

令和 元年 6月 10日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00350

研究課題名(和文) 多脚歩行ロボットのための自由歩容を実現するグラフ探索を用いた脚軌道計画

研究課題名(英文) Leg trajectory planning using graph search for free gait of multi-legged robot

研究代表者

琴坂 信哉 (KOTOSAKA, Shinya)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：30334147

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、多脚歩行ロボットを対象として、グラフ探索手法を用いた歩行パターン生成手法の開発を行った。従来手法では、6脚歩行ロボットを対象とするとグラフ構造が大きくなりすぎて歩行パターンの探索が不可能であったが、本提案手法では、グラフの構造化、および歩行パターン生成と脚の運動軌道生成の分離により、実用的な時間内に計画できる手法を開発した。

平面状の不整地を対象として、実ロボットによる巡回歩行動作、直線歩行動作を実現することができた。また、一部脚が下せない場所のある地形、ランダムに配置された地形等の様々な地形において歩行パターン生成のシミュレーションを行い、本手法の有効性が確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、不整地において安定に歩行するために有利な多脚歩行ロボットを対象として、様々な地形に対応して自由に歩行できるようにするための脚の運動を生成する手法を提案している。これまで、少ない脚数のロボットまでしか対応していなかったグラフ理論を用いた歩容パターン生成手法を、新しい手法により、より安定な歩行が可能な6脚ロボットにも対応できるように拡張した。多脚ロボットを様々な地形でも歩行できるようになるはずである。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed a walking pattern generation method using graph search algorithm for multi-legged robots. In the proposed method, we have developed a method that can be planned in a practical time by structuring the graph and separating walking pattern generation and leg motion trajectory generation.

We were able to realize the walking and straight walking motions by a real robot on flat rough terrain. Moreover, the simulation of walking pattern generation was carried out on various terrains such as terrains with places where legs can not be lowered and terrains arranged randomly, and the effectiveness of this method was confirmed.

研究分野：ロボット工学

キーワード：多脚歩行ロボット 歩容パターン生成 グラフ探索

## 1. 研究開始当初の背景

災害現場では瓦礫の崩落や汚染物質などにより人が容易に近づけない場合がある。そこで、調査や応急復旧が行えるロボットの開発・導入が進められている<sup>(1)</sup>。ロボットの地上での移動形態を考えると主に車輪型、クローラ型、脚型の3種類がある。脚型は他の移動形態に比べ移動速度やエネルギー効率は劣るが、接地点を離散的に選択することができるため移動可能な環境が他の移動形態に比べて広い。特に4脚以上の歩行型ロボットは常に静的安定性を保ったまま歩容を行うことができ、6脚以上の脚を持つロボットの場合は複数の脚を同時に遊脚しても静的に安定な歩行が行えるという利点がある。しかし、脚型ロボットを不整地で歩行させるためには、任意の接地点を選択できる自由歩容の実現が必要である。自由歩容の生成手法としては、脚の可動域の余裕分が少ない脚を遊脚とする手法<sup>(2)</sup>や強化学習を用いた手法<sup>(3)</sup>、また、消費エネルギーを小さくする歩容生成手法<sup>(4)</sup>などがある。しかしこれらの手法では障害物を想定していない、特定の不整地のみを対象としているなど実際の不整地環境下での利用は困難である。この問題を克服できる自由歩容の手法としては、グラフ理論を用いた手法が提案されている<sup>(5)</sup>。脚の動作をグラフで表現し、そのグラフ探索により数歩先のロボットの状態を考えながら歩行動作を生成することで、デッドロックに陥りにくく、また、効率の良い移動が期待できる。しかし、これまでの研究では、現実的な探索時間で計画を終えるために、4脚までを対象とした手法<sup>(5)</sup>しか提案されてこなかった。そのため、常に歩行安定余裕を維持できる6脚のロボットを対象として、リアルタイムで歩容生成を行うことが難しいという問題があった。

