

6 脚歩行ロボットのシミュレータを用いた脚構造の検討

Investigation of Leg Structure Using a Six-Legged Robot Simulator

長坂保典・ナガサカ ヤスノリ・Nagasaka Yasunori／前野一樹・マエノ カヅキ・Maeno Kaduki／伊藤健史郎・イトウ ケンシロウ・Ito Kenshiro

SUBJECT

ロボットの構造の検討

ABSTRACT

本論文では、6 脚歩行ロボットの開発と製作を支援するために開発したシミュレータの仕様と、それを利用して行なった歩行アルゴリズムの開発の結果、および効率的な歩行を実現するために脚構造を検討した結果について述べた。

6 脚歩行ロボットのシミュレータを用いた脚構造の検討

長坂 保典^{*}, 前野 一樹[†], 伊藤 健史郎[†]

Investigation of Leg Structure Using a Six-Legged Robot Simulator

Yasunori NAGASAKA^{*}, Kaduki MAENO[†] and Kenshiro ITO[†]

(Received Oct 3, 2012)

This paper presents a six-legged robot simulator, a walking algorithm which was developed using the robot simulator, and the result of leg structure investigation. We have developed a robot simulator using ODE(Open Dynamics Engine). ODE is an open-source software library which calculates rigid body dynamics. The developed walking algorithm decides the next landing point of each leg by considering which point is suitable to place the robot's tiptoe. Using the algorithm, the robot was able to walk on stepping stones and stairs. We investigated the leg structure on the simulator. We compared four kinds of different constructions of the leg. As a result, we concluded that it is effective to set a long size to the length of the link attached to the shoulders to get a faster walking speed.

Keywords: Legged robot, Leg structure, Robot simulator, Rigid body dynamics, ODE

1 はじめに

災害現場、事故現場などで人が近寄ることができない危険な場所での作業を人に代わって実施したり、現場での情報収集や搜索活動を支援する目的のレスキューロボットが研究されている。研究機関やロボットメーカーでは様々なタイプのロボットが開発されており [1]-[9]、一部は既に実用化され現場で使用されている。これらのロボットは駆動機構として無限軌道 (戦車やブルドーザなどで用いられる環状の部品で、クローラ、履帯、キャタピラなどの呼び名がある。なおキャタピラは米国キャタピラ社の登録商標である。) を採用しているものが多い。無限軌道と姿勢を保持するための補助的な機構を組み合わせることで、階段程度の段差や角度であれば問題なく登ることができる。

岩場、瓦礫の山などの平坦でない足場の悪い状況でも

安定して歩行ができるロボットの実現を目指して、我々は 6 脚歩行ロボットの開発と製作を行なっている。6 本の脚でロボット本体を支えることで、急角度の斜面でも歩行が可能になることが期待できる。将来は無限軌道方式では登れないような急角度の斜面を登れる機構とすることを目指している。

本論文では、前述した 6 脚歩行ロボットの開発と製作を支援するために開発したシミュレータの仕様と、それを利用して行なった歩行アルゴリズムの開発のこれまでの結果、および効率的な歩行を実現するために脚構造を検討した結果について記述する。2 では、開発している 6 脚ロボットの実機の仕様を示す。3 では、実機ロボットに基づいて作成したロボットのモデルとシミュレータの仕様を示す。シミュレータはオープンソースで無料で利用できる動力学計算エンジンライブラリ「Open Dynamics Engine」[10][11] を使用して開発されている。4 では、シミュレータを用いて現在開発中の歩行アルゴリズムの概要を示す。開発当初は平坦な地面

^{*}電子情報工学科 (Department of Electronics and Information Engineering)

[†]電気電子工学専攻大学院生 (Graduate Student, Electrical and Electronic Engineering)

しか歩行できなかったが、少しずつ複雑な歩行ができるようになっており、現在は高さや位置にバラツキがあるように並べられた飛石を踏み外さずに歩行できるようになっている。5では、シミュレータ上で様々な構成の脚を持つロボットを歩行させた場合の、歩行速度や重心位置の移動する様子の記録を用いて、速く安定した歩行を実現する脚構造を比較した結果を示す。6では論文全体のまとめを記す。

2 実機 6 脚歩行ロボットの概要

図 1 に 6 脚歩行ロボットの実機の外観を示す。ロボットの本体部分は長さ 180mm × 幅 110mm × 高さ 50mm の大きさで、前方端と後方端がやや絞込まれた 8 角形をしている。各脚は肩に相当する本体取付部分から 80mm、150mm、210mm の 3 本のリンク (L1 L3 で表す) が関節で接続されている。関節にはサーボモータが使用されており、回転軸の周りでリンクを回転させる力を発生させる。サーボモータには双葉電子工業 (株) 製の RS405CB を使用している。このモータは $48 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ のトルクを発生する。脚先には地面や物体との接触を感知するマイクロスイッチを用いた接触センサーが取り付けられている。

