

令和 5 年 10 月 23 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04390

研究課題名（和文）四足動物のロコモーションにおける旋回動作に関する力学的考察

研究課題名（英文）Mechanics for turning of quadruped locomotion

研究代表者

衣笠 哲也（Kinugasa, Tetsuya）

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：20321474

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、「竜脚類などの大型の四足生物がどのように旋回するのか?」という疑問に対し、自動車工学の幾何学的旋回理論に基づいた考察をおこない、ロボットによってその妥当性を評価することが目的とする。研究成果として、これまでに発見された大型竜脚類と採取したゾウの旋回行跡に対し解析を行った結果、竜脚類は前肢操舵によって内軌道差、ゾウは後肢操舵によって外軌道差となるように旋回することを示した。また、操舵比は荷重比の逆比となる傾向を持ち、これは旋回時にそれぞれの生物が慣性モーメントを最小にするように操舵していることが原因であることを理論的に明らかにするとともに、シミュレーションにより妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、大型四足生物の旋回行跡に見られる軌道差が前肢と後肢の舵角の比によって幾何学的に決定されるという従来研究を掘り下げ、舵角の比は荷重の逆比として決定され、これは生物が慣性モーメントを最小にするように旋回した結果であることを示した。この結果は、従来あまり考察されていなかった四足生物の定常旋回メカニズムを明らかにするという意味で学術的意義がある。また、絶滅種である竜脚類の歩行メカニズムを明らかにしたという意味で重要な結果と考える。

研究成果の概要（英文）：This research aims to address the question of how large quadrupedal vertebrates, such as sauropods, turn.

It aims to conduct an investigation based on the geometric turning theory of automotive engineering and evaluate its validity using robots. As a result of analyzing the turning trajectories of previously discovered large sauropods and collected data from elephants, the research findings indicate that sauropods turn with an inner track difference through front limb steering, while elephants turn with an outer track difference through hind limb steering. Additionally, the steering ratio tends to be inversely proportional to the load ratio. This is theoretically shown to be caused by each organism steering to minimize their inertia moment during turning. The validity of these findings was also verified through simulations.

研究分野：ロボット学

キーワード：大型生物の旋回

1. 研究開始当初の背景

生物がどのように歩行するのか？この疑問に対する研究は生物学だけでなくロボット学の分野でも人工物としてのロボットを作ることによって考察するという観点でこれまでに研究がなされてきた。しかし、どのようなメカニズムに基づいて旋回するのかという問題に対しての考察は少ない。特に、大型生物の場合、その物理特性を利用することでより効率的に旋回する必要があるものと考えられる。大型の陸生動物は、恐竜などに顕著に見られ、例えば大型獣脚類の旋回について力学的視座から考察し、旋回時に慣性モーメントを小さくするような姿勢をとるべきであるという研究や、種の大形化に対して慣性モーメントの増加率が小さく、特に *Tyrannosaurids* は慣性モーメントが小さく脚が太いため他の獣脚類より急旋回できたという結果がある。また石垣らは、竜脚類の旋回行跡に前輪操舵する四輪車が旋回するとき発生する内軌道差（いわゆる内輪差）を、長鼻類の旋回行跡に後輪操舵車両で生じる外軌道差を観察した。このことから、四輪車が前輪もしくは後輪で操舵するように、竜脚類は前肢で長鼻類は後肢で操舵しているため内外軌道差が旋回行跡に生じると結論づけている（仮説1）。さらに、竜脚類は後肢側に長鼻類は前肢側に荷重が偏るという研究結果に基づいて、負荷の小さい肢、つまり竜脚類は前肢、長鼻類は後肢で操舵するという仮説（仮説2）を提案した。このように、旋回動作の背景にある力学的な意味を明らかにすることは、生物の旋回動作の共通原理の解明につながるとともに、四足ロボットの効率的な旋回動作実現に役立つものと考えられる。軌道差が確認できる定常的な旋回行跡として、石垣らがあげた竜脚類と長鼻類の行跡および Calvo らによって報告された竜脚類の行跡がある。しかし、これらの行跡に対し、ある程度定量的な解析が行われているものも含め、旋回半径や舵角などに関する具体的な解析は行われていない。また、絶滅動物である竜脚類の行跡を見つけることは難しいが、長鼻類については現生のゾウによる旋回行跡の採取と解析が必要である。この石垣らによる四足生物の旋回行跡における軌道差の発見と四輪車の旋回動作との類似性の指摘、さらに負荷の小さい側の肢で操舵するという仮説は非常に興味深い。しかし、この仮説は表面的なもので、四足生物の旋回動作に対して力学的にどのような意味があるのか、より深い考察が必要である。また、仮説に基づく操舵方法によって四足生物が旋回すると足跡に軌道差が見られるのか、その妥当性を検証する必要がある。しかし、操舵仮説を適用しているかどうか竜脚類や長鼻類に対して直接的に検証することは困難である。このような問題に対し、数理モデルや物理モデルとして人工的な生物、つまりロボットを構築し、仮説の妥当性を検証する手法が有効と考えられる。

