

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H00767

研究課題名(和文) ヒューマノイドの全身協調による瞬発的な高出力運動の実現に関する研究

研究課題名(英文) Research on Instantaneous High-power Motion Generation by Whole-body Coordination of a Humanoid Robot

研究代表者

高西 淳夫 (Takanishi, Atsuo)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：50179462

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、瞬発的な高出力運動生成法として、アクチュエータのみでは発揮できない大出力が必要となった場合において、各関節の弾性体に弾性エネルギーを蓄積し、その後大出力を発揮するという一連の運動生成法を開発し、全身の慣性力や弾性力を活用した跳躍運動を実現した。また、弾性を利用した高出力発揮が可能なヒューマノイドの開発に向けて、高負荷時にも弾性変更ができる小型高出力関節機構を開発した。高トルクの発揮が必要な関節は大型化してしまう問題があったため、4節・5節リンク構造を組み合わせ関節角度に応じて減速比を変化させることで小型化を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は高効率に大出力を実現させるため冗長自由度を含むタスクに最適な体勢の決定、弾性要素へのエネルギー蓄積を伴うヒューマノイドの全身協調運動を実現させるものである。これまで、関節に弾性要素を含むロボットは多数開発されてきたが、多大な搭載空間を要するものが多く、全身へ搭載できるほど小型の弾性要素を含む関節構造はなかった。さらに、従来研究ではロボットは関節単位での弾性要素のみを論じており、複数関節に渡る弾性要素を協調的に運動させて全身運動に利用しようとしたものはなかった。本成果は、ヒューマノイドに限らず瞬発的に高出力を要求されるロボット一般へ広く適応可能なものであり、その学術的価値は大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a series of motion generation methods to generate instantaneous high-powered motion, in which elastic energy is stored in the elastic body of joints, and then high-powered motion is generated which cannot be generated by actuators alone. For the development of a humanoid with high power using elasticity, we have developed a compact high-power joint mechanism that can change elasticity even under high load. In order to reduce the size of the joint that requires high torque, a four- and five-bar link structure was combined to reduce the size of the joint by changing the reduction ratio according to the joint angle.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ロボティクス ヒューマノイド 関節剛性 冗長自由度

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災に伴い福島第一原子力発電所事故が発生した際、残念ながら現地に即座に投入し、人間に代わって作業を遂行できるロボットは存在しなかった。これは、現場で真に必要なとされたタスクを達成できるロボットが未だ存在しないためである。まず災害現場で真に求められるタスクとは『重量物であるがれきを撤去』しながら『がれき、階段などが混在する不整地路面上を移動』し、その先にある『人間が使用することを想定されたバルブやスイッチを操作』するといった複合的なものであった。これらを達成するためには、単一のタスクに対して関節数(自由度)を最適に設計されたロボットではなく、ヒューマノイドに代表される、冗長自由度を持ち多様なタスクに対応可能なロボットを使用することが有効である。世界的にこのような研究が推進されており、米国国防省が原発事故を想定したロボットの災害対応能力を競うために主催した競技会 **DARPA Robotics Challenge** においては、すべての参加ロボットが冗長自由度を持ったヒューマノイドあるいは多肢ロボットであった。しかしながら、この大会における競技内容は、移動能力や軽量のバルブ操作などこれまでのヒューマノイドが実施可能な範囲で設定されており、原発事故の現場で実際に求められた『がれきの撤去』、『体全体で重いバルブを回す』といった瞬間的に大きな力を伴うタスクは実現困難であるとされ、除外されていた。

人間は瞬間的に大きな力を必要とするタスクを遂行する際、腕や脚のみを用いるのではなく、全身を積極的に協調させている。さらに、この際各筋肉・腱の弾性を利用しエネルギーを蓄積することで瞬間的に大きな力を発揮させている。従来のロボットがこのような方法を取ることができなかった要因として2つの原因がある。まず1点目に、ヒューマノイドの適切な冗長自由度決定法および多自由度を適切に動作させ体勢を変化させる制御法が明らかでなく冗長自由度を含む運動を効率的に生成できていないこと、2点目に、弾性要素を含むエネルギー効率の高い関節構造を全身に有しておらず、これらを連動させることで効率的にエネルギーの蓄積と放出を制御する手法が明らかでないことがある。

