

ヒューマノイドロボット「ながら」の歩行技術に関する改良

- 人とロボットが同居するためのロボット要素技術に関する研究 -

千原 健司 稲葉 昭夫 光井 輝彰 小川 行宏

Development of Walking Techniques of Humanoid Robot ‘NAGARA’

Kenji CHIHARA Akio INABA Teruaki MITSUI Yukihiro OGAWA

あらまし 本研究所では平成13年度よりヒューマノイドロボット「ながら」の開発を進めている。「ながら」は、福祉や介護といった民生分野で利用できるロボットの要素技術研究のためのプラットフォームとして開発された。民生分野で作業をするロボットは、これまでの産業用ロボットとは違い、人間と同じ空間で作業をしなくてはならない。人の生活環境を改造することなくそのままの状態でも自由に動き回るためには、ロボットの移動形態として2足歩行が適していると考えられ、「ながら」に採用されている。しかし平成13年度では直進歩行しかできず、また多少の段差があっても転倒してしまうため、その歩行性能は十分とはいえない。そこで本年度は、後退、旋回、横歩きといった基本歩行パターンを追加し、また歩行安定化のための足首ダンパを開発したので報告する。

キーワード ヒューマノイドロボット、2足歩行、歩行パターン、歩行安定化

1. はじめに

現在、日本において少子高齢化が急速に進行しており、2025年には、2人で1人の高齢者の生活を支える必要があると言われている。その中で、人間型ロボットは、高齢者の介護や、人間と協調して作業を行うなど、人の生活環境に入って様々な活動を行う存在として期待が大きい。本研究所では、平成13年度よりヒューマノイドロボット「ながら」の開発を進めている。しかし平成13年度においては、直進歩行しかできず、また多少の段差があっても転倒してしまうため、人の生活環境に入って様々な活動を行うためには、その歩行性能は十分とはいえない。そこで本年度は、後進、旋回、横歩きといった基本歩行パターンを追加し、また歩行安定化のための足首ダンパを開発する。

2. 基本歩行パターン

「ながら」の歩行パターンは、ロボットを側面および正面から見た2次元平面に投影した運動（Sagittal Plane, Lateral Plane）に分解し、互いの運動の干渉は無視できると仮定し、それぞれの平面に対して定義されている^[1]。Sagittal Planeに関しては、梶田^[2]が提案した線形倒立振り子モードを規範とした歩行パターンの生成手法を参考にしている。Lateral Planeに関しては重心を唯一の質点とし、両足裏の中心へ無質量脚を下ろした倒立振り子の運動に基づいて定義している。「ながら」は、股にロール・ピッチ・ヨーの3自由度、膝にピッチの1自由度、足首にロール・ピッチの2自由度を両脚に有している（図1）。

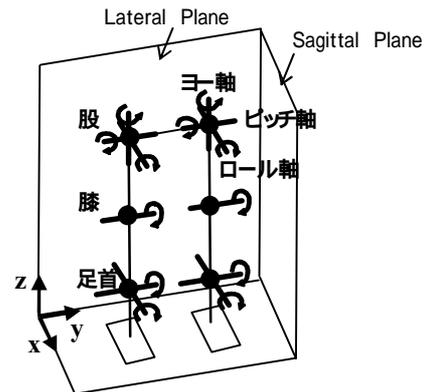


図1 ロボットの脚関節自由度

そこで、Sagittal Planeの運動に関しては、股・膝・足首のピッチ軸の駆動で、Lateral Planeの運動に関しては、股・足首のロール軸の駆動で、それぞれ定義した運動を実現している^[1]。今回、新たに定義した旋回歩行パターンは通常の直進歩行パターンに加えて、股のヨー軸を駆動することにより実行される。横歩きパターンは、通常の直進歩行パターンの股と足首のロール軸の駆動に、横移動用の駆動関数を重ね合わせるにより実行される。後退パターンは、Lateral Planeの運動は直進歩行パターンと同じであるが、Sagittal Planeでの腰と足先の進行方向を反対にする。2.1節に旋回パターンに関して、2.2節に横歩きパターンに関して詳細を述べる。