2. 研究の目的

そこで本研究は、どのように四足生物が旋回するのか竜脚類と長鼻類の旋回行跡に基づいて考察し、その背景にある力学的意味を明らかにすることを目的とする。具体的にはまず、石垣らによる仮説を自動車の四輪操舵手法に基づいて四足動物の四肢操舵仮説として拡張し、これまでの研究における竜脚類と長鼻類の旋回行跡と新たに採取したアジアゾウの行跡について定量的に解析を行うことで軌道差や舵角などを推定した。次に、四足生物ロボットとしての2次元動力学モデルをもちい四肢操舵によって旋回行跡に軌道差が生じることを示す。また、仮説2を四肢操舵仮説に基づいて拡張し、軌道差は大型四足生物が慣性モーメントを最小化しながら定常的に旋回した結果生じることを示す。さらに、この結果の妥当性を検証目指して試作した動力学的特徴を巧く利用して歩行する四足ロボットおよび竜脚類であるワニと鳥のロボットの実現のための後肢モデルについて述べる。

3. 研究の方法と成果

四足生物の四肢操舵仮説 軌道差は、前輪で操舵する一般的な四輪車の旋回において後輪の軌跡が前輪の内側を通る現象（内輪差）として知られている。前輪操舵の場合、後輪の旋回半径が前輪より小さく、逆に、フォークリフトのように後輪で操舵する場合、後輪の旋回半径が大きくなる。この前輪と後輪が描く軌跡の旋回半径の差を“軌道差”と呼び、後輪の軌跡が前輪より内側を通る場合を“内軌道差”，逆の場合を“外軌道差”と定義する。例えば、モロッコの旋回行跡は内軌道差を示すので、仮説1に基づけば行跡の前肢によって操舵したことになる。しかし、四足動物が前肢もしくは後肢だけで操舵したと仮定するのは無理があり、四輪操舵車のように全ての肢によって操舵すると考えたほうが自然である。四輪操舵は乗用車にも一部導入されている操舵方法で、前後の舵角に依存して軌道差が変化するとともに、旋回以外の様々な移動様式を実現できるという特徴を持っている。そこで、仮説1を四輪操舵に類似した四肢操舵へ拡張する。

【仮説1a】 四足生物は水平面に投影した四肢が頭尾軸に対して *glenoid* と *acetabulum* 回りで角度を持つように操舵する。また旋回時、水平面内において各肢が見かけ上伸縮する方向に直行する直線が1点で交わる、つまりこの点を幾何学的な旋回中心とするように操舵する。

