

令和元年6月24日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06201

研究課題名（和文）衝突を伴う運動を時間遅れ無しに安定化させる筋骨格構造の実現と機構メカニズムの理解

研究課題名（英文）Analyze of mechanical effect of musculo-skeletal structure that realizes stabilization of motion including a impact without time delay

研究代表者

田熊 隆史（Takuma, Takashi）

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：40437372

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は跳躍や走行のように着地時に衝撃が生じる運動や、瓦礫の中の移動のように機体と障害物との衝突により衝撃が発生する運動を対象に、時間遅れの発生するフィードバック制御ではなく機構的に衝突に対処し、適切な運動を促す機構について研究を行った。跳躍ロボットでは空気圧人工筋肉の取り付け位置を調整することで着地時の姿勢や角度が多少異なっても転倒することなく着地できることを物理シミュレータと実機で示した。瓦礫移動では重心移動が可能な水駆動ロボットを試作し、隙間の移動と移動中に対象物の形状を推定可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来ロボットを制御するにあたり、外部から加わる力に対しては計測と運動計画、実行をループとしたフィードバック制御により対処してきた。しかしこの枠組みは時間遅れが発生するため、瞬間的な対応が求められる衝突を含む運動には不向きであった。本研究では柔軟なアクチュエータを用いて時間遅れ無しに衝撃に対応し、更に衝撃を利用して望ましい運動を生成できる機構について研究した。得られた結果はロボットが衝突を伴う運動を実現するにあたり、その身体設計に大きな貢献になることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we adopted mechanical structure in order to deal with a landing impact in case of jumping and running and a collision impact in case of exploring in a wreckage instead of a feed back controller that requires time delay. In the jumping study, we adopted viscoelastic pneumatic actuators for absorbing the landing impact and searched an appropriate positions of the actuators that influences behavior of landing. From physical simulator and physical robot experiments, we found that the robot achieved stable landing even if the landing angle and posture are different in some degree. In the exploring in the wreckage, we adopted water driven chamber that can shift its center of mass, and we found that the robot broke through a small gap, and it estimated the shape of the obstacle while breaking through the gap.

研究分野：ロボティクス

キーワード：流体駆動アクチュエータ 跳躍運動 瓦礫移動 機構的な制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

走行や跳躍といった着地時に衝突が発生する運動や、瓦礫内の移動のように障害物との衝突が常に発生する運動において、これまで多くの研究ではフィードバック、すなわち環境を測定し、運動を計画し、実行するプロセスを経てきた。しかし測定・計算・駆動のプロセスを経る従来のフィードバック手法ではごく短時間で発生する衝突に対応できない。そこでこういったプロセスを経ることなく問題を解決できる手法が求められてきた。

2. 研究の目的

本研究では上記の問題に対して、機構を工夫することで解決を図った。問題解決にあたり、空気圧もしくは水圧といった流体で駆動する柔軟なアクチュエータを導入し、衝撃に応じた適応的な変形を試みた。また変形による力を各機構へ適切に配分するアクチュエータの取り付け方について検討し、そのメカニズムを検証した。また、柔軟性を利用することで所望の運動が自動生成可能であることを検証した。

3. 研究の方法

ひとつの運動として最初に跳躍運動に着目し、ヒトの身体に倣って配置した空気圧人工筋肉、特に二関節筋と呼ばれる二つの関節に跨って付着する筋の取り付け位置を動力学シミュレーションで総当たりで調査する。シミュレーション結果を受けて、実機により検証を行う。もうひとつの運動として障害物のあるフィールドでの移動に着目し、水で駆動する柔軟なチャンバを有するロボットにより、障害物に自身を押しつけ機体を変形しながら隙間をくぐり抜ける運動を試みた。また、柔軟性を利用して四脚形態から二脚形態へと姿勢を変更する運動の実現を試みた。

