

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03272

研究課題名（和文）手形状と内力の変化がもたらす手首表面の凹凸変化現象の解明と装着型デバイスへの応用

研究課題名（英文）Analysis of wrist contour changing phenomenon induced by hand shape and internal force changes and its application to a wearable device

研究代表者

福井 類 (Fukui, Rui)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：80607416

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では腕時計のように手首に装着するだけで手形状と内力（力の入れ具合）を同時に認識可能なデバイスの実現を目指した。具体的には次の3つのアプローチで研究を行った。(1)手首表面の凹凸を手首装着型デバイスの内面に搭載された距離センサアレイによって計測した、また同時に筋電計または握り込み力計を用いて力の入れ具合も取得した。(2)手首凹凸パターンに含まれる力の入れ具合の情報を分析し、手首凹凸変化現象がどのように引き起こされているかを解明した。(3)強い影響因子である手首凹凸の特徴量を入力とし力の入れ具合を出力とする認識器を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は手首に巻き付ける腕時計型のデバイスにより得られる手首凹凸データから、手形状だけでなく、力の入れ具合（内力）まで認識できることを明らかにした世界初の試みである。多くのユーザインタフェース研究では、手指の動き（形状）が認識されてきたが、本研究のように力の入れ具合まで認識した研究は研究代表者の知る限り過去に例がなく、非常に先進的な取り組みである。この研究成果は、手首装着型のユーザインタフェース研究に新たな認識対象を加えることの意義をもたらし、さらなる発展が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aimed to realize a device that can recognize the hand shape and internal force (the degree of force applied) at the same time just by wearing it on the wrist like a wristwatch. Specifically, we conducted research using the following three approaches. (1) The unevenness of the wrist surface (wrist contour) was measured by a distance sensor array mounted on the inner surface of the wrist-mounted device, and at the same time, the degree of force applied were also acquired using an electromyogram or a gripping force meter. (2) We analyzed the acquired data on the degree of force applied in the wrist contour pattern, and clarified how the wrist contour change phenomenon is caused. (3) We constructed a recognizer that inputs the feature values extracted from wrist contour data and outputs the degree of force applied.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：ウェアラブルデバイス ユーザインタフェース 手首凹凸 腕時計型デバイス 人間工学

1 研究開始当初の背景

ジェスチャ認識を用いたインタフェースは、自然な動作で情報が表現でき、ハンズフリーに操作可能であることから、スマートグラスやヘッドマウントディスプレイへの入力手段として注目されている。特に手首装着型のセンサを用いるものは使用環境を選ばないため、ウェアラブルコンピュータの操作への活用が期待される。

手首装着型の手形状認識システムとして、手形状変化により手首部で生じる変化を圧力 [1] や表面筋電位 [2]、超音波の反射 [3] を計測することにより手形状を認識する手法が存在する。こうした手法はカメラを用いる手法と比較して外光など環境の影響を受けにくいという利点がある一方、センサを手首表面に密着させ続ける必要があるため、装着負荷が大きいという問題点がある。

こうした課題を解消するため、筋腱の動きによって手首表面に生じる凹凸の変化を手首表面とバンド間の距離を計測することで手指の動作を認識する、手首凹凸計測デバイスが有効と考えられる。これは、非接触の距離センサを用いるため、強い締め付けを必要としないため装着負荷が小さく、外出先等での長時間の使用に利点がある。手首凹凸計測デバイスにより、6 クラスの手形状認識 [4]、撓屈角度と屈曲角度それぞれの認識によるカーソルの二次元的移動 [5] が先行研究で実現された。そこで本研究では、新たに握りこみ動作に着目する。握りこみ動作は、ものを掴む時に行う操作であり、画面操作インターフェースにおける選択の操作に自然に対応づけられると考えられる。また、力の強弱によって入力値の大小を表現でき、手首部の回内角度と独立して操作できるため、握りこんだまま回内角度を変化させるといった同時入力も可能である。握りこみ力の推定を実現することで、ジェスチャ入力のユーザビリティ向上に寄与すると考えられる。