四肢操舵仮説による竜脚類と長鼻類の旋回行跡解析 次に、仮説1aに基づいて竜脚類と長鼻類の旋回行跡について軌道差、旋回半径、舵角、および操舵比を最小自乗推定する。まず、竜脚類の旋回行跡 Trackway Tu in Morocco, Trackway Utah in USA, CB-1 in Argentine について考察した。Morocco の竜脚類の場合 (Fig. 1 右), 後足印の中心線が前足印の中心線の内側を通過する内軌道差を生じていることがわかる。解析の結果、操舵比 78 対 22 となった。Fig. 1 左は長鼻類の行跡

の解析結果である。後足印が前足印の外側にあり外軌道差を生じながら旋回していることがわかる。解析の結果、操舵比は43対57となった。

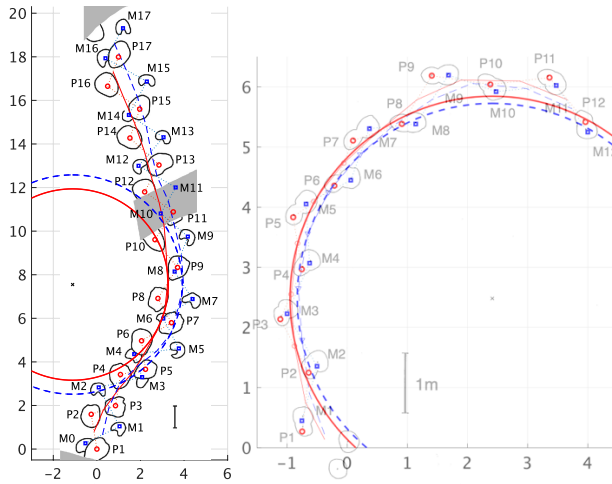


Fig. 1 竜脚類 (左) と長鼻類 (右) の旋回行跡

旋回運動の数値シミュレーション 次に、四足動物の四肢操舵仮説について平面内の動力学モデルを用いて妥当性を検証した。Fig. 2 は竜脚類と長鼻類の旋回シミュレーションである。また、下図は前肢操舵率に対する旋回中心回りの慣性モーメントの変化を表している。石垣らは仮説1を掘り下げ、四足動物は負荷の小さい肢を使って操舵する(仮説2)という力学的考察を行っている。しかし、この仮説2は仮説1と同様に、前肢もしくは後肢のみで操舵することが前提であったため仮説2を拡張する。

【仮説 2a (四肢操舵における操舵比と荷重比の関係)】 大型四足生物が旋回するとき、前後肢の操舵比は荷重の逆比をとる。

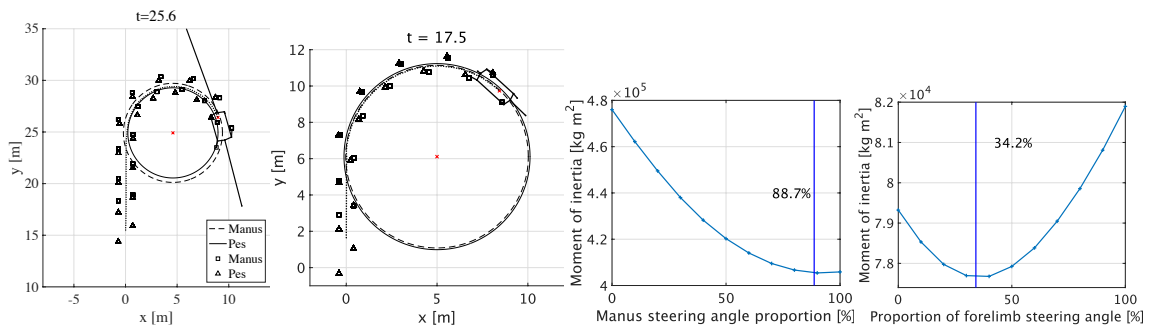


Fig. 2 竜脚類 (左) と長鼻類 (右) の旋回シミュレーション

仮説 2a に基づいて、改めて上述した旋回行跡の操舵比と荷重比の関係を考察する。竜脚類において前後肢の操舵比は 78:22、長鼻類では 34:66 であった。この傾向はほかの旋回行跡からも確認している。仮説 2a から荷重比はそれぞれ 22:78、66:34 となる。従来研究において、竜脚類の荷重比は 1:9 から 4:6、ゾウはおおよそ 6:4 とされており、舵比は旋回半径などに、荷重比は個体差に依存して多少変化するが、推定された操舵比は、従来研究の結果や実測された荷重比の逆比に近い値を取ることがわかる。

