

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289129

研究課題名(和文) 身体運動の変動性に着目した協調制御モデルの構築と実験的検証

研究課題名(英文) A Study of Coordinated Control Model Based on the Variability of Physical Movements

研究代表者

宇野 洋二 (Uno, Yoji)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：10203572

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：人間の身体運動では多くの関節が互いに協調して、調和のとれた巧みな動きが実現されている。本研究課題では、システムの冗長性と運動の多様性という観点から、運動協調のメカニズムの解明をめざした。特に、多関節の運動軌道の変動性に着目し、人が運動タスクを実行しているときの関節角のばらつきを定量的に解析した。この運動解析に基づいて制御メカニズムを考察し、各関節の動きが多少ばらついていても、全体として協調的に動作してタスクを達成できる制御モデルを考案した。さらに、身体揺動と外乱付加の可能な実験装置を設計・構築し、人の運動計測実験とロボットの実機実験により、協調制御モデルの検証を行った。

研究成果の概要(英文)：The human can perform dexterous motion tasks coordinating redundant multi-joints of his body. We approached the control mechanism of human physical movements from the viewpoint of a computational theory. Human body movements in various tasks were mathematically analyzed focused on the variability of joint trajectories. In addition, a synergistic control model allowing task-irrelevant variability was proposed on the basis of the redundancy of systems. The validity and efficiency of the proposed model were confirmed by the measurement experiments of human physical movements and the control experiments of actual robots.

研究分野：計算論的神経科学

キーワード：身体運動 関節間協調 協調制御 冗長性 UCM解析 バランス制御 ヒューマノイド 多関節アーム

1. 研究開始当初の背景

人間の身体は複雑な筋骨格から成る多自由度系であるが、個々の筋がばらばらに働くのではなく、神経支配による協調的なメカニズムが存在し、全体として調和のとれた動きが実現されている。人の身体の高自由度運動では、試行のたびに各関節（運動要素）がばらついたとしても、運動タスク達成のために特定の変数（性能変数：手先位置や重心など）に対しては、その変動が抑えられるように身体が制御されていると考えられる。逆に言えば、運動タスクの達成に影響を及ぼさないような運動要素（関節角）のばらつきは許容するのである。このような視点から、本研究では、非制御多様体（UnControlled Manifold: UCM）解析（Scholz & Schönner, 1999）に基づいて、人が身体の高多くの関節を巧みに協調させている仕組みにアプローチする。

UCM 解析では、多関節運動の変動性（variability）に着目し、計測された関節角の分散をタスクの達成に影響を与える成分（ORT 成分と呼ぶ）と影響を与えない成分（UCM 成分と呼ぶ）とに分けて、ORT 成分が UCM 成分より十分に小さければ、身体の高関節は協調していると判定する。

2. 研究の目的

上記の背景の下で、本研究課題では「システムの冗長性と身体運動の多様性」という観点から、各関節の動きが試行毎に多少ばらついていても、全体として協調的に動作してタスクを達成する制御モデルの構築を目的とする。具体的には、次の3つの研究課題を設定して、研究を進めた。

(1) 協調制御モデルの考案

多自由度系の運動協調を実現するために、タスクを達成する運動要素（関節角座標）から成る多様体 UCM を生成し、運動状態に応じて UCM 上で適切な関節角の組を選択する制御モデルを考案する。

(2) 身体運動計測実験による解析と検証

課題(1)の協調制御を検証するために、揺動装置と外乱付加装置を組み合わせたシステムを構築し、外乱付加の応答実験により運動協調を定量的に評価する。さらに、この実験システムを用いて身体の一部の関節を拘束したときの運動計測実験を行い、運動自由度の減少によりシナジーがどのように変化するかを解析し、協調制御モデルの計算機シミュレーションの結果と比較・検討する。

(3) 実機ロボットによる協調制御の実現

協調制御のアルゴリズムの有効性を確認するために実機ロボットの制御実験を行う。さらに、どのような協調制御がより実用的かを試すことも課題の1つである。

3. 研究の方法

研究目的で挙げた3つの研究課題を達成するために、以下の4ステップで研究を進める。

(1) 協調制御モデルへのアプローチ

冗長な多関節の協調運動を実現できる制御法に取り組む。これまでの研究で提案してきた UCM 参照フィードバック制御のアイデアを基礎にして、実行可能な制御アルゴリズムを開発する。例えば手先の目標軌道が指定されている軌道追従問題を考える。まず、性能変数（手先の目標軌道）に対応する UCM の族（多様体の時系列）を生成する。次にこの UCM の族を時々刻々と参照して、UCM 上で適切な点（関節角の組み合わせ）を選び続けることにより、協調運動を実現する。

