

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22680018

研究課題名（和文）

力学変容系としての人の運動理解と次世代人型ロボット制御の基盤構築

研究課題名（英文） Understanding of the human motion as dynamics morphing system and laying of the base of next-generation humanoid robot control

研究代表者

杉原 知道（SUGIHARA TOMOMICHI）

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70422409

研究成果の概要（和文）：人型ロボットの運動制御技術に基づいて、人が複雑な拘束条件の下に安定性を維持しながら全身を操り、多様な運動を間断なく行う数学的原理を、身体・環境・制御器のなす力学変容系として理解する枠組を提案した。ロボット用に開発した立位・足踏み・歩行を統一に表現する制御器をモデルとし、運動計測に基づいて人の制御パラメータを同定した。結果、開発した制御器が人の制御器モデルとしても良好な精度を有することを確認した。

研究成果の概要（英文）：A framework to understand the mathematical principle of the human motor control as a *dynamics-morphing* system comprising the body, the environment and the controller was proposed. It is based on a control technique for humanoid robots to articulate the whole body under complex constraints, keep the stability and achieve a variety of motions. It was found that the controller which was developed for a humanoid robot in order to unify standing, stepping and walking nicely models that of a human through motion measurements and identifications of control parameters.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2011年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2012年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
年度			
年度			
総計	19,400,000	5,820,000	25,220,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学 ・ 知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：運動制御、非線形力学系、ロボティクス、身体科学

1. 研究開始当初の背景

脳科学や解剖学の進歩により、骨格・筋肉・神経等の身体部品が各々担う機能は明らかになってきた。しかし、人がどのようにそれらの部品を駆使し多様な運動を行っているのかは、未だ不明なことが多い。

ロボティクスの理解に基づけば、人は、筋

肉で発生する駆動力を環境に作用させ、その反作用力の逆伝播によって環境内で運動する。発生できる反力は支持領域によって制限され、また支持領域は運動に伴って不連続に変形する、というように運動の原因と結果が渾然としている。さらに支持領域を能動的に変形するために、平衡安定状態を自ら崩して

非平衡状態を経由し別の平衡安定状態へと遷移する、極めて複雑な制御が要求される。このような原理は、筋肉・神経等の部品や腕・脚等の単位動作に分解する要素還元論的な考え方だけでは説明が困難である。

現在最先端にある人型ロボットのほとんどは、身体各部位の時間軌道を事前に計画することで困難を回避している。制御原理が分からなくても、運動方程式と拘束条件の下で境界値問題を解くことは可能だからである。この方法は、ロボットのおかれた環境や状況が既知であるときは有効だが、事前知識と実状とのずれが大きくなると、詳細な計画軌道はむしろ障害となる。人型ロボットがなかなか実用されない理由は、主にここにある。

上記のような背景の下、応募者は、人型ロボットにおいて大域的安定性を維持しながら平衡安定状態と非平衡安定平衡状態（安定自励振動）の間を連続的に相互遷移する制御の数理を議論し、支持領域内での反力操作と支持領域の不連続変形、ならびに従来別個に論じられてきた立位安定化と定常的な足の交互踏み替えを、力学系の変容という枠組みで統合した。

2. 研究の目的

上記の研究は、人型ロボットが安定性を維持しながら間断なく運動を様々に切り替える大域的な原理を論じたものである。この議論が数学的に正しいならば、実際の人の振る舞いも同じ方程式の下で説明可能なはずである。本研究ではこの考え方に基づき、人の運動を、身体・環境・制御器の三者が生み出す「力学変容系」として構成論的に理解する新たなパラダイムの創出と、人型ロボットの多様な全身運動を統一的に実現する大域的安定な制御器設計のための基盤理論開発を目的とする。

具体的課題は次の3点である。

(1) 力学変容に基づくロボット制御器の拡張

先行研究において、立位安定化と定常的な足踏みとを統合していた制御器を拡張し、歩行を含む3次元的环境内での運動まで扱えるようにする。

(2) 人の運動計測による制御器同定

人の運動を力学系としてとらえたときの、大域的構造を観察し、制御器を同定する。本研究の中心的課題である。

(3) 3次元的环境内での人の運動表現

複雑な3次元的环境内を、身体を支持するための必要な接触と、作業遂行に不必要な接触とを区別しながら移動するための運動表現を提案する。

(4) 人とロボットの高精度状態計測

人や人型ロボットの運動、具体的には慣性系における位置・姿勢・速度・角速度等を高精度に計測するセンシング技術を開発する。

3. 研究の方法

(1) 力学変容に基づくロボット制御器の拡張

これまで、ある参照点の近傍での平衡・非平衡安定化に限定していた運動制御を、空間内での移動制御にまで拡張する。そのために、運動の指令値を位置でなく速度の次元でも与えられるようにし、その場合も、任意のタイミングでどちらの次元で指令値が与えられたとしても、運動を中断することなく切り替えられるようにする。同時に、故意の移動と、外力等の過渡的な摂動に対する転倒防止のための反射的な移動（踏み出し）を併存させる。

