

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289057

研究課題名(和文) 身体と環境のダイナミックなインピーダンス調節に関わる全身触覚メカニズムの検証

研究課題名(英文) Investigations on Human Haptic Mechanism for Impedance Adjustments of Whole Body in Dynamic Environmental Interactions

研究代表者

昆陽 雅司 (Konyo, Masashi)

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：20400301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトのダイナミックな運動を可能としている筋骨格系によるインピーダンス制御に、全身を伝播する高周波振動の触覚が関与していること調査するために、下肢運動を中心に運動中のインピーダンスおよび高周波振動を計測する手法を開発した。ペダリング運動中に環境負荷に応じてヒトが足先インピーダンスを調整していることを実証した。また、歩行運動と下肢を伝播する振動の関係を簡易に記録する新手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：To investigate contributions of the high-frequency vibrations propagated in a human whole body and the related haptic mechanisms to realize dynamic body movement by impedance control of the musculoskeletal system, we develop an estimation method of the impedance of legs during lower limb exercises and a measurement method of the propagated vibration. We suggested that humans adjust the impedance of the feet during pedaling exercises to adopt environmental load changes. We also develop a novel method to record the relationship between the gait motions and propagated vibrations easily.

研究分野：ロボティクス・メカトロニクス

キーワード：人間機械協調

1. 研究開始当初の背景

ヒトの筋骨格系からなる運動機構は、位置や力の制御だけでなく、身体の剛性、粘性などの機械インピーダンスを環境のインピーダンスに合わせて調節することにより、俊敏な運動や、エネルギー効率の向上、安定性の向上を実現している^①。このようなインピーダンス調節は、歩行や走行など環境との衝突を伴う高速でかつ、ロバストな運動の獲得には不可欠な機能である。

しかし、インピーダンス調節がどのような知覚情報に基づいて獲得されるかは、深く議論されていない。一般的には、筋の伸びや力の知覚に關与する深部感覚（筋や腱に存在する受容器）が利用されると考えられてきた。一方、近年、皮膚感覚（皮膚や関節部に存在する受容器）もインピーダンスの知覚に関わりうることを示す結果が報告されている。例えば、触覚ディスプレイの研究では、衝突時発生する高周波の振動情報が、材質の硬さの知覚に關与することが報告されている^②。また、研究代表者らはインピーダンスの知覚に關しては、運動の特定のタイミングで皮膚への振動刺激を増減させることで、身体に加わる力覚として、慣性と粘性の知覚が生じることを実証した。

2. 研究の目的

ヒトのダイナミックな運動を可能としている筋骨格系によるインピーダンス制御に、全身を伝播する高周波振動の触覚が關与していることを実証することを目的とする。具体的には、上肢、または下肢の運動中に関節部に振動刺激を加え、身体のインピーダンス調節に影響を及ぼすことを調査する。そのために、従来、直接評価することが難しかった衝突を伴う高速な運動のインピーダンス調節機能を、1) 可変インピーダンス介在機構による振動現象と運動への影響の調査、2) ハプティックシミュレータによるインピーダンス調節タスクの学習過程の調査、により総合的に実証する。これまで未知であったダイナミックな運動の調整機能に關わる触覚の役割を明らかにすることで、革新的な運動評価技術や運動サポート技術に繋がる新しい学術パラダイムを開拓する。

3. 研究の方法

(1) インピーダンス介在機構を用いたインピーダンス調節評価

身体と環境の間に、可変インピーダンス機構を介在させることで、調整するインピーダンス条件をコントロールする。実際に衝突運動を行うことで、身体の振動情報を計測することが可能であり、機械インピーダンスと振動情報の関係を評価しやすい。ただし、直接インピーダンスを評価することは難しく、力センサや筋電信号などで運動への影響を間接的に評価する。

(2) ハプティックシミュレータを用いたインピーダンス調節評価

運動の自由度を限定した力覚呈示装置により調整するインピーダンス条件をコントロールする。力覚呈示装置では、衝突現象を表現することが困難であるため、(1)で明らかにする衝突振動を振動子によって別途加振することで疑似的な衝突運動を再現する。シミュレータにすることで、複数の条件を繰り返し実験することが可能になり、学習過程を評価しやすくする。

