

令和 元年 6 月 17 日現在

機関番号：32644
研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
研究期間：2016～2018
課題番号：15KK0014
研究課題名（和文）触覚情報の記録・提示が可能なアクティブ骨導音センシング（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Active Bone-Conducted Sound Sensing for Haptic Feedback and Recording(Fostering Joint International Research)

研究代表者
竹村 憲太郎（Kentaro, Takemura）

東海大学・情報理工学部・准教授

研究者番号：30435440
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,000,000円
渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：申請者はこれまでの研究で、指先等で知覚されない周波数帯の振動と知覚可能な振動を選択的に利用することで、関節角度や力などの計測に加え、触覚のフィードバックが可能な手法を提案してきた。本研究課題では、能動的に inputs する振動の利用を人の知覚の強化やリハビリテーションなど、これまで申請者が取り組んできたインタフェースとは異なる分野へ応用することを目指した。リハビリテーション分野では、これまで刺激として振動 inputs が利用されてきたが、効率的なリハビリテーションの実現には、input タイミングの最適化が必要であり、個別に最適なタイミングを推定することが可能であるアルゴリズムを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、脳卒中などで手足に麻痺が生じた場合に行われるリハビリテーションにおいて、振動刺激の input タイミングの最適化を実現するものである。振動の input タイミングは、運動誘発電位を得るために、磁気刺激に合わせて適切なタイミングで inputs する必要があるが、このタイミングが個人ごとに異なることや、タイミングがあったとしても確実に得られるものでないため、これまで最適化が難しかった。本研究の成果はこのタイミングを確率的に求めるもので、これが実現されるとロボットによる最適なリハビリテーションが可能となり、リハビリテーションの効果が効率的に得られることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In our previous research, the active acoustic sensing has been studied for the human body, and the angle of the joint and the contact force are estimated by using the unnoticeable vibration and the perceptible vibration. Additionally, our method can be used as haptic interfaces. In this research, we applied this method to other fields such as augmented human perception and rehabilitation. In rehabilitation, the vibration is used as a mechanical stimulus, but it is necessary to optimize the timing of input. Therefore, we proposed the method for optimizing input timing for highly effective rehabilitation.

研究分野：ユーザインタフェース

キーワード：振動 リハビリテーション

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

申請者はこれまで、アクティブ骨導音センシングを用いた常時装着型手入力インタフェースに取り組み、触知覚できない振動を用いて関節角度推定を実現してきた。また、触知覚可能な振動を適宜合成入力することで、関節角度と同時に触覚フィードバックを行うことを実現している。仮想空間上にロボットグリップを構築し、関節角度推定と同時に物体との接触があった場合には、触覚フィードバックを提示することが可能である。身体への振動入力にはユーザインタフェースへの利用だけでなく、その他の分野として感覚強化やリハビリテーションなどへの応用も期待されている。

2. 研究の目的

本研究課題は、能動的に入力した振動を用いて、関節角度推定・触覚提示を行う技術に加えて、人の知覚機能、運動機能の強化及び手指の状態推定を実現することを目的とする。申請者は、これまでの研究で、指先等で知覚されない周波数帯の振動と知覚可能な振動を選択的に利用し、関節角度の推定に加え、触覚フィードバック可能なアクティブ骨導音センシングを提案してきた。本研究課題ではこれを発展させ、人の知覚を強化やリハビリテーションなどに取り組み、インタフェースのみではなく医工連携など応用範囲を幅広く展開する。

3. 研究の方法

リハビリテーションの分野で振動を効果的に用いる手法として、本研究では Paired associative stimulation に注目した。神経ネットワークの再構築が可能と期待される Paired associative stimulation は、一般的に電気的刺激を入力するものが多いが、本研究では図 1 に示すような空気圧アクチュエータを用いた機械的刺激入力装置を用いて、振動を腱に入力した。空気圧で駆動するアクチュエータによって前腕部の腱に対して機械的刺激を入力できる装置と、経頭蓋磁気刺激を運動野に入力し、Paired associative stimulation を行うことで神経ネットワークの再構築を行い、脳卒中などで生じた麻痺状態からの回復が期待できる。しかしながら、Paired associative stimulation は、運動誘発電位を得るために、刺激の正確な同期が必要であり、機械的刺激と磁気刺激の入力を適切なタイミングで入力しないと効果がない。また、このタイミングは個人で異なり、最適なタイミングを効果的に発見する手法が求められてきた。これまでの研究で、機械的刺激を用いた場合は、inter-stimulus interval が電気的刺激に比べて長く、利点があることを確認している。そこで、最適な入力タイミングを推定するパーティクルフィルタを用いた手法を検討した。具体的には、運動誘発電位が観測されると思われる区間にパーティクルをばら撒き、刺激の入力を重ねるごとに運動誘発電位の観測確率が高い区間を定める。全区間に刺激を入力するインクリメンタルな方法に比べて、パーティクルフィルタを用いることで探索に必要な試行回数を減らすことを試みた。