仮説 2a の力学 さらに、仮説 2a の力学的意味を考えると次の定理が成り立つ。

【定理：大型四足生物の旋回メカニズム】 もし四足生物が正中断面に旋回中心を投影した点に重心を置きながら旋回すると、操舵比は荷重比の逆比となる。つまり大型四足生物は仮説 2a に基づいて旋回する。このとき旋回中心回りの慣性モーメントが最小となる。

この定理は、合成重心位置が旋回中心の頭尾軸投影点に一致するという仮定が荷重の逆比が操舵比となることと等価であることを意味する。さらに、この仮定は四足動物が旋回する場合、旋回半径(胴体の中心線と旋回中心との距離)が一定であれば操舵比が荷重の逆比を取るとき慣性モーメントが最小となることも意味する。したがって、大型四足生物は慣性モーメントを最小にしながらか旋回するという意味で最適な歩行を行っているものと考えられる。Fig. 2 下は竜脚類と長鼻類の数値例における旋回中心回りの慣性モーメントを表す。この図から、慣性モーメントは前肢操舵率が 90%もしくは 40%付近で最小となることがわかる。竜脚類モデルの荷重比は 11.3:88.7、長鼻類で 66:34 であることから、慣性モーメントが最小となるとき操舵比はほぼ荷重の逆比である。以上のことから、竜脚類や長鼻類など大型四足生物は仮説 1a, 2a に基づいて荷重の逆比を操舵比としながらか四肢操舵することで慣性モーメントをできる限り小さくしながら旋回しているものと考えられる。

議論 竜脚類の旋回行跡は上述したものも含めていくつか知られているが必ずしも軌道差が見られるとは限らない。例えば石垣らはいくつかの旋回行跡には軌道差がみられないことを示し、これらの足跡が比較的小さいことから、軌道差を持つ条件として程度大型の竜脚類であることを挙げている。Castanera らは、Las Cuestas I track site の LCU-I-37 in Spain の旋回行跡に若干の内外軌道差が入れ替わりながら生じていることを示し、一貫した明確な軌道差が見られない原因として、FL (足長) が Morocco や Utah の足跡と比較して短く比較的小さい個体であること、もしくは Henderson によって指摘された種や重心位置の違いを挙げている。また、Xing らは、比較的小さい竜脚類が残した2つの旋回半径が小さい行跡 in 山東と四川に軌道差が見られることを示し、旋回半径が小さく、ほぼ 180°方向転換する非定常な運動であることから、石垣らの仮説は当てはまらないことを指摘している。ゾウの行跡について、石垣らの研究にあるゾウの足跡化石には軌道差が見られないが、現生のゾウについては我々の実験を含めて旋回行跡に何らかの軌道差が確認できる。ゾウは比較的小型の竜脚類と同程度の FL であるが、substrate や浸食による足跡の変形や行動学の影響がない理想的な定常歩行であったため軌道差を生じたと考えられる。竜脚類と長鼻類に共通するのは体が大きく体重が重い四足生物という点である。大型の場合、慣性モーメントが大きく、定常的な歩行においてはこれを最小化するために仮説に基づいて操舵することで軌道差が生じると解釈できる。しかし、行動様式 (急旋回や特定の方向への注視、癖など) に強く影響されると慣性モーメントの相違は無視された旋回動作となり、そのような場合は四肢操舵仮説に基づく定常的な軌道差は生じにくいものと考えられる。