上記の計画に従い研究を進めた結果、下肢運動のインピーダンス調整を実証する上で解決すべき技術課題である、下肢運動中のインピーダンス評価および、歩行中の歩行周期と下肢振動記録技術について注力することとなった。以下では、主たる成果である(1)ペダリング運動を用いたハプティックシミュレータとインピーダンス推定手法の開発と実証、(2)歩行運動と高周波振動の関係の計測手法について報告を行う。

4. 研究成果

(1) ペダリング運動を用いたハプティックシミュレータとインピーダンス推定手法の開発と実証

① 背景と目的

これまでインピーダンス計測手法としては、身体のある部位に強制変位（摂動）を与え、その時の発生力と変位の関係より剛性等を推定する手法が主に用いられてきた^③。上肢において摂動を用いた手法は多数提案されている^④。一方、下肢のインピーダンス計測に關する研究は少なく、下肢運動は自由度が大きく、また運動範囲も広いので計測装置の大型化や装置着脱の煩雑化、解析が困難になるなどの問題が生じる。

そこで、簡便なインピーダンス計測手法を実現するためにペダリング運動に着目したハプティックシミュレータを開発した。ペダリング運動では、下肢の運動は1自由度の回転運動となり、特別な拘束を必要とせず解析を容易化できる。また、クランクのインピーダンス特性を制御することでインピーダンス調整を促すための環境負荷の調整が可能である。

本研究では、トルク外乱を用いたペダリング運動中の足先インピーダンスの推定手法を提案するとともに、環境負荷の変化に対して、足先のインピーダンス調整が実際に起こることを実証した。

② ペダリング装置を用いたハプティックシミュレータとインピーダンス推定手法

開発したハプティックシミュレータの外観を図1に示す。インピーダンスを推定するにあたり、クランク角度は駆動部に搭載しているエンコーダにより検出し、下肢の姿勢やペダルの角度などはモーションキャプチャ

システム、ペダル踏力はフォースプレート（テック技販社製，M3D）によって計測する．負荷環境の制御や与える振動はタイミングベルトによってクランク回転軸とつながっている AC サーボモータによって制御する．

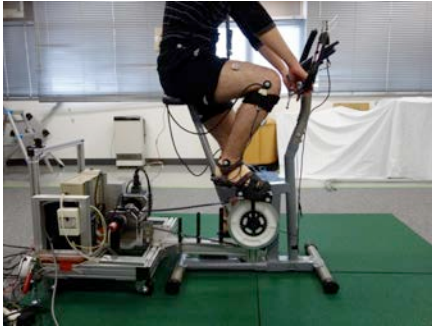


図1：下肢用ハプティックシミュレータ

インピーダンス推定手法は足先に集中定数モデルを想定し，トルク振動によって生じた変位，力データを計測し，モデル式に対し最小二乗法を使用することでインピーダンスパラメータを導出することで実現する．ペダリング運動中のクランク回転軸周りの足先の運動特性は，慣性・粘性・剛性特性を有する集中定数モデルを用いて表わされる．振動は微小時間によって与えられるので，インピーダンスパラメータは一定であると仮定することで振動による変化分のみの定式化することができる．

本研究では各身体部位の重力や慣性の影響を，図2で示す多関節リンクモデルで下肢を表現し，両足によるクランク回転軸周りのインピーダンス特性を推定する手法を提案した．トルクを算出することで，各関節のインピーダンス特性を推定することが可能となる．ペダリング運動中の各関節トルクのうち慣性および遠心力・コリオリ力項，重力項を姿勢の状態より算出するために各リンクの質量や慣性モーメント，重心位置などのパラメータを被験者の各関節に取り付けたマーカー間距離より計測し，人体モデルのデータベースより各リンクの質量と部分長に対する重心位置を求めた．

