

公立はこだて未来大学 2024年度 システム情報科学実習
グループ報告書

Future University Hakodate 2024 Systems Information Science Practice
Group Report

プロジェクト名

Make Brain Project

Puroject Name

Make Brain Project

グループ名

触覚を持つ歩行ロボット

Group Name

Walking robot with tactile senses

プロジェクト番号 / Project No.

21-A

プロジェクトリーダー / Project Leader

狩野政宗 Masamune Karino

グループリーダー / Group Leader

狩野政宗 Masamune Karino

グループメンバー / Group Member

狩野政宗 Masamune Karino

吉田舜 Syun Yoshida

前田凌瑛 Ryoei Maeda

指導教員

香取勇一 栗川知己 加納剛史

Advisor

Yuichi Katori Tomoki Kurikawa Takeshi Kano

提出日

2025年1月21日

Date of Submission

January 21, 2025

概要

昆虫は人間よりも神経細胞の数が少ないにもかかわらず周囲の環境に適応して歩行できる。これは、感覚器官からのフィードバックを脳だけでなく、脳よりも下位の神経システムで分散的に処理をしているためだと考えられる。その例として、昆虫の足裏のフィードバックは不整地での歩行で、体の揺れを減少させることに役立っていると考えられる。このことを検証するために、足裏に触覚を持つ歩行ロボットを作成し、「駆動範囲の大きさを調整するモデル」「柔軟さを再現した数理モデル」という2種類のフィードバックを提案した。そして、ロボットに実装して、段差を上る際の体の揺れを測定した。その結果、「駆動範囲の大きさを調整するモデル」では歩行時の揺れを減少させることはできなかった。しかし、「柔軟さを再現した数理モデル」では揺れを減少させることができた。

(※文責：前田凌瑛)

Abstract

Insects can adapt to their surroundings and walk despite having fewer neurons than humans. This is thought to be due to the decentralized processing of feedback from sensory organs not only in the brain, but also in the nervous system lower down than the brain. As an example, feedback from the insect's footpads may help reduce body sway when walking on uneven terrain. To verify this, we created a walking robot with tactile sensation on its sole and proposed two types of feedback: "a model that adjusts the size of the driving range" and "a mathematical model that reproduces flexibility". We then implemented them in the robot and measured the body's sway when climbing a step. As a result, the "model that adjusts the size of the driving range" could not reduce the swaying during walking. However, the "mathematical model that reproduced flexibility" was able to reduce the swaying.

(※文責：前田凌瑛)

1章：はじめに

生物は段差や傾斜、障害物などの周囲の環境、重量や体長などの自身の変化、移動速度の変化、これらに適応した歩行を行っている。例えば、段差を越える際は、脚の動きが調整され、重心の位置や足の接地角度を調整することで安定した移動を維持している。また、移動速度を変化させる際には、歩幅や歩行のリズムが変わり、身体への負担を抑えるような適応がなされる。

その中でも昆虫は、人間や他の脊椎動物などと比較して、高度な脳の機能を持たないにもかかわらず、樹上などの複雑構造をした地形に適応して歩行している。このことは、Cruseら(2006)による、局所的な反射の連鎖によって昆虫の歩行が生み出されることを示したモデル[1]に代表されるように、感覚器官からのフィードバックを、脳だけでなく、脳の低位の部分を利用して処理していると考えられている。

以前のプロジェクト学習である脳を作るプロジェクトにおいて、石川ら(2021)はナナフシの歩行を、神経回路を再現したプログラムによって、コンピュータ上での3D物理シミュレーションとして実現していた。[2] しかし、先行研究においては、歩行の検証は平地で行われており、不整地のような複雑な地形においては十分な検証がなされていない。

我々は、不整地での歩行における触覚による足裏からのフィードバックの役割を調べることが目的とした。そして、制御側を考案して、触覚を持つ歩行ロボットを作成し、制御側を実装して実環境で動作検証を行うことを決めた。その理由は、昆虫の脳内における情報処理過程を直接観測することは技術的に困難であるためである。そして、ロボットを用いて実験を行うことで、昆虫の不整地歩行における足裏の触覚の役割を解明することを目指す。また、このメカニズムを解明することは脳がどのように感覚情報を入力し、運動指令に変換しているのかという根本的な問いに答える手掛かりとなる。