## 2. 研究の目的

本研究では、歩行パターン生成と重心位置・脚接地位置の選択および運動軌道生成を分離することによって、グラフの探索空間を縮小する手法を提案し、リアルタイムで6脚を含む多脚歩行ロボットの自由歩容を実現することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### 3.1 提案する歩行パターン生成手法

#### 3.1.1 グラフ構造の定義

本手法では、ロボットの状態をノード、ロボットの動作をエッジとしてグラフを表現する。脚位置を離散化してロボットの状態を数値として表現したものをノードとする(Fig. 1)。脚の基準位置を2として、進行方向前方の脚位置を3、後方を1と表現する。また、それぞれの遊脚状態を1', 2', 3'とする。これら遊脚状態を総称して脚位置0と呼ぶ。1, 2, 3からそれぞれ1', 2', 3'への遷移が脚を上げる動作に対応し、その逆が脚を降ろす動作である。また、1', 2', 3'の内で遷移するのが脚の進行方向に対しての前後移動に対応する。この離散化した脚位置を用いて、6脚ロボットの状態をグラフのノードとして定義する。この状態は、6桁の数値として表現する。脚位置は6種類であるので、このグラフのノードの総数、つまりロボットの状態は $6^6$ 通りとなるが、今回は常に静的安定性を保ちながら移動することを想定している。そのため、静的安定性を保てない6脚を同時に遊脚、5脚を同時に遊脚、4脚を同時に遊脚、隣り合う3脚を同時に遊脚する場合を除くため、ノードの総数は、26244個となる。

次にロボットの動作を用いてエッジの定義を行う。ロボットの脚の動作を、脚の上下運動と前後運動の2種類に分け、これに対応するエッジをそれぞれ上下運動のエッジ、前後が運動のエッジと定義する。上下運動のエッジがつなぐのは、脚を上げる動作のみもしくは脚を降ろす動作のみで遷移することが可能な2つのノード間であることとする。また、前後運動のエッジがつなぐのは、遊脚している脚の前後移動させる動作のみで遷移することが可能な2つのノード間とする。

#### 3.1.2 グラフの探索方法

一般的に、グラフ探索では、探索深さに対してノードの探索数は指数関数的に増加する。そのため、目標位置に到達できない場合には、探索が現実的な時間内に終わらない可能性が高くなるため。そこで、本手法では、グラフの探索方法として探索深さを制限した幅優先探索を用いることにした。

グラフの探索手順について以下に示す。

- (1) 現在のロボットの状態を根ノードとする。
- (2) 探索深さが浅いノードから順に、グラフを使用して分岐を調べる。
- (3) 地形情報を用いて、発見した分岐のうち、実現不可能なロボットの状態を表すノードを消去する。
- (4) (2), (3)を指定した探索深さになるまで行う。
- (5) 探索深さの制限に達したノードの評価を行う。
- (6) 評価値が最も高い経路を採用する歩容パターンとして出力する

#### 3.1.3 あらかじめグラフから消去するエッジ

グラフに存在するエッジは4種類であるが、探索するときには明らかに無意味な経路を探索しないようエッジの消去を行う。無意味な経路とは、重心移動や脚の遊脚運動などの動作を繰り返すものや同じノードが探索されるものである。これらを探索しないようにするため、以下のように条件を設ける。

- (1) 前回行った動作が脚の遊脚運動、重心移動、胴体回転のとき、次に同じ動作を行うエッジを削除する。
- (2) 前回、前々回に連続で脚の上下運動を行った場合、脚の上下運動のエッジを削除する。
- (3) 前回の動作が重心移動のとき、胴体回転のエッジを削除する。
- (4) 前回の動作が脚の遊脚運動のとき、脚の上下運動以外のエッジを削除する。