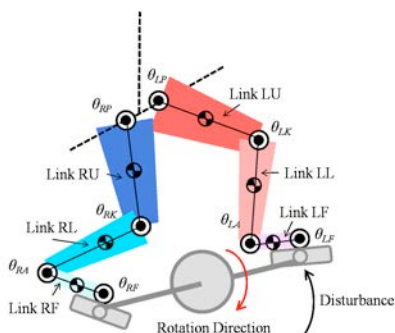


図2：ペダリング運動の多関節リンクモデル

③ 周期運動中のインピーダンス特性

ペダリング運動の1周期分の各点のインピーダンス特性を推定した．被験者は20代の健常者の男性である．ペダリング運動中の姿

勢は座位とし，サドル高は立位姿勢時の大転子の高さに調整し，つま先はペダルに固定した．また，クランク角度は右ペダルを基準とし，ペダル上死点を0 deg，1回転して再びペダルが上死点に来たときを360 degとし，これをペダリング運動の1周期とした．ペダリング運動は，周期全体において40 rpmの一定速度となるように漕ぐことを被験者に指示した．22.5 deg刻みの16点において100 ms，5.0 Nmのトルクを振動としてランダムに与えた．また，ペダリング装置の負荷としてインピーダンスパラメータを，慣性 $I_p = 0.2$ [Nm/(rad/s²)]，粘性は $C_p = 1.5, 2.0, 2.5$ [Nm/(rad/s)]と変化させた．

実験により計測されたインピーダンスパラメータを図3に示す．それぞれ左から $C_p = 1.5, 2.0, 2.5$ の際の，剛性（上段）および粘性（下段）を示したものである．赤線は5回の試行の平均値である．

剛性については右脚踏み込み時の初期（22.5 - 45 [deg]）は大きく，45 - 90 [deg]にかけて小さくなるという傾向が見られた．

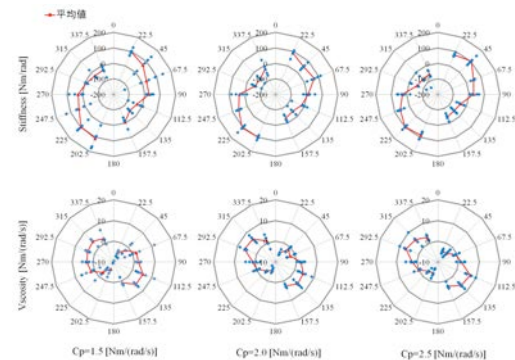


図3：周期運動中のインピーダンス推定の例

筋剛性の値は筋活動の活性化によって大きくなることが知られており，推定された剛性の値は左右脚とも踏み込み初期に大きな筋力を発生して踏力を加えていることと矛盾しない．粘性についても，環境負荷の変化に関わらず，右脚踏み込み時・左足踏み込み時に対称となる傾向がある．このようにランダム提示にもかかわらず，推定されたインピーダンスは運動中に一定傾向で変化しており，左右の脚での対称性もみられたことから，妥当なインピーダンス推定が行えることが示唆された．

④ 環境負荷の変化に対する下肢インピーダンスの変化の検証

前節と同様の実験装置を用いて，ペダリング中の特定の角度で周期的に環境負荷を変化させることで，ヒトはその環境に対応するために，下肢のインピーダンスを調整すると考えられる．このような現象が提案するインピーダンス推定法で定量的に評価できるかを検証した．図4に(a)一定負荷と(b)周期的に高負荷（90-135 degと270-315 degの領域）を変化させた場合の条件を示す．被験者は20代の健常者の男性3名である．被験

者には周期全体において 40 rpm の一定速度で漕ぐことを指示した。

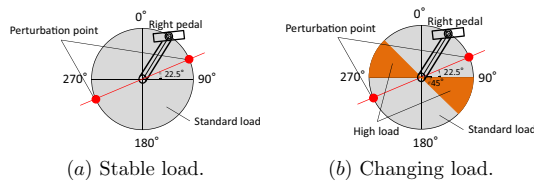


図 4：環境負荷の変化

図 5 に各被験者の推定されたインピーダンスの剛性の変化の結果を示す。この結果より、すべての被験者において、高負荷が加えられる直前に、剛性が減少することが確認できる。また、粘性に関しては、同様にすべての被験者において平均値が増加する傾向が確認された。

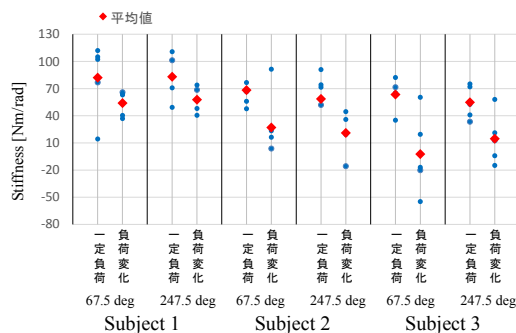


図 5：環境負荷へのインピーダンス調整の結果

以上の結果より、ハプティックシミュレータにより、下肢の運動中のインピーダンスを計測可能なこと、および環境負荷の変化に対して、ヒトは実際に下肢のインピーダンスを変化していることを実証した。