2.1 旋回パターン

旋回時に股関節のヨー軸に与える指令値の例を図2に示す。図の上段は、与える関節角度の指令値であり、中段は上段に対応する時間において脚を上から見た図であ

り、下段は正面から見た図である．この例では両脚の股関節のヨー軸に同じ指令値を与えている．指令値の立ち上がりと立ち下りの部分は速度が連続となるように3次関数で与える．また、体重が片足に乗りきれない時に駆動させると慣性力によってバランスを崩すので、図2に示すように、股・足首のロール軸の駆動に対してやや遅らせて駆動させている．直進歩行パターンを0にすればその場で旋回し、歩幅を持たせれば歩きながら旋回する．以上の動作を機構解析ソフトウェアDADSによるシミュレーションによりパラメータ値を調整して歩行安定性を確認した後に、C言語により動作プログラミングを行った．

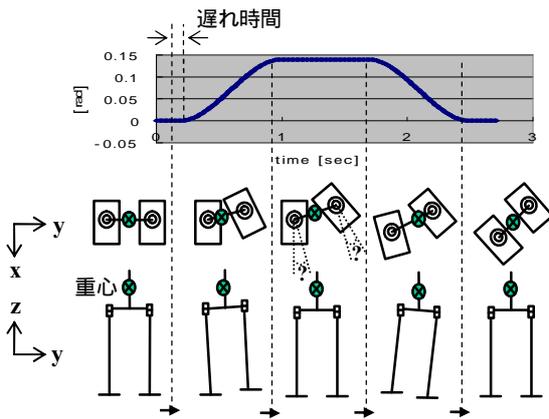


図2 旋回時に股のヨー軸に与える値

2.2 横歩きパターン

横歩き時に股と足首のロール軸に加える指令値の例を図3に示す．図3の図内配置は図2と同様である．この例では両脚の股と足首のロール軸に同じ指令値を与えている．3次関数で滑らかにし、基準となる股・足首のロール軸の駆動に対し遅らせることは旋回パターンと同様である．直進歩行パターンを0にすれば横歩きし、歩幅を持たせれば斜めに歩く．旋回パターンと同様にDADSによるシミュレーションによりパラメータ値を調整した後、動作プログラミングを行なった．

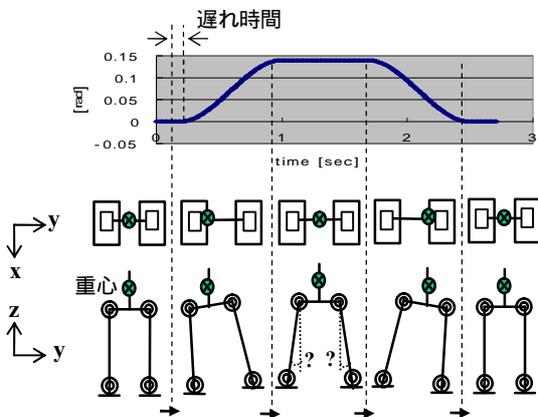


図3 横移動時に股と足首のロール軸に加える値

3. 足首ダンパによる歩行安定化

2足歩行ロボットにおいて着地時の衝撃は、歩行を不安定にさせる大きな要因であり、その衝撃を緩和するために、これまでも研究がなされている^{[3][4]}．山口ら^[3]はオープンセルフフォームとウレタンフォームの2層を組み合わせたものを足底部に装着し、着地時の衝撃を吸収している．広瀬ら^[4]は足底部に、法線方向に対してゴムブッシュとガイド、水平方向に対してスポンジとゴムを配した構造で着地の衝撃を吸収している．これらの研究では緩衝材を足底部に装着することで歩行の安定性が向上することが確認されているが、緩衝材の取り付け部分の検討や、バネ定数、ダンパ定数に関する検討は行われていない．また、その緩衝機構は、その固有のロボット専用のものであり、他のロボットに使いまわしができない．そこで本研究では、衝撃吸収機構をロボットの部品ととらえ、装着・脱着が容易に行うことができる油圧ダンパを開発する．本章では、3.1節にダンパの取り付け位置に関する検討を、3.2節にバネ定数、ダンパ定数に関する検討をDADSによるシミュレーションで行った結果を示す．3.3節に実際のロボットのモデルを用いて段差乗越えのシミュレーションを行った結果を示す．3.4節に油圧ダンパの設計方法を示す．3.5節に作成されたダンパの特性測定結果を示す．3.6節にダンパを装着したロボットの歩行実験の結果を示す．