(※文責：前田凌瑛)

2章：関連研究(以前に行われた研究や過去に行われたプロジェクト学習)

生物の歩行の解明を目指して、神経回路に着目したアプローチなど、さまざまな研究が行われている。過去に行われたプロジェクト学習の中で関連しているテーマとして石川ら(2021)のナナフシの神経回路のシミュレーションが挙げられる。石川らはシミュレーションすることにより、ナナフシの歩行や神経回路のメカニズムを理解しようと試みた。中枢パターン発生器(Central Pattern Generator)・運動ニューロン・介在ニューロンによって構成される神経回路モデルを用いて、Pythonで数値計算を行い、ナナフシの歩行パターンを生成した。その後、その歩行パターンを用いて3D物理シミュレータ上でナナフシの歩行を再現した。[2]

また、足裏の触覚に着目した研究もおこなわれている。Owakiら(2017)は、6脚歩行ロボットと感圧センサを用いた歩行の研究を行った。ここでは「Tegotae」と呼ばれる概念に基づいて、六足歩行における四肢間の調整のための最小限のモデルが紹介されている。「Tegotae」とは、知覚された反応が元々何らかの期待する意図とどの程度一致しているかを記述する概念であると述べられている。このモデルによって、定常歩行、移動速度に応じた脚の移動遷移、重量配分の変化に適応した歩行ができるようになるなど、6脚ロボットの基本的な歩行制御が可能であることが示されている。[3]

これらの研究はシミュレーションと平地でそれぞれ行われていた。実際に生物が歩行する環境は平地のみではなく、障害物や傾斜、段差などがある場合もある。そのような複雑な環境における歩行に関する研究も行われている。

木村ら(1988)は、不整地での安定した歩行と平地での走行を実現するため、神経振動子ネットワークを中心とした神経系モデルを活用したロボット制御を提案している。不整地歩行においては神経振動子ネットワークを補佐する反射機構として「伸張反射」と「屈曲反射」を導入することで障害物を乗り越える動作が確認され、平地での走行においてはバネ機構と神経振動子の組み合わせによりホッピングからバウンスへの歩容遷移が可能であることを示した。不整地は高さの違う水平面が組み合わせられた30mm程度の段差を用いて実験している。[4]

また、Zhangら(2023)はさまざまな環境での四脚ロボットの適応性を向上させるために、超音波信号とジャイロスコープ信号を用いたCPGネットワークを提案した。超音波信号によって狭い場所で障害物を検出し、狭いスペースから脱出できるようにした。また、ジャイロスコープ信号によって、傾斜のある不規則な路面を歩行する際のロボット本体のピッチ角とヨー角を安定させた。[5]

これらの研究は、生物の歩行メカニズムの解明と、それを基にしたロボットの歩行制御の高度化に向けた重要な知見を提供した。特に、神経回路モデルや触覚・環境センサを活用した研究は、複雑な環境における適応的な歩行の可能性を広げている。

(※文責：吉田舜)

3章：目標

昆虫は歩行をするとき、感覚器官からのフィードバックを脳だけでなく、脳よりも下位の神経システムで分散的に処理していることに着目した。その中でも特に、歩行時の足裏の触覚が環境適応に重要な役割を果たしていると考えたため、この触覚の働きを調べることを決めた。その理由として、不整地を歩行する際に重要なのは環境に馴染むための脳・神経系-身体-環境の相互作用であるという視点に基づく。環境との接触点である足先は、身体と環境を直接的に結ぶ役割を担っており、地面の凹凸や硬さといった情報を感知する。これにより、環境に即した運動制御を実現するための情報を神経系に伝えることが可能になる。そして、この触覚の働きが役立てられることとして、不整地で適応的に歩行することを考えた。

