

ヒューマノイドロボットの手をついた障害物またぎ動作

An Obstacle Overstriding Motion of a Humanoid Robot with its hands

佐藤留介, 那須康雄, 山野光裕, 金子慎一郎, 水戸部和久
Ryusuke SATO, Yasuo NASU, Mitsuhiro YAMANO,
Shin-ichiro KANEKO, Kazuhisa Mitobe

山形大学工学部
Yamagata University

キーワード: ヒューマノイドロボット(Humanoid Robot), またぎ(Overstriding),
障害物(Obstacle)

連絡先: 〒992-0038 米沢市城南 4-3-16 山形大学工学部機械システム工学科
那須研究室 佐藤 留介,

Tel.: (0238) 26-3237, Fax: (0238) 26-3205, E-mail: ts017@dipfr.dip.yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

一般に, ロボットというものは主に産業用である。ロボットは同じ作業を繰り返し行うという点で, とても有能な働きをする。しかし近年ロボットは工場の生産現場を出て我々の日常生活環境や家庭に入ろうとしている。そのため, 災害救助, 家庭, 福祉など広く人間の社会に進出し, 活躍できるようにならなければならない。そして, このような事を期待されているロボットが二足二腕を有するヒューマノイドロボットである。

現在ヒューマノイドロボットの移動手段として盛んに研究が行われているのが, 二足歩行である。しかし, 日常生活や災害現場などで

二足歩行だけで移動できる範囲は限定される。例えば, 瓦礫や高い障害物, 凹凸のある床などは移動が困難である。そのため, その場の状況に合わせて, 立ち上がり動作, しゃがみ動作, またぎ動作¹⁾, 這って移動するなどさまざまな動作が必要となってくる。このように手と脚を同時に用いた協調動作の研究はまだ不十分であり, 現在のロボットで人間の生活空間の中で行動することが困難である。しかし, このような動作が実現可能になれば, ロボットの行動範囲が非常に広がると思われる。

本稿では, まず開発したヒューマノイドロボットについて述べ, 以下またぎ動作の動作方法について検討する。さらに, 考案した動作の姿勢が実現可能かどうか検討する。最後に,

その動作方法を利用し,今後行う予定の制御方法について述べる.

2. ヒューマノイドロボット (Bonten-Maru)

本研究で使用するヒューマノイドロボット Bonten-Maru の概観を Fig.1 に示す.全長 1250 [mm],全幅 540 [mm],重量 31.5 [kg] である.構造部はアルミニウム合金を使用し,頭部には CCD カメラを搭載し現在のロボットの位置や周囲の状況を確認できる.足底には圧力センサを設置しZMP を計測する.また今後,両手先に力覚センサを設置する予定で,圧力センサと合わせて制御を行う.

自由度配置は片腕に3自由度,片脚に6自由度,腰に1自由度,首部に2自由度,全身で21自由度を有する.首部は,モータ,ハーモニックドライブ,エンコーダが一体となっているものを使用し駆動している.定格トルクは 0.29 [Nm],定格回転速度 52 [rpm],減速比 80 である.首部以外の各関節はすべて同じ DC サーボモータを用い駆動しており,プーリとベルトを介してハーモニックドライブでさらに減速している.この DC サーボモータの最大連続トルクは 107 [mNm],無負荷回転数は 7220 [rpm]である.ハーモニックドライブは減速比 100 であり,プーリの減速比を含めると各関節の減速比は 333 である.

各関節の角度はエンコーダを用いて計測する.また,コンピュータ,電源,モータドライバは全て外付けであり,ロボットは自身の後ろに取り付けてある線を介して電力および指令を行っている.

システム構成については,ロボット制御用 PC に Linux を搭載し,サンプリング周期を1 [ms]で実験を行えるようにカーネルの再構築をしてある.また,モータドライバを速度制御モードとしロボットの各関節を制御している.

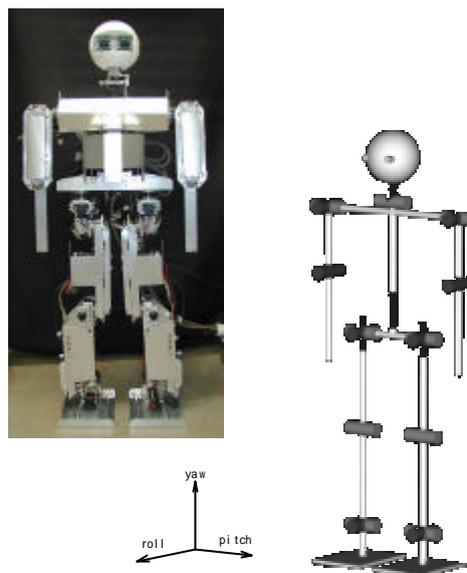


Fig.1 ヒューマノイドロボット (Bonten-Maru)

次に可動範囲について説明する. Table 1, Table 2 に開発したヒューマノイドロボットの可動範囲を示す.ヨーとピッチと首部ロールに関しては左右同じ可動範囲である.腕,脚のロールは左右それぞれの可動範囲を示している.