3.1 取り付け位置に関するシミュレーション

図4にダンパの取り付け位置シミュレーションのモデルを示す．ダンパの取り付け位置を境にして、Aは上半身と下半身の質量比が1:5のモデル、Bは1:1のモデル、Cは5:1のモデルである．全体質量は「ながら」と同等の16[kg]、足底の面は10cm×10cmの正方形とし、10cmから落下させる．バネ定数、ダンパ定数は20k[N/m]、2k[Ns/m]とした(3.2節参照)．床と足裏との衝突要素は、ヤング率 7×10^{10} [N/m²]、反発係数0.8とした．

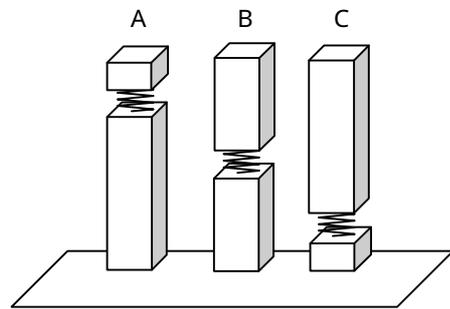


図4 取り付け位置シミュレーションのモデル

図5にシミュレーションの結果を示す．横軸は時間、縦軸は足底を原点とした上/下半身の重心位置である．Aは上半身と下半身が共に振動的である．Bは下半身がやや沈み込むものの、上半身の変動が一番少ない．Cは上半身がやや沈み込むものの、下半身の変動が一番少ない．この結果から、ダンパは必ずしも足の底に取付ける

必要はなく、質量比が1:1の部分より下に付ければ十分に機能することが分かる。「ながら」では取付けの容易さから、足首部分に取付けることにした。

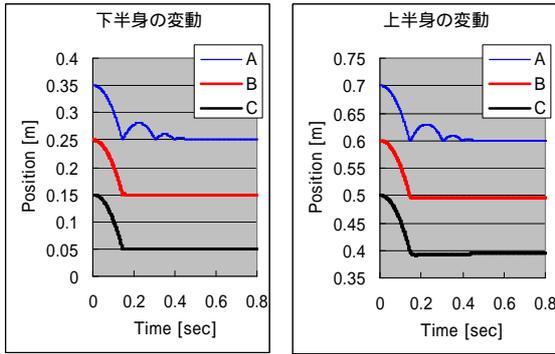


図5 取付け位置シミュレーション結果

3.2 バネ定数, ダンパ定数のシミュレーション

図4のCのモデルにおいて、バネ定数とダンパ定数を変化させ、落下シミュレーションを行った。質量、衝突要素などの条件は3.1節と同様である。図6にバネ定数を20k[N/m]で固定して、ダンパ定数を1k[Ns/m], 2k[Ns/m], 3k[Ns/m]と変化させた場合のシミュレーション結果を示す。ダンパ定数が小さいと足と胴体部分が衝突し上半身と下半身が大きく変動する。ダンパ定数大きいと上半身が静定する時間が長くなるので、上記条件では2k[Ns/m]が適当であることが分かる。

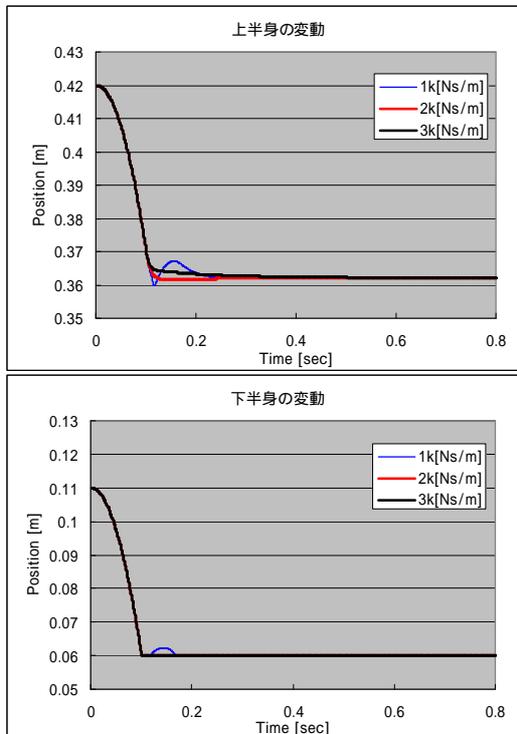


図6 ダンパ定数を変えた時の結果

図7にダンパ定数を2k[Ns/m]で固定して、バネ定数を10k[N/m], 140k[N/m], 300k[N/m]と変化させた場合のシミュレーション結果を示す。バネ定数が小さいと上半身

