

人間の運動時の床反力フィードバック装置に関する研究

研究代表者 大谷 拓也
(理工学術院総合研究所 次席研究員)

1. 研究課題

近年、ロボットの遠隔操作やVR体験のリアリティ向上のために、人間が作業に用いる手や腕に力や触感を再現する研究がさまざま行われている。足裏は手に次いで感覚が鋭敏であるといわれており、足裏に力や触感を再現できれば、VR体験として通常の路面だけでなく階段や草原、砂浜を歩く感触を感じるなど遠隔存在感の向上や、ロボットの足裏が受ける力を人間にリアルタイムに再現することでロボットの傾きを足裏で感じながらの全身での遠隔操作を行うなどへの応用が期待できる。しかし、足裏に対しては、手への触力覚提示技術に応用し主に振動を与えることによる触感再現は行われているが、人間の運動時には足裏が受けるものと同程度の力覚提示はあまり研究されていない。これは、人間の運動時には足裏は人間の体重を支える必要があるため、手に比べて受ける力が非常に大きくこれを再現する機構が必要となることが問題の一つとして挙げられる。また、手の場合は実際の作業では指を主に用いるため指先に刺激を与える手法が用いられるが、足裏の場合は全体が地面に接触し、歩行などの運動時にはその接触部が刻一刻と変化するため、力覚提示も複数点に設けなければCOP (Center of Pressure) の認識や歩行などの運動の判別が困難となる。

そこで、運動時の垂直床反力を再現可能な足底力覚提示装置を開発することを目的とする。

2. 主な研究成果

人間の歩行時の床反力を提示するため、以下を要求仕様とした。

- 人間の歩行時の足裏反力相当の力 (2000N) が発揮できる
- 人間の歩行時の足裏反力の変化と同等の速度 (500mm/s) で稼働できる
- 人の足裏 (サイズ目安23-29cm) 4箇所刺激を与えられるサイズに収まる

使用者の体重の影響を受けないよう、使用者が椅子に座った状態で装置の上に両足を置き足部と大腿部を固定する形態をとり (図1)、足裏の刺激受容器が集中している4か所の特徴点 (親指・拇指球・小指球・踵) をそれぞれ直動機構により押し力を印加する構造とする。また、各直動力再現ユニットは個々人の足サイズに合わせられるように、水平位置を調整可能とする。直動力再現ユニットは、人の歩行時に足裏にかかる力を印加できるよう、ブラシレスDCモータとボール

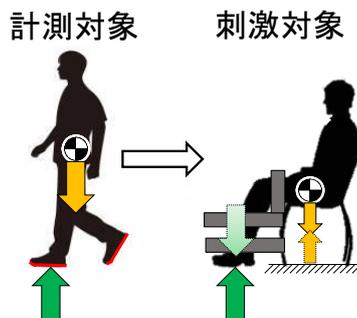
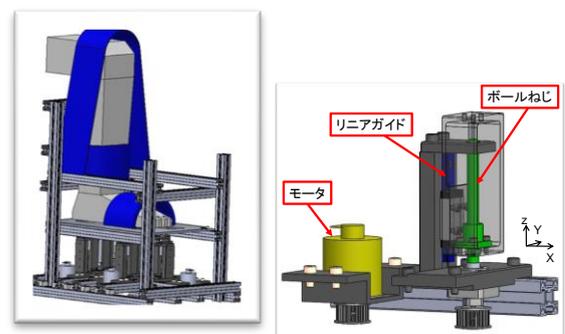


図1 装置概要



(a) 機構全体 (b) 直動力再現ユニット

図2 足底力覚提示装置 CAD

ねじを用いた直動機構を用いる (図2). 足裏と接触する部分には圧力センサを搭載し, 印加力を測定して力フィードバック制御を行うことで目標の印加力を実現する.