申請者らは上記の観点から、これまでにヒューマノイドの運動に積極的に冗長自由度を含んだ体勢変化と複数の関節を連動した弾性運動を取り入れてきた。まず、等身大の2足ヒューマノイドロボット **WABIAN-2** (高西ら, **IEEE ICRA2006 Best Paper Award Finalist**) は人間の運動を模擬するために骨盤 Roll 軸に冗長自由度を設け、膝関節を伸ばした歩行を実現した。ここで、膝関節を伸ばした状態での歩行では、膝関節を曲げた歩行と比べ、膝関節のエネルギー消費量を **95%**低減させることに成功した。一般的には能動自由度が増えることはエネルギー消費量の増加につながるが、上記の結果は冗長自由度の利用により運動に合わせロボットの体勢を適切に調整することで効率的な全身協調運動が実現できることを示した。また、申請者らは等身大の2足走行ロボット **WATHLETE** (高西, 橋本, 大谷ら, 第30回日本ロボット学会学術講演会研究奨励賞)を開発している(図1)。**WATHLETE** は人間の走行運動中の脚部弾性および骨盤運動を参考に、膝関節・足首関節に組み込んだ弾性体に骨盤運動を用いてエネルギーを蓄積することによって人間と同等の関節出力 **1000W** による跳躍運動を実現した。これは関節に弾性要素を導入することで、関節単体ではなく複数関節を連動してエネルギーを蓄積しロボット全体としてエネルギー効率の高い運動を実現したものである。本研究では、申請者らのこれまでの研究における知見を全身に拡張することで、冗長自由度と弾性エネルギーの巧みな利用により冗長自由度系の高出力な全身協調運動生成の実現が期待される。

2. 研究の目的

本研究はヒューマノイドのハードウェア構成法・運動生成法を全身の効率的な協調運動の実現という観点から見つめなおすことにより、運動性能を飛躍的に向上させることを目的とする。具体的には、エンドエフェクタへの目的の出力に対し、自由度の冗長性を用いた全身の体勢および複数関節の弾性要素を協調させたエネルギーの蓄積を制御する、全身の高効率な協調運動生成法を確立する。小型軽量の弾性要素を含む高出力関節機構を開発し、さらに全身協調運動に最適化した等身大のヒューマノイドを開発、提案手法をロボット実機で評価する。本研究を通して全身の協調運動により効率的に高出力を発揮するヒューマノイドが実現される。

3. 研究の方法

(A) 全身協調による瞬発的な高出力運動生成法の確立

ロボットがエンドエフェクタから出力すべき力をもとに、ロボット全身を考慮した逆動力学運動方程式を用い、各関節に適切にトルクを分配することで、タスクに最適な冗長自由度を含んだ体勢の遷移を生成させる。さらに、大きな力の発揮が必要な際は関節に導入された弾性体を利用することで瞬発力を獲得するように体勢を変化させる運動生成法を構築する。

(B) 全関節に搭載可能な弾性要素を含む小型高出力関節機構の開発

エネルギーの蓄積により瞬発的な高出力を実現するためヒューマノイドの全関節に搭載可能な **CFRP** 弾性体を用いた小型の弾性要素とフレームレスモータを組み合わせた関節機構を開発する。複数関節の弾性要素を効率的に連動させるため、弾性値は広範囲で調整可能とする。

(C) 弾性要素を含めたヒューマノイド自由度構成決定手法の創出

冗長自由度の配置や関節の弾性値など、タスクを達成するために必要十分なハードウェア構

成を上記 (A) の知見から決定する. この構成をもとに (B) で開発した関節機構を組み込んだ等身大のヒューノイドを開発し, 全身協調による高出力運動を実機で実現させる.

