

生物型ロボットにおける歩行制御と協調行動

Walking Control and Cooperative Behavior of Biotype Robot

伊庭研究室

27301 D2 井上 豊

Abstract

In late years, various studies about robots are conducted actively. Especially, great numbers of papers about the biotype robot are reported. In the robots, the documentation is explained about walking of the multi-legged robot. Moreover, the walking control of the humanoid robot is described. Zero-Moment Point (ZMP) is defined as follows by the beginning of the paper [1] which described the walking of the bipedal locomotion of humanoid robots. As the load has the same sign all over the surface, it can be reduced to the resultant force R , the point of attack of which will be in the boundaries of the foot. Let the point on the surface of the foot, where the resultant R passed, be denoted as the zero-moment point, or ZMP in short. This ZMP is explained briefly.

1 はじめに

近年、ロボットに関する研究は活発に行われている。ロボットの開発を行う際、生物にヒントを得て作られたものが多く存在する。機械システムは物理的身体、すなわち大きさや形、運動機能のメカニズムを持ち、環境との物理的インタラクションによって機能を発現している。機械システムでは、環境の変化に応じて機能を対応させるというロバスト性の向上が重要な課題であり、人工物システムが設計仕様の枠外でも機能できるという可能性を視野に入れると、その対象を生物システムに向けることは自然な考えであると思われる。生物は自然の環境の中で活動し、長い時間の中で激変する環境に対応し生き延びている。生物に解を求めることは、生物を真似するのではなく、生物システムの機能発現のメカニズムを知ることであり、その構成原理を解明し実現する設計原理を確立すること、またそれを人工物で作ることである。

生物を模倣したロボットの中でも、特にヒューマノイド型2足歩行ロボットに関する研究は盛んに行われている。ヒュー

マノイドロボットの優位性は、人間が生活する環境に最も適した物理的身体を持つところにある。つまり、ある部分に特化したロボットではなく、知的生物である人間が人間のために作り出した道具や知識をすべて利用することができる身体的特徴を持つということである。

そのヒューマノイドロボットの基本動作である歩行制御に関する研究は、医学生理学的研究やモデルによるシミュレーションだけでは困難な人間の歩行制御則の解明に大きな役割を果たすものと考えられる。2足歩行ロボットは本質的に不安定であるため、外部環境の変化に対応しながら迅速に制御を行う必要がある。これが車輪型移動ロボットや安定な多足歩行ロボットと大きく異なる点である。この迅速な制御のためにはロボットの内部に力学モデルを持ち、さらに外部環境に対する知識を持つ必要がある。

2足歩行の制御に関する研究は、Vukobratović によって1960年代から盛んに行われ、ゼロモーメントポイント(ZMP)の概念^[1]、プログラム式協調制御などが提案された。その後、Hemami^[2]、伊藤^[3]および山下によって比較的自由度の低いモデルを用いた理論解析が行われた。2足歩行ロボットを実際に製作して歩行の制御を行う研究は、加藤やWittによって1970年頃に始められ、特に日本で多くの研究が行われてきた。

本輪講では、生物型ロボット、特に多足歩行ロボットの歩行に関する事項について説明を行う。また、近年盛んに研究が進められているヒューマノイドロボットにおける歩行制御について述べる。さらに人間の協調するヒューマノイドロボットについても説明する。