実験では, 人間の歩行時の鉛直床反力を4点で計測し, それを目標値として, 別の被験者に再現することとした. 実験は, 健康な男性被験者3名に対して行い, 装置は右脚に装着する. 具体的な実験の手順は, まず被験者が椅子に座った状態で足底力覚提示装置を装着し, 親指, 拇指球, 小指球, 踵を刺激できるよう刺激点の位置を調整する. 実験者の足底の親指, 拇指球, 小指球, 踵には圧力センサを装着しておき, 実験者が歩行しその際の足底反力と同等な刺激を被験者に与える. 実験結果として, 提示目標である計測足底反力および実際の提示足底反力を図3に示す. 実験者の歩行時に計測した力および被験者に印加した力は, それぞれ実験者, 被験者の体重で正規化している. 計測したものと提示したものを比較すると, 同等の足底反力が提示できていることが確認できる. 印加力が急速に減少した際に少し上がる挙動が見られるが, 瞬間的に足と提示装置が離れてしまうために挙動が安定しないと考えられるため, 改良を進める. また, 本実験ではセンサにより取得した計測足底反力にローパスフィルタをかけて提示したため, 周波数の高い振動は提示していない. 実用化を考えた際に, そもそも人間の足底感覚がどの程度の鋭敏であるかはまだ分かっていないため, 本装置を用いて検証を進められると考える. また, 個人ごとに足底各点への床反力の遷移は異なるが, 他人の足底反力を複数提示された場合違うものであると事前に伝えずとも, 異なるものであると認識できることも確認した. 歩行だけでなく, その他の動作についても検証を進める.

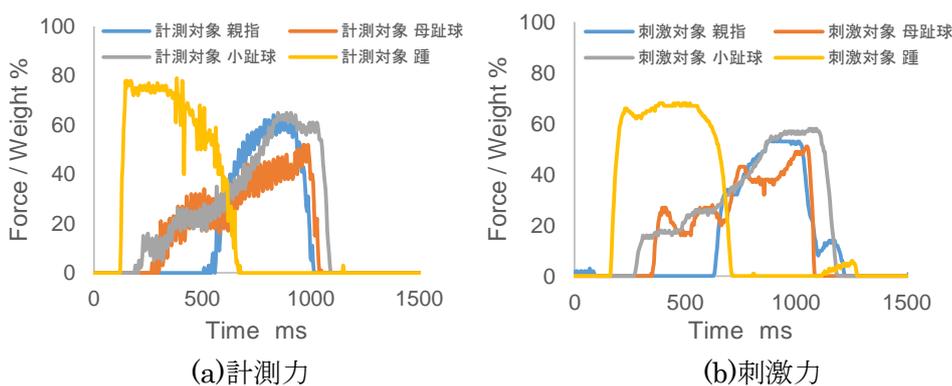


図3 歩行時床力提示実験結果

さらに広範な運動を対象とし, 足底力覚情報のみにより運動を識別できるかを検証した. 本実験では, 足底力覚情報のみにより, 動作の識別が可能かを検証した. 実験は, 健康な男性被験者7名に対して行った. 本実験で対象とする動作は, 前歩き, 後ろ歩き, その場足踏み, 足底接地跳躍, 爪先接地跳躍, 段差昇り, 片足スクワットの7種類とした. 足底接地跳躍・爪先接地跳躍では地面と接地する足, 段差昇りでは後脚, 片足スクワットでは立脚の足底力覚情報を用いる. 具体的な実験の手順は, まず被験者が椅子に座った状態で足底力覚提示装置を装着し, 親指, 拇指球, 小指球, 踵を刺激できるよう刺激点の位置を調整する. 被験者にアイマスクおよびヘッドフォンを装着し, 実験者の足底の親指, 拇指球, 小指球, 踵には圧力センサを装着しておき, 実験者が7種類のうちいずれかの動作を3回行うことで, 足底刺激を被験者に与える. 足底刺激を受ける被験者は7種類の運動のいずれかが行われることを事前に知っており, 自身が受けた足底刺激から実験者の動作を推定する. これを1被験者につき10回連続して行った. 試行の割り振りにおいては, 10回の内はじめての7回は, 各動作を1回ずつランダム