経頭蓋磁気刺激と空気圧アクチュエータによる機械的刺激を入力することで運動誘発電位が観測できる最適な刺激入力タイミングを求める。具体的なアルゴリズムは、図 2 に示す。a) 推定区間に分布している各パーティクルは、b) ノイズを加えられた後、c) 重みに応じてリサンプリングされる。d) リサンプリングされたパーティクルが存在するタイミングにて刺激を入力し、運動誘発電位を観測する。運動誘発電位が大きく観測されるタイミングが望ましいことから、e) パーティクルの重みを運動誘発電位の大きさを用いて定義し、a) 正規化を行う。これを複数回繰り返すことで、運動誘発電位が観測されやすい inter-stimulus interval を求めるが、アルゴリズム 1 に示すように、パーティクルの初期位置は、これまでの研究で運動誘発電位が観測されている区間に一様に分布させる。また、終了判定は、パーティクルの取束を判定することで、行う。

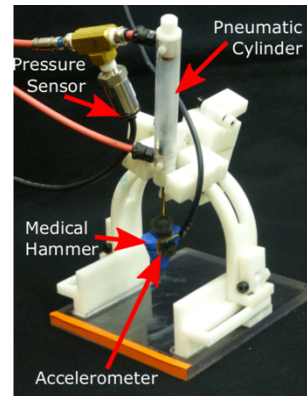


図 1 空気圧アクチュエータを用いた機械的刺激入力装置

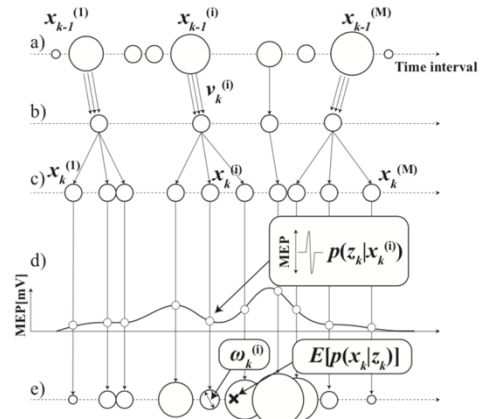


図 2 パーティクルフィルタを用いた ISI の推定

Algorithm 1 Particle filter for estimating individual ISIs

```

procedure PARTICLEFILTER
   $\{x_0^{(1:M)}, \omega_0^{(1:M)}\} \sim p_0(\cdot)$   $\triangleright$  Initialize particles and weights
   $k \leftarrow 1$ 
  while variance  $\geq \epsilon^2$  do
    for  $i \leftarrow 1, M$  do
      sample  $x_k^{(i)} \sim p(x_k | v_k, x_{k-1}^{(i)})$ 
       $\omega_k^{(i)} = p(z_k | x_k^{(i)})$ 
     $\omega_k^{(i)} = \omega_k^{(i)} / \sum_{i=1}^M \omega_k^{(i)}$ 
     $\{x_k^{(1:M)}, \omega_k^{(i)}\} = \text{Resample}(x_k^{(1:M)}, \omega_k^{(1:M)})$ 
     $p(x_k | z_k) = \sum_{i=1}^M \omega_k^{(i)} \delta(x_k - x_k^{(i)})$ 
     $E[p(x_k | z_k)] = \sum_{i=1}^M \omega_k^{(i)} x_k^{(i)}$ 
     $k \leftarrow k + 1$   $\triangleright$  Repeat until convergence
  return  $E[p(x_k | z_k)], p(x_k | z_k)$ 
  
