

平成 26 年 4 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24800038

研究課題名(和文) ヒト静止立位姿勢における足および股関節の協調運動制御

研究課題名(英文) Coordinated Motion Control of Ankle and Hip Joints during Quiet Standing

研究代表者

鈴木 康之 (Suzuki, Yasuyuki)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：30631874

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではヒト静止立位時における神経制御戦略を明らかにすることを目的とし、健常者およびパーキンソン病患者の姿勢動揺計測実験、および数理モデルのシミュレーションを行った。計測実験により、静止立位時にける股関節が大変柔軟であること、また数値シミュレーションにより、その股関節の柔軟性が姿勢維持に重要な役割を果たすことを明らかにした。健常者とパーキンソン病患者の姿勢動揺の差異より、パーキンソン病患者の姿勢の不安定化が、健常者の柔軟な姿勢制御メカニズムの崩壊によって引き起こされている可能性が示唆された。ここで得られた知見は、パーキンソン病重症度の定量的な診断指標の構築などへ応用できることが期待される。

研究成果の概要(英文)：With the aim of understanding about neural control strategy for human quiet standing, we conducted metering experiment of postural sway for healthy subject and Parkinson's disease patient, and mathematical simulation of human model. We clarified that hip joint is moving during quiet standing posture from the metering experiment for healthy subject, and the hip motion plays an important role to keep the quiet standing posture from the mathematical simulation. By comparison in dynamics of healthy subject and Parkinson's disease patient during standing posture, it is indicated that destabilization of standing posture of Parkinson's disease patient arise from crash of flexible control mechanism which is shown in healthy subject.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：医用生体工学・生体材料学

キーワード：姿勢制御 協調運動 関節の柔軟性

1. 研究開始当初の背景

ヒト静止立位姿勢は、機械力学的に不安定である。ヒトは進化の過程においてこの立位姿勢を獲得したが、その制御メカニズムは未だ十分な理解がなされていない。近年の詳細な計測実験により、静止立位時における身体の各関節は固く維持されているのではなく、柔軟に運動していることが明らかとされている。さらに、関節間の協調運動が重要な役割を果たすことが明らかとされつつある。関節間の協調運動に見られる柔軟な神経制御メカニズムを明らかとすることにより、例えば姿勢の不安定化が見られるパーキンソン病などに対する臨床応用が期待できる。

2. 研究の目的

私は、時間遅れを伴う神経フィードバック制御による静止立位姿勢の安定化に関して、「神経系は足および股関節に対する能動的フィードバックトルクを特定の協調的時間パターンで活性化および不活性化させることで静止立位を柔軟かつロバストに安定化している」との仮説を提案している。また同時に、「パーキンソン病における立位姿勢障害の一要因は足関節と股関節の協調運動障害である」との仮説を提案している。本研究では、健常者ならびにパーキンソン病患者の姿勢動揺計測実験を通して、これらの仮説の実験的検証を目的とする。

3. 研究の方法

健常被験者に対して、3次元モーションキャプチャシステム、床反力系、無線筋電システムを統合した動作解析システム上での姿勢動揺計測実験を行った。また、パーキンソン病患者に対して、床反力系、筋電計測システムを統合した動作解析システム上での姿勢動揺計測実験を行った。

計算機上に、ヒト身体の二重振子モデルを構築し、神経制御に対する姿勢応答の数値シミュレーションを行った。また、構築したモデルを用いてシステムの安定性解析、および立位姿勢を柔軟かつロバストに維持することが可能な神経制御メカニズムを構築した。

4. 研究成果

健常者を対象とした姿勢動揺計測実験により、股関節の運動が足関節の運動と同程度に大きいことが明らかとされつつある。この知見は、先行研究で得られた知見に一致する。さらにこれを詳細に解析することにより、足関節および股関節の運動にある規則性が見られることが明らかにされつつある。先行研究において、関節間の協調運動は、例えば身体の質量中心位置が一定であることを基準とする Uncontrolled Manifold に沿ったものである、などと考えられてきた。本研究で得られた結果には、確かにそのような側面も含まれるが、これに加えて以下に示す数値シミュレーションから得られる知見と融合する

ことにより、今後、静止立位姿勢の神経制御メカニズムに関する新たな知見が得られることが期待できる。

ヒト静止立位姿勢の倒立二重振子モデルを構築し、解析および数値シミュレーションを行うことで、ヒト静止立位時の神経制御メカニズムを探った。本研究では、神経系を介したフィードバック経路に時間遅れを含めることにより、モデルを実際のヒト静止立位姿勢に近づけた。

我々の研究グループでは、神経系の立位姿勢維持の戦略として「中枢神経系は制御を行う場合と行わない場合を切り替えることにより、姿勢制御に間欠的に介入する」とする間欠制御仮説を提案している。この仮説において、中枢神経系が制御を行う場合と行わない場合の切り替えは、状態空間内に存在する安定多様体(ならびに不安定多様体)と状態点の空間的配置によって決定されるところに特徴がある。この特徴を活かした間欠制御により、本研究では、大きな時間遅れを含む倒立二重振子モデルの姿勢維持に成功した。この間欠制御では、股関節の受動的弾性係数が異なる値であっても、姿勢を維持することが可能である。

