

## 二足歩行における腰軌跡を考慮した逆運動学解析 Inverse Kinematics Analysis Considering Waist Trace for Biped Robot

正 浜松 弘(北九州高専)

○ 宮脇 貴秀(北九州高専専攻科)

Hiroshi HAMAMATSU, Kitakyushu National College of Technology, Shii, Kokura-minami-ku, Kitakyushu  
Takahide MIYAWAKI, Kitakyushu National College of Technology

**Keywords:** Biped Robot, Inverse Kinematics, Waist Trace

### 1. 緒論

工場で稼働する産業用ロボットをはじめ、警備用ロボットなど様々なロボットが我々の生活に深く関わるようになってきている。その中でも人間と同等の外観を持つ二足歩行ロボットは、人間の作業空間にそのまま適応できるとして今後の活躍が期待されている<sup>[1]</sup>。しかし、二足歩行ロボットは全体が移動体であるため歩行時に不安定になりやすい。そのため、ロボットに安定な歩行動作を行わせるために、どのような指令を作成すればよいか重要な問題になっている。

ロボットの指令は、対象となるロボットの運動学的性質と動力学的性質を考慮する必要があるが、両者を関連して計算することは複雑である。運動学と動力学による拘束条件をそれぞれ満足するロボットの移動軌跡を作成することで両者を分離して計算する。安定な歩行を行うロボットの移動軌跡をあらかじめ設定し、その軌跡を辿らせることによって歩行を行わせる手法が考えられている<sup>[2]</sup>。

運動学による移動軌跡を作成するために運動学的性質を考慮したロボットの腰部分の移動軌跡を作成する<sup>[3]</sup>。本研究では、ロボットの腰軌跡を与え、逆運動学解析によって二足歩行ロボットの動作指令を作成する。

### 2. 装置

研究対象として使用するロボットは Fig.1(a)に示す近藤科学社 KHR-2HV である。二足歩行ロボットは、上半身を使用せずに下半身の動作で歩行が可能のため、計算対象は KCR-2HV の下半身のみとした。下半身の自由度は10である。本研究では、Fig.1(c)に示す KCR-2HV の下半身に相当する部分を運動学モデル化し、歩行動作指令作成を行う。

Fig.1 (c)に示した運動学モデルを、自由度を保ったまま、さらに関節数を6つの運動学モデルに変換する。関節点を6つに減らした運動学モデルが Fig.2 である。Fig.2 の JR3, JR1, JL3, JL1 は x 軸と y 軸に対してそれぞれ回転の自由度を1つ持つ関節点であり、JR2, JL2 は y 軸に対して回転の自由度を1つ持つ関節点である。ロボットの下半身は自由度を10個持つ、7リンクのマニピュレータとみなすことができる。二足歩行ロボットの歩行動作指令は Fig.2 の運動学モデルを用いて作成する。各関節の回転方向は、回転軸に対して右ねじの方向を正とする<sup>[4]</sup>。

### 3. 順運動学解析

作成した運動学モデルを用いて順運動学計算を行った。運動学モデルから座標変換行列を導出して順運動学計算を行い、任意のリンクの位置を求めることができた。関節角度を与え、順運動学解析によるロボットの歩行指令を作成した。解析結果を Fig.3 に示す。Fig.3 はロボット歩行中の動作を横から見た図で、右足のみを表示している。ロボットは Fig.3 の左側より動作を開始し、右側に進んでいる。解析結果より順運動学解析による歩行動作指令の作成は出来なかった。順運動学解析は関節の角度を入力し、リンクの位置・姿勢を出力する計算である。そのため、歩行動作に必要な関節角度が既知でなければならない。また、安定歩行のための適切な角度が未知である場合は歩行指令を作成することが出来ない。以上のことから、順運動学解析による歩行指令作成は適切でないと判断した。

逆運動学計算はリンク先端の位置・姿勢を入力し関節角度を出力するため、安定歩行のための角度が未知な場合でも、歩行の軌跡を与えれば適切な角度を導出することができる。

よって本研究では、逆運動学計算を用いた歩行動作指令の作成を行う。

### 4. 逆運動学解析

逆運動学計算の数値的解法は、複雑な機構を持つロボットであっても解を得ることが可能である。このため、本研究ではヤコビ行列を用いた数値的解法を利用し、解の収束計算には数値計算のニュートン法を利用した<sup>[5]</sup>。ロボットが歩行動作中にロボット股関節点が通過する軌跡を腰軌跡とする。逆運動学計算を行う際に腰軌跡を以下の3通り設定した。