- (5) 旋回半径が 0mm のその場旋回を行うときは重心移動のエッジを削除し、上下運動、脚の遊脚運動、胴体回転の 3 種類のエッジを用いて探索を行う。

### 3. 2 6 脚ロボットを対象とした歩容パターン生成の実装

#### 3. 2. 1 脚位置、重心位置および胴体回転角度の候補位置

##### (1) 脚位置の候補位置

離散化された脚位置 1, 2, 3 に対応する実際の脚位置の決定方法について述べる。ただし、脚を下ろすことのできる点(脚接地候補点)とロボットの脚可動範囲はセンサー等で既知となっていると仮定する。決定された実際の脚位置を Fig. 2 に示す。初めに離散化された脚位置 2 を重心移動もしくは胴体回転を行った直後の脚位置とする。次に、脚可動範囲内にあり、かつ脚位置 2 より進行方向前方に存在する脚位置を調べる。その中で最も進行方向成分が大きい脚接地候補点を脚位置 3 とする。ただし、旋回を行う際に内側となる脚は目標とする旋回円の内側に脚接地地点があれば優先的にその脚接地地点が選ばれるようにする。条件を満たす脚接地候補点が存在しない場合は、脚位置 3 は存在しないものとする。そして、その脚位置を表すノードは実現不可能なロボットの体勢としてグラフから消去する。同様に、脚位置 1 は脚可動範囲内で脚位置 2 より後方に存在する候補点の中から進行方向成分が大きいものを選択する。 $1'$ ,  $2'$ ,  $3'$  はそれぞれ 1, 2, 3 を垂直に上げた位置とした。

##### (2) 重心位置の候補位置

実際のロボットには移動可能な重心位置が無数に存在するが、生成された歩容パターンの評価を行うには、重心位置をある一点の座標として決定する必要がある。そこで、ロボットの脚の対角線からなる多角形の中で安定余裕が確保できる点を重心位置の候補とする。6 脚ロボットの場合、すべての脚位置を線で結ぶと Fig. 3 のように 8 個の多角形ができる。この各多角形において、その多角形を代表する点として静的安定性を保てるもののうち、目標とする旋回軌道に一番近い点を選択する。これらの重心位置の候補点を重心移動後のノードとして扱うこととする。

##### (3) 胴体角度の候補

ロボットの胴体角度は連続量であるが、後述する実験で用いるロボットの動作精度から 0.1rad 単位で胴体角度を決定することとした。これにより決定した胴体姿勢を旋回動作後のノードとして扱う。その場旋回動作を行う場合は、現在の胴体角度から旋回方向への回転のみを探索する。旋回半径が 0mm より大きくなる旋回動作を行う場合は、旋回方向とは逆側への胴体回転の探索も行う。

#### 3. 2. 2 歩容パターンの選択

探索により得られた経路の中から実際に動作させる歩容パターンを選択する方法について述べる。探索深さが制限に達した場合、その深さのノードすべての評価を行い、最も評価の高いノードに至るまでの経路を歩容パターンとして選択する。評価方法については、旋回半径を基準として以下の(a), (b), (c), (d)の四つに場合分けを行い、それぞれにおける条件に基づいて歩容パターン選択を行う。

Fig. 4 にノードの評価に用いる値を示す。これらの値は以下のように定義する。

- ① 胴体の図心を中心とした胴体回転量
- ② 旋回中心を中心とした各接地脚の移動角度
- ③ 胴体の図心の移動角度
- ④ 目標方向の角度と胴体角度の差

##### (a). 旋回半径が 0mm(その場旋回)

この条件では、①が最大のノードを選択する。①の値が同じものが複数存在する場合、②の平均が最大のノードを選択する。

##### (b). 旋回半径が 0mm より大きく、重心位置から脚の最大接地可能距離より小さい

この条件では、まず、旋回中心から重心位置までの距離と旋回半径の差が旋回半径±ロボットの胴体幅以内に存在し、かつ、胴体の向きと接線方向との差が± 0.2rad 以内でないノードを除外する。その上で、①が最大のノードを選択する。さきほどと同様に、①が同じ値のノードが複数存在する場合、③が最大のノードを選択する。さらに、①も③も同じ値の場合は、④が最小のノードを選択する。さらに、①から④までが同じ値の場合、②の平均が最大のノードを選択する。

