

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04193

研究課題名（和文）多様な形態の脚歩行と形態間遷移を誘発する柔軟な体幹機構の開発

研究課題名（英文）Development of viscoelastic trunk mechanism that promotes and transitions multi-modal legged locomotion

研究代表者

田熊 隆史（Takuma, Takashi）

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：40437372

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではこれまで着目されてこなかった体幹機構に着目し、柔軟な体幹が二脚、四脚及び多脚運動に及ぼす影響について数理モデル解析やロボット実験により明らかにした。二脚では腕を前後非対称に振り、粘弾性を有する体幹を鉛直軸周りに受動的に捻ることで、転倒しない歩行の指標である床反力中心が左右にのみ揺動することを数理モデルで明らかにし、ロボット実験で検証した。四脚では二つの剛体がねじりバネで接続された体幹を有するモデルを対象に、トロット運動とペーシング運動を解析した結果、歩行安定性のための身体のねじりの重要性が明らかになった。多脚においては体幹に弾性を持たせることで様々な歩容が生成されることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで脚ロボットの歩容では、脚部の運動や設計が議論されてきた。しかしロボットにおいて大きな重量を占め、四肢を繋ぐ役割を担う体幹の効果については議論されてこなかった。各形態の歩行において体幹重心が適切な位置にないと転倒したり歩行の効率が悪くなったりするなど、体幹の機構と運動を適切に設計することは多様な形態での歩行と遷移を実現するにあたり必要不可欠な課題である。本研究では各歩容において鍵となる体幹関節に粘弾性を持たせることで、脚は自律分散的に適当に動かしているだけにもかかわらず、歩行が安定したり多様な歩行が発生したりすることを示した。これにより脚とは異なる新たな設計指針の議論が可能となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the trunk mechanism, which has not been paid attention to so far, and revealed the effects of a flexible trunk on biped, quadruped, and multiped locomotion by analyzing mathematical models and robot experiments. In the biped, we showed using the mathematical model that the center of pressure, which is an index of capability of walking, oscillates only to the left and right when the arms swing back and forth asymmetrically and the viscoelastic trunk twists passively around the vertical axis. We also verified by robot experiments. In the quadruped, a model with a trunk constructing two rigid bodies connected by a torsion spring was analyzed for trotting and pacing motions, which revealed the importance of body torsion for walking stability. In the multiple legs, various gait patterns can be generated by adding elasticity to the trunk.

研究分野：ロボット工学

キーワード：脚移動 多様な歩行 弾性を有する体幹 ロボット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

脚口ロボットは、車輪型ロボットでは踏破が難しい不整地などで、大きな効果を発揮する。脚口ロボットがエネルギー効率良く、また安定した歩行を獲得するために、これまで多くの研究では脚部の運動や設計が議論されてきた。一方で質量が大きく、四肢をつなぐ重要な役割を果たす体幹については、その運動や設計についての議論があまりされてこなかった。これまで報告されてきた二脚、四脚、多脚のロボットでは、体幹部は関節を有さない剛体であった。しかし各形態の歩行において体幹は歩行に大きな影響を与え、たとえば不適切な体幹重心位置によりロボットが転倒したり歩行の効率が悪くなったりする。従って、体幹の機構と運動を適切に設計することは、多様な形態での歩行を考えるにあたり必要不可欠な課題である。また四脚から二脚など異なる歩容形態に遷移する際も、体幹の運動を考えることは重要である。

