

# 振動刺激を用いた環境情報フィードバック型 ウェアラブル運動教示システム

Wearable Motion Guidance System using Vibrotactile Cue based on  
Feedback of Environment Information

2161902



研究代表者

東北大学大学院工学研究科

教授

平田 泰久

## [研究の目的]

高齢化社会の問題解決には健康寿命の増進が効果的であり、高齢者・障がい者自身が積極的に自らの意志で活動することを促す機械システムの開発が重要である。本研究では、高齢者・障がい者のスポーツ支援に注目し、高齢者や障がい者の衰えた環境認識能力をセンサで補い、その情報を振動刺激という形で体の部位に提示することで、高齢者や障がい者が健常時と同等もしくはそれ以上にスポーツを行うことを可能とする環境情報フィードバック型ウェアラブル運動教示システムを研究開発することを目指す。

一般に高齢者や障がい者は、筋力と感覚が衰えることから健常時と同等の運動を行うことが難しくなる。筋力の衰えを支援するウェアラブルロボットの研究は数多く行われているが、本研究では感覚の衰えに起因する運動能力の低下を補完するウェアラブル運動教示システムの実現を目指す。

スポーツ訓練では一般に指導者が訓練者の腕や足を持ち適切に動かすことによって指導するいわゆる「手取り足取り」型の指導方法が採用され、その場合の訓練者の運動は受動的である。しかし本研究では、人間が自ら能動的に運動し、その実際の運動軌道と技能に要求される理想軌道との差異を複数の振動刺激によって提示する

ことで、人間に自らの運動修正を誘発させることを目的とする。

## [研究内容・成果]

### 1. 運動方向提示デバイスの開発および振動モータ制御手法の構築

本研究では、はじめに運動方向提示デバイスの開発を行った。3D プリンタ等を用いて人間の手首の周囲に複数の振動モータを取り付けたウェアラブルデバイスを開発した。振動デバイスには、様々な手首の太さに対応できるように、振動モータを1つ格納するモジュール構造を製作した。このモジュール6個をゴムバンドで連結させることで、手首に複数の振動モータを配置した。開発したデバイスを図1に示す。これにより、手首のサイズに合わせて装着すること

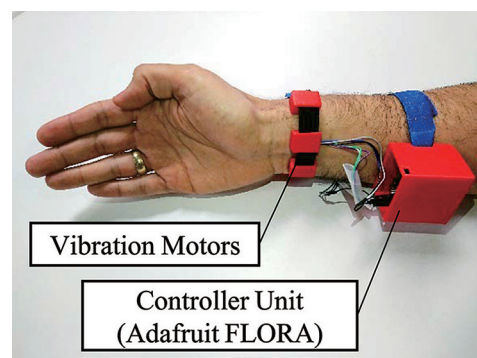


図1 振動提示デバイス

ができ、同時に使用者に合わせて振動モータの配置を調節できる。使用した振動モータは、コイル型偏心モータ（FM34F）を用いた。振動モータの制御には、Adafruit 社の FLORA を用いた。Pulse Width Modulation (PWM) 制御を行うため、PCA9685 チップを用いることで振動モータの強さを制御した。

次に、手首に複数の振動刺激を与えることで、運動方向を呈示する手法を提案する。本研究では、運動方向提示手法（Direction Sensation : DS）を提案する。人は川の中に手を入れると水が肌を伝わる感覚から、川の流れの方向を認識することができる。この感覚を参考にし、運動方向を生成することを考える。人の四肢を円柱と仮定し、その周りに複数の振動モータを配置する。運動方向に基づいて呈示する方向の出発点と到着点を決め、出発点から両側に振動を伝えていき、到着点まで皮膚上を振動刺激が移動していくことで、運動方向を生成する。

図2に手首を想定した運動方向提示手法の概念を示す。本研究では振動刺激の移動を生成するために、Phantom Sensation (PS) を用いることとした。PSは振動の錯覚現象の1つであり、2つの振動モータを同時に近くで振動させることにより、2つの振動モータ間に1つの振動モータ（仮想的な振動刺激）が存在するように感じる現象である。仮想的な振動刺激の強さと発生位置は各振動モータの強さで決まる。

PSの発生位置を連続的に移動させることで皮膚上を振動が移動していく感覚を実現することが可能となる。また、この手法を用いることで、出発点から到着点までの振動の伝達時間を