各関節の回転方向は、胴体と L1 を繋ぐ関節 1 は水平方向に回転し、脚を前後に動かす役目を持っている。L1 と L2 を繋ぐ関節 2、L2 と L3 を繋ぐ関節 3 は垂直方向に回転し、脚を上下に動かす、および脚の伸ばし具合を調整する役割を持っている。各脚には左前脚を Leg0 とし、反時計回りに 0 ～ 5 までの番号が振られている。ロボットの重量はおよそ 3kg である。

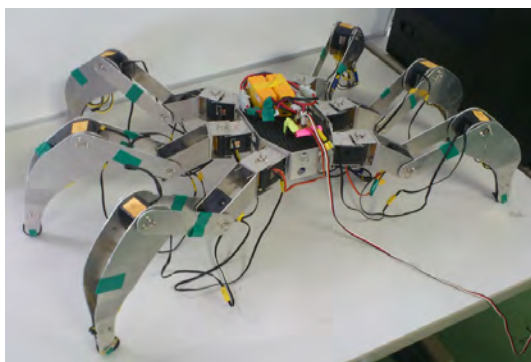


図 1: 実機 6 脚歩行ロボット

3 6 脚歩行ロボットのシミュレータ

3.1 シミュレータにおけるロボットのモデル

ロボットに新しい機能を実装するたびに毎回実機でそのテストを行うのは効率が悪く、想定外の動作をする

可能性もあって危険な面がある。そこで本研究では、6 脚歩行ロボットを ODE(Open Dynamics Engine) 上にモデルとして再現した。これを用いて 6 脚歩行ロボットの様々な評価や開発を行っている。シミュレータ上に作成したロボットのモデルを図 2 に示す。

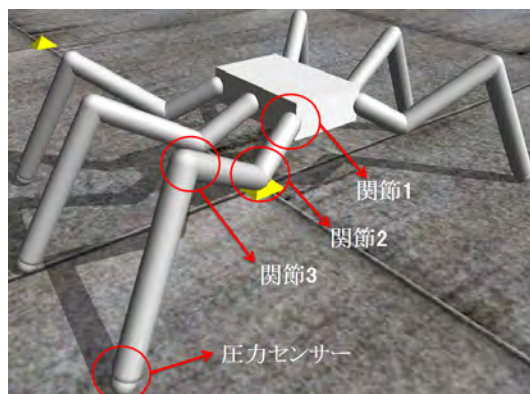


図 2: 6 脚歩行ロボットのシミュレータにおけるモデル

実機ロボットを構成する各 부품の細かい形状は再現していないが、ロボット本体の大きさ、脚を構成する各リンクの長さ、重量などの物理的諸元は実機と同一にしてある。各関節は実機で使用しているサーボモータと同様に $48 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ のトルクを発生するように設定している。

本体を直方体で表現しているため、前脚と後脚の取り付け角度が実機とモデルとで異なる。実機では、前脚と後脚は本体の斜めになっている部分に接続されており、肩に相当する関節の角度を 0° にした状態で脚は真横に向かない。この違いを吸収するためシミュレータでは前脚、後脚の 4 本については、それぞれ前後に 30° 傾けた状態を 0° としている。

シミュレータ固有の設定として、各脚に仮想原点が設定されている点がある。次に述べる逆運動学により関節角度の計算を行なうためには、現在の脚先の位置から次のステップで踏み出した脚先が到達すべき目標地点までの距離情報が必要になる。そのため、各脚の根元部分にあたる関節 1、及び次の関節 2 の部分に座標計算のための原点を便宜上配置してある。実機ロボットでは脚先には接触センサーが取り付けられているが、モデルでは圧力センサーとなっている。接地したかどうかを検出する点では同等の機能となる。

3.2 逆運動学の計算

平坦な地面以外でロボットを歩行させるためには、各脚を踏み出す度に脚先をどの位置に着地させるかを決め、その位置に正しく脚先が到達するように各関節を

回転させる必要がある。このような目標位置から関節角度を求める計算手法は逆運動学と呼ばれ、我々のロボットでも採用している。逆運動学による関節角度決定には、脚の基準となる点から目標地点までの距離情報が必要になる。今回のモデルでは、関節 1、関節 2 に設置された原点 1、原点 2 の 2 か所の座標を基準位置として、そこから目標地点の座標までの距離を求める。また、角度計算の流れは、図 3 に示すように、水平方向の脚の回転 (方向の調整に相当する) と、垂直方向の回転または脚の進展 (距離の調整に相当する) を別々に行っており、それぞれの計算のための原点が原点 1、原点 2 となる。