不整地を歩行する際の問題として、地面の凹凸によって体制を崩してしまうことがあるが、足裏のフィードバックを用いることでこれを解消しようと考えた。例えば、段差に乗り上げた際にその足の動きを調整することで、胴体を安定させる事ができる。このように、生物が自然に行っていることを実現するための方法を考察する。本プロジェクトでは、不整地を歩行した際の体の揺れの大きさを歩行の安定性の指標とした。

我々は、足裏のフィードバックを用いて歩行の際の揺れを減らすための制御則を作成し、その数理モデルを適用したロボットを実際に歩行させた。そして、フィードバックを用いた場合に用いない場合よりも揺れを減少させられるかを検証することを目標とした。

(※文責：吉田舜)

4章：目的を達成するための手法・手段

4-1 手法

我々は、シミュレーションで現実の物理的環境を完全に再現するのは困難であると考えた。よって、実際に感圧センサを組み込んだ歩行ロボットを作成し、その歩行を改善する方法を考えることで、昆虫の触覚フィードバックと歩行の関係について考察する。

まず、基本的な歩行システムをもつ昆虫ロボットを作成し、その歩行システムを不整地を安定して移動できるものにするためのフィードバック則を2つ考案した。そして、フィードバックを用いない歩行と考案した2つのフィードバック則を適用した歩行をそれぞれ比較した。

(※文責：前田凌瑛)

4-2 必要なスキル

ハードウェア作製に必要なスキルとして3Dモデリングと電子工作が挙げられる。3Dモデリングに関してはAutodesk Fusionを用いて3Dモデルを作成した。電子工作については、「情報処理演習Ⅱ」の授業を参考に電子工作を進める。この授業ではArduinoを用いて、サーボモータの操作や、温度センサや加速度センサなどのセンシング技術について学んだ。本グル

ープではプロセッサとしてRaspberry Pi Picoを用いて、感圧センサを利用したセンシング技術を利用する。

ソフトウェア作成に必要なスキルとしてC++が挙げられる。基本的なプログラミング知識を使うために、「プログラミング基礎」と「情報処理演習Ⅰ」の授業を参考に進める。「プログラミング基礎」では主にC言語の基礎文法を学んだ。C++はC言語をもとにしたプログラミング言語であるため、関連性が高い授業である。「情報処理演習Ⅰ」ではオブジェクト指向について学んだ。オブジェクト指向はチーム開発の円滑な進行と柔軟なソフトウェア管理を行う上で有用な考え方である。

(※文責：吉田舜)

4-3 ロボットの作成

ロボットは昆虫のように6本の脚を持ち、左右それぞれ3本ずつの脚で構成されている。胴体部分には電子基板やバッテリーを重ねて乗せることができるよう設計した。脚と胴体はAutodesk Fusionを使用し3Dモデルを作成した。そして、脚の構造は3自由度となっており関節角にはTowerPro社のマイクロサーボ9g SG-90を用いた。また、各足先にはInterlink社の感圧センサFSR X 402を取り付けた。図1はロボットの脚部である。また、制御部にはRaspberry Pi Picoを用いた。Raspberry Pi Picoはコンパクトで扱いやすいため、ロボットのようなスペースや重量に制約がある本プロジェクトにおいても適している。図2は脚6本と制御部を取り付けたロボットである。また、歩行時の揺れを測定するために、Kionix社の3軸加速度センサ、KXM52を実装した。ただし、加速度センサは測定のみを行い、そのフィードバックを用いて制御を行うことはしていない。