2 歩容の基本**2.1 クロール歩容とトロット歩容**

我々の回りの自然界を観察してみると、動物の歩き方は色々なバリエーションが存在することがわかる。例えば、馬はゆっくり歩くとときと速く走るときではかなり様子が違う。

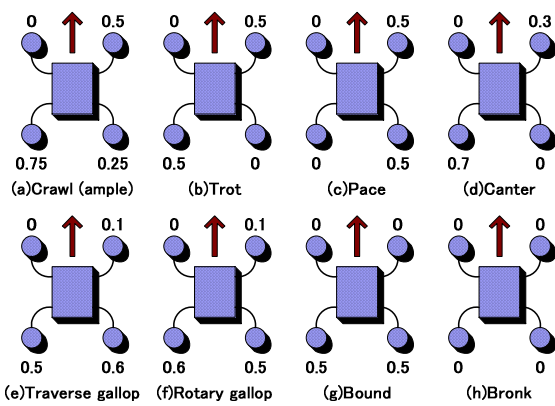


図1 各種4足歩容における脚の着地タイミング

しかし、現在の技術で作ることができるロボットは、馬のようなスピードはでない。そこで、もっとゆっくり歩く動物に注目してみる。動物の中で最もゆっくり歩行するものの1つとしてカメが挙げられる。カメは左前、右後、右前、左後の順序で足を上げて前方にだしている。このように空中に上げている脚を遊脚と呼ぶ。カメは4回の遊脚を1周期として、ちょうど4拍子の曲に合わせているかのように歩行を繰り返している。このときの各脚の着地時刻を1周期で1として表すと図1(a)のようになる。この着地タイミングを表す数字を各脚の相対位相と呼ぶ。

さらに詳しく見るとカメは常に1脚のみを遊脚化していることがわかる。すなわち、必ず現在の遊脚を着地させてから次の脚を上げている。例えば、位相ゼロで着地した左前脚に続いてすぐに右後脚を遊脚化する。すると、右後脚は位相ゼロから0.25までの間遊脚となり、0.25から1まで地面に接した支持脚となる。ここで、1周期中の支持脚期間の割合をデューティ比と呼ぶ。上記の例ではデューティ比が0.75となる。これは歩行中の平均支持脚数が4本(全脚数)×0.75=3本であることも表している。通常各脚1回の遊脚化で1周期となるような歩き方において、足を上げる順序や上げ下げのタイミングはすべて前述の相対位相と、このデューティ比によって特定することができる。このような足を上げる順序やタイミングを「歩容」という。上記のカメの歩容は「クロール歩容」と呼ばれる。

もっと速い歩容をさがしてみる。トカゲはカメより少し速い。特に大型で体長3メートル、体重100キロを越すコモドドラゴンは、獲物をつかまえるために時速20キロもの速さをだすことができる。このときの歩容は、カメと違って2本の足が同時に遊脚化している。よく見ると図1(b)のように対角線上の2脚の相対位相は同じで、ちょうど2拍子の歩き方

になっている。これを「トロット歩容」と呼ぶ。ワニも同様の歩容である。一方、馬はゆっくり歩くときにはパッカパッカという変形2拍子調で歩く。これは、先程のクロール歩容と呼ばれる。それが少し速足になるとカッカと完全な2拍子になる。これがトロット歩容である。この他にも図1のような様々な歩容が分類されている。馬はさらに高速になると、キャンタ、ギャロップと歩容を変えてゆく。また、馬車を引くなどの負荷があるときにはペース歩容をとることが知られている。

ところで、トカゲの歩容は本当にカメの歩容より速いのであろうか。単に足を振りだす速度が速いだけではないだろうか。そこで、足の振り速度ではなく、歩容に依存する歩行速度の違いを見いだすため、胴体から見た遊脚の平均前方振りだし速度を一定の値として、歩容による前方進行速度の違いを算出してみる。クロール歩容ではデューティ比が0.75であったが、2拍子で歩くトロット歩容のデューティ比は0.5である。1周期の時間を T 、前述のデューティ比を β 、胴体の対地進行速度を V 、胴体から見た相対的な遊脚の平均速度を U とすると、遊脚時間は $(1-\beta)T(U+T)$ となる。1周期中の胴体の移動量は1歩の歩幅に等しいので、 $\lambda=VT$ と表せる。これより、歩行速度は、

$$V = \frac{1-\beta}{\beta} U \quad (1)$$

と表すことができる。 $\beta=0.75$ のクロール歩容では $V=0.33U$ であるが、 $\beta=0.5$ のトロット歩容では $V=U$ となり、3倍も速いことがわかる。このようにデューティ比が小さい歩容ほど高速な歩行に適しているといえる。なお、上記の関係は一般には $\beta \geq 0.5$ で用いられる。それ以下のデューティ比では、胴体に対する支持脚の速度が遊脚速度より大きくなり、歩行速度は支持脚をどれほど速く後ろに蹴りだすかで決まってくる。