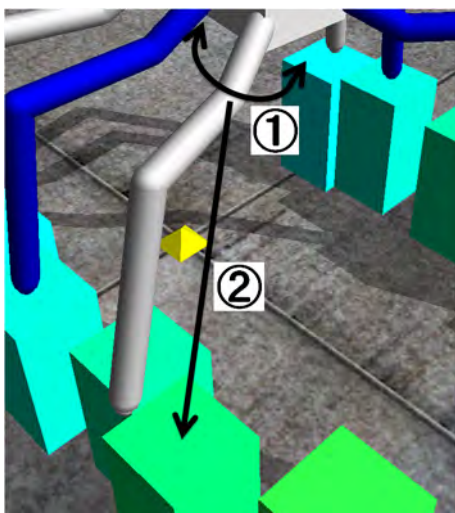


図 3: 逆運動学による脚の動作

逆運動学の計算は、まず原点 1 から目標地点への方向を求め、脚が向く方向が一致するように関節 1 の角度を決定し、水平方向に回転させる (図 3 中の 1)。その後 (実際の脚の動きでは同時に実行されるが) 原点 2 から目標地点までの距離から残った 2 つの関節角度を求め、脚先が目標座標に達するように伸ばす (図 3 中の 2)。つまり、水平方向の回転で向きを確定させた状態から、改めてリンク 2 から距離を合わせることで、脚先の位置を正しく調整している。

現在は脚の動きを 1 本ずつ計画して 1 本ずつ動かしており、2 本以上の脚を同時に動かすことはしていない。また脚を動かす処理と胴体を前に進める処理も分けて実行している。今後は転倒の心配がないときは複数の脚を同時に踏み出し、また脚の動きと胴体を前に進める動きを同時並行的に実行できるようにしたいと考えている。これにより滑らかな動きの実現と歩行速度の向上が期待できる。

3.3 歩行テストの環境

シミュレータ上での歩行テストは、現在は平らな地面でなく、図 4 に示すような飛び石と、図 5 に示すような階段を使用して行っている。シミュレータ開発当初はまだ歩行が安定せず、平らな地面上でしか歩行することができなかったが、その後逆運動学を導入することで目標座標に正確に脚を下ろすことができるようになったため、飛び石や階段などの不安定な足場でも歩行できるようになった。

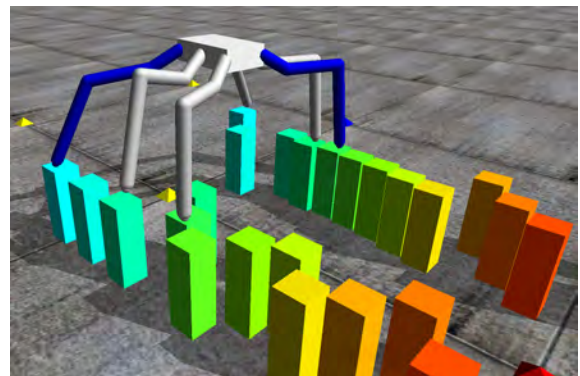


図 4: ロボットが歩行する環境、飛び石

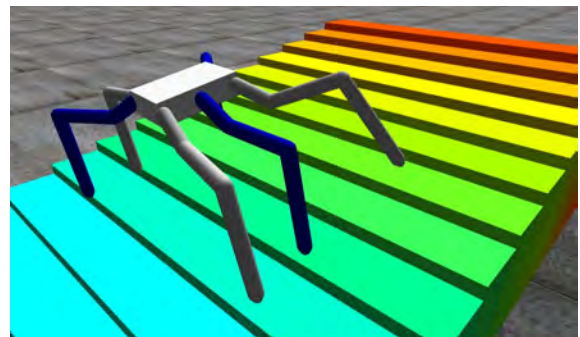


図 5: ロボットが歩行する環境、階段

この飛び石は、高さや位置がランダムに設定されるようになっている。飛び石上に正確に脚先を下ろし、バランスを崩さずに歩行できるかが評価の基準となる。また、設定を変更することで、階段のような形状 (図 5) に変更することもできる。飛び石の基本的な配置は、上面の大きさが縦横 100mm、横方向の飛び石の間隔が 560mm、飛び石と次の飛び石の中心間の距離が 130mm となっている。現在は主として飛び石を歩行の評価に用いている。

シミュレータ上のモデルは脚先にある接触センサ以外のセンサが搭載されていないため、カメラやその他のセンサにより飛び石や着地点の位置をロボット自身

で計測することができない。そのため、現在は飛び石や階段の段差の位置がシミュレータ内での絶対座標としてデータ化されており、ロボットは歩行に際してこれらのデータにアクセスすることができる。すなわち環境内のすべての物体の絶対座標が既知として脚の動きを決定している。