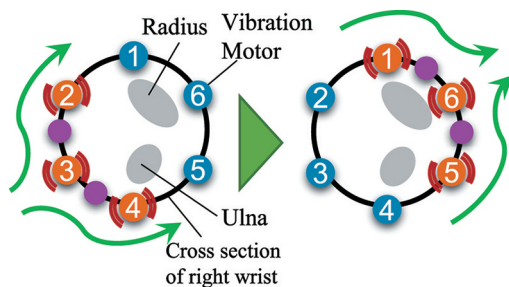


図2 運動方向提示手法

制御することが可能となる。実際にこの手法を用いて呈示した方向が認識できることを確認し、約80%の認識率を実現した。

## 2. 動的な運動を考慮した運動提示システムの構築

前節で提案した運動方向呈示手法は、振動が移動していくような感覚を得られるという振動刺激を用いた。これにより、刺激を受けた部位をどこへ動かしたらよいか直感的に理解することを可能となる。しかしながら、この運動方向呈示手法は、方向を伝えるのに一定時間要するといった課題があり、その応用範囲は静的な方向提示に限定される。

そこで、本研究では方向の伝達に時間を要しない、新たな運動方向呈示手法を提案する。本研究で利用する振動刺激は図3に示すような定点振動刺激であり、振動を感じた点の方向に運動を行うものとする。ただし、手首を回転させるような動的な運動を行うと、振動を知覚する角度が絶対座標系基準において手首の回転とともに変化的ることとなる。すなわち、前節で示したリストバンドを利用して定点振動刺激を与えると、図4(a)のようにPSを用いて手首の目標運動方向を示すことはできるが、手首を回転させた場合は図4(b)のように斜め上方が目

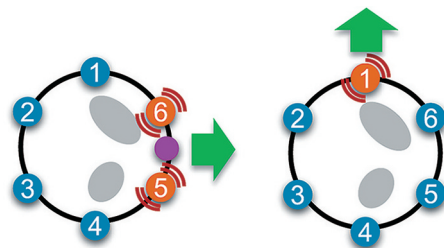


図3 定点振動刺激による運動方向提示

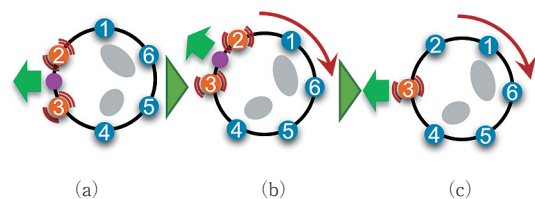


図4 手首の回転補償制御

標方向と認識してしまう。その結果として誤った方向に腕を動かしてしまう可能性がある。そこで、図 4(c) のように手首の回転に応じて振動を与える点も移動させることで、手首の姿勢によらず絶対座標系において常に一定の方向に振動を与えることが可能となる。

提案する手法の有効性を確認するために、x-y 平面上に目標位置を設定し、提案した制御手法に基づいて運動方向を提示することで手先を目標位置まで誘導できるか検証実験を行なった。初期位置を (0, 100) [mm] と設定し、目標位置は (200, 300), (100, 450), (150, 150), (-150, 300) [mm] の 4 点を設定した。1 つの目標位置に対して方向が 15[s] 間提示される。15[s] 経過すると、次の目標位置への方向が提示される。実験結果を図 5 に示す。図 5 は x および y 方向の時間変化をプロットしたものである。実験結果から 1 つの目標位置に対し運動方向が提示されてから 1.4[s] 程度で手先が動き出し、5~10[s] 程度で目標位置に到達していることがわかる。これより、被験者は振動デバイスから提示される運動方向に関する情報のみを利用して目標位置に手首を到達させることができることが示された。

また、より動的な運動支援を実現するために、この振動刺激による方向提示手法を利用して、手先を目標経路に追従させることを試みた。このとき、振動によって方向を持続的に提示すると、皮膚の感度が低下し方向の認識が困難になる可能性がある。そこで、人間はある程度目標

の運動フォームを知っていることを前提とし、手先が目標経路から一定距離内にある場合は方向提示を行わず、目標経路から大きく離れた場合にのみ方向提示を行う。これにより、振動刺激によるユーザーの負担軽減と目標経路への追従性の向上を図る。

本研究で提案する振動刺激による方向提示によってユーザーの目標経路への追従性が向上するか検証した。本実験では 8 人の被験者を振動刺激による方向提示を与える (With Feedback, WF) グループ 4 人と与えない (No Feedback, NF) グループ 4 人に分け、それぞれのグループの目標経路への追従性を評価した。被験者は目標経路をあらかじめ知らされ、1 人あたり 20 回の経路追従を行った。また、手先を動かす速度は、振動刺激に対する人間の反応速度を考慮して 200[mm/s] 以下とした。経路追従実験の結果から、WF グループの方が目標経路に追従できていることが分かり、各グループの平均二乗誤差 (RMSE) および最大誤差の平均と標準誤差が、いずれも WF グループの方が低いことが分かった。また、RMSE および最大誤差に対し 2 つのグループ間で両側 T 検定を行なった結果、RMSE と最大誤差がいずれも有意水準 0.01 を下回ったため、振動による方向提示を行なった方が目標経路に対する追従性が向上すると認められた。