近年ロボットの分野において、本研究代表者・分担者を中心に、弾性や粘性といった受動的な要素を有する関節を体幹に持たせ、それらを調整することで様々な歩行に影響を与えることが報告されてきた。たとえば二脚歩行では体幹の弾性を変えることによる歩行速度の変化、多脚歩行では異なる歩行パタンの誘発や方向転換などが発現する。これらの研究で共通する興味深い点は、体幹は能動的に駆動せず、受動的な要素を変更するのみとしている点である。またそれぞれの脚は足が着地したら前に出すなど単純な規則で駆動しており、歩行に応じて関節の軌道変更は行っていない。すなわち、体幹は関節の弾性など自己の受動要素を操作することで、自律分散的に駆動する脚の運動に方向性を与え、多様な歩行を実現している。このように体幹の機構を工夫することで、様々な歩容が実現されることや安定性を獲得することが示されつつあるが、それらに潜在するダイナミクスについて明らかになっていない点が多くある。将来、単体の機体が状況に応じて様々な歩行形態や形態間遷移を実現することが求められているが、そのための鍵となる体幹機構の設計を議論するために、体幹の弾性が二脚および多脚歩行に及ぼす影響をより詳細に調査することが求められている。また実機での実現にあたり、体幹関節の粘弾性を操作できるような機構の開発も求められている。

2. 研究の目的

本研究ではこれまでの知見を発展させ、多様な歩行形態とその遷移を実現するにあたり「様々な形態における歩行の安定性や歩行パタンの誘発に影響を与える体幹の構造と、そのメカニズムはどのようなものか？」を学術的な「問い」とし、これを明らかにすることを本研究の目的とする。本研究は研究代表者や分担者がこれまで明らかにしてきた、二脚や四脚、多脚歩行における柔軟体幹の効果に関する知見を深化させ、数理モデルによる解析によりそのメカニズムを明らかにし、実ロボットや動力学シミュレーションにより現象が発現することを確認する。本研究が定める目的の特徴的な点は、多くの研究では多様な歩行について脚の構造や運動を議論しているのに対し、本研究では身体の「要」となる体幹の設計に着目し、その効果を明らかにしようとする点である。体幹の機構を設計するにあたり、本研究ではこの要となる体幹の受動要素を操作することで、自律分散的に駆動する前肢後肢に対して所望の運動の誘発や、安定/不安定な運動を発生させる。これまで歩行ロボットの研究では体幹については剛体と見なしているものが大半であったが、上述の通り体幹の設計を工夫することで、自律分散的に駆動する四肢であっても歩行が誘発されることや、安定な歩行が獲得されることを示す。

3. 研究の方法

研究を遂行するにあたり、二脚や四脚、多脚、姿勢の遷移それぞれにおける柔軟体幹の効果について、数理モデルによる解析および実機と動力学シミュレーションによる検証を行った。田熊と青井は柔軟体幹と腕を有する二脚のモデルに対して数理モデルの構築と解析を行った。田熊は数理モデルで得られた知見を元に実機を試作し、数理モデルの挙動が実ロボットでも見られるか検証した。また動力学シミュレーション上でモデルを構築し、体幹関節の弾性係数を様々に変えたときの挙動を観察した。杉本は同じ二脚でもヒトと身体構造の異なるカラスの歩行に注目し、歩行の遷移と安定性について調査した。四脚については青井が数理モデルを構築し、トロット運動とペース運動における体幹の捻りと安定性の関係について調査した。田熊は実機を試作し、体幹の弾性操作による歩行速度の変化を観察した。また動力学シミュレーション上でモデルを構築し、体幹上の異なる位置に関節を取り付けた場合の、体幹関節弾性と歩行速度の関係を調査した。多脚については杉本がイナゴのモデルを対象に、脚長と歩容の関係を調査した。青井はムカデのモデルを対象に、体幹関節の弾性と歩容の関係および移動方向転換の関係を調査した。四脚から二脚への変遷については田熊が数理モデルを構築し、体幹の弾性と遷移の安定性について調査した。またシミュレーション上で様々に体幹の弾性を変化させたときの起き上がり運動の安定性を調査した。最後に単体の機体で異なる歩行形態を実現するための体幹の設計について検討した。粘弾性が操作できる体幹関節実現のため、杉本はマッキベン型空気圧人工筋の特性を調査した。