4 歩行アルゴリズムの開発

4.1 飛び石を歩行する場合の歩行モーション

平坦な地面を歩行する場合は、脚をどの位置に着地しても問題ないため、複数本の脚を同時に振り出しての高速な歩行が可能であった。しかし飛び石上では脚を着地可能な場所が限定されるため、現在は着地点を考慮しながら脚を1本ずつ前に送っていく。そのため現在の歩行は、飛び石を1つ1つ順に伝って歩行していく形になっている。その際の脚の動きを図6に示す。

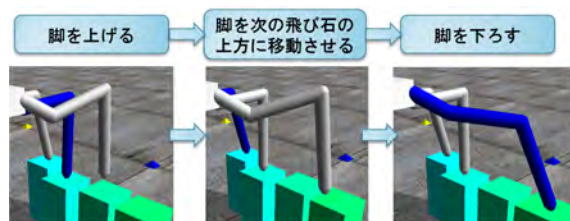


図 6: ロボットが歩行する際の基本的な脚の動き

まず、左前脚 (Leg0) を上げ、次の飛び石の上方に移動し、その後脚を下ろす。このとき、脚先の圧力センサーが反応することで着地したことを検出して一連の動作が終了し、次の脚の動きに移る。次の脚も同じ動作を行う。動作する脚は、Leg0 から始まり、Leg5、Leg1、Leg4、Leg2、Leg3 という順番 (左前脚→右前脚→左中脚→右中脚→左後脚→右後脚の順番) になっている。

これらの動作だけでは、脚だけが先行してしまい、ロボット本体が前進しないため、いずれ後方に転倒してしまう。これを防ぐため、脚先がある方向に偏った時には、転倒しないよう本体をその方向に移動させてバランスを取る動作をする。例えば、歩行が進んで半分以上の脚が動作し終えた時点では、多くの脚が前方に出た状態、つまり脚先が前方に偏った状態になる。そうなった場合、本体を前方に押し出すことで転倒を防ぎ、かつ脚の前進に合わせて本体も前進できるようになっている。また、本体の向きが左右に振れた時も同様の処理を行い、常にロボットが正面を向くよう、制御している。

歩行に関する別の問題として、飛び石が狭い範囲に密集している部分において、そこに脚が集まってしまう

ことで、ロボットを支える支持多角形 (接地している脚先を結んだ多角形) が小さくなり、ロボットの重心が支持多角形の外に出ると転倒してしまうことがある。これを防ぐには、脚先の配置から支持多角形を求め、重心が支持多角形の外に出ないように常時監視して脚の運びを決める必要がある。

4.2 階段を登る場合の歩行モーション

階段歩行を行った場合の様子を図5に示す。階段の歩行では、飛び石のように足場がランダムに設置されるわけではないので、「脚が届かない」「脚が届くのだが不安定な姿勢にならざるを得ない」といった状況にはならず、比較的安定して歩行を続けることができる。しかし、リンク L2 と L3 の長さを足しても 30cm ほどにしかならない 6 脚歩行ロボットの構造上、人間が通常登るような 20cm 近い高さの階段を登ることは簡単ではない。また階段の歩行の場合、当然前方の脚ほど高所にあることになり、歩行と共に脚が前方、高所に偏っていく。そのため、ロボットの前方が徐々に持ち上がっていくような形になり、後脚を上げた際、バランスを崩し、後方に転倒してしまうことが多い。

これに関しては、前述した脚が偏った方向に胴体を移動させてバランスを取る動作が、高さ方向に関してはまだ実装されておらず、ロボットの姿勢を水平に保てないことが原因の一つとなっている。図5に示す程度の段差の階段でも、バランスが取れずに転倒してしまうことがあり、高さ方向でバランスを取る動きを加える必要がある。

4.3 飛び石を歩行する歩行モーションの改良

前述した飛び石を歩行するモーションの改良として、無駄な動作を除くことを考えた。前述した歩行モーションは、飛び石の位置に関わらず、全ての飛び石1つ1つに脚を順番に下ろしながら歩行していた。しかしこの方法では、飛び石の間隔が狭い場合に本来2つ3つ先の飛び石まで脚が届くにも関わらず、全ての飛び石を伝って歩いてしまい、歩行に無駄な時間がかかってしまう。例えば、1歩で3つ先の飛び石まで脚が届くのに、1つ1つ順番に歩いてしまった場合、単純に考えて、同距離の歩行に3倍の時間がかかってしまう。