全身運動を可能にするため,各関節の可動範囲を出来る限り広範囲になるように設計してある.特に両脚が外側や前方に大きく広げられるようになっているため,脚を横や前に大きく移動でき,高さの高い障害物や幅の広い障害物を乗り越えることが可能である.

Table 1 上半身部の関節可動範囲

関節	(回転軸)	可動範囲 [degree]
首部	(ロール)	- 90 ~ 90
	(ピッチ)	- 90 ~ 90
肩関節	(ピッチ)	- 180 ~ 120
	(右腕ロール)	- 135 ~ 30
	(左腕ロール)	- 30 ~ 135
肘関節	(右腕ロール)	- 90 ~ 90
	(左腕ロール)	- 90 ~ 90
腰関節	(ヨー)	- 45 ~ 45

Table 2 下半身部の関節可動範囲

関節 (回転軸)	可動範囲 [degree]
股関節 (ヨー)	- 60 ~ 90
(右脚ロール)	- 90 ~ 25
(左脚ロール)	- 25 ~ 90
(ピッチ)	- 130 ~ 45
膝関節 (ピッチ)	- 20 ~ 150
足首関節 (ピッチ)	- 90 ~ 60
(右脚ロール)	- 90 ~ 20
(左脚ロール)	- 20 ~ 90

3. またぎ動作

本稿で報告するまたぎ動作とは手を使って障害物をまたぐ事とする。また、動作手順を少なくする事、すばやく移動する事を目的として、またぐ途中で障害物の上に一旦足底や膝をつかない (Fig.2) でまたぐ事としている。そして、静的安定に動作可能であるような動作方法の検討をする。

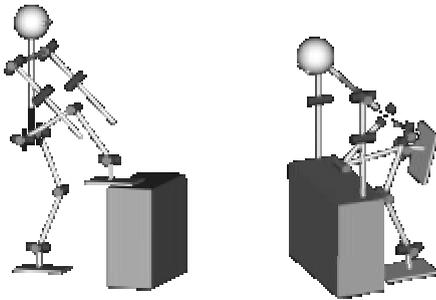


Fig.2 障害物に脚・膝を接地

またぎ動作を実現するために検討しなければならない事は、主に以下の三つが考えられる。

(a) ヒューマノイドロボットの可動範囲

可動範囲はそのロボットの作業空間を意味し、腕や脚が移動可能な距離を決定するので、障害物の高さや動作方法に大きく影響を及ぼす。そのため、またぎ動作を実現する上で重要な要素と考えられる。

す。そのため、またぎ動作を実現する上で重要な要素と考えられる。

(b) 各関節のモータへの負荷分配

動作中のある姿勢において、使用しているモータの定格トルク以上を必要とした場合、動作実験中の暴走やモータの破損の可能性がある。そのため、その姿勢が可能かどうかをトルク計算する必要がある。

(c) 転倒評価

動作中の姿勢において支持している点を結ぶ支持多角形内に重心がはいると転倒してしまうのであらかじめ重心を計算する必要がある。

以上の三つの要素を検討する事により、またぎ動作の実現が可能になると思われる。そこで、以下の説明では始めに可動範囲を考慮した動作方法の検討を行い、その後モータのトルク計算、及び重心位置の計算をする。そして、またぎ動作が実現可能かどうかを検討する。

3.1 可動範囲を考慮した動作方法の検討

またぎ動作を考える時にはじめに考える事は、またぐ時の脚の上げ方である。なぜなら、脚の上げ方が障害物の高さを決定し、動作方法に影響を及ぼすからである。そのため、ロボットの可動範囲を考慮した最適な脚の上げ方を検討し、それに合わせた動作方法を考える必要がある。