4. 研究成果

(1) 跳躍ロボットにおける空気圧人工筋肉の配置

図 1(a)に跳躍ロボットのフレームワーク、同(b)に動力学シミュレータ上の跳躍ロボット、同(c)(d)にロボットを支持する空気圧人工筋肉の配置を示す。ロボットは4つのリンクと3つの関節で構成されている。図 1(a)のようにリンクは上から体幹部、大腿部、脛部、足部とする。各リンクの大きさ、重さは実験で使用する実機をもとに設定した。つま先-足首と足首-踵の長さの比率は3:1とした。モデルのサイズと重量も実機に倣った。本モデルは2次元平面で拘束しており、奥行き方向や前方に転倒しないものとした。図 1(c)(d)に示すように、モデルには単関節筋と二関節筋に相当するアクチュエータを取り付けた。単関節筋は一つの関節、二関節筋は二つの関節をまたぎ駆動する筋のことである。着地時の衝撃に対しモデルの受動的な動作を観察するため、着地運動中に能動的に関節は駆動しないものとした。図 1(c)のように、一つの関節は拮抗に配置した二つの単関節筋で支持される。1-6番の全ての単関節筋のモーメントアームは $R=0.05m$ とした。これに加え、図 1(d)に示すような二関節筋を、ヒトの筋配置に倣って取り付けた。二関節筋の7番を「ハムストリングス」、8番を「大腿直筋」、9番を「腓腹筋」と呼ぶ。本研究では二関節筋が、着地時の衝撃により発生する力を適切に各関節に伝播させると仮定し、二関節筋の取り付け位置、すなわち二関節筋のモーメントアームの長さを変更し、着地角度や着地姿勢が多少異なっても転倒しない取り付け位置を探索した。

探索にあたり、最初に物理シミュレーションによる総探索を行い、次に実機による検証を行った。物理シミュレーションでは二関節筋の取り付け位置を様々に変更し、それぞれの設定下で異なる着地角度およびある範囲内でランダムに変更した関節角度の元で転倒せず静止できる確率を求めた。人工筋肉はバネ-ダンパモデルに近似し、バネ係数は人工筋肉内の圧力に対して線形に変化するものとした。シミュレーションの結果、着地成功確率20%以上のものに対して筋の付着位置の傾向を調査した。最も高い確率で着地できた二関節筋の取り付け方を図 2 に示す。図のようにハムストリングス上部は関節より遠い位置に付着、下部は関節に近い位

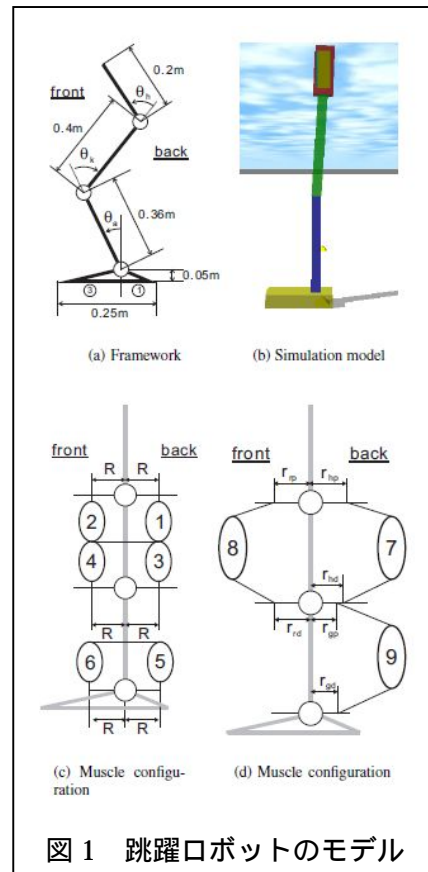


図 1 跳躍ロボットのモデル

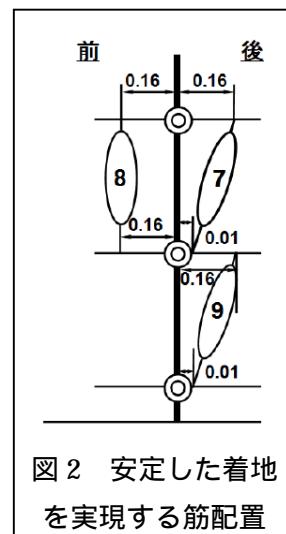
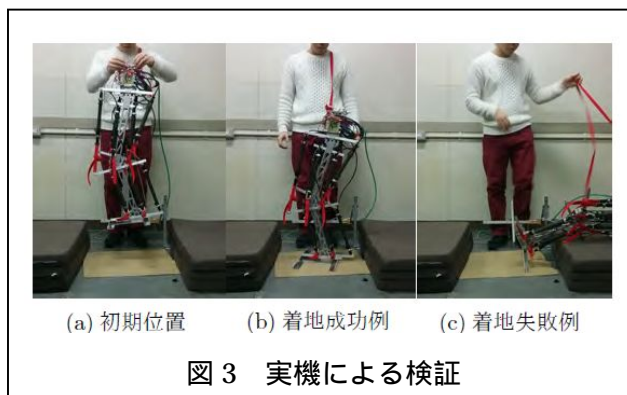