(2) 歩行運動と高周波振動の関係の計測手法

① 背景と目的

歩行時に発生する高周波振動を計測するためには、対応する運動や床反力を記録する必要がある。しかし、広域や階段での歩行を許しながら、歩行速度や歩行周期などを厳密に記録する手段は一般に普及していない。また、IMU 内蔵の専用靴や、インソール型の足裏センサを使用すると、伝播する振動自体に影響が生じるため、一般の靴を履いた際の振動を計測することができなくなる。

一方、デッドレコニングと呼ばれる手法は、計測対象に取り付けられた加速度センサやジャイロセンサの情報に基づき位置・動作推定を行うため、範囲を限定されず様々な環境での計測を可能とする。さらに加速度・角速度から歩容や歩行周期等を含む情報を計測することが可能となるため、歩行・走行解析に有用と考えられるが、位置（歩幅）推定には累積誤差を補正するための手法が必要となる。

そこで、研究代表者らが提案した足首に伝播する高周波振動成分を利用した歩行周期

推定法を利用して、従来のデッドレコニングを高精度化する手法の開発し、簡易に歩行運動と振動情報の組み合わせを記録するためのシステムを提案する。

② 歩行軌跡推定手法

ミッドスタンス期において、足裏は地面と完全に接触している状態となり、足裏および足首関節の対地速度は 0 となる。従来手法^⑤では、足裏センサを用いて歩行周期を推定し、計測デバイス装着位置の対地速度も 0 と近似することで、カルマンフィルタ (KF) による補正を行う。新たに提案するモデルでは、図 6 に示すように、足関節上部に設置した IMU とピエゾセンサによる高周波振動を計測し、歩行周期を推定する手法を提案した。

また、IMU の設置場所の補正を行うために、下腿部が足首関節を中心とした回転運動を行うことを利用し、推定した速度を観測値として補正を行う手法を提案した。さらに、KF アルゴリズムについては、文献^⑥を参考に実装した

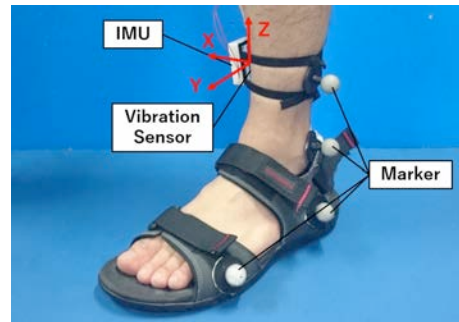


図 6：歩行軌跡の簡易記録システム

③ 運動の推定結果

複数のフットウェアに対して、異なる歩行速度や歩幅を与え、提案手法が効果的に機能するかを検証し、歩幅や移動距離に対して定量的な評価を行う。歩行速度の条件として、図 7 上段の図に示すように、断続的に歩行者に歩行速度や歩幅を変更するように指定し、提案手法によって変化を検出できるかを検証した。

図 7 に歩行速度を 10 m 毎に変化させたときの、ステップ毎の推定速度を平均して算出した歩行速度の推定結果を示す。横軸は、そのステップまでに移動した推定距離を示し、縦軸はプロットされた各点の歩行速度を表している。各ステップにおける推定速度は実験条件の従い、10 m 毎に上昇し、30 m から減少し始めている様子が見て取れる。フットウェアの種類により、推定速度に多少の違いは確認できるが、全体的にみられる傾向に歩幅変化時と同様、大きな差はみられない。

また、移動距離について 1% 程度の誤差で推定することが可能である。また、一歩一歩の歩幅についても、それらを足し合わせた移動距離が高精度に推定できていることから間接的にはあるが同等の精度で推定できて