3.1.1 脚の上げ方

可動範囲を考慮した脚の上げ方は Fig.3 に示すように三通り考えられる。この中から最も高く脚を上げられる方法を計算する。

- (a) 前に上げる
- (b) 後ろに上げる
- (c) 横に上げる

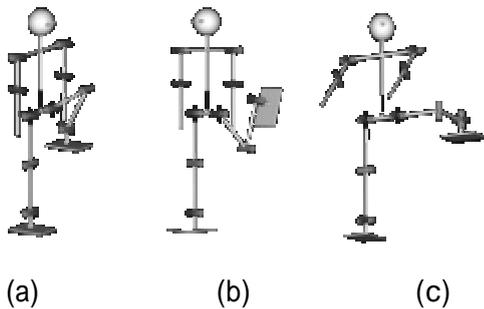


Fig.3 脚の上げ方

使用するロボットの可動範囲から、それぞれの場合の脚が上がる高さを以下の式を用い計算する。

$$Z_a = L \cdot \cos(\theta_1) + L_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_3) \quad (1)$$

$$Z_1 = Z_a \cdot \cos(\theta_2) \quad (1)$$

$$Z_2 = L \cdot \cos(\theta_1) \quad (2)$$

ここで、 Z_1 は足底から床までの距離、 Z_2 は膝から床までの距離、 L は足首から股関節までの長さ、 L_1 は股関節から膝までの距離、 L_2 は膝から足首までの距離、 θ_1 は股関節ピッチ角度、 θ_2 は股関節ロール角度、 θ_3 は膝ピッチ角度である。(a)、(c)で床から一番近い距離にある部分は足底なので式(1)を使用する。(b)は膝が床面に一番近いので式(2)を使用する。(a)から(c)でそれぞれの式に代入するパラメータを Table 3 に示す。

Table 3 脚リンクのパラメータ

	(a)	(b)	(c)
L [m]	0.628	0.628	0.628
L_1 [m]	0.27	0.27	0.27
L_2 [m]	0.27	0.27	0.27
θ_1 [deg]	-120	45	0
θ_2 [deg]	0	0	-90
θ_3 [deg]	150	150	150

Table 3 のパラメータを用い、式(1)、(2)に代入すると、それぞれの場合の床から足底又は膝までの高さは、(a) 0.528 [m]、(b) 0.427 [m]、(c) 0.54 [m] である。これより、脚を横に上げる方法が一番高く上げられ、障害物を高く設定できる事がわかる。しかし、(c)の姿勢は脚が胴体からかなり離れているため不安定であり、転倒の可能性がある。2 番目に高い(a)は(c)より安定性のある姿勢だが、膝が前に出ているため腕と干渉の可能性がある。

以上のことから、動作中の姿勢に応じて転倒のしないように、重心位置などを考慮し脚の上げ方を選ぶ必要がある。

3.1.2 動作方法

またぎ動作の動作方法は、最初に障害物に対してロボットが立つ位置によって決まる。最初のロボットと障害物の位置関係 (Fig.4) について以下のように考えられる。

- (a) 障害物を前にして平行に立つ
- (b) 障害物に対して垂直に立つ
- (c) 障害物を背に平行に立つ

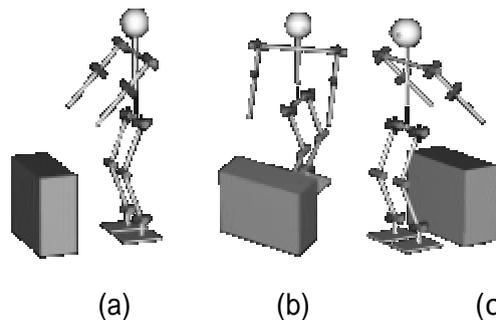


Fig.4 ロボットと障害物の位置関係

ここで、障害物に対して斜めに立つ場合も考えられるが、これは(b)の場合と同じものとする。

次にそれぞれの位置関係について動作方法を検討する。

(a) 障害物を前にして平行に立つ

この場合考えられる動作手順は, Fig.5 のようにはじめに両手を障害物と接地させ, 左手・左脚に重心を移動する. 次に右手・右脚を上げて左脚を支点として床に対して垂直方向に回転させる. そして, 右手を障害物に接地させ, 右脚は障害物をまたぎ床に接地させる. ここまでの動きを前半の動作とし, 後半の動作は前半と逆の手順で行い, 障害物を乗り越える.

この動作手順の利点は, 脚を横に上げられるので, 障害物の高さを高く設定できる. 欠点は障害物を前にして平行に立っているため, 膝を曲げた時に障害物と衝突しないように, ロボットの初期位置を後ろにしなければならない. そのため, またく障害物の幅が狭くなってしまふ.