(2) 身体揺動と手先外力を与える実験装置の設計と構築

手先の振動抑制中の機械的インピーダンスを計測するために、図1に示す実験システムを構築する。一つの台の上に、被験者の体幹を固定する椅子と腕に外乱を与えるためのマニピュレータを搭載する。揺動装置のモータクランク機構によって、台全体に対して前後方向の様々な振動（図中の赤い矢印で示す）を与えることができるようにする。

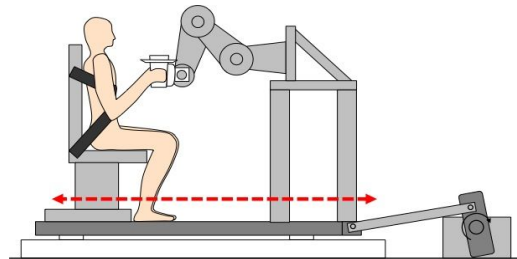


図1. 身体揺動と外乱付加装置

(3) 運動計測実験による協調構造の抽出

図1の実験系のマニピュレータで、身体の一部を拘束（例えば、前腕の動きを制限）したときの運動計測実験を行う。運動の自由度の減少により、運動タスクを実行する際の軌道のばらつきと精度、シナジー構造がどのように変化するのかに注目して解析を行い、運動スキルの獲得とシナジーの再構成について考察する。また、人が身体バランスをとっているときの関節の動きを計測して、UCM 解析により、上半身と下半身の動作を含めたシナジーの階層構造について考察する。

(4) 実機ロボットによる協調制御の検証

(1)で開発した協調制御のアルゴリズムを多関節アームロボット、およびヒューマノイドに応用する。水平面内で動作する3関節アームの制御実験では、軌道制御の計算時間や精度が実用可能であるかどうかを検証する。また、実現された運動軌道や協調構造が人の運動計測実験結果と比較することにより、生体の運動制御のモデルとして妥当であるかどうかを検証する。ヒューマノイドへの応用実験では、カメラの視野がぶれないような協調制御に挑戦する。すなわち、ロボット身体が大きく動いても、目標の対象物をカメラ視野の真ん中に保つ（凝視する）ための関節間協調を実現する。

4. 研究成果

身体運動の計測実験と UCM 解析、協調制御モデルの考案と計算機シミュレーション、実験と考察、モデルの改良を繰り返しながら、以下に記すような研究成果を得た。

(1) 身体揺動における関節間協調

まず、身体を揺動したり外乱を与えることができる実験システムを構築した(図1参照)。この実験システムはクランク機構を搭載した揺動装置と腕に外乱を与えるためのマニピュレータから構成されている。次に、身体の自由度が変化すると関節間の協調がどのように変わるかを調べた。具体的には、被験者が水の入ったコップを手を持って立位で静止しているときに、水平方向の振動装置を用いて、足もとを水平方向に振動させたときの身体動作を計測する実験を行った。その際に被験者の足首や膝関節を拘束すると、身体関節間の協調がどのように変化するかを UCM 解析により調べた。その結果、下肢の拘束箇所を増やすと、関節角空間の中で手先躍度に対して冗長となる方向のばらつきが増加した。このことは、利用可能な身体自由度が減少して運動タスクが難しくなると、関節間の協調がより強く働くようになることを示唆している。

また、筋の弾性特性の観点から手先振動抑制の制御モデルを提案した。このモデルの制御シミュレーションと揺動台上でのコップ保持実験の結果とを比較し、腕のダイナミクスの平衡点の調整により手先の振動が抑えられる可能性を示した。さらに、ロボットアームと DSP を組込んだ計測システムを構築し、人間が手先の振動を抑制しているときの手先インピーダンス計測実験を行った。具体的には、水が満杯のコップを手を持ち、手先の振動等により水がこぼれないように、保持する動作(水有り条件)を対象とした比較として、水の代わりに同じ重さの石が入っているコップを保持する動作(水無し条件)も計測した。前者は手先振動を抑制する必要があるが、後者はその必要がない。計測実験では、インパルス状の外乱を加えたときの手先位置の変位と手先がロボットから受ける力を測定し、スペクトル解析により手先のインピーダンスを推定した。水無し条件と比較して水有り条件では、手先位置の変位が 10~20% 増大しており、手先剛性が減少している傾向が見られた。さらに、インパルス状外乱後 200ms 以降の手先軌道は二つのタスクで異なっており、被験者がコップの水の状態を見て随意的に手先位置を動かしている可能性が示された。