・論文投稿準備中

四足歩行機の実現 上述したように四足生物は定常旋回において慣性モーメントを最小にしながら旋回するため、その重心位置 (前後の荷重比) に応じて足跡に軌道差を生じる。この点について二次元動力学モデルによるシミュレーションで妥当性を検証したが、三次元モデルや実機による検証が求められる。しかし、四足歩行であっても安定で生物が示すようななめらかで効率的な歩容を実現することは困難な課題である。そこで、まず第一歩として、受動的歩行を規範とすることで動力学的特徴を巧く利用した四足歩行を実現した (Fig. 3)。

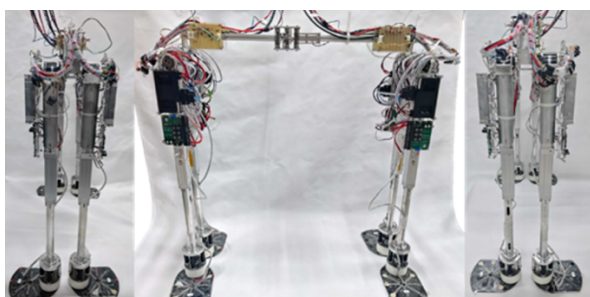


Fig. 3 三次元四足歩行機 RW06-Duo

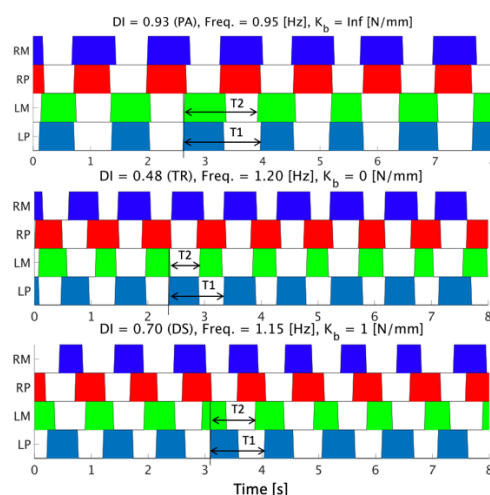


Fig. 4 Pace (上), Trot (中), DS walk (下)

RW06-Duo は二足受動歩行機に直動膝関節を導入しこれを2対ねじり関節を持つ体幹で連結したものである。歩行の制御は位相振動子により伸縮させることで実現され、この膝の固有振動数と体幹の剛性を変化させると歩容が Pace (PA), Trot (TR), Diagonal sequence walk (DS)と変化する。代表的な歩容を Fig. 4 に示す。体幹の剛性と膝の固有振動数に対して歩容や移動効率がどのように変化するか明らかにした (Fig. 5)。この図から、体幹の剛性が高く膝の固有振動数が小さくなると PA となり、逆に、剛性が低く振動数が高いと TR や DS となることがわかる。さらに、移動効率の意味で DS や TR が効率的であることも確認できる。さらに、無次元化移動速度に対する移動効率および歩容の関係を Fig. 6 に示す。この図から、低速領域では PA、速度の上昇につれて TR, DS と歩容が変化し、しかも移動効率が低下していることが確認できる。つまり、受動歩行を規範とした四足歩行機は地面反力をフィードバックする位相振動子を導入することで身体の動力学的特性を巧く利用しながら移動速度に応じて効率的な歩容を自律的に選択可能であることがわかる。したがって、今後このような歩行機を用いて旋回動作を実現することで、前後肢の荷重比に対して前後操舵率を逆比として与えると慣性モーメントが最小化されるかどうか、本研究で立てた仮説の検証を実機により行うことができるものと考えられる。