ここでいう接線とは、ロボットが目標旋回軌道より外側にいる場合はロボットの胴体の図心から目標軌道に向かって引いた接線のことで、ロボットが目標旋回軌道より内側に存在する場合は、ロボットの図心と旋回中心までの距離を半径とした円の接線である。この接線の角度を、目標方向の角度とする。また、(1)の条件は、ロボットの位置が目標とする旋回半径と角度から過大に離れることを防ぐため、使用するロボットの大きさや動作精度から決定した。

##### (c). 旋回半径が重心位置から脚の最大接地可能距離より大きい

このときのノードの選択には、まず、旋回中心から重心位置までの距離と旋回半径の差が旋回半径±ロボットの胴体幅以内に存在し、かつ、胴体の向きと接線方向との差が± 0.2rad 以内でないノードを除外する。その上で、③が最大のノード

を選択する。③が同じ値の場合、④が最小のノードを選択する。さらに、③、④が同じ値の場合、②の平均が最大のノードを選択する。

(d). (c)の条件で旋回中心を無限遠とすることで対応する。

### 3. 3 グラフ探索による歩容パターン生成のシミュレーション

#### (1)シミュレーション条件

Trossen Robotics 社製の PhantomX AX Hexapod Mark II をシミュレーションのモデルとした。このシミュレーションでは、幅優先探索を行う際の探索深さの制限は5とした。また、地形条件について、今回は2次元平面内の移動を対象として、不整地を想定して脚接地可能点をランダムに配置することとした。

#### (2)シミュレーション結果

直進移動のシミュレーションにおける歩行の様子を Fig. 5 に示す。丸で示しているのが脚を接地することが可能な点であり、白い線はロボットの重心軌道である。

シミュレーションの結果より、いずれの条件においても脚接地可能点が十分存在するため、3つの脚を同時に遊脚させる動作が多く選ばれていることがわかる。また、重心移動は一部の脚を遊脚させてから行っていることが多い。重心軌道の結果からは、目標とする旋回軌道に対して大きく逸脱することなく移動を行えていることが確認できる。これらのシミュレーションの結果から、いずれの条件においてもロボットが目標の旋回半径、移動方向に沿って歩行を行うことができ、6脚ロボットにおいてもグラフ探索による歩容パターン生成が有効であることが確認された。

### 3. 4 実機実験

提案手法の有効性を確認するために、実機を用いた歩行実験を行った。実機として、シミュレーションで想定したのと同じ PhantomX AX Hexapod Mark II を使用した。脚接地可能点は2次元平面上にランダムに配置し、センサーで地面状態を予め計測していることを想定し、それらの位置は既知とした。重心移動のない旋回半径が0mmのその場旋回の結果を Fig. 6 に示す。その他、直進動作を含む各種の歩行実験を行い、本手法の有効性を確認した。

## 4. 研究成果

本研究では、6脚ロボットに対するグラフ探索による歩容パターン生成手法を提案した。本手法では、歩行パターン生成、重心位置・脚接地位置の選択および運動軌道生成を分離することによって、グラフの探索空間を縮小することに成功し、リアルタイムで6脚歩行ロボットの自由歩容を実現することができた。