そこで間隔が狭い部分の飛び石を効率良く歩行するため、各脚の歩行プログラムを図7に示すような処理に変更した。この処理は、まず1つ先の飛び石 (n 番目) に脚が届くか判定して、脚が届く場合、 $n=n+1$ とし、更に1つ先の飛び石を目標地点とし、再帰的に届くかどうかの判定を繰り返す。届かないと判定した場合は $n=n-1$ として、結果的に脚が届く最も遠い飛び石に脚

を下ろすことができる。

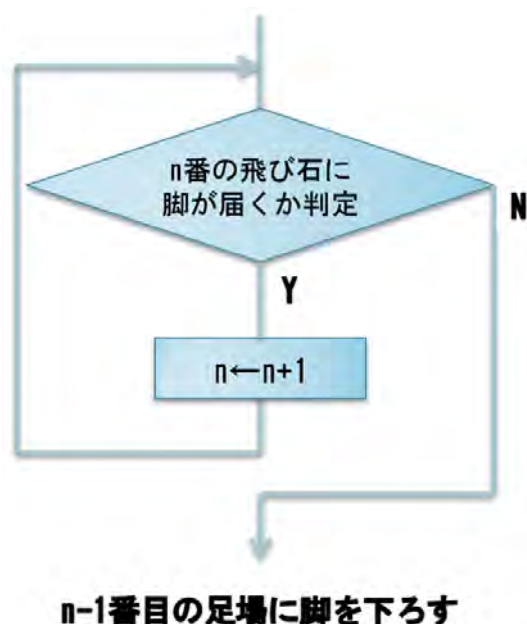


図 7: 改良した飛び石歩行の着地点を決める処理

Leg0 と Leg5 の 2 本の前脚を除く中脚以降の脚は、脚が届く限り前に出そうとすると、前方の脚と同じ飛び石に脚を下ろそうとして脚が絡み、転倒する可能性がある。そのため前脚以外の 4 本の脚は、前方の脚が既に脚を下ろしている飛び石の 1 つ後ろまでしか進まないよう制限されている。この改良したプログラムを使用して飛び石を歩行させた様子を図 8 に示す。

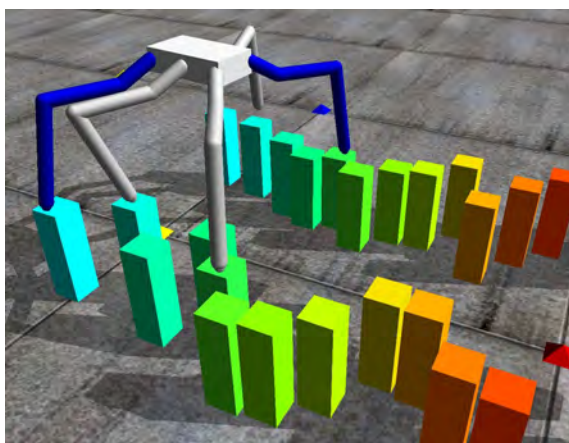


図 8: 改良した飛び石歩行の様子

前脚と中脚の間に石が 2 個あるが、これは途中の石を 1 個スキップしても歩行に影響ないと判断し、前脚が届く最も遠い石を選択して歩行していることを表している。

5 脚構造の検討

シミュレータ上で様々な構造の脚を持ったロボットのモデルを作成し、同じ条件で歩行させた時の速度や歩行中の重心の移動の様子を記録し比較することで、歩行に適した脚構造を検討した。実機ロボットで様々な構成の脚を製作して性能の比較をするのは容易ではないが、シミュレータを使用することでリンク長などはプログラム中の設定値を変更するだけでよく、様々な構成を手軽に比較することが可能である。この点はシミュレータを使用する大きなメリットであると言える。

実機ロボットの脚を構成する 3 本のリンクの長さは、胴体に近いところから $L1=80\text{mm}$, $L2=150\text{mm}$, $L3=210\text{mm}$ となっている。この組み合わせを基本として、リンク長の合計が一定であるという条件の下で、以下に示すリンク長の組み合わせを比較した。

- (1) 基本構成,
 $L1=80\text{mm}$, $L2=150\text{mm}$, $L3=210\text{mm}$
- (2) 中リンク長,
 $L1=80\text{mm}$, $L2=210\text{mm}$, $L3=150\text{mm}$
- (3) 根リンク長,
 $L1=210\text{mm}$, $L2=80\text{mm}$, $L3=150\text{mm}$
- (4) 平均,
 $L1=147\text{mm}$, $L2=147\text{mm}$, $L3=147\text{mm}$

(1) は基本の構成で、先端のリンクが一番長くなっている。(2) は真中のリンクが長く、(3) は根本のリンクが長くなっている。(4) は 3 本のリンクが同じ長さになっている。各モデルで 3 個の関節の回転軸の向きの設定は実機と同じである。また歩行のアルゴリズムも共通である。それぞれのモデルの外観を図 9 に示す。