が沈み込みすぎ、バネ力よりも粘性力の方が大きいため足が遊脚である間に復帰できない。バネ定数大きいと着地後しばらくして足底が跳ね上がることが分かる。この条件の他に、バネ定数をいろいろ変えてみた結果、20k ~ 140k[N/m]が適当であった。

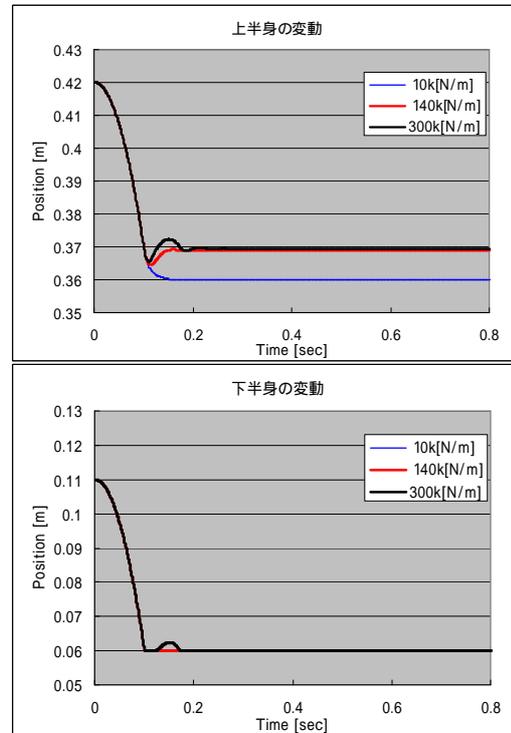


図7 バネ定数を変えた時の結果

3.3 段差乗越えシミュレーション

可動範囲10[mm], 自由度を鉛直方向のみとし、バネ定数20k[N/m], ダンパ定数2k[Ns/m]としたバネダンパ要素を、足首部分に取付けた2足歩行ロボットのモデルを用いて±4[mm]の段差を乗越えるシミュレーションをDADSにて行った。バネダンパ要素がない場合は乗越えられなかった段差を、乗越えられることを確認した。足が着地した直後は着地した足のダンパが衝撃を吸収し、その後、両足のダンパが連動してスムーズに体重が移動している様子が確認できた。

3.4 ダンパの設計

市販されているショックアブソーバで一般的に使用されているシリコンオイルを用いたダンパを製作する。自由度を鉛直方向に固定し、十分な剛性を持ち、かつストロークが10mmで止まるように、図8のような構造を提案する。可動部分の半径をr, 隙間をg, 隙間高さをh, 充填オイルの粘度をμとすると、この構造におけるダンパ係数は、隙間から逆流するオイルとシリンダの摩擦によるせん断応力から計算すると、式(1)となる。

$$D = \frac{4prhm}{g} \left(1 + \frac{3r}{4g} \right) \cong \frac{3pr^2hm}{g^2} \dots (1)$$

シリコンオイルにGE東芝シリコン社製のTSF451-3M

(粘度 $\mu = 29.2[\text{Pa} \cdot \text{s}]$) を使用し, $r=15[\text{mm}]$, $h=8[\text{mm}]$ とすると, 3.2節で求めた $D=2\text{k}[\text{Ns/m}]$ としていた場合は式(1)を変形して式(2)より求められる.

$$g = \sqrt{\frac{3pr^2hm}{D}} \cong 0.5[\text{mm}] \quad \dots(2)$$

バネはシミュレーションの結果に従って $20[\text{N/m}]$ のものを使用した. 材料は, はめ合いが生ずる部分には S45C を, その他の部分は軽量化のため A5056 を用いた.