```

4. 研究成果

図 3 は、30 個のパーティクルを用いて推定を行った際の様子で、縦軸は時間軸、横軸は繰り返し数となっている。収束判定はパーティクルの分散を用いて行っており、実験協力者 11 名で推定を行ったところ、必要な繰り返し回数は、実験協力者毎に大きく異なった。しかしながら、推定した inter-stimulus interval と最適な区間を比較すると、どの推定結果も運動誘発電位が観測されやすい最適な区間に近い inter-stimulus interval が推定されており、アルゴリズムが適切に動作していることがわかる。

収束したパーティクルから、図 4(a) に示すように、運動誘発電位が観測される区間 inter-stimulus interval を定める。また、実際に観測された結果である図 4(b) と比較することで F-Score 算出し、評価値を行った。本研究では刺激を入力する試行回数を減らし、適切な inter-stimulus interval を求めることを重要としていることから、パーティクル数に応じた試行回数の比較を行った。想定される区間を全探索するインクリメンタルな方法よりも総試行回数が下回る必要があることから、最大のパーティクル数を 50 個とし、推定および評価を行う。図 5(a) は、パーティクル数を 10~50 個と変化させた際の試行回数である。提案手法は、パーティクルフィルタを用いているため、実行毎に試行回数が増える。誤差棒は試行回数の分散を示している。グラフからパーティクル数が少なくなるにつれて、収束までの試行回数が減少していることが確認できる。一見、パーティクル数は少ないほど試行回数が増えるため良いと思われるが、実際は推定精度も合わせて低下する。図 5(b) に示すように、パーティクル数が 10, 20 の場合には、30~50 個に比べて、F-Score が低下していることが確認できる。これはパーティクル数が少なすぎると、適切な inter-stimulus interval を推定できないことがあることを示しており、パーティクル数としては 30 または 40 個程度が試行回数および精度の観点から適切であることがわかる。

また、さらに試行回数を減らす方法としては加速度計の利用が考えられる。空気圧アクチュエータを利用している本装置は、安全であるとともに、電気刺激のように痛みを感じるなどということはない。しかしながら、コンピュータから制御信号が出力されてから、実際に腱に刺激を与えるまでは時間差があり、この点が電氣的刺激を入力する装置に比べて欠点であった。そこで、装置のハンマー内部に加速度計を配置し、加速度計の値から衝突のタイミングを算出することで、機械的刺激の入力タイミングを正確に求め、探索範囲をさらに限定することができる。図 6 は、実際に加速度計を用いた場合と用いない場合で、繰り返し回数を比較した結果であり、パーティクル数を 10~50 個で設定した場合で、繰り返し回数の比較を行った。加速度計を用いることで、探索範囲を限定できることから、パーティクルをばらまく領域が狭まり、分散が初期から小さくなっている。この効果は大きく、パーティクル数が多いほど効果的に寄与しており、試行回数を減らすことが可能である結果が得られた。安定した推定には比較的多いパーティクル数が必要であることが結果から得られたが、パーティクル数が増えるということは刺激を入力する試行回数が増えることを意味している。加速度計を用いることでこの問題が解決できる