図 2 安定した着地を実現する筋配置

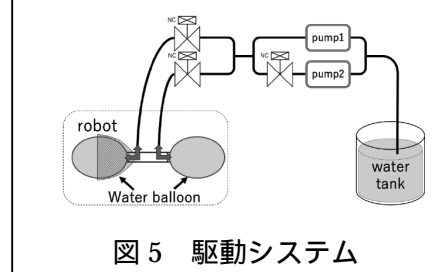
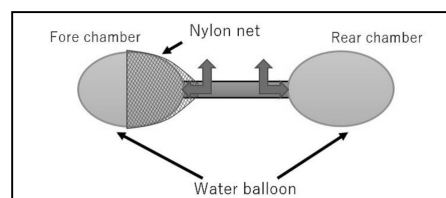
置に付着など、各二関節筋の取り付け位置に傾向があることが分かった。

実機による検証実験では、初期姿勢と落下高さをシミュレーションと同じ条件とし、手動による落下実験を行った。試行回数を制限するため、落下角度（体幹長軸と地面鉛直方向の間の角度）を 0.0deg のみとし、シミュレーション結果から得られた最適な筋配置および高確率で着地可能な筋配置、低確率で着地する筋配置で落下実験を行った。各筋配置につき 20 試行の実験とした。図3に実験の様子を示す。同(a)に示すような、足先が地面から 200mm の位置を初期位置とする。そこから落下させ同(b) のように実機が転倒しなければ着地成功とし、同(c) のように転倒した場合着地失敗とする。実機実験の結果、物理シミュレーション上で高い確率で成功となった二関節筋の配置については実機でも高い確率で転倒せず静止し、シミュレーション上で低い確率となった二関節筋の配置については実機でも低い確率でしか静止しなかった。これにより、二関節筋の取り付け位置は安定した着地に貢献することが分かった。