### <引用文献>

- (1) Shigeo Hirose, “A study of design and control of a quadruped walking vehicle”, The International Journal of Robotics Research, 3(2), pp.113-133, 1984.
- (2) Joaquin Estremera, Pablo Gonzalez de Santos, “Free Gaits for Quadruped Robots over Irregular Terrain”, The International Journal of Robotics Research, 21(2), pp.115-130, 2002.
- (3) 安達弘典, 小谷内範穂, 新井健生, 本間敬子, 篠原善裕, 西村賢一郎: “可動限界到達時の踏み換えルールに基づく4脚ロボットの操縦型歩行制御” 日本ロボット学会誌, 16(3), pp.329-336, 1998.
- (4) Halme, S., and Halme, A.: “Implementing and testing a reasoning-based free gait algorithm in the six-legged walking machine, “MECANT””, Control Engineering Practice, 4(4), pp.487-492, 1996.
- (5) Erden, Mustafa Suphi, and Kemal Leblebicioglu.: “Free gait generation with reinforcement learning for a six-legged robot”, Robotics and Autonomous Systems 56.3, pp.199-212, 2008.
- (6) 小田島正, 湯浅秀男, 羅志偉, 伊藤正美: “多脚歩行ロボットの消費エネルギーに基づいた創発的歩容生成”, 日本ロボット学会誌, 17(8), pp.1149-1157, 1999.
- (7) J. Estremera, J.A. Cobano, P. Gonzalez de Santos, “Continuous free-crab gaits for hexapod robots on a natural terrain with forbidden zones: An application to humanitarian demining”, Robotics and Autonomous Systems 58.5, pp.700-711, 2010.
- (8) Dilip Kumar Pratihari, Kalyanmoy Deb, Amitabha Ghosh, “Optimal path and gait generations simultaneously of a six-legged robot using a GA-fuzzy approach”, Robotics and Autonomous Systems 41.1, pp.120, 2002.
- (9) Pal, P. K., and Jayarajan, K.: “Generation of free gait—a graph search approach”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 7(3), pp.299-305, 1991.
- (10) Yam Geva, Amir Shapiro, “A combined potential function and graph search approach for free gait generation of quadruped robots”, Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.5371-5376, 2012.
- (11) Pal, Prabir and Mahadev, Vivek and Kutuvan, Jayarajan, “Gait generation for a six-legged walking machine through graph search”, Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1332-1337 vol.2, 1994.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

- ① 椎名 亮人, 程島竜一, 琴坂信哉, グラフ探索を用いた多脚ロボットの巡回歩容パターン生成, 日本機械学会 関東支部 第 24 期総会・講演会, 2018.
- ② 中岡翔平, 程島竜一, 琴坂信哉, グラフ探索を用いた多脚歩行ロボットの自由歩容パターン生成, 日本機械学会 関東支部 第 22 期総会講演会, 2017.
- ③ 望月恒星, 渡邊宗一郎, 程島竜一, 琴坂信哉, ザトウグモ型 6 足歩行ロボット ASURA II の開発 —第 2 報: 複合式ワイヤ干渉駆動を用いた脚機構設計—, 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, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 程島 竜一  
 ローマ字氏名: HODOSHIMA, Ryuichi  
 所属研究機関名: 埼玉大学  
 部局名: 大学院理工学研究科  
 職名: 准教授  
 研究者番号 (8 桁): 10432006