2.2 ウェーブ歩容

前項のクロール歩容とトロット歩容は、どちらもウェーブ歩容と呼ばれるカテゴリーに属する。ウェーブ歩容とは一般に左右対称の $2n$ 本足の歩行において、脚の上下動作が後脚から前脚に向かって進む歩容で、後脚の着地と同時に前脚を遊脚化する。また、対になる左右の脚の位相差は0.5である。クロール歩容はデューティ比が0.75のウェーブ歩容であり、トロット歩容はデューティ比が0.5のウェーブ歩容であることがわかる。これらの中間のデューティ比を持つウェーブ歩容について、歩容線図を用いて考える。図2はクロール歩容

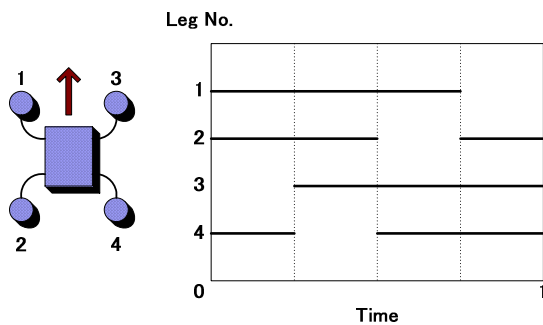


図2 クロール歩容の歩容線図

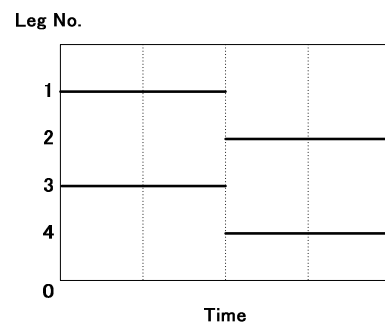


図3 トロット歩容の歩容線図

の歩容線図である。横軸が時間で1サイクルの時間で規格化している。各脚の実線のある部分が接地している支持期間で、破線部が遊脚期間である。一方、トロット歩容の歩容線図は図3のように表せる。この2つを図4のように脚毎に上下に並べて表すと、この2つの歩容の差がはっきりする。図の網掛け部分のように2つの歩容をつなげることにより、中間のデューティ比の歩容を作ることができる。さらに、これをデューティ比の大きい側に延長すれば、クロール歩容、トロット歩容を含む拡張された歩容概念とすることができる。これを拡張トロット歩容と呼ぶ。先程の式(1)によれば、デューティ比によって歩容の高速性が大きく変化するので、この歩容では、低速の場合にはデューティ比を大きく、高速の場合は小さくすることによって速度変化に対応することができる。

2.3 間欠トロット歩容

デューティ比0.5のトロット歩容を基準として、デューティ比がより大きく、0.5~1の歩容の1つとして、各脚の相対位相はトロット歩容と全く同じで、デューティ比のみを変化させた歩容が考えられる。すなわち、対になる対角線上の脚は常に同時に上下させ、その遊脚時間がデューティ比に応じて短くなるという歩容である。歩容線図は図5で表される。

2対の脚間の位相差は0.5で変わらず、トロット歩容の2拍子のリズムを間欠的に行うものとなるため、これを「間欠トロット歩容」と呼ぶ。この歩容は制御がしやすいという利点がある。

3 動的安定性とゼロモーメントポイント

3.1 静歩行と動歩行

動物や機械が3本以上の脚で支持させている場合は、図6のように、その接地点を結んだ多角形の中に全体の重心の投影点が存在すれば、ひっくり返らずに立っていられることは容易に想像できる。カメのクロール歩容のように常に3本以上の支持脚を持つ歩容においては、このことが歩行の安定性を判断する指標となる。これを静的安定性といい、静的安定性を保った歩容を「静歩行」と呼ぶ。このとき、重心投影点から最も近い多角形の辺までの距離を安定余裕という。特に、前後方向だけに注目し、進行方向に沿って計った辺までの距離を縦安定余裕と呼ぶ。前述のウェーブ歩容は、一般に脚が左右1列ずつに等間隔で並んだ $2n$ 脚の歩行において、一定デューティ比の歩容中で最大の縦安定余裕を持つことが知られている。