4. 研究成果 <得られた成果>

関節弾性を活用する高出力運動生成法の開発

高出力運動生成法として, ロボット全身を考慮した逆動力学運動方程式を用い, 各関節の弾性体に弾性エネルギーを蓄積し, その後大出力を発揮するという一連の運動生成法を開発した. アクチュエータのみでは発揮できない大出力が必要となった場合において, 各関節の弾性体に弾性エネルギーを蓄積し, その後大出力を発揮するという一連の運動生成法として, 脚弾性を考慮して重心の目標運動量を実現する重心運動, それを実現するために逆運動学を用いた関節運動, 最後に関節弾性を考慮して各関節運動を実現するアクチュエータ運動の順で運動生成を行う運動生成法を開発した. 提案手法により沈み込んだ後に跳躍を行う動作を達成した. 実際のロボットを用いた実験により, 膝や足首関節にて必要な関節出力が分配され, 全関節出力の 40%程度を, 沈み込み時に各関節に蓄積した弾性エネルギーにより発揮できることを確認した (図 1).

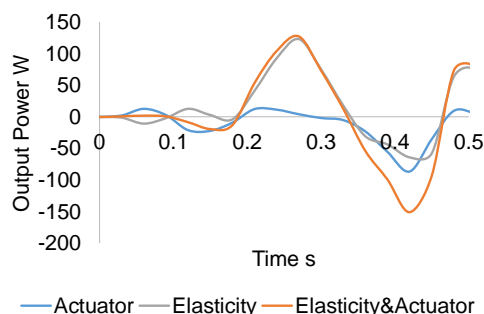
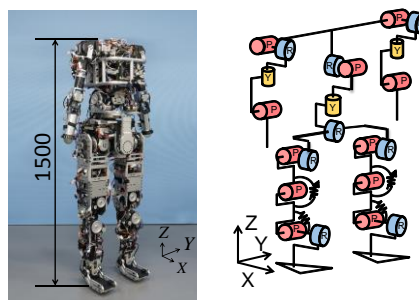


図 1 跳躍運動における弾性の活用

全身を活用した高出力運動生成法の開発—全身跳躍

高出力運動生成法として, 全身を簡易モデルとして全身のばね性を利用した場合の重心軌道をばね質点モデルとして生成し, その重心軌道を実現するように運動量・角運動量方程式から各関節軌道を生成する. ここで, ロボットの関節にはアクチュエータと弾性体が直列に搭載されているため (図 2), 関節軌道と全身の逆動力学運動方程式から各関節の必要発揮トルクを算出し, 各関節の弾性体の変位量を計算することで, 目標関節軌道を実現するアクチュエータ軌道を決する. 本手法を用いることで, 腕振りを行うことで, エネルギー蓄積および発揮出力を向上させた全身運動を実現した.



(a) 写真 (b) 自由度構成図
図 2 本研究に用いた人間型ロボット

弾性要素を含む小型高出力関節機構の開発

弾性を利用した高出力発揮が可能なヒューノイドの開発に向けて, 小型高出力関節機構を開発した. 全体の構造は, 能動アクチュエータと, 弾性値を任意に変更可能な弾性要素を直列に接続する. 弾性要素については, 材料として金属材料に比べ軽量・高強度を実現できる炭素繊維強化プラスチック CFRP を用い, 高強度・広弾性範囲を実現する重ね台形板ばねを開発し, 弾性体の固定部を関節駆動用とは異なる別のアクチュエータにより移動することで弾性値変更を行う構造とした. 開発した関節機構は, 大学所有の荷重試験機を用いて弾性変位と負荷を計測し評価を行い, 人間と同等の高出力・広弾性範囲を実現可能であることを確認した. ただし, 開発した機構は高重量でも高出力発揮が必要な脚などには搭載可能であるが, その他の部位に搭載するにはサイズが大きいかつ高重量であった.