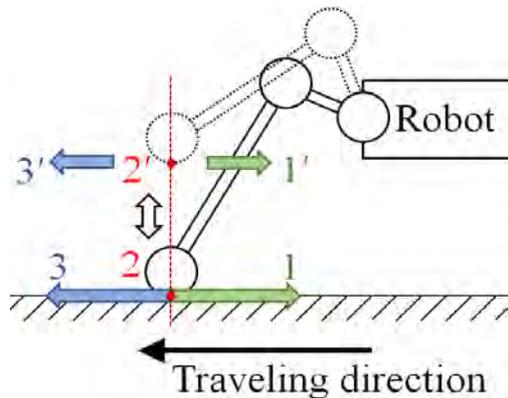


Fig. 1 Definition of discretized leg position

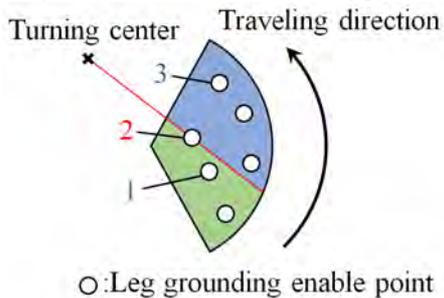


Fig. 2 Foot position determination method

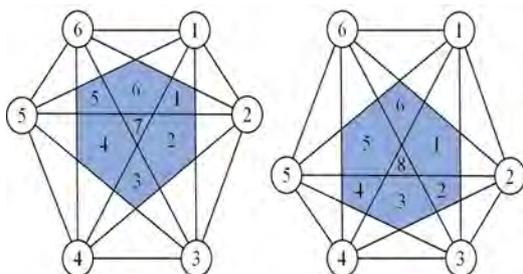


Fig. 3 Discretization of the center of gravity position