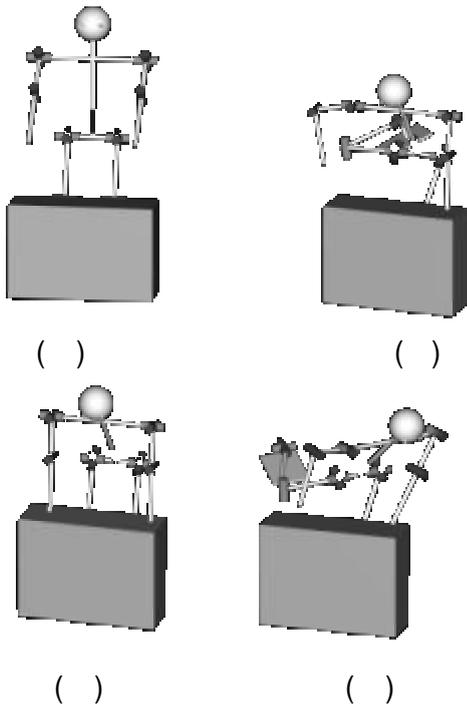


Fig.5 動作手順

(b) 障害物に対して垂直に立つ

この場合に考えられる動作手順は, はじめに腰を曲げながら障害物に両手を接地させる. 次に右脚を前, 又は後ろに上げ障害物をまた

ぐ. ここまでの動作を前半として, 後半はこの逆の手順で行う.

この動作手順の利点は動作手順の少なくまたく事が出来るので簡潔に移動できる. 欠点は脚を前か後ろに上げるため障害物の高さが低くなる. また, 障害物に手を接地させる時点での姿勢が左脚股関節ロールの可動範囲を超えてしまふ. 従ってこの動作は不可能である.

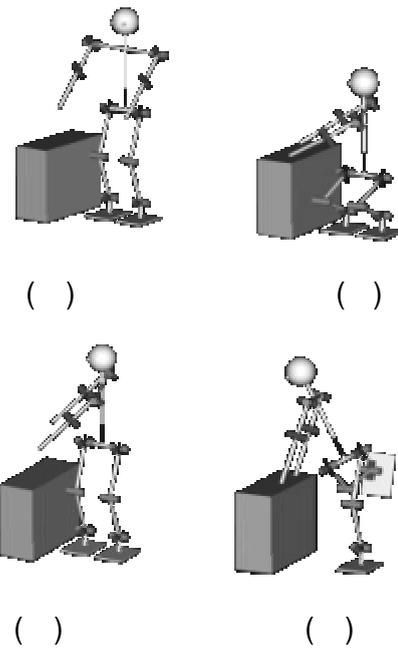


Fig.6 動作手順

(c) 障害物を背に平行に立つ

この場合の考えられる動作手順は(a)の場合と同じである. 違う点は手や脚の上げる向きである.

利点としては障害物を背に平行に立っているため膝を曲げた時の障害物との衝突を考慮しなくてすむので, ロボットの初期位置を障害物に近づけることができる. そのため, 障害物の幅を(a)の場合より大きく設定できる. また, 腰を中心に全身を回転させる事により, 脚を前に上げる方法でも高く脚を上げることができ, 障害物を高く設定できる. その結果, 脚を横に上げる場合より安定した動作が可能