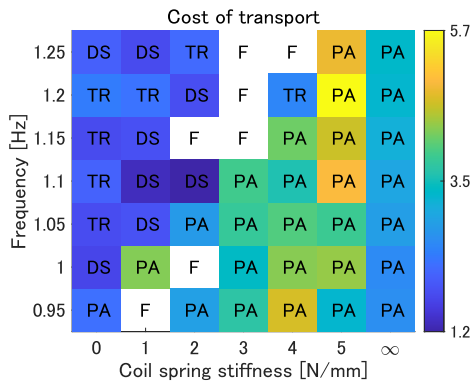


Fig. 5 歩容と移動効率

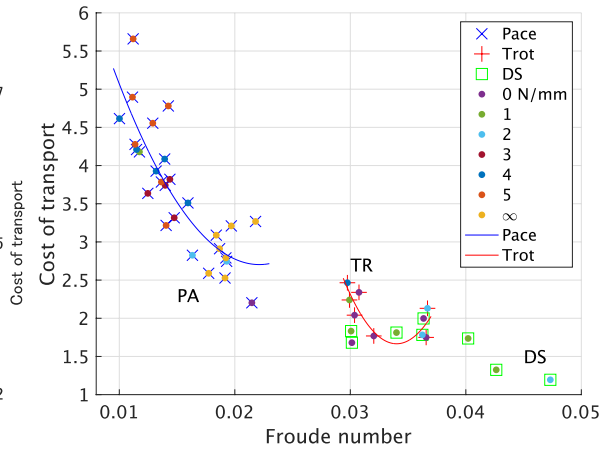


Fig. 6 無次元化速度に対する移動効率

発表論文 : S. Miwa, T. Kinugasa, et al. Various gait pattern generation and analysis of semi-passive quadruped walker with telescopic knee based on phase oscillator, *Artificial Life and Robotics* (2023), published online 25 Mar. 2023.

ワニ類後肢ロボットの実現 さらに、竜脚類の身体特性を再現したロボットを実現するために主竜類の現生種であるワニ類の後肢に注目し、その特殊な筋骨格系の受動的連動メカニズムを再現するロボットを実現した。この受動的連動メカニズムは、イリエワニの解剖によって示唆されたもので、長尾大腿筋、長尾大腿筋から分岐する腱および腓腹筋外側頭の連動によって実現される。簡易的に実現されたワニ類後肢ロボットと自重支持実験の様子を Fig. 7 に示す。この図からわかるように、ワニ類後肢に確認された受動的連動メカニズムは長尾大腿筋の収縮のみによって自重支持と推進動作を実現可能であることがわかる。今後、ワニ類ロボットによる四足歩行を実現するとともにこれを恐竜類に適用し、受動的連動メカニズムの有効性を検証するとともに、旋回動作を実現することで本研究の仮説の検証につなげたい。