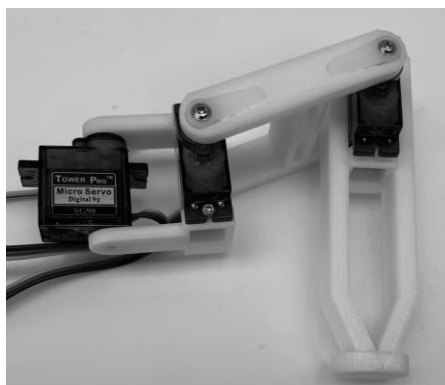


図1. ロボットの脚部

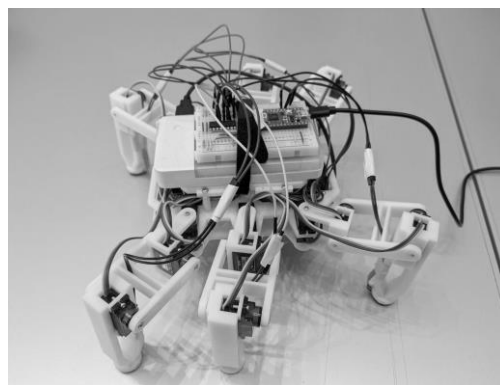


図2. 完成したロボット

(※文責：吉田舜)

4-4 ロボットの制御アルゴリズム

・基本的な脚の駆動の方法

$$\dot{\phi} = w$$

$$\theta_0 = -D \cos \phi$$

$$\theta_1 = \begin{cases} E \sin \phi & \text{when } 0 \leq \phi < \pi \\ \frac{E}{4} \sin \phi & \text{when } \pi \leq \phi < 2\pi \end{cases}$$

$$\theta_2 = \begin{cases} F \sin \phi & \text{when } 0 \leq \phi < \pi \\ \frac{F}{4} \sin \phi & \text{when } \pi \leq \phi < 2\pi \end{cases}$$

w : 固有角速度

ϕ : 位相

D, E, F : 駆動範囲

θ_i : 関節角

足裏のフィードバックを用いない基本的な歩行について説明する。それぞれの脚が位相を持ち、その位相が0から 2π への変化を角速度 ω で続けて、それに対応してそれぞれの脚をまわす。図3は位相 ϕ と遊脚期・立脚期の関係を示した図である。 $0 \leq \phi < \pi$ のときは遊脚期であり、脚は地面についていない。また、 $\pi \leq \phi < 2\pi$ のときは立脚期であり、脚は地面を踏み体を支えている。

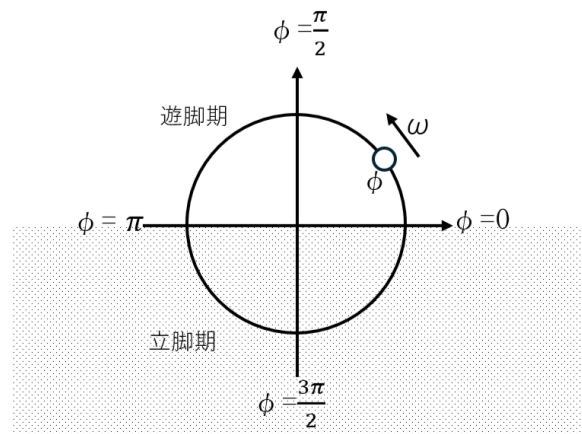


図3. 脚の位相と遊脚期・立脚期

そして、位相 ϕ によってそれぞれの脚がもつ3つの関節角 $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ が決定する。ただし、図1の3つのサーボモータが左から順に関節角 $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ が対応している。そして、図4はロボットの脚を真上から見たときの関節角を示している。 θ_0 が変化することによって、ロボットの脚は前後に動く。また、図5は脚をロボットの正面から見た場合の関節角を示している。 θ_1 と θ_2 はどちらも鉛直方向の動きに関係する関節角である。ただし、図5の θ_1 と θ_2 はそれぞれ負の場合であり、立脚期の場合の関節角である。