これに対して、トカゲのトロット歩容では、歩行中の各瞬

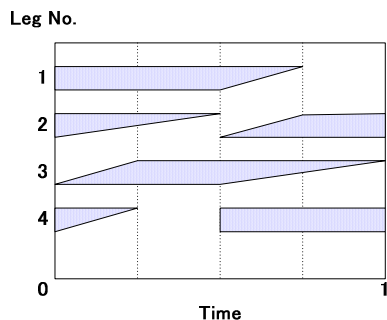


図4 クロール歩容とトロット歩容の融合

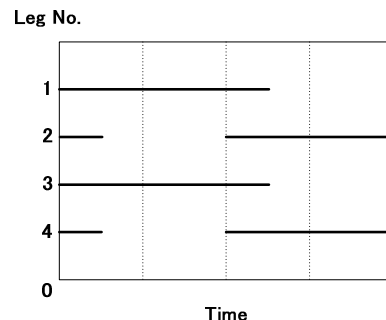


図5 間欠トロット歩容の歩容線図

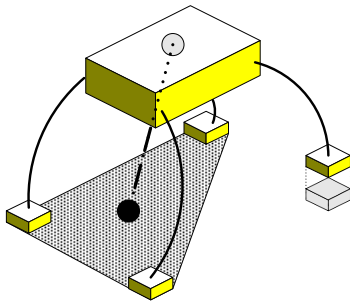


図6 3点支持の静的安定領域

間においては、2本の足しか接地していない。足の裏の面積を考慮すると、図7のように2脚の足裏をつないだ幅のある領域（支持領域）に重心投影点があることが静的安定条件となる。しかし、トカゲは必ずしもこの領域に重心を保っていない。同様に人間の歩行においても、片足支持の期間中、重心を支持脚の足裏の領域上に保っていない。このように静的に不安定であるにもかかわらず歩行を安定して続けられるのは動的効果（ダイナミクス）のおかげである。動的効果は質量のある物体の加速、減速には力が必要であることから生まれたものである。我々が台の縁などから前に倒れそうなときに、腕を上から前の方向に回転させて持ちこたえようとするのは、この動的効果を利用したものである。このような動的効果を利用して安定性を得ている歩行を「動歩行」と呼ぶ。静歩行はどんなにゆっくり歩いても安定性は保たれるのに対し、この動歩行には適度な速さが必要である。

3.2 動的安定性

我々人間は、何気なく動歩行をしているが、どのようにして動的安定性を生みだしているのであろうか。歩行に直接関係する脚の運動以外の動きに注目してみる。歩行中、人間はからだ全体を左右に揺動させ、腕を振っている。また、他の動物では、犬や猫がしっぽを振る動作や、ニワトリやハトが頭を前後に揺らす動作などは、一見歩行とは無関係のようにみえるが、これらはすべて動的安定性に関係している。

歩行が動的に安定であることの定義は、広く解釈すれば、歩行不可能な状態に陥らず、歩行継続ができればよいと考えることもできる。しかし、ここでは計画した歩行運動がそのまま乱れることなく実施できるとき、その運動計画は動的安定性を持つと呼ぶこととする。そこでまず、この運動計画の実現条件とはどのようなものであるかを明らかにしておく。歩行ロボット全体の運動方程式を記述するとき、歩行ロボットに働く力は重力、床からの力、接地点以外の各部に直接働

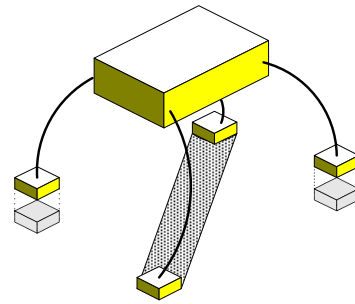


図7 足裏面積のある2脚支持静的安定領域

く外力である。すなわち、歩行ロボットの各部の加減速に必要な力とモーメントの合計を F_a, M_a とし、各部に働く重力を合計した力とモーメントを F_g, M_g 、接地点以外の各部に直接働く外力の合計を F_o, M_o とすると、床から得るべき力とモーメントは、

$$\bar{F} = F_a - F_g - F_o \quad (2)$$

$$\bar{M} = M_a - M_g - M_o \quad (3)$$

と表せる。ここで、座標系は慣性座標系であれば、原点の位置などは任意に設定できる。ただし、以降の計算に統一して用いるものとする。また、 \bar{F} は設定した座標の原点に働くべき力であり、 \bar{M} は原点回りのモーメントである。一方、実際に足先が床から受ける力は、