2 研究の目的

本研究の目的は、手首凹凸計測による握りこみ力の推定のために握りこみ力に対応して生じる手首凹凸データの変化とその変化原理を明らかにすることである。また、明らかになった手首凹凸データ変化の特徴から、握りこみ力を推定する手法を考案し、その実現性を検証することである。

3 研究の方法

3.1 柔軟バンドを用いた手首凹凸計測デバイス

福井ら [4] によって開発された計測デバイスにより、手首凹凸データを計測する。装着型手首凹凸計測デバイスの概要を図 1(左)に示す。手首に巻かれた柔軟な計測バンド上に 2.5 mm 間隔で 2 列に並べられたフォトリフレクタによって実装された距離センサによって計測される。

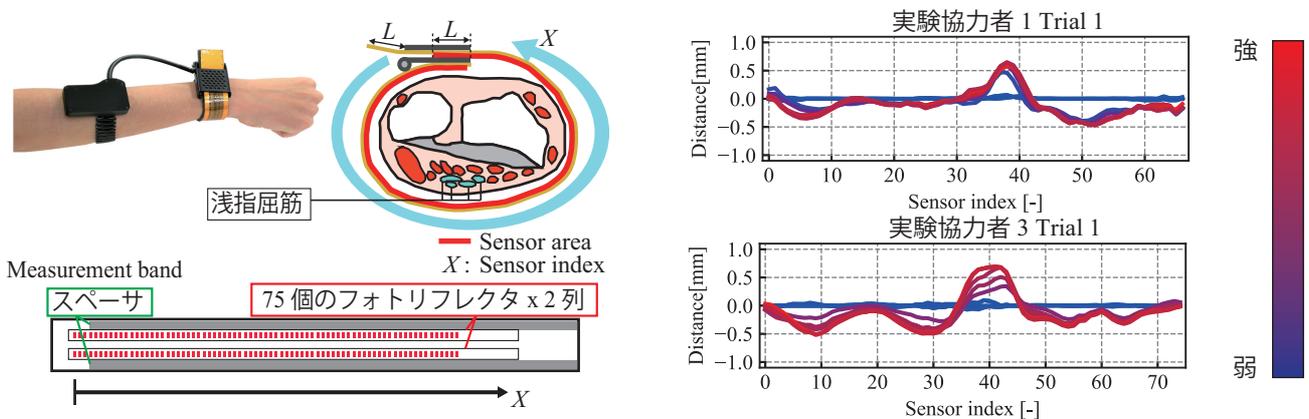


図 1: (左) 手首装着型の凹凸計測デバイス。(右) 握り込み時の手首凹凸データの様子

3.2 握りこみ時の手首表面凹凸変化の解剖学的検討

手首表面の凹凸変化は、手首内部の筋腱によって生じる。握りこみ時に主として働くのは図 1(上段中央)に青色で示す浅指屈筋である。浅指屈筋の筋腱は手首部で掌側中央に存在する。握りこみ力が加わると筋が収縮することにより、筋腱が手首表面に隆起として現れる。また、隆起した周辺では陥没が生じる。握りこみ力が強くなることで、筋腱はより強く収縮し、手首表面の隆起や陥没の大きさは大きくなると考えられる。

握りこみ力と主に対応するのは、屈筋の働きだが、握りこみ動作時には、屈筋の収縮によって手の内部に生じた内力を打ち消すために複数の筋腱が収縮する [6]。そのため、掌側に限らず、背側に存在する伸筋も含む複数の筋腱が収縮し、手首凹凸形状の変化に寄与する可能性がある。したがって、手首表面の凹凸変化は手首全周において生じうる。

3.3 握りこみ力の評価手法

本研究での検証のため、手首凹凸データと握りこみ力の同時計測が必要となる。握力計を使用した測定では、何も握っていない条件と比較して、握力計の握り幅と重量の点で異なる。これにより、指の位置や握る力の加え方に影響し、計測される手首凹凸データにも変化が生じる。手指の位置や力の加え方に影響を与えない握力評価手法が求められる。そこで、握りこんで計測できるよう十分薄型かつ軽量の握りこみ力測定器を設計実装する。