いることが確認できた。

以上の歩行運動の推定手法の確立により、下肢に伝播する振動情報とそれによって発生する運動の関係を容易に分析することが可能となる。

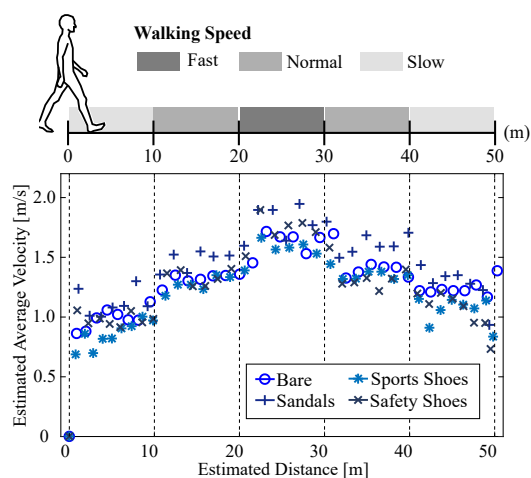


図 7: 歩行速度と移動距離の推定

<引用文献>

- ① E. Burdet, R. Osu, D. W. Franklin, T. E. Milner, and M. Kawato, The central nervous system stabilizes unstable dynamics by learning optimal impedance, *Nature*, 414(6862), 446-449, 2001.
- ② A.M. Okamura, M.R. Cutkosky, J.T. Dennerlein, Reality-based models for vibration feedback in virtual environments. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 6(3), 245-252, 2001.
- ③ F.A. Mussa-Ivaldi, N. Hogan, and E. Bizzi, Neural, mechanical, and geometric factors subserving arm posture in humans, *J. Neuroscience*, 5(10), 2732-2743, 1985.
- ④ 辻 敏夫, 後藤 和弘, 伊藤宏司, 長町 三生, 姿勢維持中の人間の足先インピーダンスの推定, 計測自動制御学会論文集, 30(3), 319-328, 1994.
- ⑤ Ozkan Bebek, et al., Personal Navigation via Shoe Mounted Inertial Measurement Units, *IEEE/RSJ Intel. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1052-1058, 2010.
- ⑥ Carl Fischer, et al., Tutorial: Implementing a Pedestrian Tracker Using Inertial Sensors, *IEEE Pervasive Computing*, 12(2), pp.17-27, 2013.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Tomohiro Miyazaki, Fumi Seto, Masashi Konyo and Satoshi Tadokoro, Evaluating human motor function of lower limbs in periodic motion during pedaling exercise, 2015 *IEEE/RSJ Intel. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 査読有, pp. 2216-2223, 2015.
doi:10.1109/IROS.2015.7353674.
- ② Shuhei Kadoya, Naohisa Nagaya, Masashi Konyo and Satoshi Tadokoro, A precise gait phase detection based on high-frequency vibration on lower limbs, 2014 *IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, 査読有, pp. 1852-1857, 2014.
doi:10.1109/ICRA.2014.6907102.

[学会発表] (計 6 件)

- ① 加藤 佳大, 足首における慣性と振動計測を利用した歩行運動の簡易ロギング手法の提案, 第 17 回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, 2N2-5, 札幌, 2016 年 12 月 15-17 日.
- ② 加藤佳大, 人体下肢振動を利用した歩行者の自己位置推定の補正, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 横浜, 2016 年 6 月 8-11 日.
- ③ 宮崎友裕, ペダリング運動中における負荷変化提示による下肢運動機能評価, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'15 講演論文集 (ROBOMECH2015), 京都, 2015 年 5 月 17-19 日.
- ④ 宮崎友裕, ペダリング運動時の姿勢変化による下肢インピーダンスの推定, 第 15 回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 (SI2014), 東京都, 2014 年 12 月 15-17 日.
- ⑤ 門谷周平, 歩行時の下肢に伝播する振動を用いた踵接地とつま先離地の検出, 第 15 回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 (SI2014), 東京都, 2014 年 12 月 15-17 日.
- ⑥ 宮崎友裕, 人体モデルを用いたペダリング運動時の下肢インピーダンス推定, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 富山市, 2014 年 5 月 25-29 日.

[その他]

- ① 昆陽雅司, 招待講演: 超高齢化社会を迎え撃つ! ~触覚フィードバック技術があなたを元気にする~, 東京オトナ大学, 東京都, 2016 年 11 月 20 日.
- ② 昆陽雅司, 招待講演: VR と体感インタフェースのための運動計測, MAC3D セミナー2016, 東京都, 2016 年 7 月 15 日.
- ③ 昆陽雅司, 招待講演: 触覚のメガネを創るには ~皮膚感覚ディスプレイの新展

開～，日本顎口腔機能学会 第 57 回学術大会特別講演，仙台市，2016 年 10 月 1 日

- ④ 門谷周平ら，SI2014 優秀講演賞（第 15 回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発表論文「歩行時の下肢に伝播する振動を用いた踵接地とつま先離地の検出」に対して），2014 年 12 月 15 日，東京都。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

昆陽 雅司 (KONYO, Masashi)

東北大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：20400301