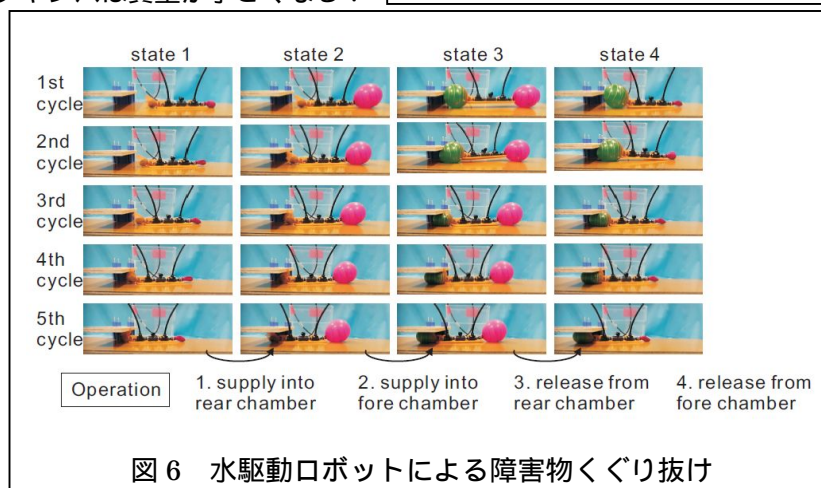
(2) 水駆動ロボットによる障害物くぐり抜け

(1) で得られた衝突が発生する運動における時間遅れなしの安定化メカニズムを応用させ、障害物に常に接触しながら移動するロボットを試作した。試作したロボットを図 4 に示す。本研究では伸縮性を持ち流体を保持するチャンバ（水風船）を前後に 2 つ有するロボットを試作した。本報告では前方のチャンバを「前肢」、後方を「後肢」、継手部分を「体幹」と呼ぶ。チャンバは前肢、後肢はともに給排水により 0-500g に変化可能である。ロボットを駆動するためのポンプとバルブの構成を図 5 に示す。配管は外径 6mm のウレタンチューブを用いている。前肢および後肢への給排水を行うため、ソレノイドバルブを 3 つとポンプを 2 つ用いている。ソレノイドバルブは流路の開閉を行う。図中三つのバルブと二つのポンプの ON/OFF を切り替えることで、前肢および後肢に給水もしくは排水を行う。水は質量を有するため、給水されたチャンバは質量が大きく、排水されたチャンバは質量が小さくなる。



これにより、ロボット全体の重心を前肢や後肢に移動でき、重量により発生する摩擦を前肢や後肢に局所的に発生させることが可能となる。

ロボットが隙間をくぐり抜ける様子を図 6 に示す。図中 state 1 から 2 で後肢に給水、2 から 3 で前肢に給水、3 から 4 で後肢から排水、4 から次サイクルの 1 で前肢排水を行う。図中



state 3 では前肢が障害物に衝突しているが、チャンバは柔軟性を有しているため、障害物の形状に応じて適応的に変形が行えている。またこの衝突によって障害物から後ろ向けに反作用の力を受けるが、後肢に水が充填されているためにこの部分で摩擦が発生しているため、後ろに滑ることはない。また state 3 で障害物に接触すると同時に、前肢内部の水圧は上昇する。そこで前肢に取り付けたセンサで水圧を観察し、一定水圧以上になったら次の操作に切り替えるようにした。これにより前肢が破損することなく障害物に接触しながらくぐり抜けることが可能となった。

(3) 柔軟体幹を利用した動的な起き上がり運動

(1) で得られた、柔軟性を利用することによる運動の自動生成の知見を利用して、四脚の

形態となっているロボットが二脚の形態へと姿勢を変更（起き上がり運動）する際に体幹の粘弾性を利用することを提案した。図 7 に形態を四脚形態から二脚形態へと変形するロボットを示す。図中体幹部には複数個の粘弾性を有する関節を埋め込む。また腰の関節（図中"Hip"関節）に、起き上がりのための力を加える。起き上がりの時間が短いほど腰関節に大きな力が発生する。物理シミュレーションではごく短時間で起き上がりが可能な体幹関節の弾性係数を探索した。探索の結果、適切な弾性を体幹に与えることで、高速に形態を変形可能であることが確認された。起き上がり成功の様子を図 8 に示す。比較のため、体幹部が剛体のモデルでも起き上がり運動の実現を試みたが、ごく限られた時間で姿勢を変形する場合のみ起き上がり運動は成功した。一方で適度な弾性に調整した柔軟体幹では、姿勢変形のための時間が多少異なっても、転倒することなく起き上がりが可能であることが確認された。

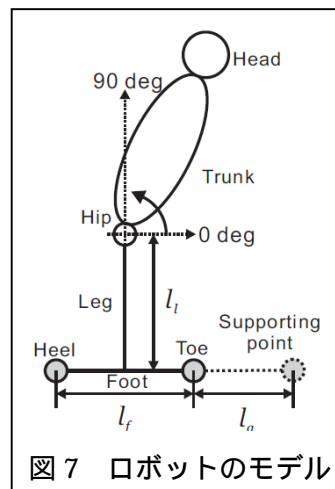


図 7 ロボットのモデル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

(1) Takashi Takuma, Wataru Kase, "Influence of trunk structure on posture transition from quadrupedalism to bipedalism", ROBOMECH Journal, 4(9), 2017 (査読有)

〔学会発表〕(計 16 件)