4. 研究成果

それぞれの歩行形態について精緻な調査を行うことで、様々なことが明らかになった。いくつか代表的な結果を示す。二脚については、図1のように、鉛直軸回りに受動的に回転する粘弾性を有する軸を設けた体幹と、前後に能動的に振る腕から構成される立脚の数理モデルを解析した。その結果、次のことが明らかになった。ひとつはそれぞれの腕を前後非対称（左右は対称）に振り、粘弾性を有する体幹を受動的に捻ることにより、転倒しない歩行の指標である床反力中心が左右にのみ揺動して前後には移動しないことが分かった。一方で腕を前後対称に振ると床反力中心は前後左右とも移動せず、原点に留まることが分かった。また一つは、体幹関節の弾性を変更することで前後非対称に腕を振る際の床反力中心左右方向の揺動の位相、すなわち床反力中心が右足および左足に位置するタイミングが調整可能であることが分かった。床反力中心の左右方向の位相は腕振り周期によって変更するが、将来歩行をする際にはどの周期であっても右足支持脚時は床反力が右側、左足支持脚時は左側となる必要がある。そのため腕振り周期、すなわち歩行周期を変更して位相が変わった場合は、体幹関節の弾性を調整することで希望する位相に収束できることが示された。これらの発見をロボットおよびシミュレーションで検証した。ロボットによる検証では、図2に示すような数理モデルに即したロボットを試作し、足裏に取り付けた複数の力センサから床反力中心を計測した。その結果、数理モデルで予測したとおり前後非対称で腕を振ることで床反力中心は左右方向にのみ揺動することを確認した。カラスの歩行についてはその安定性に着目し、歩容の遷移が起こる速度域で安定性が損なわれるかを実際のカラスの歩行を撮影して測定した。その結果、歩容が遷移する速度域と安定性が最も損なわれる速度域が一致し、歩容遷移と安定性に関係がある可能性を示した。

四脚については、図3に示すねじりバネで接続された二つの剛体で構成される体幹と、ばね特性を持つ四本の脚で構成されるモデルを構築した。このモデルを対象に、トロット運動とペーシング運動の周期解を導き、ポアンカレ写像を用いてこれらの運動タイプの安定性を評価した。またこのモデルのパラメータの安定条件を決定し、運動のメカニズムを明らかにした。更には剛体モデルとの比較により、歩行安定性のための身体の捻れの重要性を明らかにした。実機による検証では、体幹が背屈/底屈を行う関節にマッキベン型空気圧人工筋を拮抗に配置して粘弾性を持たせ、関節の粘弾性（人工筋の内圧）と走行速度の関係を調査した。その結果、体幹前方に関節を取り付けた場合は内圧と速度が上に凸の関係となり、後方に関節を取り付けた場合は下に凸の関係になることが分かった。

多脚の歩容変化については、動力学シミュレーションにより複数の体幹関節に弾性を持たせることで進行波、後退波、わき出し波に対応する3種類の歩容が生成されたことを確認した。また数理モデルの力学構造を解析的に調べることで、沈み込み波に対応する歩容が存在できない理由を明らかにした。移動方向転換については、体幹関節のバネ係数を変化させることで直進運動がピッチフォーク分岐を経て不安定になることを示し、ピッチフォーク分岐を利用した旋回操作を実機により検証した。

粘弾性を持つ関節の実現として上述したマッキベン型空気圧人工筋の特性が調査され、多くの研究で調査されている筋の進展時の特性ではなく、筋の圧縮時の変形量と効力の関係を調査した。その結果、内部の圧力がある程度大きくすると、進展時と同様変形量に応じて抗力が大きくなることが確認された。

これらの結果より、各歩容形態で体幹の粘性や弾性が有効であることが明らかになったが、歩行形態によってキーとなる体幹関節の回転方向が異なることも分かった。しかし一方で、上述した二脚立脚モデルと、トロットおよびペーシング運動する四脚のモデルでは、体幹の長軸方向、すなわち二脚であれば鉛直、四脚であれば進行方向に回転する軸を持たせ、その弾性を調整することで歩行の安定性に影響を与えることが分かった。これより、多様な歩行形態を単独の機体で実現するために、ひとつの軸を持たせることで異なる歩容形態でもその効果を発揮する可能性が示された。