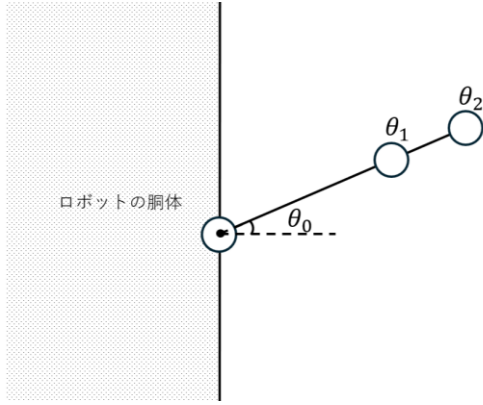


図4. ロボット真上から見た関節角

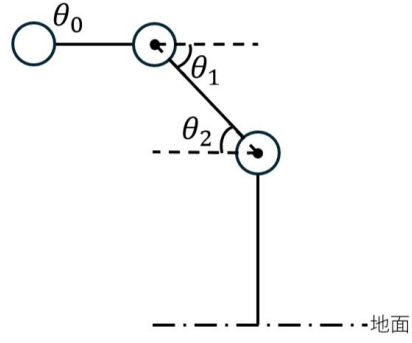


図5. ロボット正面から見た関節角

位相 ϕ と関節角の関係の例として、 $\phi = \frac{3}{2}\pi$ のとき、 $\theta_1 = -\frac{E}{4}$ 、 $\theta_2 = -\frac{F}{4}$ となり、脚がもっとも大きく地面を踏み込んでいる位相である。そして、位相 ϕ が先に進んでいくと徐々に脚を浮かせる位相になる。また、 $\phi = \frac{\pi}{2}$ のとき、脚はもっとも高い地点にある位相である。そこから位相が進んでいくことで、脚は踏み込む位相に変化していく。

(※文責：狩野政宗)

・制御則その1「柔軟さを再現したモデル」

ロボットの脚関節はサーボモータによって角度が固定されているが、本来の生物の脚は柔軟なものである。例えば、段差に乗り上げた脚は、胴体の高さに対して位置が上になるが、昆虫はその高さのまま歩行することができる。それによって、段差の影響で胴体が段差の影響で傾かないようになっている。対して、フィードバック則を用いない制御則では、指定の位置まで関節角を動かし、その結果胴体が傾いてしまう。このような問題を、柔軟性をロボットの脚で疑似的に再現することで解決し、不整地での歩行を安定させようと考えた。

$$\dot{\phi} = w$$

$$\theta_0 = -D\cos\phi$$

$$\theta_1 = \begin{cases} E\sin\phi + \frac{N}{K} & \text{when } 0 \leq \phi < \pi \\ \frac{E}{4}\sin\phi + \frac{N}{K} & \text{when } \pi \leq \phi < 2\pi \end{cases}$$

$$\theta_2 = \begin{cases} F\sin\phi + \frac{N}{K} & \text{when } 0 \leq \phi < \pi \\ \frac{F}{4}\sin\phi + \frac{N}{K} & \text{when } \pi \leq \phi < 2\pi \end{cases}$$

K ：ばね定数

N ：足裏にかかる力の大きさ ($0 \leq N < 1$)

ロボットの脚に生物の脚のような柔軟性を持たせるため、サーボモータの角度を決める式にばねを模した項を追加した。 N は足裏が受ける地面からの垂直抗力の大きさであり、足裏の感圧センサが受ける値を0から1に線形に対応させた値である。足裏が地面につかないと

き、 $N=0$ となり基本的な制御則と同様になる。脚が地面につき力が加わったときそのときの N の値に応じ、フックの法則に基づいて脚の位置が上がる。それによって、段差や傾斜に対応して脚の位置が調整される。図6の左は基本的な制御則、右は柔軟さを再現したモデルを用いて段差に乗りあげたときのイメージである。段差に乗り上げたことに対応し θ_1 と θ_2 が調整される。

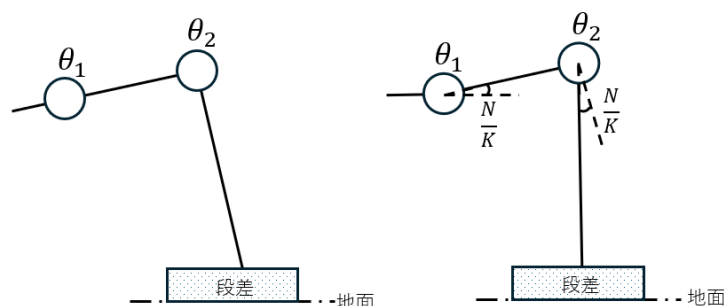


図6. 柔軟さを再現したモデルの図

(※文責：前田凌瑛)