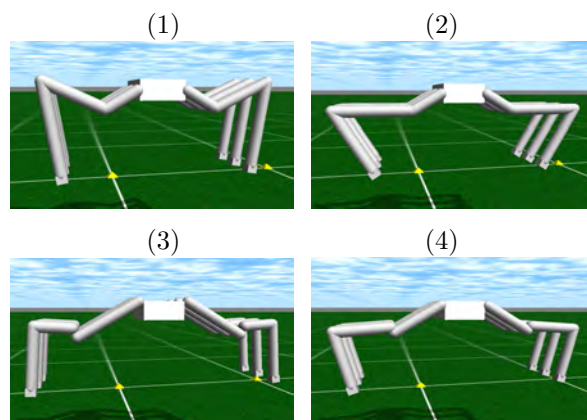


図 9: リンク長の組み合わせが異なる 4 種類の脚, (1) 基本構成, (2) 中リンク長, (3) 根リンク長, (4) 平均

5.1 脚構成の違いが歩行速度に与える影響の評価

上記 4 種類の脚の構成のロボットで平坦な地面を 1m 歩行させた。各モデルで 1m 歩行するのに要した時間を表 1 に示す。この結果から高速度が必要な場合は根本のリンクを長くする (3) の構成が効果的であるとわかる。(3) の構成がなぜ高速で歩行できるか理由を考えると、根本のリンク L1 は上下方向の回転はしなくて水平方向に長くなるような角度で本体に接続されている。それに対してリンク L2, L3 は垂直に回転するように関節が接続されており、主として高さの調整を司る。リンク L2, L3 が水平に近くなるように伸ばして歩行すれば歩幅が広がるが、現在はそのような設定になっておらず、図 9(1) のように垂直に近い角度になるように設定されているので歩幅を広くするのにあまり貢献しない。結果として L1 に長いリンクを使用すると歩幅が広くなり、同じ歩数では移動できる距離が長くなると考えられる。同じ理由から L1 に短いリンクを使用している (1), (2) の構成では歩行速度が遅くなっている。これから図 9(1) のように関節を曲げて歩行する場合は、L1 に長いリンクを割り当てるのが高速化には有効である。その反面、L2, L3 には短いリンクが使用されるので高さの調整余地はあまりなく、高い段差を乗り越えて歩行するのには向いていないと考える。

表 1: 各モデルが 1m 歩行するのに要した時間

モデル	時間
(1) 基本構成	7.59 秒
(2) 中リンク長	6.41 秒
(3) 根リンク長	4.72 秒
(4) 平均	6.03 秒

5.2 歩行中の重心揺動の比較

脚構成の違いにより歩行中の重心揺動がどのように異なるか比較、評価するために歩行途中に重心位置が移動する様子を時系列で記録した。重心揺動は揺れが少ない歩行を実現する際の歩行の滑らかさや安定性を表す指標と考えている。記録結果を図 10 にグラフとして表した。

1 つのモデルについて 2 種類のグラフが示されている。X-Y 遷移というタイトルが付いているグラフは、横軸がロボットの重心が進行方向に移動した距離、縦軸は横方向に動いた距離を表している。X-Z 遷移というタイトルが付いているグラフは、横軸は進行方向に移動した距離、縦軸は高さ方向に動いた距離を表している。単位はすべてメートルである。2 種類のグラ