(2) 人の運動計測による制御器同定

人の立位運動制御系の大域的構造をとらえる。運動計測によって、相空間内での重心の運動軌跡を多数集めることで、制御器の同定を可能にする。そのためには、平衡点から離れた領域での振舞も計測する必要がある。理論上の相図を元に運動実験プロトコルを検討する。また、得られた軌跡は運動中に制御器の切り替わりを含むものと予想される。これは区分アフィン系の同定問題となるため、同分野の技術を応用する。

(3) 3次元的环境内での人の運動表現

地面の起伏や段差、壁、家具等の人工物が身体周辺に散在する状況での運動を数学的に表現する方法を検討する。運動を大域的にとらえるという立場から、環境の立体形状も大域的に扱うのが望ましいと予想される。円筒や直方体等の解析的な単純形状を用いた近似表現により、これを可能にする。

(4) 人とロボットの高精度状態計測

カメラ等の外部センサよりも計測周期の短い内界センサ（加速度センサ、角速度センサ等）を用いて、高速かつ高精度に人やロボットの状態計測を行う技術を開発する。複数のセンサの動特性を同定・補償し相補的に組み合わせることで、これを可能にする。

4. 研究成果

(1) 力学変容に基づくロボット制御器の拡張

先行研究においては、定常的な立位制御と定常的な歩行、それらをつなぐ過渡的な運動が実現されていた。大域的安定な全身運動実現のためには、上記の任意のフェイズで強い摂動（外力）が加えられたとしても、転倒を避ける踏み出し運動へと連続的に移行し、また転倒を回避した後は速やかに元の運動へと復帰する制御が不可欠である。立位安定判別は先行研究において提案していた。これに基づいて、必要と判断された時点で安定な制御器の上に一時的に安定化に矛盾する制御器を重ねし、立位安定性が回復された時点で、その制御の寄与分を経時的に解消する方策によって実現した。

また、運動の指令値が速度の次元で与えら

れた場合、系の極の一つを零に配置することで、参照点近傍での平衡・非平衡安定化制御系から平衡点を持たない速度追従系へと変容させる方法を提案した。これに、先行研究にて提案していた立位安定判別規範に基づいて、安定性を保証する足先制御を組み合わせることで、継続的な歩行制御を実現した。さらに、その間も位置の次元の参照値を自動更新することで、任意のタイミングで立位制御に無撞着に復帰することが可能になった（図1）。

以上の成果により、無限の広がりを持つ3次元空間内での人および人型ロボットの運動を議論できるようになった。

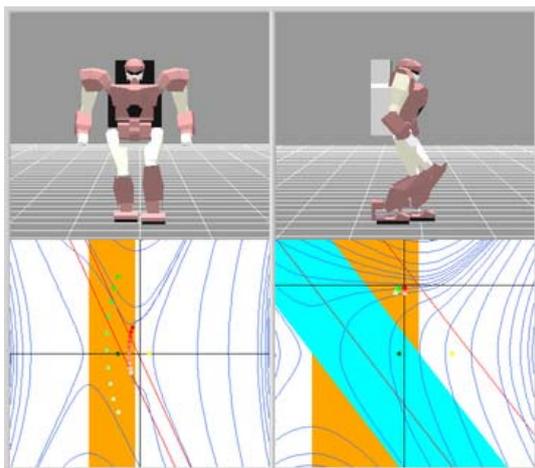


図1 人型ロボットの任意速度歩行制御

(2) 人の運動計測による制御器同定

東京大学情報理工学系研究科力学制御システム研究室のご協力を頂き、立位制御、重心の揺動、定常的踏み替え、歩行の各々において、平衡点から離れた領域での振舞も含めて大域的な相空間上の軌跡を実測するため、理論上の相図を元に、まず相空間を領域分割し、各々の領域に到達するための予備動作を実験補助者や治具を併用して付加した。その後、予備動作の区間を軌跡から検出・除外する方法を提案した。実験は二回行い、一回目の結果を元に、理論上の解曲線群と実測によって得られた軌跡群との相違点を考察し、その原因を確かめる実験を二回目の実施項目に追加した。また試行による計測精度のばらつきを低減する方法を考案し、精度向上に成功した。

