

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 7 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420201

研究課題名(和文)人体の筋骨格構造と弾性調節機能を用いた新しい歩行ロボットの設計と運動制御

研究課題名(英文) Design and motion control of a new walking robot utilizing human musculoskeletal structure and its stiffness adjustment capability

研究代表者

李 在勲 (LEE, JAEHOON)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・准教授

研究者番号：00554411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：人体システムに基づいた筋骨格構造の新しい準受動歩行ロボットを開発した。複数の駆動機と拮抗作用を活用してシステムの運動特性を統合的に調節する方法を提案した。その駆動ユニットを製作し、位置と弾性の制御が可能であることを確認した。その結果を3リンク構造の歩行ロボットに適用し、連続的な歩行を実現した。また、膝付き5リンク構造の歩行ロボットを開発し、姿勢と足部反力のセンサ情報を用いるCPG基盤の制御機を搭載した。計算機シミュレーションと実験を通して、センサ情報によって歩行が安定化することを確認した。また、バネと弾性調節用の小型モータを用いて関節周りの弾性を調節することが可能な新しい関節機構を設計した。

研究成果の概要(英文)：A new semi-passive walking robot having human musculoskeletal structure was developed. A unified method to regulate motion characteristics by using multiple actuators was proposed and verified. Its actuation unit was manufactured and used to confirm that it is possible to control its both position and stiffness. It was applied to successful walking experiments using the three-linked planar walking robot developed in this research. Besides, a five-linked walking robot having knee joint was developed and a controller based on CPG (Central Pattern Generator) exploiting information of pose sensor and foot force sensor has been embedded in it. It was observed through computer simulations and experiments that the robot can walk continuously and its motion is stabilized by the sensor information. In addition, a new joint mechanism was designed that can adjust the stiffness of itself not by using antagonism with multiple actuators but by using a special device with a spring and a small motor.

研究分野：ロボット工学

キーワード：歩行ロボット 筋骨格構造 弾性調節機能

1. 研究開始当初の背景

ロボットが日常生活環境で人間と共存し様々な活動を支援するためには、歩行を含む様々な運動において柔軟性の向上が課題となっている。一方、人体システムは柔軟な運動性能を有するため高いエネルギー効率が高く、ロボット開発の良いモデルとして認識されている。人体は弾性要素を含んでいるだけではなく、関節周りに存在する多くの筋肉を統合的に活用することによって、システム全体の特性を円滑に変化させることが可能であると報告されている。そして、制御方法においてもフィードバック (Feedback) とフィードフォワード (Feedforward) の両方を知的に用いることで、一般的なロボットより優れた柔軟性を示す様々な運動ができる。また、歩行運動には振り子の原理に基づく準受動歩行方式を採用している。人体システムのように複数のアクチュエータによる可変弾性機能と準受動歩行方式を活用することで人間のような歩行が可能なロボットの実現ができると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人体の関節周りに多く存在する筋肉による弾性調節機能の歩行運動での役割を、ロボット工学の視点から解明するとともに、人体システムに基づいた筋骨格構造の新しい準受動歩行ロボットを開発することである。また、複数の駆動機を活用してシステムの特性を統合的に調節することで、ロボットを安定して歩行させる新しい制御方法を考案する。

3. 研究の方法

駆動ユニット、初期モデルの歩行ロボット、最終モデルの歩行ロボットについて理論的な研究と計算機シミュレーション、そして実機制作と実験を行い、新しい準受動歩行ロボットを以下のように開発する。

(1) 駆動ユニットの開発

まず、歩行ロボットに活用するために、弾性調節が可能な駆動機ユニットを開発する。人体システムの筋骨格構造に基づき、1自由度のリンクメカニズムに対して二つの駆動機を装着したモデルを提案する。また、両方の駆動機による拮抗作用で関節周りの弾性を制御する方法について研究する。提案する駆動ユニットについて計算モデルを用いたシミュレーションと実験を通して制御方法を提案する。

(2) 平面型3リンク構造の歩行ロボット開発

人間の歩行運動を再現するための簡単な初期モデルとして、胴体と両脚で構成される平面型3リンクの歩行ロボットについて研究する。各脚を動かすためには開発した駆動ユニットを用いる。連続的な歩行運動を実現