3.4 握りこみ時に計測される手首凹凸データの変化

握りこみ力の変化により生じる小さい手首凹凸の変化の可視化のため、手首凹凸データ列 $d = (c_1, c_2, \dots, c_{N_{\text{row}}})$ は握りこみ力を加えていない時の手首凹凸データ d_{ref} を用いて $d' = d - d_{\text{ref}}$ と差分処理を行う。差分処理により、 d' は d_{ref} と比較して距離が減少した位置では負の値をとり、距離が増加した位置では正の値をとる。

予備測定実験における、握りこみ力を徐々に大きくしたときの差分処理後の手首凹凸データの変化の例を図 1(右) に示す。握りこみ時には、局所的な距離値の増加領域・減少領域が生じる。握りこみ力が大きくなるにしたがって、この変化量は大きくなる。従って、局所的な距離値の変化の大きさを捉えることで、握りこみ力の推定ができる可能性がある。

また、握りこみ時の手首凹凸データの変化は、実験協力者ごとに異なる。この要因として、筋腱の位置や手首の断面形状の個人差により、手首凹凸形状の変化や、それに伴って生じる計測バンドの変形の仕方が変化することが考えられる。この個人差により、握りこみ時に手首凹凸データに変化が生じる位置を Sensor index によって一意に指定することは困難である。

従って、手首凹凸データから握りこみ力と対応した特徴量を得るためには、握りこみ力と対応して距離値が増加、減少する手首凹凸データ領域をユーザ毎に取得する必要がある。手首凹凸の増加が生じる領域と減少が生じる領域の境界においては、ほとんど距離値が変化しない位置が存在する。このことから、握りこみ時の距離値の変化が小さい位置に着目することで、距離値の増加、減少が生じる領域を抽出できると考えられる。

3.5 握りこみで変化する領域の自動抽出による特徴量抽出

特徴量抽出の概念図を図 2 に示す。まず、手首凹凸データ領域から、握りこみ時に距離値が増加、減少する各領域を抽出する。これによって、握りこみ力と対応して変化する手首凹凸データ領域が複数抽出される。続いて、各領域における距離値の変化量を取得する。この手法により、握りこみ力と対応した複数の特徴量が抽出できる。

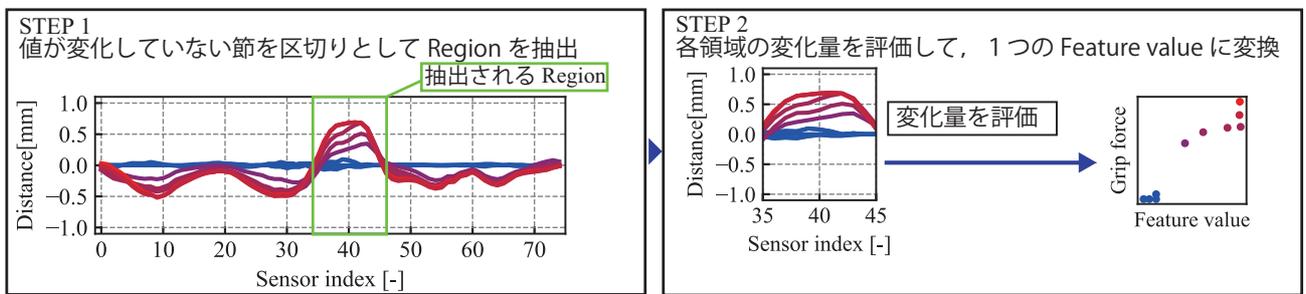


図 2: 特徴量抽出処理の概念図。

3.6 薄型握りこみ力測定器の実装

実装した薄型握りこみ力測定器について説明する。実験に用いた握りこみ力測定器の概要を図 3(左) に示す。薄型握りこみ力測定器は、SUS304 製の長方形薄型金属板上に設置された 4 つの定格容量 200 N の小型ロードセル (LMB-A-200N 株式会社共和工業製) により、握りこんだ時に人差し指、中指、薬指、小指の 4 本の指先と手のひらの間に生じる押し付け力の和を握りこみ力として測定する。曲げモーメントを受けないよう球形となっているロードセルの上部に力を伝達するため、測定時には指先に金属円盤を装着し、金属円盤を介してロードセルに力を伝達する。実装した握りこみ力測定器は幅 11 mm、厚さ 6.4 mm である。