得られた軌跡に基づいて、人の立位運動制御器を同定した。上記(1)にて開発したロボットの制御器が、人の制御器モデルとしても良好な精度を持つことを定性的に確認した（図2）。運動中に系の支配方程式が切り替わる問題を、区分アフィン系の同定問題として定式化し、逐次最小二乗法を応用して切り替わり点を検出する方法を提案した。

(3) 3次元的環境内での運動表現

環境の幾何学的情報（頂点・面切片等の情

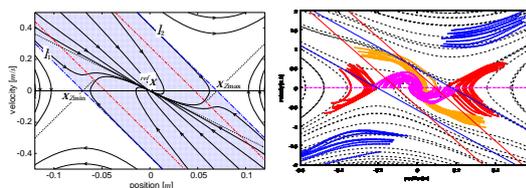


図2 人の立位制御器（左：理論図、右：実測+同定図）

報）が与えられた下で、人型ロボットが望ましい接触を維持し、望み外の接触を回避するための運動表現および姿勢修正アルゴリズムを提案した。円筒や直方体等の解析的な単純形状を用いて、環境中の物体ではなく、物体のない空間の方を表現する方法を用いた。その単純形状がロボットを包含するならば、低次元な力学系のままロボットの運動を表現する。逆に単純形状にロボットが収まりきらない場合でも、その形状周辺は比較的スペースであるとわかり、重点的に干渉回避のための計算を行うことで、計算負荷を低減し効率を上げる方法を提案した。力学系設計とは直接的に結びつくには至らなかったものの、これを応用して人型ロボットが自律的に複雑環境内を移動するための経路探索アルゴリズムの開発につながった（図3）。

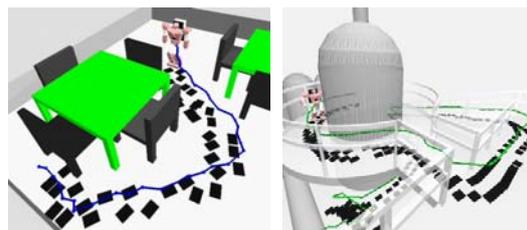


図3 人型ロボットの複雑環境内経路探索

(4) 人とロボットの高精度状態計測

慣性系における人やロボットの運動を計測するには、原理的にカメラ等の外部センサを用いる必要があるが、現在比較的安価に入手可能なものは計測周期が数10ms程度と遅い。1~3ms程度の周期で使用できる内界センサ（加速度センサ、角速度センサ、磁気方位センサ等）を用いれば高速に計測できるが、これらは慣性系に計測基準点を持たないため、信号処理に工夫が必要である。

姿勢計測は航空機等で用いられている基本技術であるが、3次元的な姿勢を表現すること自体の難しさや、センサの非線形特性等が問題となって、高速で不規則な姿勢変化を計測するのに十分な方法が提案されていなかった。そこで、センサの動特性と姿勢表現を近似的に分離することで、動特性の同定・補償と出力の安定化を可能にする信号処理技術を開発した。この方法は、デファクトスタンダードであるカルマンフィルと比較して、特にパラメータチューニングの容易さに特徴がある。

また、位置の推定も行った。人型ロボットの脚移動における特性を利用し、地面からの反

力情報に基づいて接触点（瞬間転がり中心）を推定する方法を提案、およびこれを用いて慣性系に対する体幹位置を逆算する方法を提案した。さらに加速度センサと相補的に組み合わせることで精度を向上する技術を開発した。

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3件）

- ① 杉原知道、舛屋賢、山本元司、三次元高精度姿勢推定のための慣性センサの線形・非線形特性分離に基づいた相補フィルタ、日本ロボット学会誌、査読有、31巻、(2012)、251-262
- ② T. Sugihara、Solvability-Unconcerned Inverse Kinematics by the Levenberg-Marquardt Method、IEEE Transaction on Robotics、査読有、27巻、(2011)、984-991
- ③ 杉原知道、Levenberg-Marquardt 法による可解性を問わない逆運動学、日本ロボット学会誌、29巻、(2011)、269-277

〔学会発表〕（計22件）

- ① T. Sugihara、Reflexive Step-out Control Superposed on Standing Stabilization of Biped Robots、2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots、査読有、2012.12.1、Osaka、Japan
- ② Y. Shimizu and T. Sugihara、Efficient Path Planning of Humanoid Robots with Automatic Conformation of Body Representation to the Complexity of Environments、2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots、査読有、2012.12.1、Osaka、Japan
- ③ D. Kaneta、N. Murai and T. Sugihara、Visualization and Identification of Macroscopic Dynamics of a Human Motor Control Based on the Motion Measurement、2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots、査読有、2012.12.1、Osaka、Japan
- ④ T. Sugihara、Things important to humanoid robots: from theory to real、2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots、招待講演、2012.11.29、Osaka、Japan
- ⑤ T. Sugihara、Biped Control To Follow Arbitrary Referential Longitudinal Velocity based on Dynamics Morphing、2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems、査読有、2012.10.9、Vilamoura、Portugal
- ⑥ K. Masuya、T. Sugihara and M.