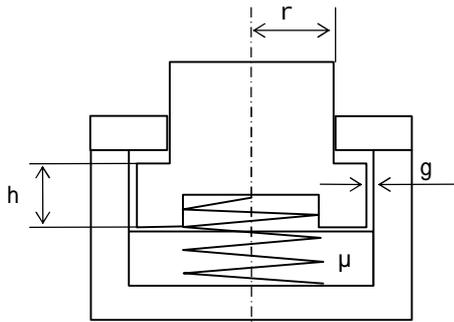


図8 ダンパ構造

3.5 ダンパの同定実験

11[kg]のおもりをダンパに接した状態から落とし, ダンパの変位量を測定した. これは約 $108[\text{N}]$ の力の単位ステップ入力を行うことに等しい. 測定結果の最大変位量を用いてバネ定数を求めた後, 時系列データを用いて, Matlabのコントロールツールボックスによるシミュレーションとのヒューリスティックなマッチングにより, ダンパ定数を求めた. 2個のダンパを作成し, それぞれについて測定したところ, バネ定数は $34.8[\text{N/m}]$, $51.8[\text{N/m}]$, ダンパ定数は $2.2\text{k}[\text{Ns/m}]$ と $2.8\text{k}[\text{Ns/m}]$ であった. 設計値との相違や, 2つのダンパ間の特性の差は, ダンパ内の気泡の量や位置によるものと考えられるため, これら特性差を改善するのであれば, 空気を含まない構造にすべきである.

3.6 歩行実験

これまでの「ながら」の安定歩行の限界は, 歩幅 60mm , 足の上げる高さ 6mm , 乗り越え段差は 1mm である. そこで, 両足首部に作成したダンパをとりつけ, 以下の3種類の実験をおこない, ダンパの有効性を確かめる. A) 歩幅は 60mm で一定で足を上げる高さを変える. B) 足を上げる高さは 20mm で一定で歩幅を変える. C) 歩幅 100mm , 足を上げる高さは 20mm で, 3mm の段差を乗り越える. 以下に実験結果と考察を述べる.

A) 歩幅は 60mm で一定で足を上げる高さを変える

図9に示すように, 足の上げる高さを 30mm にしても安定して歩行することを確認した. これまでの限界であった 6mm と比較すると大幅に改善されたことが分かる.



図9 足上げ高さ 30mm の歩行の様子

B) 足を上げる高さは 20mm で一定で歩幅を変える. 歩幅 120mm までは安定して歩行したが, 150mm まで広がると転倒した. この転倒を観察すると, 支持脚のヨー軸まわりのスリップが原因と考えられるため, 上半身による補償が必要と考えられる. ただし, これまでの安定限界であった 60mm と比較すると大幅な効果が認められる.

C) 3mm の段差を乗り越える

図10に示すように 3mm の段差を安定して乗り越えることができた. 5mm の段差も実験は行ったが, これは転倒してしまった. これ以上の段差は歩行パターンを変えることにより対応すべきであると考えられる.

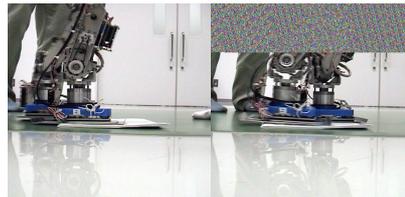


図10 段差乗り越え実験

4. まとめ

後進, 旋回, 横歩きといった基本歩行パターンを作成し, その生成方法について解説した. また歩行安定化のための足首ダンパを開発し, その有用性をシミュレーションと実機での実験により確認した. 今後は足首ダンパを改良し, 特性のパラッキの改善を計る予定である.

文献

- [1] 稲葉, 光井, 西村, 千原, 田中 “ ヒューマノイドロボット基本ハードウェアの開発”, 岐阜県生産情報技術研究所報告No3, pp.1-8, 2002
- [2] 梶田秀司 “ 線形倒立振り子モードを規範とする動的2足歩行ロボットの長時間制御”, 機械技術研究所報告, 第171号, 1996
- [3] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎 “ 衝撃緩衝材料を用いた足底機構による2足歩行の安定化と路面位置情報の取得”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, pp.67-74, 1996
- [4] 広瀬真人, 竹中透, 五味洋, 小澤信明, “ 人間型ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.7, pp.983-985, 1997