させるための制御方法を提案するとともに、支持脚と遊脚において歩行運動の各状態に対する適切な弾性について計算機シミュレーションと実験を通して調べる。

(3) 膝付き二脚歩行ロボットの開発

初期モデルを発展させた最終モデルとして、膝付き平面型5リンク歩行ロボットを設計し開発する。また、振り子の原理に基づく二脚歩行運動について、胴体の姿勢と足部の反力などのセンサ情報の影響について調べる。計算機を用いたシミュレーションの結果を実機制作に反映して、新しい準受動歩行ロボットを開発し、様々な歩行運動について提案した歩行制御アルゴリズムの検証をする。

4. 研究成果

(1) 駆動ユニットの開発

制作した駆動ユニットの実験装置を図1に示す。人体の筋肉と腱の役割を行う要素として DC モータと非線形弾性特性を持つワイヤ (SAT: Stiffness Adjustable Tendon) を採用した。両方の DC モータによる関節周りのトルクでリンクが回転し、両方の張力が釣り合うところで停止する。また、両方の張力の総和によって弾性要素である SAT の弾性が変化するので、フィードフォワード方式でシステムの弾性を制御することが可能となった。

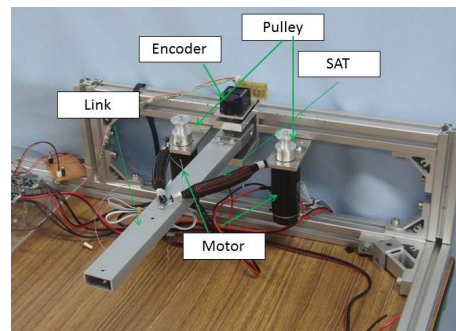


図1. 駆動ユニットの実験装置

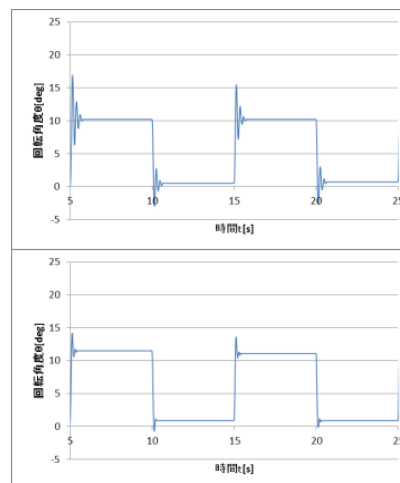


図2. ステップ移動実験結果 (上: 低い弾性の場合, 下: 高い弾性の場合)

この原理を基に，関節角度のフィードバックによる位置制御と，内力のフィードフォワードによる関節周りの弾性制御を同時に行う方法を提案した．図2は提案した方法で行った位置及び弾性制御実験の結果を示す．内力を小さく設定した場合は(図2の上)，低い弾性を持つとともに減衰特性も小さくなるため振動が長く続く．また，外力に対しても動きやすく柔らかい特性を示す．しかし，内力を大きく設定した場合は(図2の下)，高い弾性と高い減衰特性を持つため短い時間で目標位置に移動し停止する．さらに，外力に対しても回転しにくい硬い特性を示す．

(2) 平面型3リンク構造の歩行ロボット開発

図3に本研究で開発した初期モデルの準受動歩行ロボットを示す．胴体と両脚の3リンクで構成される平面型である．左右に倒れないように，各脚は二本の並列リンクで製作し，内脚と外脚として設置した．各脚は駆動ユニットが設置されており，胴体との角度と関節周りの弾性を制御できる．歩行運動制御としては，遊脚と支持脚を目標角度に移動させるとともに姿勢を維持するPID制御方法を採用した．提案した方法で計算機シミュレーションを行い，開発したロボットに適用した歩行実験の様子を図4に示す．