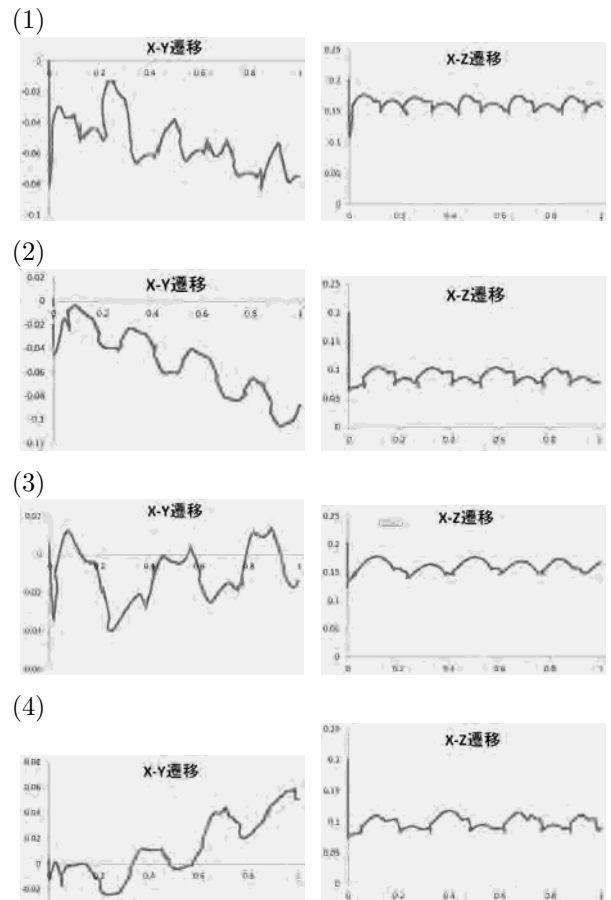


図 10: 歩行中に各モデルの重心位置が移動する様子, (1) 基本構成, (2) 中リンク長, (3) 根リンク長, (4) 平均

フからロボットが 1m 歩行する間に重心がどのように動いたかを読み取ることができる。これらの結果から次のことがわかる。

X-Y 遷移のグラフは横方向の重心位置のずれを表しているが、この結果を見るとロボットは歩行中に少しずつ横にずれていくことがわかる。1m 歩行後に値が 0 でない場合は進行方向から右または左にずれていることを表す。現在は常に同じ方向に進むという処理が入っていないため歩行の過程で左右どちらかにずれていく場合が多い。このずれは 1m 進む間に数 cm から 10cm 程度である。脚の動きは何も設定しないときは直進するように左右で同じ動きになっているが、着地した脚先の滑りや脚を振り上げる動きの影響で微妙にロボットが回転するのか進行方向が若干ずれる傾向がある。この現象は重心位置の座標や進行方向を監視して定期的に補正すれば改善できるので、今後導入していきたい。

X-Z 遷移のグラフからはロボットの重心位置が (1) と (3) ではほぼ 15cm の高さに、(2) と (4) では 10cm 程度の高さになっていることがわかる。重心位置

を一定に保つという特別な処理は含まれていないがほぼ一定に保たれていることがわかる。また 15cm と 10cm の違いについては、各モデルで重心をなるべく高く保つという処理はしていないので、この結果から (1) と (3) が重心位置を高く保つのに向いているという結論はすぐには得られない。現在の関節角度の設定では L3 に長いリンクを割り当てるのが重心位置を高く保つのに有効である。(3) の構成では上行する L2 に短いリンクを割り当てたため、下行する 2 本のリンクが長くなり結果的に重心位置が高くなったと考えられる。

歩行中に重心が移動する様子は、今回比較した 4 種類の構成では大きな違いはなかった。リンク長の組み合わせ方によって揺れが極端に大きくなるといった現象は見られなかったため、重心の動きは脚の構造を考えるうえでそれ程考慮する必要はないと考える。

6 まとめ

本論文では、6 脚歩行ロボットの開発と製作を支援するために開発したシミュレータの仕様と、それを利用して行なった歩行アルゴリズムの開発の結果、および効率的な歩行を実現するために脚構造を検討した結果について述べた。

歩行アルゴリズムの開発では、平坦な地面だけではなくランダムに配置された飛び石や階段を歩行できるアルゴリズムを実現した。脚構造の検討では、4 種類の異なる構成の脚を持ったロボットのモデルを用いて、歩行のシミュレーションを行った結果、平坦な地面を高速に歩行するのに適した構造と段差が多い場所を歩行するのに適した脚の構造を明らかにした。現在の関節角度の組み合わせでは根本のリンク L1 に長いリンクを割り当てるのが、歩幅を広くするのに有効で高速歩行に向いている。その反面、高さ方向の調整の余地が少なくなるので段差を乗り越えるのには向かない。ロボットが歩行する環境に段差が多くある場合には、L2, L3 に長いリンクを割り当てるのが有効と考える。脚における異なるリンク長の組み合わせが、歩行中の重心の移動にどのような影響を与えるか評価したが、結果に大きな違いはなく、重心の移動は現状では考慮する必要がないことがわかった。

今後の課題として、歩行アルゴリズムについては飛び石や階段を歩行できるようになったが、問題点として脚を 1 本ずつしか動かせず高速な歩行ができない、支持多角形を考慮した脚の運びがまだできない点などが残っている。これらについては今後開発を続けて改善していきたい。脚の運びを考える際には様々な要素を考慮する必要があるが、まだアルゴリズムに組み込ま

れていないものが多いので、それらを順次組み込んでいく。前述した支持多角形の問題では、脚が狭い範囲に集中してしまうと脚先で構成される支持多角形の面積が小さくなり、転倒しやすくなる。また階段や段差では特にロボットの本体が斜めになる姿勢が続くので、そのような場合でも転倒しないような各脚の着地点の選択と脚の運びを考える必要がある。飛び石は現在ほぼ 2 列に並んだ配置に固定されているが、今後は図 11 に示すような 2 次元に広がった配置で歩行時にどの飛び石を選択するのが有効かロボット自身で判断できるようにしたい。