(2) 全身バランスにおける階層的運動協調

バランス保持動作について人間がどのような関節間協調で運動を実現しているのかを調べた。協調動作を詳しく調べるために、階層性を考慮した協調解析(図2参照)を考案した。この方法は、性能変数に影響を与えない UCM 成分をさらに分割し、分割した成分

を比較することでばらつきがどのように偏っているのか調べるものである。すなわち、性能変数と運動要素の間に中間変数があるとして階層性を仮定することで、上位層と下位層のどちらの協調を強めるようなばらつきの偏りがあるのか評価でき、従来の協調解析である UCM 解析に比べてより詳しくばらつきを解析することができる。

バランス保持動作の計測実験で被験者は片足立ちで外乱に対応する動作とリーチング動作の二つのタスクを行った。通常の UCM 解析ではどちらのタスクも UCM 成分より大きい同様の結果となり、違いが見出せなかった。これに対して、本研究で考案した階層的協調解析の結果、外乱対応動作では階層モデルの下位層の協調を働かせて重心を制御しており、一方、リーチング動作では上位層の協調を強めることによって重心を制御していることが示唆された。

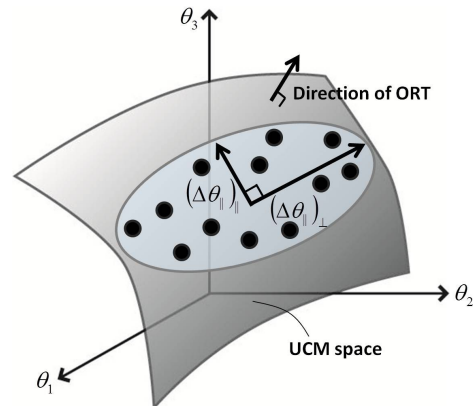


図2. 階層性を考慮した UCM 解析

(3) 姿勢の変動を許容する協調制御法

人の身体のような冗長多関節アームの軌道生成において、タスク達成に関係のない要素(運動要素)がばらついたとしても、タスク達成に関係のある変数(性能変数)はばらつかない制御法(UCM 参照フィードバック制御)を発展させた。まず、目標手先位置と望ましい重心位置を実現する関節角からなる部分空間(UCM: UnControlled Manifold)を定めた。この UCM 上で、最適な関節角の組を時々刻々と決定していく制御法を考案した。この制御法は UCM 上の点を選び続けることによって、手先位置が目標軌道に沿い、また重心位置が身体バランスをとるための範囲内に存在するような身体姿勢を生成する。この制御法の特徴は、目標関節角を陽に与えないことで、身体姿勢の変動を許容する柔軟性にある。

次に、上記の協調制御法によってどのような全身運動が実現できるかを計算機シミュレーションで調べた。具体的には、人の身体動作を鉛直面内で動く 5 リンクアームで簡略化してダイナミクスを表現し、到達運動の制御を行った。運動の途中でインパルス状の外乱を引加した計算機シミュレーションを行った結果、関節角にばらつきが生じるも

の、手先は目標軌道に沿い、かつ重心バランスも保たれることが確認できた。

(4) フィードバックトルクを用いた冗長関節アームの協調動作生成

(3)の UCM 参照フィードバック制御法では逆ダイナミクスを用いて、評価関数が最小となる目標関節角度を決定する。そのため、制御対象のダイナミクスが既知である必要がある。また、制御対象の姿勢が UCM 上の近傍にあると仮定し、逆ダイナミクスより入力トルクを計算する。そのため、姿勢と目標関節角度との誤差が大きくなるとトルクが過剰となり、動作が不安定となる。そこで、新たにフィードバックトルクを入力とし、目標関節角度を UCM 上から時々刻々と決定していく方法を考案した。この制御法では、フィードバックトルクを基にして、評価関数が最小となる目標関節角度をリアルタイムで決めていく。