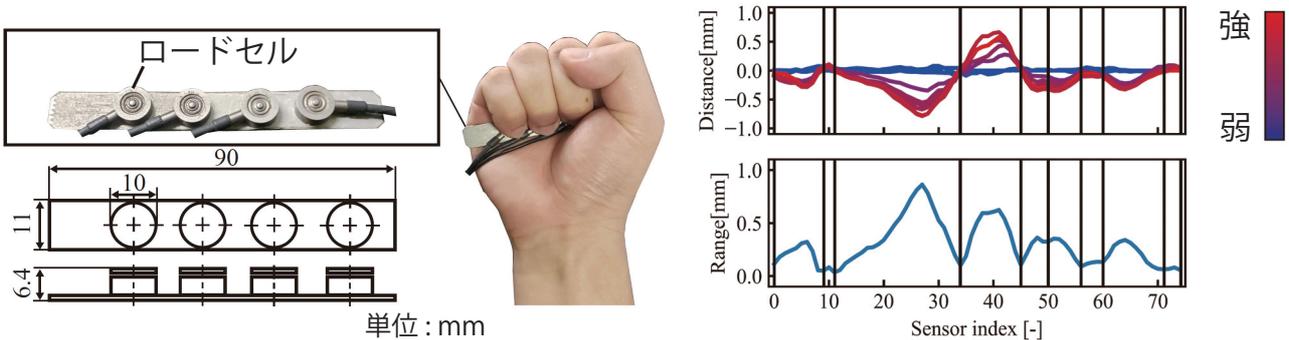


図 3: (左) 薄型握りこみ力測定器。(右) 握り込み次の手首凹凸データ変化及び最大変化量

3.7 握りこみ時の距離センサの変化量に着目した手首凹凸データ領域の自動分割

握りこみ時に距離値の変化が少ない位置を境界として手首凹凸データを分割することにより、距離値が減少、あるいは増加する個々のデータ領域を抽出する。この処理には、握りこみ力を徐々に大きくした際に計測した手首凹凸データセット $D = (d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n)$ を用いる。各センサにおける距離の変化量は握りこみ時に測定した手首凹凸データの各センサがとる値の範囲から求められる。外れ値を取ったときの影響を小さくするために、最大値と最小値の差ではなく、各センサの出力値の 90 パーセンタイル値 $c_{i,90}$ と 10 パーセンタイル値 $c_{i,10}$ を計算し、 $c'_i = c_{i,90} - c_{i,10}$ により変化量 $d_{\text{range}} = (c'_1, c'_2, \dots, c'_{N_{\text{row}}})$ を取得する。 k 個の学習データを使用するとき、それぞれの D_i から $d_{\text{range}}(i)$ を取得し、その平均値 d'_{range} により、領域分割を行う。

握りこみ力を加えたときのデータセット D について、手首凹凸データの変化と、 D から計算した各センサの変化量の例を図 3(右) に示す。この例では、 $N_{\text{row}} = 75$ であり、 d'_{range} は Sensor index が 9, 11, 34, 45, 56, 60 の 9 つの点で極小値を取る。手首凹凸データ d はこれら 9 つの点により、10 つの領域に分割される。これにより、手首凹凸データ $d = (c_0, c_1, \dots, c_{74})$ は $X = (x_1, x_2, \dots, x_{10})$ のそれぞれに分割され、 $x_1 = (c_0, c_1, \dots, c_9)$ である。この分割処理により、2 列の手首凹凸データはそれぞれ複数の部分領域のデータ列に分割される。以下では、この分割関数を $X = F(d)$ とする。