$$F = \sum F_j \quad (4)$$

$$M = \sum P_j \times F_j \quad (5)$$

と表せる。ここで P_j は足先の接地点の座標である。ここでは面状の接触も点接触の集合として扱う。 F_j は各接地点で受ける床からの力である。このとき、 F_j を垂直抗力 N_j と摩擦力 f_j とに分離して考えると、垂直抗力が床面から空中に向かう方向であるという条件として、

$$N_j \cdot n_j > 0 \quad (6)$$

n_j は接地面から空中に向かう法線ベクトルである。また、摩擦力が限界以内である条件として、

$$\frac{|f_j|}{|N_j|} \leq \mu_j \quad (7)$$

という制約がある。 μ_j は各接地点での静止摩擦係数である。先程算出した、運動に必要な力とモーメントが実際に床からの力として得られること、すなわち、

$$\bar{F} = F, \bar{M} = M \quad (8)$$

が実現できることが計画通りの運動が可能になる条件である。これは n 点が接地している場合、未知数は各点での3次元の並進力の $3n$ 個に対して方程式が3次元の力とモーメントのバランスの6個で、さらに式(6)(7)のような不等式の制約条件がついている問題となり、運動の安定性を判定することは、この問題の解の存在を判定することに帰着する。

以上のことは、どのような地形にも適用できる一般的なものである。例えば、壁面を移動するロボットにも適用できる。式(2)(3)において、各脚を壁に押しつける外力という形で吸着力を付加すればよい。さらに、一般的にはマニピュレータハンドによる把持の安定性と全く同じ問題であり、これについては既に多くの研究が行われている。しかし、これを一般的に解決することは難解な場合が多い。このため、歩行ロボットの制御では、特有の簡便な安定性評価法が提案されている。その一例がゼロモーメントポイントである。

3.3 ゼロモーメントポイント

ゼロモーメントポイント (ZMP) ¹⁴⁾とは、ひとことでいえば運動中に床から受ける力の中心のようなものである。図8のように足の裏に働く床反力(接地力)が分布している場合、これらを合わせて、原点 O に働く1つの並進力ベクトル F と回転モーメント M で表すことができる。ここで、 F の作用点を F' の位置に水平に移動させると、 F' は並進力であると同時に原点 O まわりのモーメントとしても働くことになる。ちょうど F' の発生するモーメントが M に等しくなる点が床面上に存在する。この点が ZMP である。すなわち、分布している床反力群は ZMP を作用点とする1つの並進力

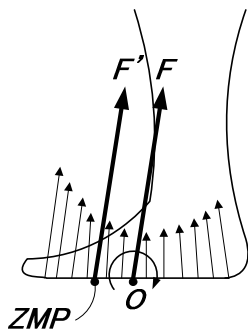


図8 床反力の分布と ZMP

で置き換えられる。一般の3次元では、床反力モーメントの水平成分がゼロになる点が ZMP である。この ZMP は、実際の床からの力を計測すれば求めることができる。その存在範囲は1脚支持ならば足裏の範囲内、2脚以上なら図7のような支持領域に限定されることは、容易に想像できる。

一方、上記のような実際の床反力の合計から得られる ZMP とは別に、歩行ロボット各部の運動から、計算によって ZMP を算出することもできる。簡単な具体例として、歩行ロボットが質量 M の1つの剛体とみなせ、回転運動のない場合について考える。簡単のため考察はすべて床面に固定した慣性座標系で行うこととする。図9のように前方に加速度 α で加速する運動に必要な力は $M\alpha$ である。慣性座標系であるので、これは慣性力ではない。慣性力とは否慣性座標系で運動方程式を作るときに用いる補正項である。すなわち所定の加速度運動を実現するためには外力としてこの $M\alpha$ の力が必要である。歩行ロボットには床反力の他に重力 Mg が加わっているので、これらをすべて合計した力が $M\alpha$ でなければならない。つまり、重力を打ち消す力 $+M\alpha = F$ を床から受けなくてはならない。カベクトルはそのベクトルの延長線上に平行移動しても全く等価であるから、重心の位置に作用するこのカベクトル F を延長して床面と交わった点が、床からの反力をモーメント無しで発生できる点、すなわち ZMP である。もし、この点に足がついていれば、例えそれが点接地の一本足でもモーメントを発生できなくても、所定の加速度 α を実現することができる。これが、いわば計画上の ZMP というもので、その存在範囲は運動の計画によって制限なく、床面上のどこにでも存在し得る。しかし、実際の ZMP の存在範囲は支持領域に限定されることから、計画上の ZMP が支持領域外にある場合、その計画は実行不可能であ