タスクとして、水平面内で手先の目標軌道があらかじめ与えられる手先軌道追従問題を設定した。水平面内で動作する 3 リンクアームを制御対象として、計算機シミュレーション実験、および図 3 に示すような 3 リンクアームロボットを用いた実機制御実験を行った。制御法の有効性をチェックするためにここでは、従来よく用いられてきた擬似逆行列を用いて目標関節角軌道を一意に決定して冗長性を除去する方法と提案法とを比較した。制御実験では、手先の目標軌道として 2 秒間の躍度最小軌道を与え、その途中でインパルス状の外乱を第 1 関節に与えた。図 4 に、1 秒後に第 1 関節に与えた場合の第 1、第 2、第 3 関節のトルクパターンを示す。従来法では、外乱に乱れた軌道を目標関節軌道に戻すため、第 1 関節に大きなトルクが働いていた。これに対して提案法では、関節軌道のばらつきを許容するので、全関節トルクが変動して、目標手先軌道を追従していた。これにより提案法では、外乱入力時に比較的小さな入力トルクで手先誤差を抑え、タスクを達成できることが確認できた。

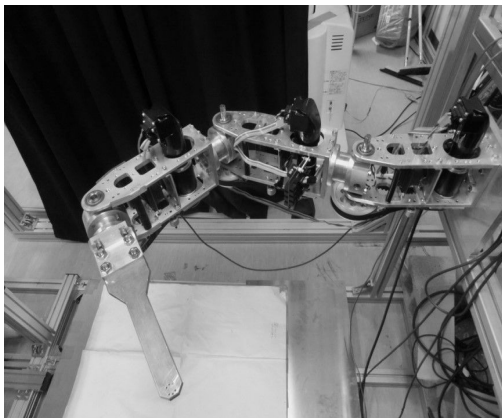
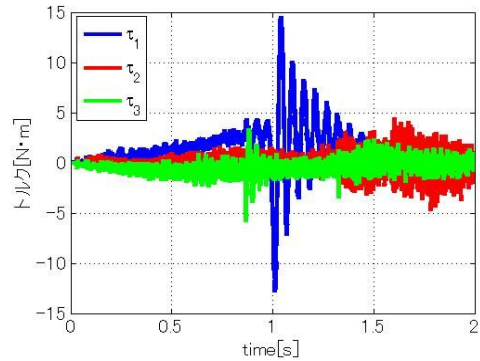
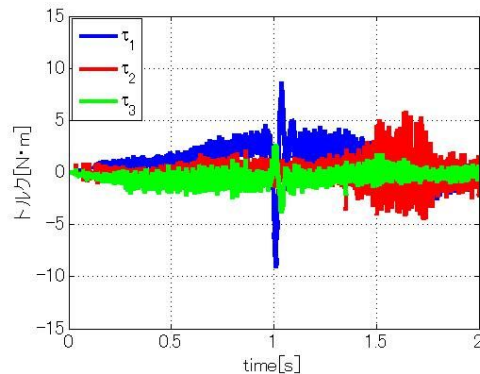


図 3 . 水平面内で動作する 3 リンクアームロボット



(a) 従来法でのトルクパターン



(b) 提案法でのトルクパターン

図 4 . 運動開始 1 秒後に第 1 関節へ外乱を加えた試行における入力トルクパターン

(5) 仮想軌道制御への展開-工学的応用へ

生体の運動制御の分野で発展してきた仮想軌道制御を冗長多関節アームに応用した。仮想軌道を適応的に調整することにより、フィードバックゲインの調整が不要な制御方法を考案した。鉛直面内で動く 5 リンクアームの軌道追従の計算機シミュレーションを行い、冗長性の問題を陽に解かなくても、数回の繰り返して、滑らかな運動軌道が生成されることを確認した。

以上本研究課題では、人の運動計測と解析に基づいて、冗長多関節の協調制御モデルを提案し、ロボットの実機実験により、モデルの有効性を確認した。今後は、仮想軌道制御と組み合わせ、工学的により応用しやすい制御法を開発することが求められる。

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 8 件)

Togo, S., Kagawa, T., and Uno, Y.: Uncontrolled manifold reference feedback control of multi-joint robot arms, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 10, 00069, 2016. doi: 10.3389/fncom.2016.00069. 査読有

Kudo, N., Choi, K., Kagawa, T. and Uno, Y.: Whole-body reaching movements formulated by minimum muscle-tension change criterion, *Neural Computation*, 28,

950-969, 2016. doi: 10.1162/NECO_a_00830. 査読有

Togo, S., Kagawa, T., and Uno, Y.: Changes in motor synergies for tracking movement and responses to perturbations depend on task-irrelevant dimension constraints, 46, 104-116, 2016. doi: 10.1016/j.humov.2015.12.010.00069. 査読有

竹内花帆, 香川高弘, 宇野洋二: ヒトのバランス保持動作における階層的協調の解析, 電子情報通信学会論文誌 D, J99-D, 214-223, 2016. 査読有