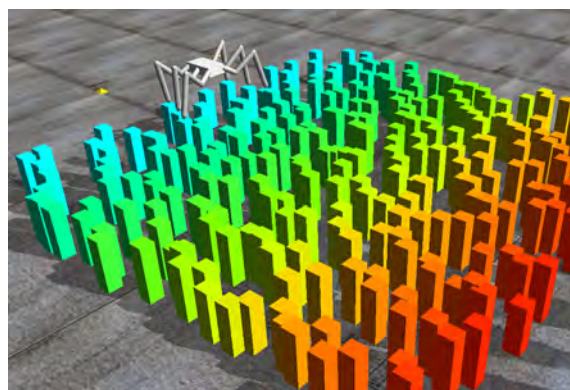


図 11: 2 次元に広げて配置した飛び石の歩行

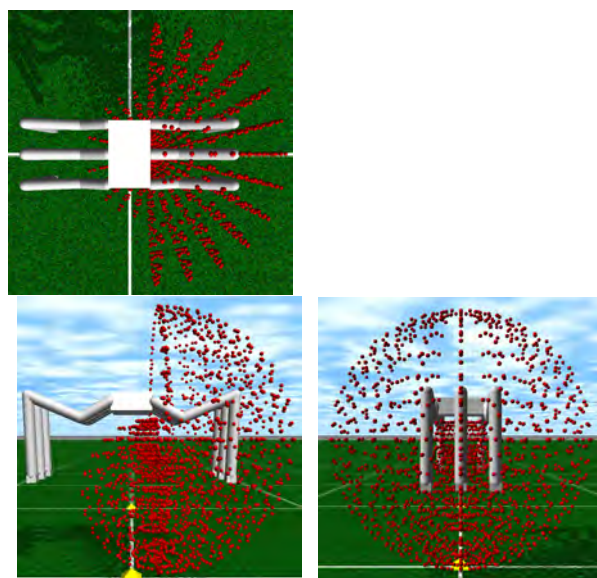


図 12: 脚先が届く座標の可視化の取り組み

脚の構造については、考慮すべきパラメータが多く、今回比較した内容だけではまだ不十分である。ロボットが持つ脚の数、1 本の脚が持つ関節数、各関節の回転軸の向き、各リンクの長さなど考えられるすべての組み合わせを比較することは難しいが、そのような中で

より有効な基準を定めてそれにより構造を決める取り組みを続けたいと考えている。現在、図 12 に示すような脚先の到達可能な座標を可視化する機能の開発に取り組んでおり、完成したら評価の際の一つの基準として導入したいと考えている。

参考文献

- [1] 金子真, 阿部稔, 他 : 多足歩行機械の自由度に関する基本的考察, 日本ロボット学会誌, vol.2, no.2, pp.142-150, 1984.
- [2] 木村浩, 秋山征一, 桜間一彰, : 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走行, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.8, pp.1138-1145, 1998.
- [3] 山元順三, 細井博幸, 坂野進 : 昆虫型ロボットの研究-カブト虫型ロボットの構成と制御-, 電子情報通信学会技術研究報告, EMD 機構デバイス, vol.98(5), pp.9-16, 1998.
- [4] 倉重健太郎, 長谷川泰久, 福田敏男, 他 : NN と EP による六脚歩行ロボットの行動生成, 日本ファジィ学会誌, vol.13, no.2, pp.71-79, 2001.
- [5] 高橋幸也, 萩原義裕, 他 : 重心移動の効率化を考慮した多脚歩行ロボット, 日本機械学会講演論文集, vol. 2006(41), pp.153-154, 2006.
- [6] 中山隼, 内田洋彰, 清水裕亮 : 半円弧状の脚を有する 6 脚歩行ロボットの歩行制御, 高等専門学校の教育と研究 : 日本高専学会誌, vol.13, no.2, pp.27-32, 2008.
- [7] 高橋 健治, 金田 忠裕 : 新型六脚歩行ロボットの開発, 高等専門学校の教育と研究 : 日本高専学会誌 vol.14, no.3, pp.13-16, 2009.
- [8] 青井伸也, 土屋和雄 : 多脚歩行ロボットの力学特性と運動機能, システム制御情報学会誌, vol.53, no.12, pp.500-505, 2009.
- [9] R. Vidoni, A. Gasparetto : Efficient force distribution and leg posture for a bio-inspired spider robot, Robotics and Autonomous Systems, vol.59, Issue 2, pp.142-150, 2011.
- [10] Russell Smith : <http://www.ode.org/>
- [11] 出村公成 : 簡単! 実践! ロボットシミュレーション, 森北出版, 2007.