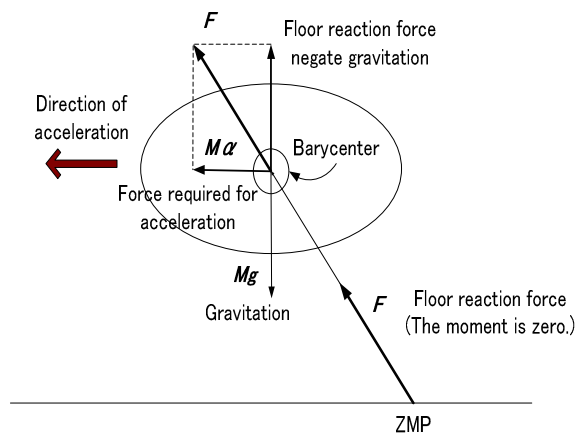


図9 加速時の ZMP

ることができる。この ZMP の概念は、2 足歩行ロボットの制御にも用いられている^[4]。

4 P2 に学ぶ歩行制御

ホンダ技術研究所が開発した ASIMO (Advanced Step in Innovative Mobility) の前身である二脚二腕のヒューマノイドロボット P2 (Prototype model 2) (図 10) は、1996 年 12 月に公開された。P2 の脚は、股関節にピッチ軸、ロール軸、ヨー軸まわりの 3 自由度、膝関節にピッチ軸まわりの 1 自由度、足関節にピッチ軸、ロール軸まわりの 2 自由度、合計 6 自由度を持っている。腕は手首に 3 自由度、肘に 1 自由度、肩関節に 3 自由度、合計 7 自由度を持っている。質量は 210kg であり、身長は 182cm である。胴体には、コンピュータ、バッテリー、センサ等を搭載している。

このヒューマノイドロボット P2 の制御システムについて述べる^{[6][6]}。各関節はサーボモータおよびハーモニックドライブ減速機からなる駆動システムで駆動される。膝関節および脚関節のピッチ軸まわりの自由度を駆動するサーボモータは、上方に取り付けられ、ベルト、プーリを介してハーモニックドライブ減速機の入力軸を駆動している。このように質量物をできるだけ上方に配置することにより、股関節まわりの脚の慣性モーメントをできるだけ小さくしている。

P2 の足部はゴムプッシュとガイド部で構成された上下方向のコンプライアンス機構を持つ。また、足底にはスポンジを介して足底ゴムが貼られている。これらにより、着地時の衝撃が緩和される。さらに、足底の力制御ループのゲインを等価的に下げることになり、力制御ループの安定化にも寄与している。また、足部には 6 軸力センサが内蔵され、ZMP を計測する。

歩行制御システムの概要を図 11 に示す。歩行制御の最も下位レベルにあり、その基礎をなすのは、各関節における関節角度制御である。駆動システムにおける摩擦等のため、モータへの供給電流を制御しても関節のトルクを制御することにはならない。そこで、力制御を行う際にも関節角度制御をマイナーループ制御として行い、マイナーループへの目標値を補正することにより間接的に力制御を行っている。

ZMP の制御について説明を行う。目標歩行パターンにおける慣性力と重力の合計を目標総慣性力と呼ぶことにする。この目標総慣性力のモーメントがゼロとなる床面上の点が目標 ZMP である。もし、ロボットが理想的に歩行している場合には、目標 ZMP と床反力中心は一致する。しかし、床

面の未知な凹凸や不確定な要因により床反力の作用線と目標総慣性力の作用線がずれると、転倒力モーメントが発生する。転倒を防ぐために次のように制御が行われる。

- (1) 床反力制御：全床反力中心点を目標 ZMP と一致させることが床反力制御の目的である。そのために足底の姿勢を制御することにより、全床反力中心点を目標 ZMP に近づける。全床反力中心点は足部に取り付けられた 6 軸力センサにより計測され、歩行面が平らでない場合にも、全床反力中心点を希望の位置に移動させ、姿勢の安定性を保持する。
- (2) モデル ZMP 制御：ロボットが倒れそうになる、すなわちロボットの上体の姿勢とその目標値の差が大きくなると、目標上体軌道を変更して、姿勢を復元させる位置まで目標 ZMP をシフトすることが行われる。これによりロボットの姿勢が復元される。これをモデル ZMP 制御と呼ぶ。
- (3) 着地位置制御：モデル ZMP 制御により、目標上体軌道が変更されると、上部部に相対的な遊脚の位置・姿勢の目標値を変更する必要が生じる。この補正が着地位置制御である。