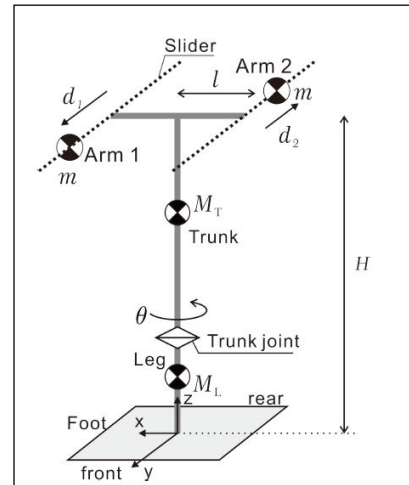


図1 能動的な腕振りと受動的な体幹捻りをするモデル

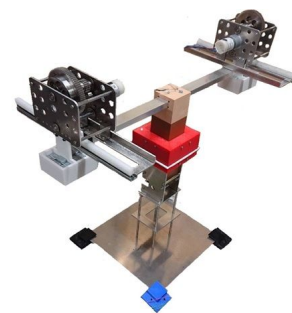


図2 開発したロボット

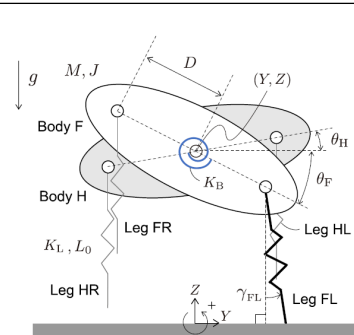


図3 四脚モデル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Adachi Mau, Aoi Shinya, Kamimura Tomoya, Tsuchiya Kazuo, Matsuno Fumitoshi	4. 巻 15
2. 論文標題 Body torsional flexibility effects on stability during trotting and pacing based on a simple analytical model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bioinspiration & Biomimetics	6. 最初と最後の頁 055001 ~ 055001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-3190/ab968d	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 Takuma Takashi	4. 巻 9
2. 論文標題 Design of Tendon-Driven Mechanism Using Geometrical Condition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 48 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/act9030048	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 -

1. 著者名 Sugimoto Yasuhiro, Sugiyama Shuntaro, Naniwa Keisuke, Osuka Koichi	4. 巻 34
2. 論文標題 Analysis of the unique gait mechanism of locusts focusing on the difference in leg length	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 1110 ~ 1121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2020.1750481	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 S. Aoi, R. Tomatsu, Y. Yabuuchi, D. Morozumi, K. Okamoto, S. Fujiki, K. Senda, and K. Tsuchiya	4. 巻 38
2. 論文標題 Advanced turning maneuver of a many-legged robot using pitchfork bifurcation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Robotics	6. 最初と最後の頁 3015-3026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TR0.2022.3158194	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 -