Yamamoto、Design of Complementary Filter for High-fidelity Attitude Estimation based on Sensor Dynamics Compensation with Decoupled Properties、2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation、査読有、2012.5.15、St. Paul、USA

- ⑦ 舛屋賢、杉原知道、反力情報に基づく推定接触点と加速度センサを用いた二脚ロボットのデッドレコニング、第18回ロボティクスシンポジウム、査読有、2013.3.15、かみのやま温泉
- ⑧ 清水康志、杉原知道、人型ロボットの段階的経路計画に伴う小範囲干渉の局所的解消、日本ロボット学会第30回記念学術講演会、2012.9.20、札幌
- ⑨ 兼田大史、村井伸行、杉原知道、全身運動計測に基づく人の立位制御器の巨視的構造同定、日本ロボット学会第30回記念学術講演会、2012.9.19、札幌
- ⑩ 舛屋賢、杉原知道、瞬間速度最小点を用いた二脚ロボットのオドメトリ、日本ロボット学会第30回記念学術講演会、2012.9.19、札幌
- ⑪ 清水康志、杉原知道、環境の複雑さに応じた身体表現の自動適合による人型ロボットの効率的運動計画、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'12、2012.5.28、浜松
- ⑫ 松本恭典、杉原知道、人型ロボットのインタラクティブ動作設計における運動拘束条件の自動整合、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'12、2012.5.28、浜松
- ⑬ 兼田大史、杉原知道、全身運動計測に基づく人の運動制御の巨視的な構造可視化、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'12、2012.5.29、浜松
- ⑭ 舛屋賢、杉原知道、山本元司、姿勢推定のための相補フィルタとカルマンフィルタの精度に関する比較考察、第17回ロボティクスシンポジウム、査読有、2012.3.14、萩本陣
- ⑮ 舛屋賢、杉原知道、山本元司、動的特性補償した慣性センサと磁気センサの相補的利用による高精度三次元姿勢推定、第29回日本ロボット学会学術講演会、2011.9.8、芝浦工業大学
- ⑯ 杉原知道、二脚ロボットの任意速度前後進制御のための力学変容、第29回日本ロボット学会学術講演会、2011.9.7、芝浦工業大学
- ⑰ T. Sugihara、Dynamics Morphing Toward Globally Stable Bipedalism、Dynamic Walking 2010、招待講演、2010.7.11、Boston、USA
- ⑱ T. Nishi and T. Sugihara、Thinning and Smoothing of Randomly-sampled Support Transitions Toward Practical Motion Planning for Humanoid Robots、2010

IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems、査読有、2010.10.19、Taipei、Taiwan

⑱F. Seto and T. Sugihara、Motion Control with Slow and Rapid Adaptation for Smooth Reaching Movement Under External Force Disturbance、2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems、査読有、2010.10.19、Taipei、Taiwan

⑳舩屋賢、杉原知道、山本元司、慣性センサの逆モデルに基づく高精度姿勢推定のための相補フィルタ、第28回日本ロボット学会学術講演会、2010.9.24、名古屋工業大学

㉁杉原知道、二脚ロボットの立位安定化に重畳する反射的踏み出し制御、第28回日本ロボット学会学術講演会、2010.9.23、名古屋工業大学

㉂小林英仁、杉原知道、長谷川勉、足着地位置急変更に対処する人型ロボット誘導中の運動軌道修正法、第28回日本ロボット学会学術講演会、2010.9.22、名古屋工業大学

ほか研究機関終了後の発表3件、査読中の国際会議発表4件。

〔図書〕(計1件)

①杉原知道、東京理科大学、機械システムとしての表現に基づく人の運動制御メカニズムの構成論的理解、理大科学フォーラム330号、(2011)、7-11

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称：姿勢推定装置

発明者：杉原知道、舩屋賢

権利者：九州大学

種類：特許

番号：特願2011-061146、特開2012-198057

出願年月日：2011.3.18

国内外の別：国内

〔その他〕

①杉原知道、ロボット工学に基づく二足歩行制御の構成論的理解、日本ロボット学会第75回ロボット工学セミナー、招待講演、2012.12.7、中央大学

②成果発表ウェブページ

<http://www.mi.ams.eng.osaka-u.ac.jp/research-human-j.html>

杉原 知道 (SUGIHARA TOMOMICHI)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70422409

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者