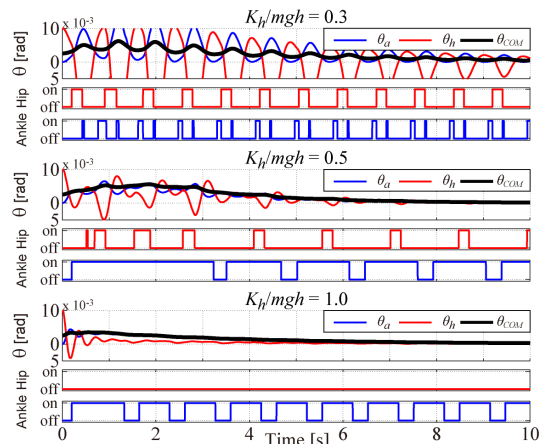


図1. 間欠的神経フィードバック制御によって姿勢維持された倒立二重振子モデルのダイナミクス

また、股関節の受動的弾性係数が異なる場合、異なる神経制御戦略が創発することを明らかにした。股関節の受動的弾性係数が小さな値である時、股関節に作用する能動的フィードバック制御トルクの果たす役割が重要であり、この制御戦略は Hip Strategy と呼ぶことができる。これに対し、股関節の受動的弾性係数の値が大きくなるにしたがって、足関節に作用する能動的フィードバック制御トルクの果たす役割が大きくなり、図1 $K_h/mgh=1.0$ に見られるように、足関節の能動的フィードバック制御を間欠的に切り替えることにより、立位姿勢を維持できることが明らかとなった。この神経制御戦略は、Ankle Strategy と呼べるであろう。

さらに、様々なパラメータのセットに対して安定性を解析することにより、パラメータ空間において姿勢維持を実現することが可能な領域を調べた。これを持続的な比例微分制御(PD 制御)によって姿勢維持が実現されるパラメータ領域と比較することにより、我々が構築した間欠制御が持続制御よりもパラメータの変化に対してロバストに姿勢を維持できることを示した。

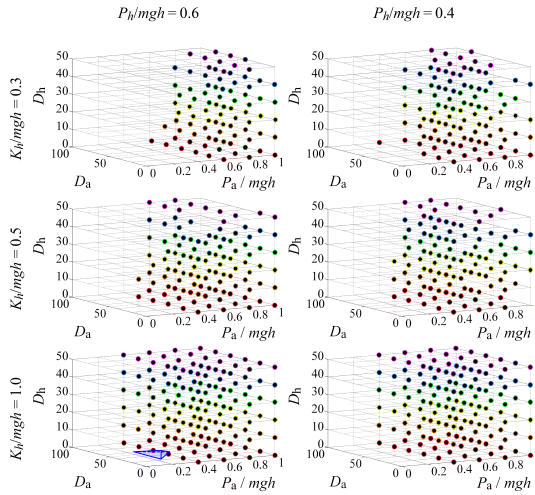


図2. 間欠的フィードバック制御および持続的フィードバック制御によって姿勢維持が実現されるパラメータ領域。ドットは間欠制御によって姿勢維持されるパラメータを示す。青色で囲まれた領域は、持続制御で安定なパラメータを示す。

パーキンソン病患者の姿勢動揺計測実験から得られるデータと健常者の姿勢動揺計測実験から得られるデータを比較することにより、パーキンソン病患者の静止立位時における姿勢制御メカニズムと健常者の静止立位時における制御メカニズムの差異を探った。パーキンソン病患者と健常者の間では、筋活動パターンに差異が大きくみられる傾向がある。姿勢動揺計測実験を今後も継続的に実施することにより、本研究で得られた知見を発展させ、パーキンソン病重症度の診断指標の構築など、臨床応用が期待できる。

本研究で得られた姿勢制御戦略に対する知見は、他の分野への応用も可能であると考えられる。我々の研究グループが提案する間欠的フィードバック制御は、状態空間内に存在するサドル型の不安定性を巧みに利用した制御手法である。これは、状態空間内に安定多様体が存在し、また状態点はその安定多様体から離れた際に、他のモデルにスイッチすることによって、その安定多様体存在空間に漸近させられるようなハイブリッドシステムであれば、巧みに利用することが可能な制御手法である。この応用課題として、前立腺癌の間欠的アンドロゲン抑制治療に対し、我々が提案する制御手法の応用を試みた。従来の間欠的アンドロゲン抑制治療は、アンドロゲン由来のバイオマーカーである Prostate