- (1) 腰軌跡を与えない方法
- (2) 腰軌跡を連動させる方法
- (3) 腰軌跡の高さを一定にする方法

以下に各方法の条件と解析結果を示す。

#### 4.1 腰軌跡を与えない方法

解析を行う際の拘束条件を以下のように設定した。

- (1) ロボットの足裏は参照軌跡上を移動する。
- (2) ロボットは x-y-z 空間内を移動する。
- (3) 右足裏と左足裏は y 軸方向への移動をしない。

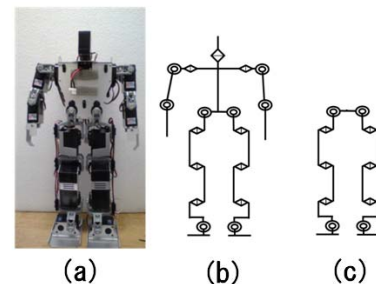


Fig.1 Kinematics Model

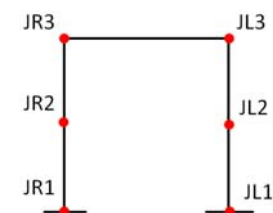


Fig.2 Simplified Kinematics Model

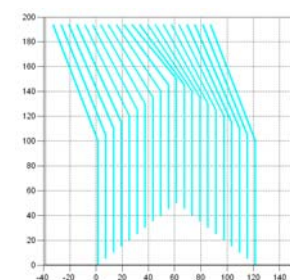


Fig.3 Result of Forward Kinematics Analysis

運動学モデルを用いて座標変換行列を導出した。ヤコビ行列を用いて逆運動学計算を行い、腰軌跡を与えない方法の歩行動作指令を作成した。シミュレーション結果を Fig.4 に示す。ロボット足裏は参照軌跡上を移動するが、ロボット股関節は適切な値を与えていなかったためロボット脚長さが歩行中に変化した。足裏と股関節との間に幾何学的な拘束条件を作成することで脚長さの変化はしない。股関節にも拘束条件を満たす軌跡の作成が必要である。幾何学的な拘束条件を与え、ロボットの腰軌跡を作成し、歩行動作の検討を行う。

#### 4.2 腰軌跡を連動させる方法

ロボットの腰にあたる位置の軌跡を足裏参照軌跡と連動させる方法の歩行指令を逆運動学解析によって作成した。解析を行う際の拘束条件を以下のように設定した。

- (1) ロボットの足裏は参照軌跡上を移動する。
- (2) ロボットは x-y-z 空間内を移動する。
- (3) 右足裏と左足裏は y 軸方向への移動をしない。
- (4) ロボット腰軌跡は参照軌跡に連動する軌跡を描く。

変換行列とヤコビ行列は腰軌跡を与えない方法と同じになる。ヤコビ行列を用いた逆運動学計算により歩行指令を作成した。解析結果を Fig.5 に示す。

Fig.5はロボットを真横から見た図で折れた直線はロボットの脛と腿と足先を表しており、ロボットは画面左から右へ移動をしていくと仮定している。脚の長さや動作に矛盾は無いが、脚の関節角度も変化しないまま歩行動作をするので竹馬に乗って歩行をしているような結果が得られた。

#### 4.3 腰軌跡の高さを一定にする方法

足裏と股関節の距離が常に一定になるため関節角度の変化が無く、不自然な歩行になった。そこで、ロボットの腰にあたる位置の軌跡を高さ一定として与える。

解析を行う際の拘束条件を以下のように設定した。

- (1) ロボットの足裏は参照軌跡上を移動する。
- (2) ロボットは x-y-z 空間内を移動する。
- (3) 右足裏と左足裏は y 軸方向への移動をしない。
- (4) ロボット腰高さは一定で参照軌跡に影響されない。

この条件で逆運動学解析による歩行指令を作成した。Fig.6 に解析結果を示す。

腰軌跡の高さを一定にする方法では腰高さが変化しないため、関節角度が適宜変化した。また、幾何学的拘束条件から腰軌跡を作成したのでロボットの脚長さが変化することもなかった。腰軌跡の高さを一定とする方法では、腰軌跡を与えない方法の脚長さが変化するという問題、腰軌跡を連動させる方法の関節角度が変化しない問題の両方を克服した。これより、腰軌跡の高さを一定とする方法で検討した逆運動学解析をロボットの歩行動作指令としてプログラムを作成する。