に行い、残り3回は7種類の動作のうちから3つをランダムに出題した。

実験結果として、被験者別の正答率および動作別の正答率をそれぞれ表1、表2に示す。被験者別に見ると最低でも60%以上の正答率となり足底力覚情報のみによりある程度の動作判別が可能である可能性が示唆された。動作別判別率について考察すると、前歩きおよび後ろ歩きについては100%、爪先接地跳躍・段差昇りについては90%と高い正答率が確認できた。これは、今回の7種類の動作のうち、刺激を与えた4点の力が順番に変化していくため特徴を識別しやすい動作であったためであると考えられる。前歩きや後ろ歩きに関しては、踵から爪先、爪先から踵のように足底内での圧力中心の移動が明確であり、段差登りや片脚跳躍は踵を接地せず、爪先接地跳躍は着地のため指や拇指球の床反力が大きい。

表 1: 被験者別正答率

被験者	正答率 %
A	60
B	70
C	80
D	60
E	90
F	80
G	90

表 2: 動差別正答率

動作	正答率 %
前歩き	100
後ろ歩き	100
その場足踏み	50
足底接地跳躍	45
爪先接地跳躍	90
段差昇り	90
片足スクワット	56

3. 共同研究者

高西 淳夫（創造理工学部・総合機械工学科・教授）

4. 研究業績

4.1 学術論文

“Robotic Ankle Mechanism Capable of Kicking While Jumping and Running and Adaptable to Change in Running Speed,” Hiroki Mineshita, Takuya Otani, Kenji Hashimoto, Masanori Sakaguchi, Yasuo Kawakami, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi, Proceedings of the IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2019), pp. 529-534, Tront, Canada, October, 2019.

“Construction of Automatic Scoring System to Support Objective Evaluation of Clinical Skills in Medical Education,” Yurina Sugamiya, Takuya Otani, Ryu Nakadate, and Atsuo Takanishi, Proceedings of the 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), pp. 4177-4181, Berlin, Germany, July, 2019.

“Experimental Validation of High-Efficiency Hydraulic Direct-Drive System for a Biped Humanoid Robot—Comparison with Valve-Based Control System,” Juri Shimizu, Takuya Otani, Hideki Mizukami, Kenji Hashimoto and Atsuo Takanishi, Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2019), pp. 9453-9458, May, 2019.

4.2 総説・著書

4.3 招待講演

4.4 受賞・表彰

4.5 学会および社会的活動

“足底力覚提示による運動認識に関する検討,” 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会予稿集, 2B-02, 2019 年 9 月.

“直動機構を用いた足底力覚提示装置の開発,” 第 37 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3E1-04, 2019 年 9 月.

日本ロボット学会会誌編集委員会

第 37 回日本ロボット学会学術講演会 事務局長

5. 研究活動の課題と展望

その場足踏み, 足底接地跳躍, 片足スクワットに関しては正答率が低かった. 片足スクワットに関しては全動作中唯一実験時間中ずっと立脚し続ける動作であるという特徴があるにも関わらず正答率は高くない. これは, その場足踏みや足底接地跳躍, 片足スクワットはそもそも運動として日常的に行うものではないためであると考えられる. 自身の動作時のイメージがはっきりとしていない運動は比較が困難である可能性があり, 実際に, これら 3 つの動作は 3 回提示した際に, 他の動作に比べて各回に大きな違いがある. また個々人によって所作が異なる可能性もあるので推定精度が下がることが考えられる. 所作が各人で異なるとすれば, 今回の実験者が提示した 7 種の運動のうち, 一部は一般的だが, 残りはそもそも一般的でないことも考えられるため, 異なる実験者の運動時のデータを提示することで, 検証を進める.

さらに, VR 体験やロボット操作などの具体的なアプリケーションでの活用可能性の実証を進める.