Sung, C.H., Kagawa, T. and Uno, Y.: Synthesis of humanoid whole-body motion with smooth transition, Advanced Robotics, 29, 573-578, 2015. doi: 10.1080/01691864.2015.1024284. 査読有

Togo, S., Kagawa, T. and Uno, Y.: Control model for dampening hand vibrations using information of internal and external coordinates, Plos One, 10, e0125464/1-16, 2015. doi:10.1371/journal.pone.0125464. 査読有

清澤悠, 香川高弘, 宇野洋二: フィードバックコントローラを組み込んだ誤差順伝播学習システム, 電子情報通信学会論文誌 D, J98-D, 1047-1056, 2015. 査読有

Kagawa, T., Ishikawa, H., Kato, T., Sung, CH., and Uno, Y.: Optimization-based motion planning in joint space for walking assistance with wearable robot. IEEE Transactions on Robotics, 31, 415-424, 2015. doi:10.1109/TRO.2015.2409434. 査読有

[学会発表](計 19件)

吉田悠馬, 香川高弘, 宇野洋二: 視点を固定した身体運動における関節間協調, 電子情報通信学会 NC 研究会, 2018.

鈴木雄大, 香川高弘, 宇野洋二: 繰り返し計算に基づく仮想軌道制御, 電子情報通信学会 NC 研究会, 2018.

川岸敬生, 香川高弘, 宇野洋二: ヒューマノイドロボットによる障害物踏み越え動作の生成, 第30回自律分散システムシンポジウム, 2018.

木場亮太, 香川高弘, 宇野洋二: UCM に基づく冗長関節アームの協調制御法, 第30回自律分散システムシンポジウム, 2018.

福井俊太郎, 香川高弘, 宇野洋二: 歩行補助ロボットと協調する歩行器の開発, 電子情報通信学会 MBE 研究会, 2017.

本谷拓磨, 香川高弘, 宇野洋二: VR 環境下での歩行におけるオプティカルフローの不一致が姿勢制御に与える影響, 電子情報通信学会 NC 研究会, 2017.

Kagawa, T., Takahashi, F., and Uno, Y.: On-line learning system for gait assistance with Wearable robot, SICE Annual Conference, 2017.

Kagawa, T., Ichioka, K. and Uno, Y.: Sense of body ownership and control of arm movement under immersive VR environment, Life Engineering Symposium, 2017.

木場亮太, 香川高弘, 宇野洋二: フィードバックトルクを利用した冗長関節アームのオンライン軌道生成, 第35回日本ロボット学会学術講演会, 2017.

宇野洋二, 大島悠輔, 鈴木雄大, 香川高弘: 仮想軌道を参照するフィードバック制御, 第11回 Motor Control 研究会, 2017.

大島悠輔, 香川高弘, 宇野洋二: フィードバックゲインに応じた仮想軌道修正に基づくロボットアーム制御, 第29回自律分散システムシンポジウム, 2017.

市岡紘平, 香川高弘, 宇野洋二: VR 環境における自己身体感覚の評価に関する検討, 第17回計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2016.

熊澤一樹, 香川高弘, 宇野洋二: 姿勢の変動を許容する全身運動の制御, 電子情報通信学会 NC 研究会, 2016.

Togo, S., Kagawa, T., and Uno, Y.: A control model of human-dampening hand vibration using internal and external information, Neural Control of Movement 25th Annual Meeting, 2015.

Sung, CH., Muhligh, M., Gienger, M. and Uno, Y.: Task-dependent distribution and constrained optimization of via-points for smooth robot motions, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015.

暮石昌, 香川高弘, 宇野洋二: 視覚フィードバックの遅延を低減したときのヒト腕の目標追従運動, 電子情報通信学会 NC 研究会, 2015.

伊藤穂高, 香川高弘, 宇野洋二: 多関節ロボットの関節間協調を用いた重心変動を許容する立位姿勢制御, 第2回制御部門マルチシンポジウム, 2015.

加藤高之, 香川高弘, 宇野洋二: ユーザ動作のセンシングと軌道最適化に基づく装着型ロボットのオンライン歩行制御, 第2回制御部門マルチシンポジウム, 2015.

伊藤穂高, 香川高弘, 宇野洋二: 支持多角形内における重心位置のばらつきを許容する立位姿勢制御, 電子情報通信学会 NC 研究会, 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇野 洋二 (UNO, Yoji)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 10203572

(2) 研究分担者

香川 高弘 (KAGAWA, Takahiro)

愛知工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 30445457