・制御則その2「駆動範囲の大きさを調整するモデル」

$$\dot{A} = k(1 - N - A)$$

$$\theta_1 = E' A \sin \phi$$

$$\theta_2 = F' A \sin \phi$$

N ：足裏に加わる力の大きさ($0 \leq N \leq 1$)

k ：パラメータ

この数理モデルは脚をまわす大きさを調整するモデルである。足裏に力が加わっているときはその力に応じて脚をまわす大きさを小さくして、力が加わらなくなったらその大きさはもとの大きさまで戻っていく。例えば、脚が地面を押してその足裏に力が加わったら、その脚を動かす大きさは加わっている大きさに応じて徐々に小さくなっていく。そして、脚が地面から離れたら足裏に力が加わらなくなり、脚をまわす大きさはもとに戻っていく。図7は段差がある場合とない場合の関節角 θ_1 の違いの説明図である。段差がある場合はない場合と比較して、脚を踏み込み始めてから早いタイミングに足裏に力が加わり、関節角を小さくするように調整する。

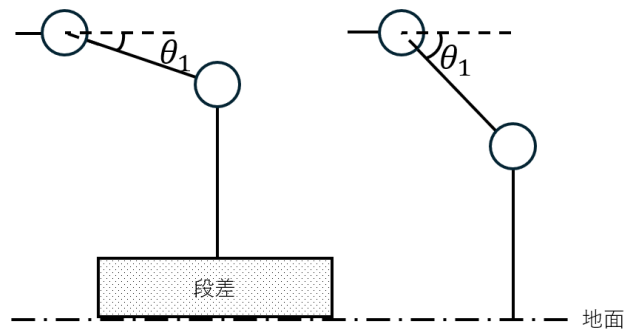


図7. 段差の有無による関節角の違い

A、Nはそれぞれ0以上1以下である。Aは脚の駆動範囲であり、Aが大きいほど脚を大きくまわし、小さいほど小さく脚をまわす。Nは足裏に加わっている力である。足裏に力が加わっていないとき、 $N=0$ であり、力が加わるとNの値はそれに応じて大きくなる。Aの初期値は1であり、Nが0より大きい値をとるとAの値は一定の値まで小さくなっていく。

足裏のフィードバックを用いることにより、脚をまわす大きさは足場の状態に応じて調整される。具体的には、足裏に力が加わっていない場合、脚を大きくまわすようになり、次に踏み込む足場を探る動作を行う。へこんだ足場では脚をより深く踏み込み、平坦な足場では早期に力が加わり、脚を小さくまわすように調整される。基本的な脚の駆動方法においては、 θ_1 と θ_2 の位相による条件分岐が行われ、過度に踏み込まないように制御されていた。しかし、今回のモデルでは足裏のフィードバックを利用することにより、位相による条件分岐は必要なくなる。具体的には、脚が地面に接触した際に足裏の力を検知し、脚の踏み込み量が過剰にならないように調整される。

(※文責：狩野政宗)

4-5 評価方法

考案した制御則を用いた場合の、歩行時の揺れの大きさを測定をするため、実際に簡単な不整地として1cmの段差に乗り上げる歩行をさせた。鉛直方向と水平方向の揺れを加速度センサを用いて計測した。また、その計測はそれぞれの制御則について5回ずつ行い、各回に取得した値の分散を求めてその平均を取った。そして、提案した二つの制御則と基本の制御則の結果をそれぞれ比較した。

(※文責：前田凌瑛)

5章：結果

基本的な制御則を用いた歩行と我々が提案した2つの制御則を用いた歩行での段差を上る際の揺れの大小を比較した。揺れの大小を定量的に分析するためにロボットに加速度センサを付け、それぞれの制御則における水平方向と鉛直方向の値を取得した。そして、その結果を表1にまとめた。

	水平方向	鉛直方向
フィードバックを用いない制御則	1077.15	778.16
駆動範囲の微分方程式モデル	1027.74	794.47
柔軟さを再現した数理モデル	694.13	671.36