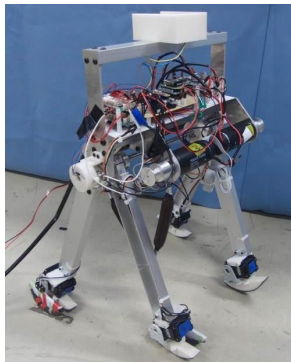


図3．開発した3リンク構造の初期モデルの歩行ロボット

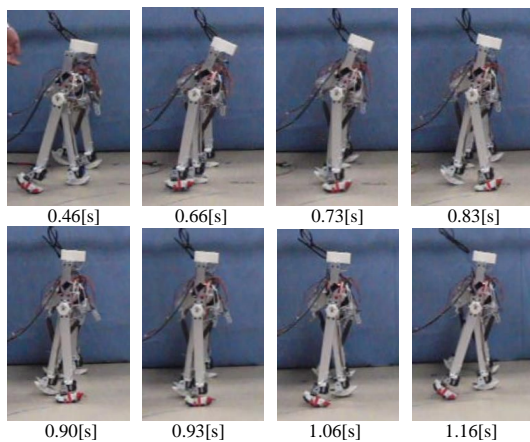


図4．初期モデルの歩行ロボットを用いた歩行実験の様子

(3) 膝付き二脚歩行ロボットの開発

最終モデルとして，膝付き平面型5リンク歩行ロボットが開発された．図5はその実機と実験環境を示す．ロボットが左右に倒れずに長距離で歩行できるように，トレッドミルに特殊なメカニズムを装着した．ロボットの胴体には姿勢を計測するためのIMU(Inertial Measurement Unit)センサを，脚部には反力を測定するための力センサを装着した．センサ情報を活用するCPG(Central Pattern Generator)基盤の歩行制御を搭載した．センサのフィードバック情報によって歩行運動が安定されることが確認された．図6に開発した膝付き二脚歩行ロボットを用いた歩行実験の様子を示す．

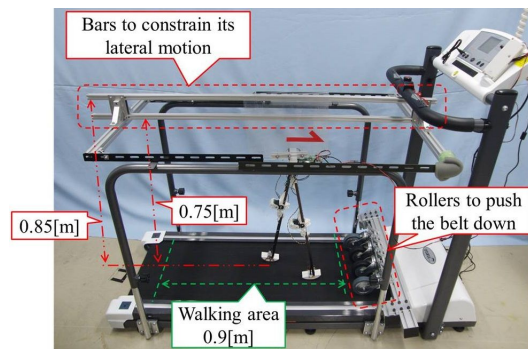


図5．開発した最終モデルの歩行ロボットと実験環境

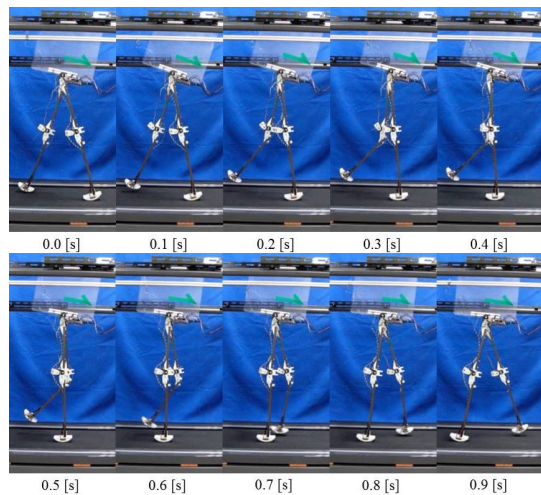


図6．最終モデルの膝付き二脚歩行ロボットを用いた歩行実験の様子

(4) 可変弾性関節機構の開発

アメリカテキサス大学との共同研究で新しい可変弾性調節機構を設計した．複数の駆動機による拮抗作用を用いて弾性を調整する駆動ユニットではなく，バネのような受動弾性要素と弾性調節用駆動機を用いる可変弾性調節機構の設計案が提案された．

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

Jae Hoon Lee, Christian Wahrmond, Amir

Jafari, A Novel Mechanically Overdamped Actuator with Adjustable Stiffness (MOD-AwAS) for Safe Interaction and Accurate Positioning, Actuators, Vol.6, No.3, 2017

DOI: 10.3390/act6030022

Takashige Yano, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto, Development of a Biped Walking Robot with Antagonistic Actuation, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Vol.5, No.3, 2015, pp.196-201

DOI: 10.18178/ijmerr.5.3.196-201

〔学会発表〕(計16件)

Hirotsu Suzuki, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto, Development of Semi-Passive Biped Walking Robot Embedded with CPG-based Locomotion Control, Proceedings of International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2017), 2017.6, 「Jeju, Korea」

鈴木寛達, 李在勳, 岡本伸吾, CPG制御を用いた膝付き二脚歩行ロボットの計算機シミュレーション, 平成28年度計測自動制御学会四国支部学術講演会講演論文集, 2-25, 2016.11, 「徳島大学(徳島県・徳島市)」