1. 著者名 M. Adachi, S. Aoi, T. Kamimura, K. Tsuchiya, and F. Matsuno	4. 巻 10
2. 論文標題 Fore-aft asymmetry improves the stability of trotting in the transverse plane: a modeling study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Bioengineering and Biotechnology	6. 最初と最後の頁 807777
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fbioe.2022.807777	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20件(うち招待講演 0件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Takahiro Goto, Yasuhiro Sugimoto, Daisuke Nakanishi, Keisuke Naniwa, Koichi Osuka
2. 発表標題 Analysis of Autonomous Coordination Between Actuators Using the Poincare Map
3. 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤貴滉, 杉本靖博, 中西大輔, 浪花啓右, 大須賀公一
2. 発表標題 空圧筋骨格系における自律的なアクチュエータ間協調の数理解析
3. 学会等名 第33回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryoma Kitamura, Yuichi Tamura, Takashi Takuma
2. 発表標題 Bipedal locomotion by swinging arm with flexible trunk
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 草野翔梧, 住岡英信, 港隆史, 塩見昌裕, 田熊隆史
2. 発表標題 導電性を有する布を用いた触覚センサの開発と評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Ambe and S. Aoi
2. 発表標題 Simple multi-legged model reveals that Retrograde-wave gait rather attenuates body oscillation than Direct-wave gait
3. 学会等名 3rd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤 貴滉, 杉本 靖博, 中西 大輔, 浪花 啓右, 大須賀 公一
2. 発表標題 空圧筋を用いた拮抗筋モデルにおける自律的協調の解析
3. 学会等名 第32回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本 靖博, 杉山 俊太郎, 浪花 啓右, 大須賀 公一
2. 発表標題 後脚の構造と運動に着目したバッタ特有の歩容解析
3. 学会等名 第32回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Tomatsu, Y. Yabuuchi, S. Aoi, S. Fujiki, T. Funato, K. Senda, and K. Tsuchiya
2. 発表標題 Experimental investigation of turning maneuverability of a multilegged robot using pitchfork bifurcation
3. 学会等名 9th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安部祐一, 青井伸也, 土屋和雄, 松野文俊
2. 発表標題 センサフィードバックによる多足歩行の多様な波の創発とその存在理由
3. 学会等名 システム・情報部門学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大西 涼, 北村 涼馬, 田熊 隆史, 加瀬 渡
2. 発表標題 柔軟体幹を有する二脚歩行ロボットにおける非対称腕振り運動の効果
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Takuma, and Fumiya Kitaura
2. 発表標題 Design of Tendon-driven Mechanism by using Geometrical Condition
3. 学会等名 International Conference on Design, Mechanical and Electrical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Onishi, Ryoma Kitamura, Takashi Takuma and Wataru Kase
2. 発表標題 Effect of Arm Swinging and Trunk Twisting on Bipedal Locomotion
3. 学会等名 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北村 涼馬, 田村 祐一, 田熊 隆史, 加瀬 渡
2. 発表標題 柔軟体幹を有する二脚ロボットの腕振り運動による歩行の実現
3. 学会等名 第20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 2019年

1. 発表者名 Y. Ambe, S. Aoi, M. Konyo, and S. Tadokoro
2. 発表標題 Local sensory feedback generates various wave gaits in multi-legged robots via embodied sensorimotor interaction
3. 学会等名 13th Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Aoi
2. 発表標題 Improving turning maneuver of a multilegged robot using pitchfork bifurcation
3. 学会等名 第6回理論応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kamimura, S. Aoi, Y. Higurashi, T. Matsuo, N. Wada, K. Tsuchiya, and F. Matsuno
2. 発表標題 Body flexibility effect on rotary galloping based on a simple model
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Adachi, T. Kamimura, S. Aoi, K. Tsuchiya, and F. Matsuno
2. 発表標題 Torsional body flexibility effect on stability in trot and pace based on a simple model
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安達 涼, 大崎 友貴, 田熊 隆史, 青井 伸也, 杉本 靖博
2. 発表標題 ヒト型モデルにおける腕振りと柔軟体幹ねじりが歩行に及ぼす効果の検証
3. 学会等名 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤貴滉, 浪花啓右, 中西大輔, 杉本靖博, 八木康史, 横原靖, 中村友哉, 大須賀公一
2. 発表標題 空気圧人工筋肉の圧縮負荷に対する特性の検証
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥村太一, 中西大輔, 浪花啓右, 杉本靖博, 大須賀公一
2. 発表標題 空気圧人工筋駆動の脚型ロボットにおける楕円形膝関節の形状と跳躍高さの関係
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	青井 伸也 (Aoi Shinya) (60432366)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	杉本 靖博 (Sugimoto Yasuhiro) (70402972)	大阪大学・工学研究科・准教授 (14401)	

	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
研究協力者	北村 涼馬 (Kitamura Ryoma)	大阪工業大学・工学研究科・大学院生 (34406)	
研究協力者	安達 涼 (Andachi Ryo)	大阪工業大学・工学研究科・大学院生 (34406)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------