3.8 分割された各手首凹凸データ領域からの特徴量抽出

自動分割により得られた各データ領域 $x_i = (c_j, c_{j+1}, \dots, c_{j+n-1})$ から、距離値の増加、減少の変化量を特徴量として抽出する。握りこみ力によって生じる小さい変化を捉えるにあたり、最大値や最小値と言った局所的な値を参照するよりも、多数のセンサ値の統計量を用いることにより、より頑健な計測ができると考える。そこで本研究では、自動分割された各領域の距離値の平均値を用いる。

3.9 特徴量選択

分割によって得られた領域には、握りこみ力の推定に有用でない領域が含まれ、こうした領域から抽出した特徴量は、握りこみ力の推定性能を悪化させる可能性がある。そこで、特徴量選択により、握りこみ力の推定に用いる特徴量を絞り込む必要がある。

推定に有用な特徴量は握りこみ力によって生じる隆起と陥没の変化量を反映した値であると期待するため、握りこみ力と有用な特徴量の間には相関関係があると考えられる。そこで、学習時に握りこみ力と特徴量の相関係数を計算し、相関係数の絶対値が閾値（本研究では 0.5 とした）を超えた特徴量のみを握りこみ力の推定に用いる。

3.10 握りこみ力と手首凹凸データの同時計測実験

右利きの実験協力者 5 人（男性 4 人、女性 1 人）に対して、実験を行った。なお、東京大学倫理審査専門委員会において、実験の承認を得ている（審査番号：18-231）計測中は立位で、腕を身体に沿ってまっすぐ降ろし、手のひらを身体の内側に向けた姿勢を維持し、右手で計測を行う。最初に、最大随意収縮力（Maximum Voluntary Contraction、以下 MVC）を測定する。これは実験協力者が最大の力で握りこみ力測定器を握りこむ際に測定される値である。本論文では、握りこみ力は、MVC に対する割合、% MVC で表すことによって正規化を行う。次に手首凹凸データと握りこみ力の同時計測を行う。強い握りこみ力を加えることは、操作者の疲労の要因となるため、握りこみ力の測定対象範囲を 50% MVC 以下として測定タスクを設定した。握りこみ力を加えず、薄型握りこみ力測定器を軽く持った状態を初期状態とする。この状態から、4s 間で徐々に握りこみ力を大きくし、主観強さで 50% 程度の力まで大きくする。その力を 3s 間保つ。これを 6 セット計測した。検証においては、握りこみ力を加え始めてから、握りこみ力が最大になるまでの区間に前後 1s を加えた 4s から 10s 間に測定されるデータを用いる。

最後に、手首の回転や屈曲の影響を除いたデータを得るため、手首の回転や屈曲を意識して固定するように実験協力者に指示し、同様の握りこみ力と手首凹凸データの同時計測をもう 1 セット行った。

4 研究成果

取得したデータセットを用いて、握りこみ力と手首凹凸データの対応関係を明らかにする実験を行った。

4.1 握りこみによって生じる手首凹凸データの変化の分析結果

握りこみ力と抽出した特徴量の対応関係から、握りこみ時に手首凹凸データに生じる変化について考察する。この検証では、実験協力者ごとに計測した 6 つのデータセット全てを用いて、特徴量抽出における分割関数 $F(d)$ を計算した。

握りこみ力と強い相関がみられた特徴量が抽出された領域を図 4(左) に示す。握りこみ力の増加に伴って、掌側部における距離値の増加、橈側部における距離値の減少が複数の実験協力者に共通して見られた。

握りこみ時に手首表面及び計測バンドに生じたと考えられる変化を図 4(右) に示す。掌側部における距離値の増加は、浅指屈筋の緊張により隆起が生じ、計測バンドが外側に押し付けられたことにより、その近傍でバンドと手首表面の間の距離が増加したためだと考えられる。橈側部における距離値の減少は、掌側部で計測バンドが外側に押し付けられたことにより、橈骨がある領域でバンドが手首表面に押し付けられたためだと考えられる。