滝口雄晶, 李在勳, 岡本伸吾, 可変弾性腱のモデリングと計算機シミュレーション, 平成28年度計測自動制御学会四国支部学術講演会, 平成28年度計測自動制御学会四国支部学術講演会講演論文集, 1-07, 2016.11, 「徳島大学(徳島県・徳島市)」

Takashige Yano, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto, Walking Experiment of Biped Robot with Antagonistic Actuation Using Non-Linear Spring, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS 2016), 2016.3, 「Hong Kong, China」

Takashige Yano, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto, Development of a Biped Walking Robot with Antagonistic Actuation, International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM2016), M24, 2016.1, 「Singapore」

矢野隆成, 李在勳, 岡本伸吾, 拮抗駆動型二脚歩行ロボットの開発と歩行制御, 日本機械学会中国四国支部第53期講演会講演論文集, 811, 2016.3, 「愛媛大学(愛媛県・松山市)」

鈴木寛達, 李在勳, 岡本伸吾, 膝付二足準

受動歩行ロボットの開発と歩行制御, 日本機械学会中国四国支部第46回学生員卒業研究発表講演会論文集, 203, 2016.3, 「愛媛大学(愛媛県・松山市)」

矢野隆成, 李在勳, 岡本伸吾, 筋骨格系二脚歩行ロボットの開発, 平成27年度計測自動制御学会四国支部学術講演会講演論文集, 1-17, 2015.11, 「高知工科大学(高知県・香美市)」

鈴木寛達, 李在勳, 岡本伸吾, CPG制御法を用いた膝付き二足歩行ロボットの開発, 平成27年度計測自動制御学会四国支部学術講演会講演論文集, 1-16, 2015.11, 「高知工科大学(高知県・香美市)」

片岡亮一郎, 李在勳, 岡本伸吾, 可変弾性機能を有する関節機構の性能実験, CPG制御法を用いた膝付き二足歩行ロボットの開発, 平成27年度計測自動制御学会四国支部学術講演会講演論文集, 2-23, 2015.11, 「高知工科大学(高知県・香美市)」

矢野隆成, 李在勳, 岡本伸吾, 1自由度筋骨格系脚システムの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会2015講演論文集, 2A1-Q04, 2015.5, 「みやこめっせ(京都市)」

Takashige Yano, Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto, Motion Control of 1-DOF Robotic System with Antagonistic Actuation, Proceedings of 10th Korea Robotics Society Annual Conference, 2015.5, 「Daejeon (Korea)」

竹本宏晃, 李在勳, 岡本伸吾, 1自由度系筋骨格系駆動ユニットの制御実験, 日本機械学会中国四国学生会第45回学生員卒業研究発表講演会論文集, 1411, 2015.3, 「近畿大学(広島県・東広島市)」

Jae Hoon Lee, Shingo Okamoto, Stiffness Modulation of a 1-DOF Robotic Manipulator with Antagonistic Actuation, Proceedings of 2015 Global Conference on Artificial Intelligence, 2015.2, 「Shanghai (China)」

竹本宏晃, 李在勳, 岡本伸吾, 1自由度系筋骨格系駆動ユニットの開発, 平成26年度計測自動制御学会四国支部学術講演会講演論文集, 2-6, 2014.11, 「愛媛大学(愛媛県・松山市)」

矢野隆成, 李在勳, 岡本伸吾, 1自由度筋骨格系脚ロボットの運動シミュレーション, 平成26年度計測自動制御学会四国支部学術講演会講演論文集, 2-14, 2014.11, 「愛媛大学(愛媛県・松山市)」

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.me.ehime-u.ac.jp/labo/kikais/robins/index.html>

6．研究組織

(1)研究代表者

李 在勳 (LEE Jaehoon)
愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：00554411

(2)研究協力者

JAFARI Amir
アメリカテキサス大学 (UTSA)・機械工学科・助教授

矢野 隆成 (YANO Takashige)

鈴木 寛達 (SUZUKI Hirotatsu)

滝口 雄晶 (TAKIGUCHI Takeaki)

竹本 宏晃 (TAKEMOTO Hiroaki)

片岡 亮一郎 (KATAOKA Ryoichiroh)