Jung Jin, et al. Highly Stretchable and Wearable Graphene Strain Sensors with Controllable Sensitivity for Human Motion Monitoring. ACS applied materials and interfaces 7.11 (2015): 6317-6324.
- [5] Gioberto, Guido, et al. Detecting bends and fabric folds using stitched sensors. Proceedings of the 2013 International Symposium on Wearable Computers. ACM, 2013.