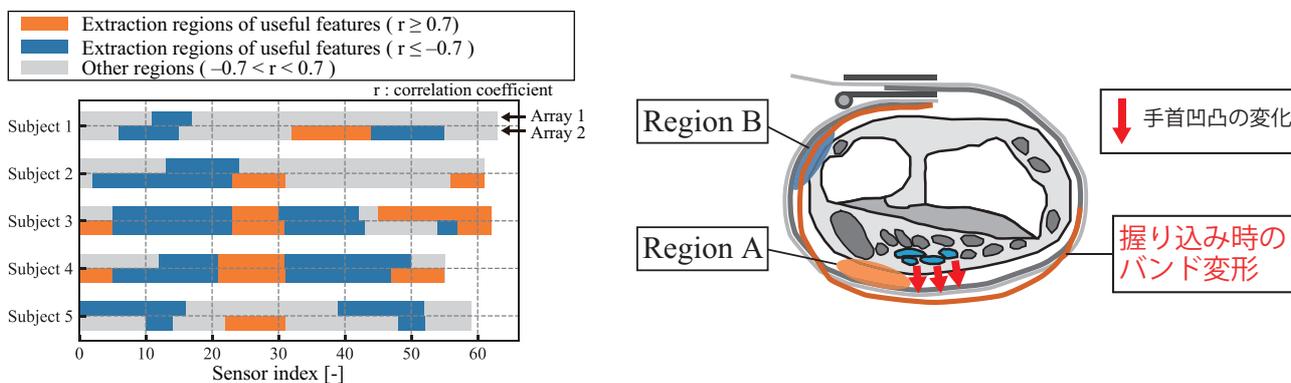


図 4: (左) 握りこみ力と高い相関を示した手首の範囲。(右) 握りこみ時の時のバンド変形の様子 (握りこみにともない, A: 距離が大きくなる, B: 小さくなる)

4.2 抽出した特徴量を用いた握りこみ力推定結果

線形サポートベクター回帰モデルを用いた推定器により，線形なモデルによる握りこみ力推定の実現性を検証する．

入力ベクトルを x_i ，重みベクトルを w ，定数項を b として，回帰モデルは，式 (1)(左) で表される．学習パラメータは，正則化の強さを表す C と，不感帯の幅を表す ε [%MVC] である．推定器の学習に用いる損失関数 Loss は，真値を y_i ，学習を行うデータ数を n として，式 (1)(右) で表される． $\max(x, y)$ は x と y を比較して大きい方を返す関数である．本研究では， $C = 1000$ ， $\varepsilon = 2$ を使用した．

$$f(x_i) = x_i w^T + b \quad \text{Loss} = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \max(0, |y_i - f(x_i)| - \varepsilon) \quad (1)$$

推定性能の検証では，実験協力者ごとに 6 つのデータセットのうち，5 つ学習データから特徴量抽出器の学習，握りこみ力推定器の学習を行い，1 つのテストデータを用いて推定性能を評価し，これをすべてのデータセットが 1 度ずつテストデータになるよう繰り返す 6 分割交差検証を行う．推定誤差は，二乗平均平方根誤差 (Root mean square error, 以下 RMSE) によって検証する．

RMSE が最小と最大の実験協力者における推定結果を図 5(左) に示す．RMSE が最大の実験協力者においても 5 %MVC 未満での推定が実現できた．手首凹凸データの変化量を捉えた特徴量を用いて，握りこみ力は特徴量の線形な関数で表現できると考えられる．