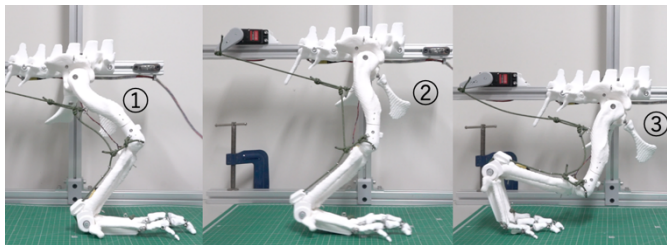


Fig. 7 ワニ類後肢ロボットと推進動作

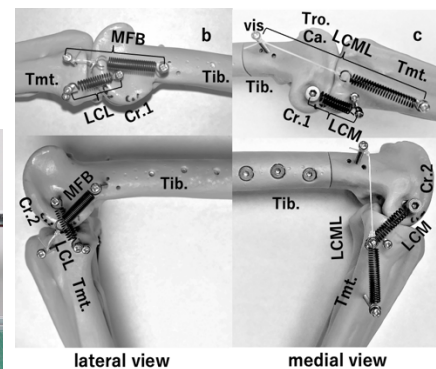


Fig. 8 ダチョウの足根間関節モデル

鳥類足根間関節モデルと EDM 最後に、主竜類の子孫である鳥類、特に走鳥類の足根間関節に見られる Engage disengage mechanism (EDM) をロボット (Fig. 8) によって再現するとともに、カム状機能と捉えることでその設計法を検討した。この EDM は伸展状態と屈曲状態を局所的な安定平衡点とし、その中間姿勢が鞍状の不安定平衡点となるような特徴を持つ。この特徴は、走鳥類の歩行時に重要な役割を果たしていると考えられているが、具体的にどのような意味があるのか不明である。したがって、得られた結果を歩行ロボットの足根間関節もしくは膝関節に導入することで EDM が歩行にどのような作用を与えるのか今後明らかにする。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Miwa Shoichi, Kinugasa Tetsuya, Oba Kii, Ishihara Takumi, Zhang Jialun, Hayashi Ryota, Yoshida Koji	4. 巻 online
2. 論文標題 Various gait pattern generation and analysis of semi-passive quadruped walker with telescopic knee based on phase oscillator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 online
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10015-023-00862-2	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6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kii Oba, Shoichi Miwa, Tetsuya Kinugasa, Takumi Ishihara, Jialun Zhang, Koji Yoshida, Ryota Hayashi
2. 発表標題 Exhibiting Various Gait Patterns in Quadrupedal Locomotion via Passive Inter- and Intralimb Coordination
3. 学会等名 28th International Symposium on Artificial Life and Robotics AROB 28th 2023（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Ito, Koichi Osuka, Tetsuya Kinugasa, Sayaka Hida, Koji Yoshida, Ryota Hayashi
2. 発表標題 Interlocking mechanism in the hindlimb using a passive musculotendinous structure during the high walk of crocodilians: Validation of the effects of iliotibials as passive element using a robot
3. 学会等名 29th International Symposium on Artificial Life and Robotics AROB 28th 2023(国際学会)（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ito, Kazuki, Kinugasa, Tetsuya, Chiba, Kentaro, Okuda, Yu, Takasaki, Ryuji, Hida, Sayaka, Yoshida, Koji, Hayashi, Ryota, Osuka, Koichi
2. 発表標題 INTERLOCKING MECHANISMS OF CROCODILIAN HINDLIMB JOINTS USING A PASSIVE MUSCULOTENDINOUS STRUCTURE DURING THE HIGH WALK
3. 学会等名 The Society of Vertebrate Paleontology 82nd annual meeting 2022(国際学会)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊東和輝(大阪大学), 衣笠哲也, 奥田ゆう, 千葉謙太郎, 檜田沙耶香, 高崎竜司, 林良太, 吉田浩治(岡山理科大学), 大須賀公一(大阪大学)
2. 発表標題 ワニ類後肢にみられる筋系の Y 字構造に基づいた立位姿勢維持機構とロボットによる実装
3. 学会等名 第28回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊東 和輝(大阪大学), 衣笠 哲也(岡山理科大学), 檜田 沙耶香(岡山理科大学), 吉田 浩治(岡山理科大学), 林 良太(岡山理科大学), 大須賀 公一(大阪大学)
2. 発表標題 筋骨格系の受動的運動を利用したワニ類後肢ロボットによる立位姿勢の実現
3. 学会等名 第35回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 檜田 沙耶香(岡山理科大学), 伊東 和輝(大阪大学), 衣笠 哲也(岡山理科大学), 吉田 浩治(岡山理科大学), 林 良太(岡山理科大学)
2. 発表標題 走鳥類の足根間関節に見られるカム様メカニズムとその設計法の検討
3. 学会等名 第35回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2023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	吉田 浩治 (Yoshida Koji) (00254433)	岡山理科大学・工学部・教授 (35302)	

6. 研究組織（つづき）

	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	林 良太 (Hayashi Ryota) (40288949)	岡山理科大学・工学部・教授 (35302)	

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