### 3. 環境情報に基づく目標運動提示手法の構築

ゴルフのピンの位置といった環境情報から適切なパッティングを行うために最適な目標フォームを推定し、その目標フォームに近づくように運動提示を行う手法の検討を行った。本研究ではゴルフのパッティングを例にとり、ピンまでの距離・方向に応じて、パッティングのスウィング量・テンポ、スウィング方向を提示する手法を構築した。実際に図 6 に示すような振動デバイスを搭載したゴルフパットを製作し、適切なスウィングを教示する実験を行い、その有効性を確認した。

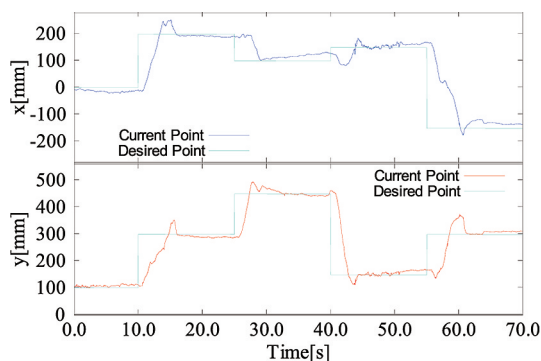


図 5 経路追従結果

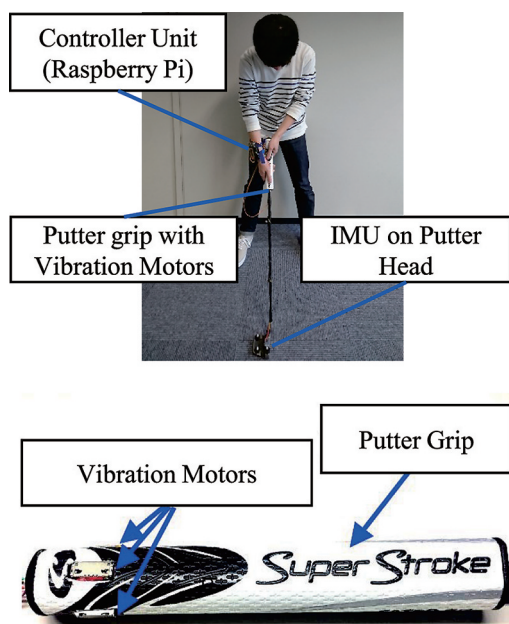


図6 ゴルフを例とした運動指示

また、手先の経路追従手法を拡張するとともに、振動を提示する場所を手首から足部にするにより、人間をある空間内で誘導する手法の検討を行った。これにより、スーパーマーケットや美術館・博物館等で人間を目的の場所に案内するシステムの開発や、認知能力の衰えた方のスポーツ支援などへの応用が期待される。

#### [今後の研究の方向、課題]

本研究は、振動刺激を用いて人間の体の一部を制御することを目指したものである。今後は、提案したデバイスおよび手法を発展させ、体全体の運動をガイドすることを目指す。また、こ

のような運動提示デバイスを長期間使用した場合に、運動習得が効率的に行うことが可能になるのか調査することが課題となる。

さらに提案する技術を用いて、より具体的な応用研究を行い、実用化を進める予定である。特に、高齢者や障がい者のスポーツ支援に注目し、究極の目標は、スポーツに最も重要な視覚や聴覚の感覚が衰えても健常者と同等もしくはそれ以上の運動を行うことを可能とする支援システムの開発である。

#### [成果の発表、論文等]

サラザルホセ, 村尾佳紀, 平田泰久, 小菅一弘, 複数の振動刺激を用いた運動方向呈示, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A1-14a4, 2016.

サラザルホセ, 村尾佳紀, 平田泰久, Conveying motion direction using phantom sensation, 第34回日本ロボット学会学術講演会, 2B2-06, 2016.

サラザルホセ, 岡部圭佑, 平田泰久, Conveying Direction using Multiple Simultaneous Phantom Sensation Vibrotactile Cues, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3A5-14, 2017.

岡部圭佑, サラザルホセ, 平田泰久, ファントムセンセーションに基づく振動刺激を利用した手先の経路追従, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 1B5-04, 2017.

Jose V. Salazar Lucas, Keisuke Okabe, Yoshiki Murao, and Yasuhisa Hirata, A Phantom-Sensation Based Paradigm for Continuous Vibrotactile Wrist Guidance in Two-Dimensional Space, IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS, VOL. 3, NO. 1, 2018.