### 5. 歩行実験

ロボットの脚長さが変化せず、各関節角度も適宜変位したので、腰軌跡の高さを一定にする方法による歩行動作指令の作成を行った。MATLABを用いて、逆運動学解析結果のシミュレーションを行った。

歩行動作シミュレーションのプログラムを研究対象である KHR-2HV に実装し、歩行動作の検討を行った。以下にプログラムを実装した KHR-2HV の歩行動作を示す。

ロボットの歩行動作指令は、KHR-2HV の関節モータに逆運動学計算によって算出した関節角度を出力させて行った。ロボットはシミュレーション結果から予想される歩行動作を良好に行った。腰軌跡の高さを一定にする方法による逆運動学解析を用いて作成した歩行動作指令が、二足歩行ロボットの動作に使用できることが分かった。

### 6. 結論

ロボットの動作指令作成のために腰軌跡に拘束条件を設定し、逆運動学解析による動作シミュレーションを行った。移動ロボットは固定点を持たないため逆運動学解析を行う際には、足裏と股関節の関節点の位置関係を定義する腰軌跡の設定が重要である。腰軌跡を3通り設定し、それぞれ逆運動学解析によるシミュレーションを行った。

腰軌跡を設定した逆運動学解析のシミュレーションを行い、腰軌跡の高さを一定とする方法でロボットの歩行動作指令を作成した。作成した

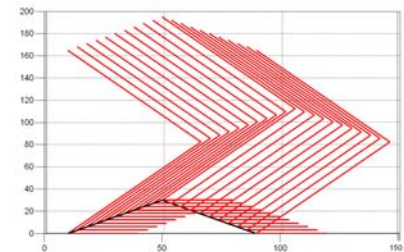
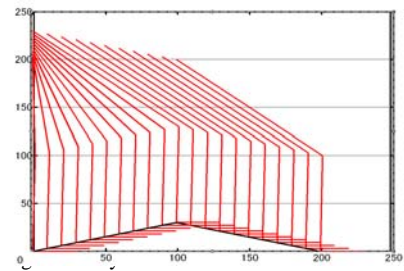


Fig.5 Result by Method linked with Waist Trace

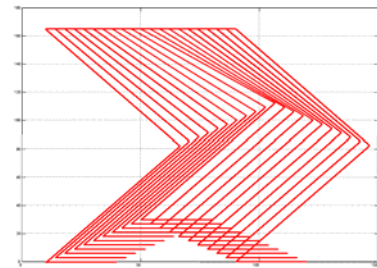


Fig.6 Result by Method kept height constant of Waist Trace

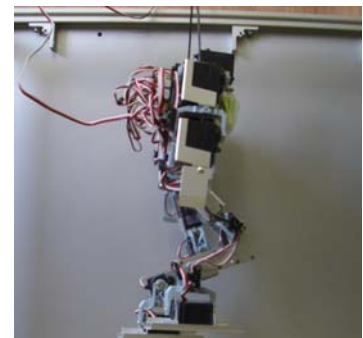


Fig.7 Robot Walking Motion by Walking Instruction

指令を対象装置に実装し、対象装置である二足歩行ロボットが歩行動作を行うことを確認した。これにより、腰軌跡の高さを一定とする方法により歩行動作指令の作成が行えることが分かった。

#### 参考文献

- [1] 梶田秀司, ヒューマノイドロボット, オーム社, (2005), pp.1,50-58
- [2] S.Marchese, G.Muscato, G.S.Virk, Dynamically Stable Trajectory Synthesis for a Biped Robot during the Single-Support Phase, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings, (2001), pp.953-958
- [3] 野津耕台, 二足歩行ロボットの三次元歩行に関する研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98 講演論文集, (1998), 2CIII2-1(1)
- [4] 三田宇洋 編, 高島博・宅島章夫・田中明美, MATLAB/Simulink とモデルベース設計による2足歩行ロボット・シミュレーション, (2007), 株式会社毎日コミュニケーションズ
- [5] 浜松弘・宮脇貴秀, 二足歩行ロボットの逆運動学シミュレーション, 日本機械学会第22回「電磁気関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, (2010), pp.174-175