表1. 各制御則の水平方向と鉛直方向の揺れの大きさ

基本的な制御則と駆動範囲の大きさを調整するモデルによる段差を上る際の揺れの結果を比較した。駆動範囲の大きさを調整するモデルでは水平方向・鉛直方向ともに基本的な制御則との間に大きな変化は見られなかった。

次に基本的な制御則と柔軟さを再現したモデルによる段差を上る際の揺れの結果を比較した。柔軟さを再現したモデルでは、水平方向に関しては大きく減少し、鉛直方向に関しても減少した。

(※文責：吉田舜)

6章：考察

実験結果の考察

柔軟さを再現したフィードバック則では、鉛直方向と水平方向の揺れを両方減少させることができた。このことから、足裏のフィードバックを用いて、段差を上る際の体の揺れを減少させられることがわかった。そして、足裏のフィードバックを分散的に処理することで不整地での歩行を改善させることができると考えられる。

一方、駆動範囲の大きさを調整するモデルでは段差を上る際の揺れはフィードバックを用いない場合の歩行と比べてほとんど変化がなかった。その理由として、柔軟さを再現した数理モデルと比べて、足裏のフィードバックを受けてから関節角を調整する反応が遅れることが考えられる。柔軟さを再現した数理モデルは足裏からのフィードバックを即座に反映させ、関節角の微調整を迅速に行うことが可能である。一方、駆動範囲の大きさを調整するモデルでは、フィードバックを受けてから角度が小さくなっていくのに時間がかかることが理由だと考察する。

この検証では、不整地への適応の一場面として段差を乗り越える動作を行った。しかし、実際の不整地は段差を上るような場面だけでなく下るような場面も考えられる。さらに、検証で用いたよりも複雑な環境についても検証したい。そして、この検証を行うためには、複雑な環境でも正しく触覚のフィードバックを受けられるようなロボットを用いる必要がある。また、データのとり方に関して、より厳密な収集方法を検討する必要がある。段差を上る際の揺れの大小を定量的に分析するための基準として感圧センサ値の分散を求めたが、この分散の値のみで判断することは不十分である可能性が考えられる。

(※文責：狩野政宗)

今後の展望

本プロジェクトを拡張すると、生物の歩行の仕組みをさらに深く考察できる。本プロジェクトにおいては歩行の周期を一定にしていたが、実際の生物は歩容を変化させることで、移動速度や環境の変化に対応している。このことから、触覚フィードバックが脚の位相の変化を調整することで歩容を調整していることが考えられる。歩容の変化と脳の下位のシステムによるフィードバック処理の関係を探ることを今後の課題としたい。

(※文責：前田凌瑛)

7章：参考文献

- [1] Cruse H, Dürer V, Schmitz J. Insect walking is based on a decentralized architecture revealing a simple and robust controller. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2007 Jan 15;365(1850):221-50. doi: 10.1098/rsta.2006.1913. PMID: 17148058.
- [2] 石川慶孝、大渡健太、井上祐貴、高良拓馬(2021), 神経回路モデルによる歩行シミュレーション. https://www.fun.ac.jp/wp-content/uploads/2022/01/document20_A.pdf
- [3] Dai Owaki, Masashi Goda, Sakito Miyazawa, Akio Ishiguro(2017), A Minimal Model Describing Hexapedal Interlimb Coordination: The Tegotae-Based Approach. *Frontiers in Neurorobotics*, 11, Article 29. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2017.00029>
- [4] 木村浩、秋山征一、桜間一彰(1988), 神経振動子を用いた四足ロボットの不整地動歩行と整地歩行, 日本ロボット学会誌, 16巻, 8号, p. 1138-1145, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jrsj1983/16/8/16_8_1138/_article/-char/ja/
- [5] Yong Zhang, Yijia Qian, Yi Ding, Beiping Hou and Rongyang Wang(2023). Adaptive walking control for quadruped robot by using oscillation patterns. *Scientific Reports*, 13, 19756. <https://www.nature.com/articles/s41598-023-47022-x>