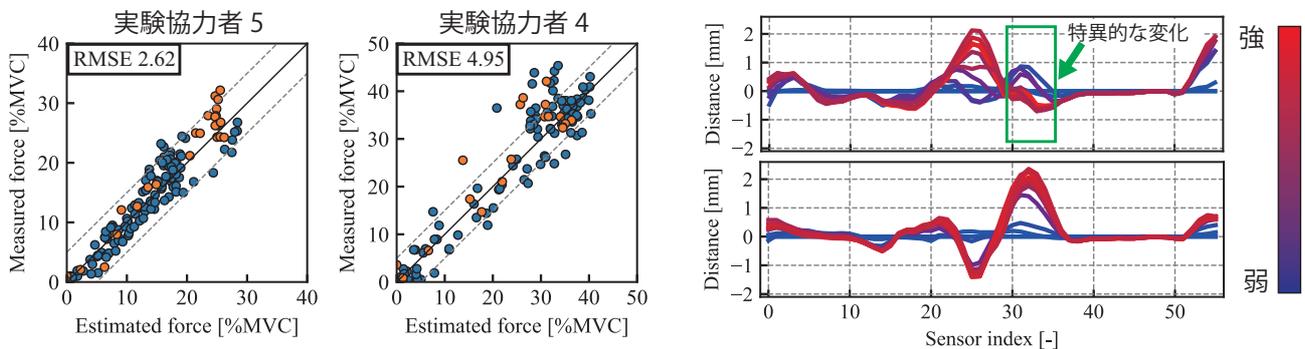


図 5: (左) 握りこみ力推定結果 (オレンジは Trial 6)．(右) 握り方を変更したときの手首凹凸変化

また，図 5(左) に橙色で示した 1 試行内での推定結果に着目すると，実験協力者 5 については実測値の増加に対して，推定値も単調に増加する傾向が見られ，各試行内においては握りこみ力の増加が正しく認識できていることが確認できる．この傾向は，実験協力者 1, 2, 3 のデータにおいても確認された．一方で，実験協力者 4 のデータでは，推定値が大きくばらついていることが確認された．測定実験中，実験協力者 4 は，掌側側に屈曲しながら握りこみ力を入れていたことが確認され，この屈曲動作が手首凹凸データに影響したと考えられる．手首部の屈曲動作を固定した時の手首凹凸データの変化と，固定しなかった時の手首凹凸データの変化を図 5(右) に示す．この図より，屈曲動作の固定の有無によって手首凹凸データの変化が異なることが確認される．

手首部の屈曲動作を固定して握りこみ力を加えた際には，握りこむ力が大きくなるにしたがって，距離値が単調に変化していることが確認される．一方，非固定時においては，Sensor index 30 付近において，握りこむ過程で一度距離値が増大し，その減少するという不規則な変化が確認され，この影響により推定性能が低下したと考えられる．

握りこみ力と屈曲動作によって手首凹凸データに生じる変化は掌側部で干渉することから，屈曲動作を固定して行うことでより高い精度で握りこみ力推定ができると考えられる．

参考文献

- [1] P. B. Shull et al. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 724–732, 2019.
- [2] Ananda Sankar et al. Kundu. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol. 91, No. 3, pp. 529–541, Sep 2018.
- [3] J. He et al. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 66, No. 5, pp. 1277–1284, 2019.
- [4] Rui Fukui et al. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 658–671, 2014.
- [5] H. Karasawa et al. In *Proc. of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1550–1555, 2019.
- [6] E. Milerad G.M. Hagg. *Clinical Biomechanics*, Vol. 12, No. 1, pp. 39–43, 1997.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 三谷達郎, 沖芝俊祐, 立山尚樹, 山之城晃士, 割澤伸一, 福井類
2. 発表標題 装着型多関節手首凹凸計測デバイスにおける 装着状態の変化に頑健な手形状認識 - データ次元圧縮による装着状態情報の抽出とその手形状認識への活用-
3. 学会等名 第26回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福井 類, 山之城 晃士, 立山 尚樹, 唐澤 宏之, 沖芝 俊祐, 割澤 伸一
2. 発表標題 装着型手首凹凸計測デバイスによる握りこみ強さ推定の試み --握りこみ強さの変化による手首凹凸形状への影響分析--
3. 学会等名 第25回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究紹介 (R-Design) http://www.ra-laboratory.com/r/research/research.html
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------