全関節に搭載可能な弾性要素を含む小型高出力関節機構の開発

弾性を利用した高出力発揮が可能なヒューノイドの開発に向けて, 高負荷時にも弾性変更ができる小型高出力関節機構を開発した. これまでに開発した関節機構では, 高トルクの発揮が必要な関節に用いる場合に大型化してしまう問題があったため, そのような条件時には 4 節リンク構造を組み合わせ関節角度に応じて減速比を変化させることで小型化を達成した (図 3).

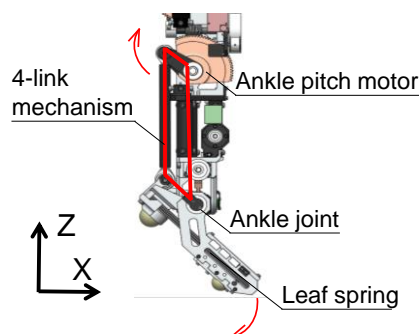


図 3 開発した関節機構

<得られた成果の国内外における位置づけとインパクト>

本研究は高効率に大出力を実現させるため冗長自由度を含むタスクに最適な体勢の決定、弾性要素へのエネルギー蓄積を伴うヒューマノイドの全身協調運動を実現させるものである。

まず、冗長自由度を利用した体勢の決定に関しては、本研究ではヒューマノイドの全身協調動作への利用という観点から冗長自由度の構成法・利用法を検討し、従来研究のように腕部や脚部といった要素ごとではなく、全身で最適化を行う点に特色がある。弾性要素の導入に関しては、本研究では関節単体の弾性だけでなく、複数関節の弾性要素を連動したエネルギーの蓄積に特色がある。これまで、関節に弾性要素を含むロボットは多数開発されてきた。これらの代表例として伊・IITのCOMAN (Tsagarakisら, 2007) が挙げられるが、これらの弾性要素はまずスペースを要するものが多く、全身へ搭載できるほど小型の弾性要素を含む関節構造は開発されてこなかった。さらに、従来研究ではロボットは関節単位での弾性要素のみを論じており、複数関節に渡る弾性要素を協調的に運動させて全身運動に利用しようとしたものはなかった。

本研究で構築される運動生成法・ハードウェア構成法は、ヒューマノイドに限らず瞬発的に高出力を要求されるロボット一般へ広く適応可能なものであり、その学術的価値は大きい。また、本研究の成果は特に汎用機械としてのヒューマノイドの運動性能を飛躍的に高めることに寄与し、災害現場などの極限環境における重量物の運搬など、実用性が大きく向上する。