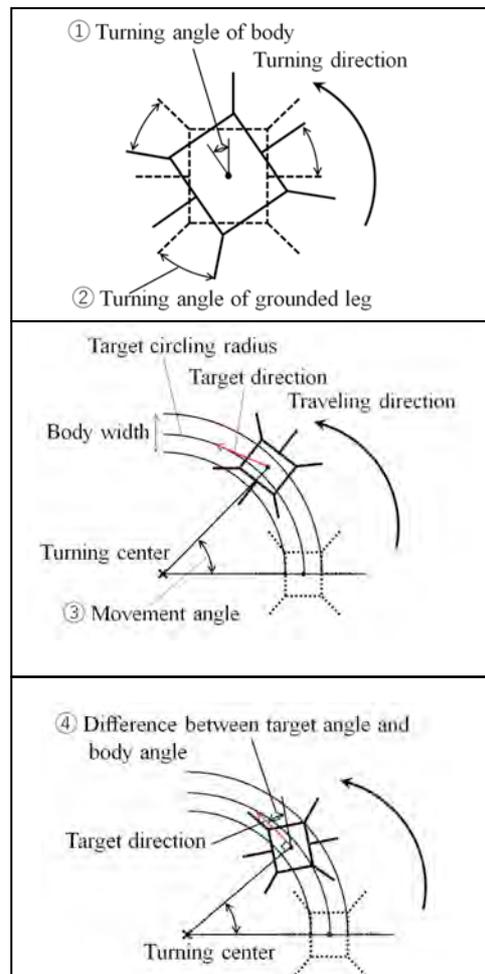


Fig. 4 Evaluation method for node selection

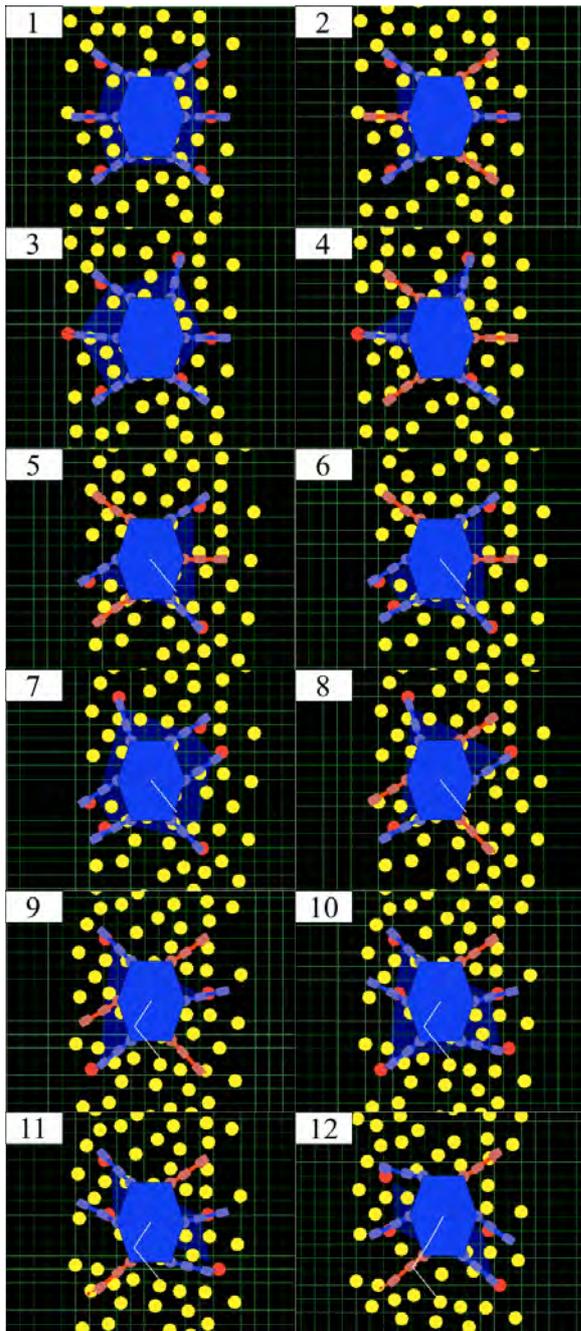


Fig. 5 Experimental result of straight gait pattern

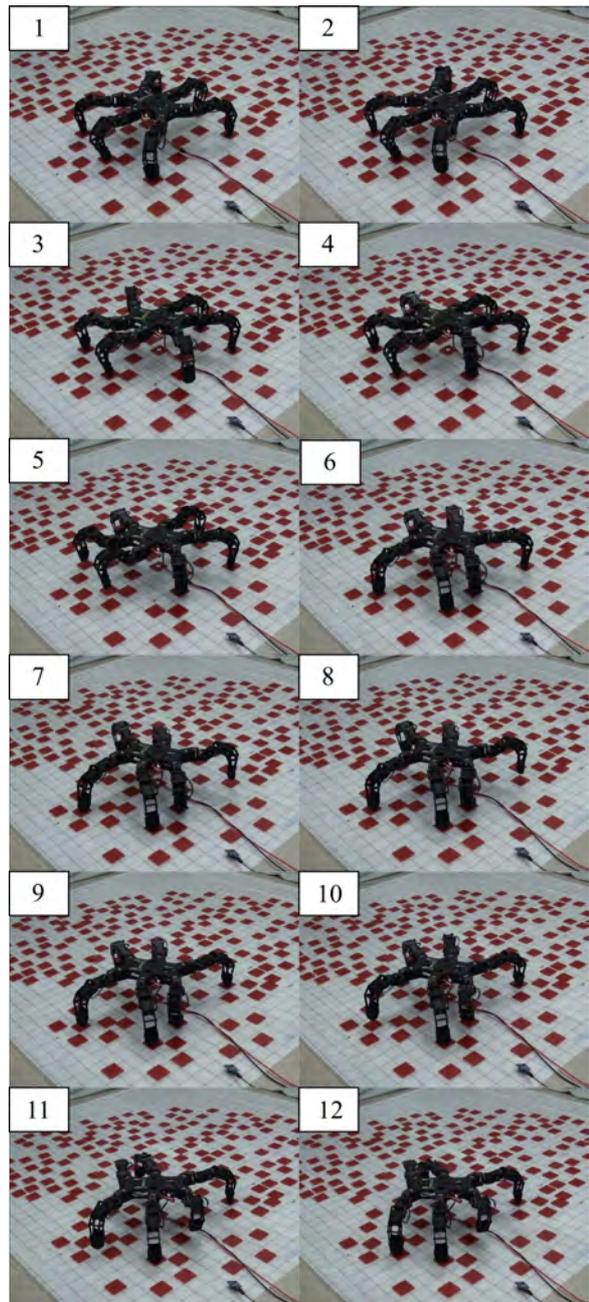


Fig. 6 Walking motion of PhantomX with turning radius 0mm