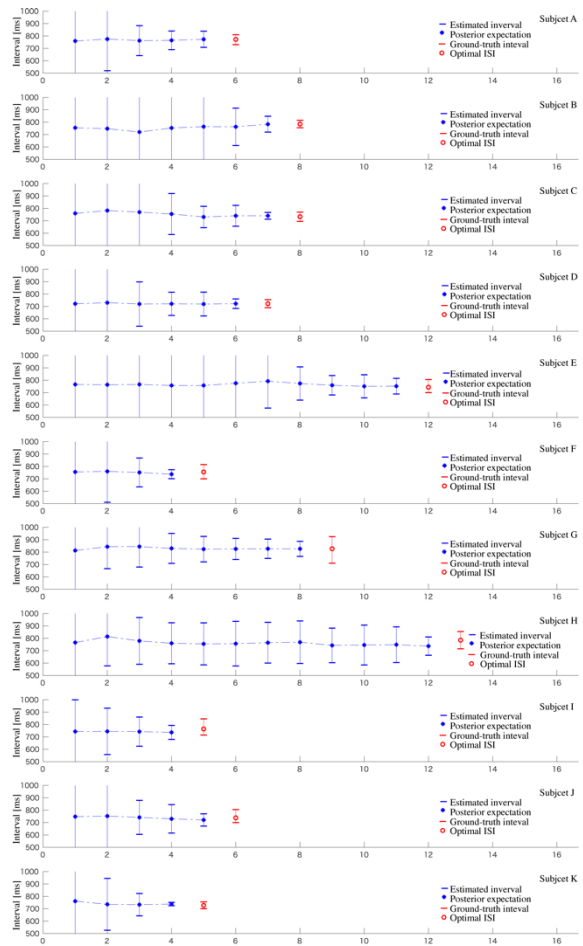


図 3 Inter-stimulus interval 推定結果

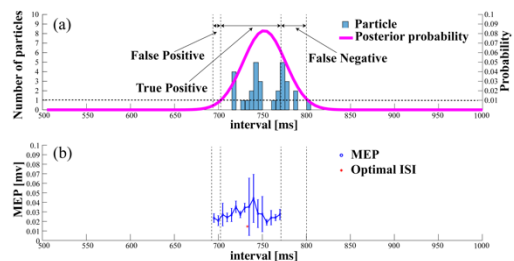


図 4 パーティクルの分布と MEP, F-Score の関係

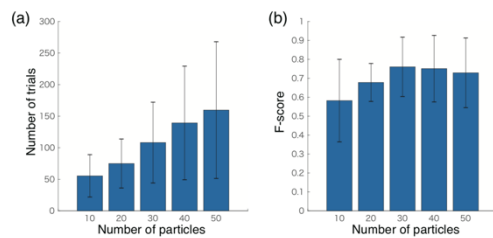


図 5 パーティクル数に応じた試行回数と F-Score

ことがわかり、空気圧アクチュエータを用いた刺激の入力システムとしては、必要不可欠な構成要素であることが確認できた。

個人毎に最適な inter-stimulus interval は異なるが、多くの実験協力者からのデータから、運動誘発電位が観測されやすい区間はある程度特定できる。現在、一様にパーティクルをばらまいているが、初期化の時点で、観測されやすい区間を考慮してパーティクルを分布させることでさらなる改善も期待できる。試行回数を減らすことは、ユーザの負担軽減のために重要な課題があるため、更なる改善に向けて検討が必要と考えている。

本研究では、Paired associative stimulation において、個人毎に異なる inter-stimulus interval を試行回数少なく求める手法として、パーティクルフィルタを用いた推定手法を提案した。従来の区間を全探索するインクリメンタルな手法と比較し、提案手法によって70~80%程度に試行回数を減らすことができることを確認した。パーティクルフィルタを用いるため、毎回刺激入力タイミングを変更する必要があるが、提案システムはロボットシステムであることから、タイミングを制御することは容易に可能である。本研究の成果によって、神経ネットワークの再構築に期待されている Paired associative stimulation において、ロボットシステムを導入することで、課題であった最適な inter-stimulus interval の同定が容易になることを示すことができた。

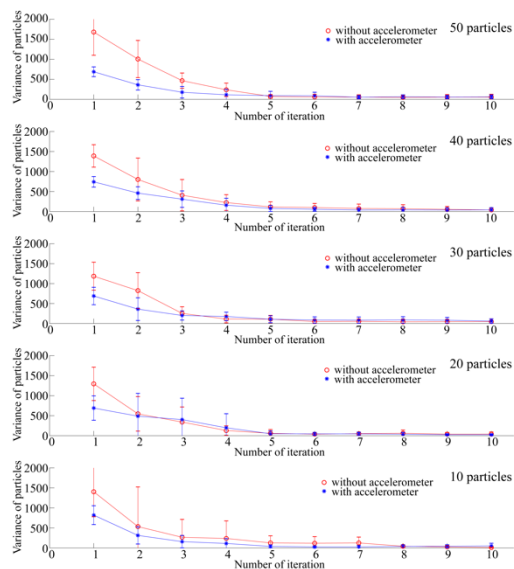


図 6 加速度計を用いた際のパーティクルの収束結果

5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

① Kentaro Takemura, Euisun Kim and Jun Ueda, “Individualized Inter-Stimulus Interval Estimation for Neural Facilitation in Human Motor System: A Particle Filtering Approach,” ASME 2018 Dynamic Systems and Control Conference, 2018.10. doi:10.1115/DSCC2018-9155

[その他]

ホームページ等

<https://takemura-lab.org/wordpress/>

6. 研究組織

研究協力者

[主たる渡航先の主たる海外共同研究者]

研究協力者氏名： 上田 淳

ローマ字氏名： Jun Ueda

所属研究機関名： Georgia Institute of Technology

部局名： GWW School of Mechanical Engineering

職名： Associate Professor

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。