<今後の展望>

本研究により、瞬発的に高出力を要求されるロボットの基礎技術を構築することが出来た。この基礎技術を用いて、様々な瞬発動作を実現していく。また、冗長自由度の活用についても、本研究の提案手法を用いることで、一見活用できない自由度であっても動作の総合的なクオリティ向上に貢献することが確認できた。そのため、瞬発的な発揮出力だけでなく、エネルギー効率やロボットの耐久性、構築コストなども含めた広範なロボット設計論の構築を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mineshita Hiroki, Otani Takuya, Hashimoto Kenji, Sakaguchi Masanori, Kawakami Yasuo, Lim Hun-ok, Takanishi Atsuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Robotic Ankle Mechanism Capable of Kicking While Jumping and Running and Adaptable to Change in Running Speed	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots	6. 最初と最後の頁 505-510
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/Humanoids43949.2019.903505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mineshita Hiroki, Otani Takuya, Hashimoto Kenji, Sakaguchi Masanori, Kawakami Yasuo, Lim Hun-ok, Takanishi Atsuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a trapezoidal leaf spring for a small and light variable joint stiffness mechanism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 23rd CISM IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） -	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mizukami Hideki, Otani Takuya, Shimizu Juri, Hashimoto Kenji, Sakaguchi Masanori, Kawakami Yasuo, Lim Hun-ok, Takanishi Atsuo	4. 巻 -
2. 論文標題 Investigation of Parallel Connection Circuit by Hydraulic Direct-Drive System for Biped Humanoid Robot Focusing on Human Running Motion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 23rd CISM IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） -	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Otani Takuya, Hashimoto Kenji, Isomichi Takaya, Natsuhara Akira, Sakaguchi Masanori, Kawakami Yasuo, Lim Hun-ok, Takanishi Atsuo	4. 巻 32
2. 論文標題 Trunk motion control during the flight phase while hopping considering angular momentum of a humanoid	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1197 ~ 1206
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1080/01691864.2018.1526709	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takuya Otani, Kenji Hashimoto, Ueta Hiroki, Masanori Sakaguchi, Yasuo Kawakami, Hun-ok Lim and Atsuo Takanishi	4. 巻 1
2. 論文標題 Jumping Motion Generation of a Humanoid Robot Utilizing Human-like Joint Elasticity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2018)	6. 最初と最後の頁 8707-8714
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Otani Takuya, Hashimoto Kenji, Miyamae Shunsuke, Ueta Hiroki, Natsuhara Akira, Sakaguchi Masanori, Kawakami Yasuo, Lim Hum-Ok, Takanishi Atsuo	4. 巻 8
2. 論文標題 Upper-Body Control and Mechanism of Humanoids to Compensate for Angular Momentum in the Yaw Direction Based on Human Running	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app8010044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Mineshita Hiroki
2. 発表標題 Robotic Ankle Mechanism Capable of Kicking While Jumping and Running and Adaptable to Change in Running Speed
3. 学会等名 2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒岩祐志
2. 発表標題 骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第23報: 高出力, 剛性変化可能で人間と同等の質量特性を有する下腿機構)
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水上英紀
2. 発表標題 骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 (第24報: 2足走行ロボットへの搭載に向けた油圧駆動股関節機構)
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mineshita Hiroki
2. 発表標題 Development of a trapezoidal leaf spring for a small and light variable joint stiffness mechanism
3. 学会等名 23rd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mizukami Hideki
2. 発表標題 Investigation of Parallel Connection Circuit by Hydraulic Direct-Drive System for Biped Humanoid Robot Focusing on Human Running Motion
3. 学会等名 23rd CISM IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya OTANI
2. 発表標題 Jumping Motion Generation of a Humanoid Robot Utilizing Human-like Joint Elasticity
3. 学会等名 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuya OTANI
2. 発表標題 Ankle and Foot Mechanism Mimicking Joint Stiffness and Following Motion Based on Human
3. 学会等名 ROMANSY 22; Robot Design, Dynamics and Control (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大谷拓也
2. 発表標題 骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発(第22報: 能動駆動と弾性発揮を活用する跳躍運動の実現)
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 峯下弘毅
2. 発表標題 骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発(第21報: 跳躍・走行時の能動蹴り出しや走行速度の変化に対応した足関節機構)
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤堀孝太
2. 発表標題 骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発(第16報: 広範囲剛性関節機構のための台形 CFRP 重ね板ばね)
3. 学会等名 第35回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 尾原睦月
2. 発表標題 骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発(第17報:低速走行から高速走行への遷移に対応した広範囲剛性可変機構)
3. 学会等名 第35回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大谷拓也
2. 発表標題 骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発(第18報:角運動量を考慮した跳躍時体幹制御)
3. 学会等名 第35回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 張春宇
2. 発表標題 骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発(第19報:CFRP重ね板ばねによる弾性関節機構の小型化)
3. 学会等名 第18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
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Toshio Fukuda, Fei Chen and Qing Shi (Eds.)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 MDPI	5. 総ページ数 554
3. 書名 Bio-Inspired Robotics	

〔産業財産権〕

〔その他〕

骨盤運動に着目した2足走行ロボットの開発 WATHLETE-1
http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/running/index_j.htm

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石井 裕之 (Ishii Hiroyuki) (10398927)	早稲田大学・理工学術院・准教授 (32689)	
研究分担者	橋本 健二 (Hashimoto Kenji) (10449340)	明治大学・理工学部・専任准教授 (32682)	
研究分担者	大谷 拓也 (Otani Takuya) (70777987)	早稲田大学・理工学術院総合研究所・次席研究員(研究院講師) (32689)	