- (1) S. Omae, T. Takuma, and W. Kase, "Arrangement of biarticular muscles for robust landing of single-legged robot driven by antagonistic pneumatic actuators", 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2063-2068, 2018
- (2) T. Takuma, K. Yamada and R. Kamai, "Development of electromotive amoeba-like hydraulic soft robot", International Conference on Artificial Intelligence and Application in Engineering and Technology (IICAET) 2018, 43-47, 2018
- (3) T. Takuma, K. Takai, Y. Iwakiri and W. Kase, "Body design of tendon-driven jumping robot using single actuator and wire set", The 21st International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2018), pp.93-100,
- (4) Takashi Takuma and Kyotaro Hamachi, Locomotion of hydraulic amoeba-like robot utilizing transition of mass distribution, 15th International Conference on Intelligent Autonomous Systems IAS-15, 314-324, 2018
- (5) 松下侑樹, 田熊隆史, 導電性シリコーンによる圧力センサの開発と評価, 平成 30 年電気関係学会関西連合大会, G3-9, 2018.12
- (6) 山田晃翼, 釜井凌, 田熊隆史, ソフトロボットのためのセンシング方法の検討, 平成 30 年電気関係学会関西連合大会, G3-5, 2018.12
- (7) 大前 伸悟, 田熊 隆史, 加瀬渡, 駆動跳躍ロボットの着地運動における二関節筋配置の効果の検証, ロボティクスメカトロニクス講演会 2018, 2A1-111-2, 2018
- (8) 西村 直輝, 田熊 隆史, 体幹及び腕を有する筋駆動二脚ロボットの運動計測, 第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会, 223-1, 2018
- (9) 大西 涼, 田熊 隆史, 加瀬 渡, 二脚歩行ロボットにおける柔軟体幹機構および腕振り運動の効果, ロボティクスメカトロニクス講演会 2017, 2P1-K05, 2017
- (10) 田熊 隆史, 岩切 勇貴, 加瀬 渡 ワイヤ駆動脚ロボットによる跳躍実現のための適切なワイヤ経由点配置, ロボティクスメカトロニクス講演会 2017, 1P2-G11, 2017
- (11) Ryo Onishi, Hiroki Oku, Takashi Takuma and Wataru Kase, Effect of Viscoelastic Trunk Mechanism with Arm Swinging in 3D Bipedal Locomotion, The 20th International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2017), pp.383-390, 2017
- (12) 山本 真由, 田熊 隆史, 筋駆動跳躍ロボットにおける適切な二関節筋配置の探索と検証, 平成 28 年度 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会, E1-3, 2017
- (13) 田熊 隆史, 山本 真由, 筋駆動脚ロボットの着地運動における二関節筋の効果, 第 17 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, 2751-2754, 2016
- (14) 田熊 隆史, 福井 恭斗, 瀬底 友貴, 杉山 真貴, 加瀬 渡, 四脚ロボットの不整地踏破に

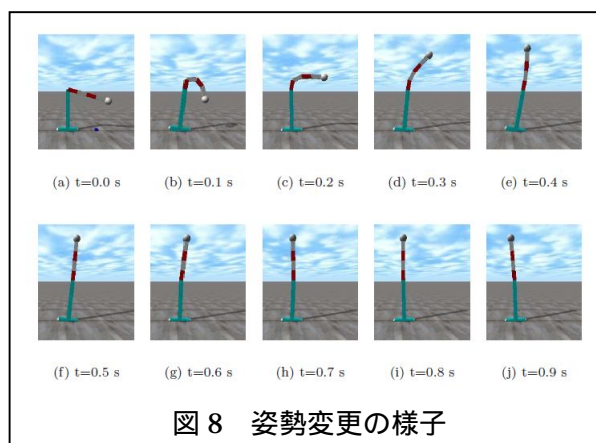


図 8 姿勢変更の様子

おける生物規範型体幹構造の効果，ロボティクスメカトロニクス講演会 2016, 2P2-12b4, 2016
(15) Takashi Takuma and Wataru Kase, Robust and directive quadruped locomotion on rough terrain without requiring sensing and actuation, Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), SuD04.4, 2016
(16) 田熊 隆史, 福井 恭斗, 瀬底 友貴, 杉山 真貴, 加瀬 渡, 四脚ロボットの不整地踏破における生物規範型体幹構造の効果，ロボティクスメカトロニクス講演会 2016, 2P2-12b4, 2016

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.oit.ac.jp/www-ee/server/islab/robotics/>

6. 研究組織

研究協力者

研究協力者氏名：大前 伸悟

ローマ字氏名：Shingo Omae

研究協力者氏名：山田 晃翼

ローマ字氏名：Kosuke Yamada

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。