Specific Antigen (PSA) 値に上限および下限を設定し、それを基準としてアンドロゲン抑制の on と off を切り替えるというものである。間欠的アンドロゲン抑制治療時における前立腺癌細胞およびアンドロゲンダイナミクスの数理モデルが先行研究において構築されており、本研究ではその数理モデルに、我々の手法が有効に作用するための条件が当てはまることを見出した。そこで、我々が提案する間欠的制御の応用例として新たな前立腺癌の間欠的アンドロゲン抑制療法として Region Dividing Method を提案し、Region Dividing Method であれば、従来法に比べてより効果的に前立腺癌細胞を抑制できることを示した。

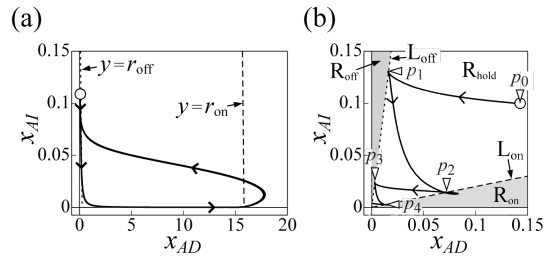


図3. 間欠的アンドロゲン治療法による前立腺癌の抑制。(a) 従来法。(b) ヒト静止立位姿勢の倒立二重振り子モデルの姿勢維持を実現した方法をアンドロゲン治療法に応用した方法 (Region Dividing Method)。

さらに、様々なパラメータセットに対して安定性を解析することにより、本研究で提案した方法が前立腺癌のアンドロゲン抑制治療においても、パラメータの変化に対してロバストに作用することを明らかにした。

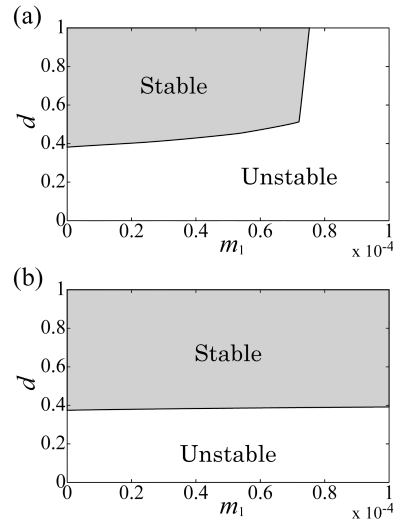


図4. 間欠的アンドロゲン治療法の安定領域。(a) 従来法によって安定化されるパラメータ領域。(b) Region Dividing Method によって安定化されるパラメータ領域。

このように本研究で用いた状態空間内における安定多様体を利用した制御法は、様々な分野に応用できる可能性がある。

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 5件)

鈴木康之, 酒井大地, 野村泰伸, 前立腺癌間欠的アンドロゲン抑制治療法における新しい治療プロトコルの提案, 統計数理研究所共同研究レポート, 査読無, 312巻, 2014, 69-79

山本智久, 鈴木康之, 清野健, 野村泰伸, ヒト静止立位時重心動揺パターンの個人的特異性と横断の普遍性, 統計数理研究所共同研究レポート, 査読無, 312巻, 2014, 10-19

Yasuyuki Suzuki, Daichi Sakai, Taishin Nomura, Yoshito Hirata, Kazuyuki Aihara, A new protocol for intermittent androgen suppression therapy of prostate cancer with unstable saddle-point dynamics, Journal of Theoretical Biology, 査読有, 350巻, 2014, 1-16

Naoya Yoshikawa, Yasuyuki Suzuki, Ken Kiyono, Taishin Nomura, A Theoretical Study on a Computational Algorithm for Human Posture Estimation Based on Motion Capture of Small Number of Markers, Advanced Biomedical Engineering, 査読有, 2巻, 2013, 107-116

鈴木康之, 間欠的制御によるヒト静止立位二重振子モデルの安定化, 統計数理研究所共同研究レポート, 査読無, 294巻, 2013, 1-15

[学会発表](計 4件)

Yasuyuki Suzuki, Taishin Nomura, An Intermittent Control of a Double Inverted Pendulum: Relationship between Control Strategy and Hip Joint Stiffness, JSST 2013 International Conference on Simulation Technology

Toshiyuki Hatta, Tomohisa Yamamoto, Yasuyuki Suzuki, Ken Kiyono, Taishin Nomura, Marker-less Motion Capture System with Kinect and Foot Pressure Distribution Measurement, 35th Annual International Conference of the IEEE EMBS, Osaka, Japan

Yasuyuki Suzuki, Taishin Nomura, Maura Casadio, Pietro Morasso, An Intermittent Control of a Double Inverted Pendulum: Roles of Hip Motions Examined with Human Postural Sway, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (DS2013), Snowbird, Utah, USA

Taishin Nomura, Yasuyuki Suzuki,

Tomohisa Yamamoto, Ken Kiyono, Pietro Morasso, Bifurcation Analysis An Intermittent Control Model During Human Quiet Stance: A Possible Mechanism of Postural Sway, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (DS2013), Snowbird, Utah, USA

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

[その他]

6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 康之 (SUZUKI Yasuyuki)

大阪大学 大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号: 30631874