となる。

欠点は本研究室で開発したロボットは有線のため、手先とロボットの背中に設置してある線との接触が起こる可能性があり、手先を障害物に接地させる位置に制約ができる。

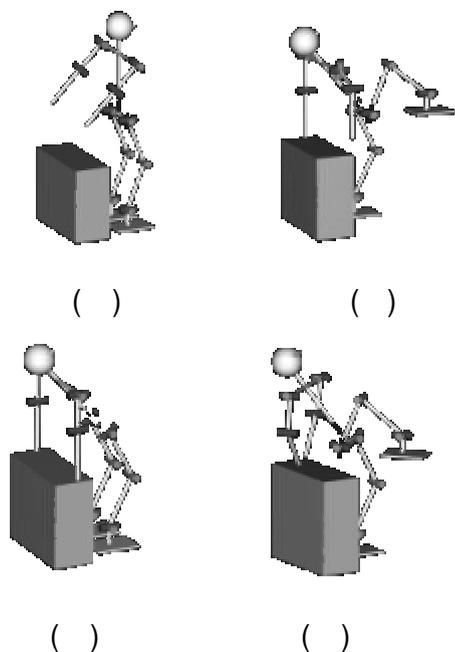


Fig.7 動作手順

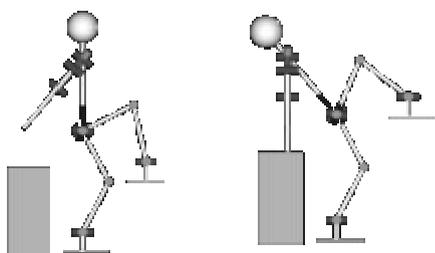


Fig.8 股関節ロール軸回りに回転

以上三通りの動作手順を検討した結果、障害物を高く設定でき安定性した動作が実現可能な(c)の動作手順が最適と思われる。

4. トルク計算

3.1.2 で決めた動作手順において、最もモー

タに負荷のかかると思われる姿勢におけるトルクを計算し、その姿勢が可能かどうか検証する。

最もモータに負荷のかかると思われる姿勢は両腕のみで全身を支えているような姿勢の時であり、この時のモデルを Fig.9 に示す。この時、条件を以下に示す。

- (a) 両腕のみで全身を支える
- (b) 左右均等に負荷がかかっている
- (c) 手先と肩の位置は鉛直線上にあり肘のみに負荷がかかる

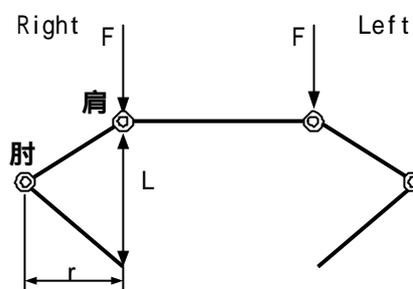


Fig.9 腕の姿勢

以下の式を用い自重によるトルク T の計算を行う。

$$T = rF \quad (3)$$

ここで r は肘から肩までの水平方向の距離、 F は全体重の半分の重さを表す。

今、肩から手先までの距離 L を0.216 [m]と設定すると、その時の肩から肘までの水平方向の距離 r は0.17 [m]である。また、条件(a)(b)より片腕にかかっている荷重は $31.5 \text{ [kg]} / 2 = 15.75 \text{ [kg]} = 154.35 \text{ [N]}$ である。従って、それぞれの値を式(3)に代入すると 25.2 [Nm] となる。また、ヒューマノイドロボットに使用しているDCサーボモータはmaxon motor製で、最大連続トルクは 107 [mNm] である。モータから関節軸には歯数60と歯数18のプーリと減速比100のハーモニックドライブを介して関節が動くので、関節で発生できるトルクは 35.6

[Nm]である。

以上より, Fig.9 のような両腕のみで全身を支える姿勢が可能であることがわかる。

5. 転倒評価

検討した動作方法でロボットが転倒するかどうかを計算する必要がある。計算方法としては, 使用するヒューマノイドロボットをモデル化し, サジタル面(XZ 平面)・ラテラル面(YZ 平面)におけるそれぞれの重心位置 (x, y) を計算する。そして, その位置が各姿勢における支持多角形内に入っているかを確認する。そのため, 脚・腕のそれぞれについて逆運動学を解き, 各関節の角度を求めてから計算する必要がある。従って, ここでは省略する。

6. 制御法の検討

ここでは, 上述した動作が実際のロボットで動作可能であると仮定し, 今後行う予定の制御法について述べる。

今回検討した動作方法は静的安定に行わせる事を目的としているため, 動作中に両腕のみで全身を支える事がないように障害物の高さを設定し, 実験を行わせる予定である。しかし, 制御をする事により, 動作中に両脚が浮き, 両腕のみで全身を支えるような高い障害物を移動する事が可能である。従って, このような場合の制御法について検討する。

制御法については動作中におけるその時々ロボットの支持点の組み合わせより変更する。動作中に考えられる支持点の組み合わせは何通りかあるが, 大きく二つに分けて考

える。

- (a) 支持多角形が面の場合
- (b) 支持多角形が線の場合

本研究室で使用しているヒューマノイドロボットはハンドが無く, 障害物と手先は点で接触する。そのため, 両腕のみで全身を支える時には(b) のように支持多角形が線になる。動作中のその他の姿勢は(a)である。

(a)の場合, 重心がその支持多角形内に入っていれば静的に安定であるが, 各関節が目標角度に追従していない時や外乱からの力を受けたときは, 転倒の可能性がある。そのため, ZMP 制御を行う。ここで ZMP とは床反力中心点のことである。そして, この ZMP を制御する事により上体のバランスを保ち安定した動作が可能になると思われる。

(b)の場合, 両腕が点接触で全身を支えているため非常に不安定である。そのため, この姿勢を倒立振り子モデルに見立て, 上体のバランスを保つ制御をする予定である。

7. おわりに

本稿ではヒューマノイドロボットのまたぎ動作が可能かどうか検討した。今後は, この動作について実際にロボットを使い動作実験を行う予定である。

参考文献

- [1] 矢木 利幸 “ヒューマノイドロボットの開発および歩行運動に関する研究”2002年度修士論文