上記(2)のモデル ZMP 制御は、次のように説明できる。例えば、ロボットの上体の姿勢が目標の姿勢より大きく離れ、モデルの上体よりも前傾したとする。このとき、目標状態位置を前方に強く加速するように与える。この結果、目標慣性力の大きさが変わり、目標 ZMP は元の目標 ZMP より後方に移動する。これにより、図 12 示す転倒モーメントと逆のモーメントが働き、ロボットの姿勢が回復する。

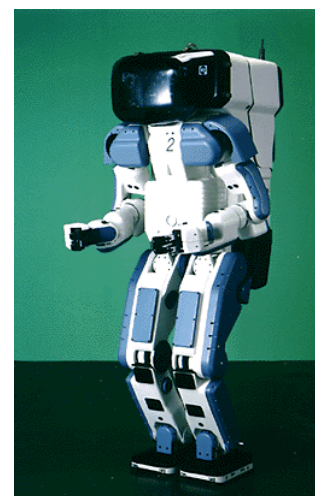


図10 ヒューマノイドロボット P2

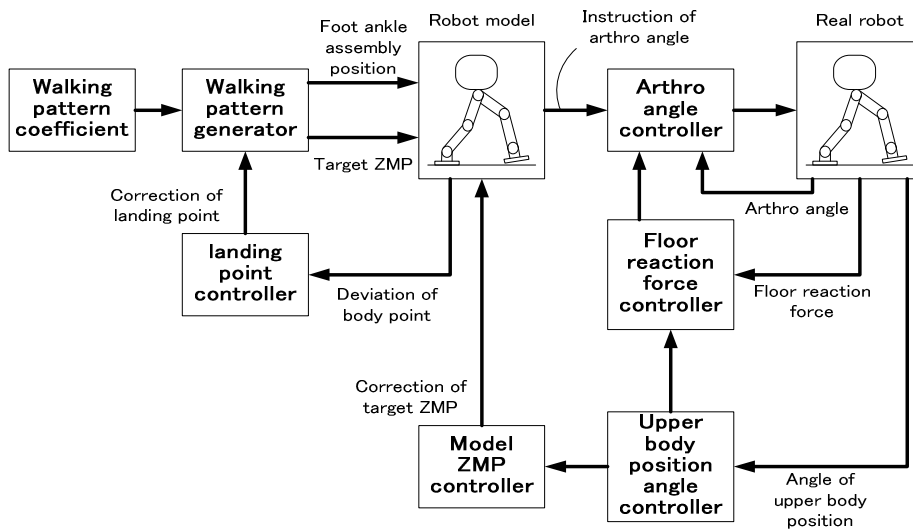


図11 P2の歩行制御システム

上記の制御は、倒立振子の制御という観点から次のように説明できる。腰の曲げを考慮する倒立振子モデルにおいて、上体を急に前傾させたとする。このとき、角運動量保存則からわかるように歩行システム全体の重心は後方へ移動し、その結果重力によるモーメントの変動分は歩行システムが倒れこむ方向とは逆方向に働く。すなわち、歩行システム全体が目標軌道より前方に倒れ込みすぎているときには、上体を前傾させることでその回復が可能となる。

歩行パターンとしては、腰の上下動のほとんどない歩行パ

ターンを採用している。力学モデルを基礎とした歩行シミュレータにおいて、制御方式、歩行パターン、目標 ZMP 等について検討を行い、次に実機において歩行を行うという手順をとっている。遊脚の着地や支持脚の切り換えなどの衝突現象はモデル化の困難な部分であるが、腰の上下動の少ない歩行パターンを採用していることが、衝突現象を小さくし、歩行の安定化に貢献している。

5 人間協調・共存型ロボットシステム

産業技術応用研究開発プロジェクトとして 1998 年から「人間協調・共存型ロボットシステム」の研究開発が行われている[7]。このプロジェクトでの初期段階では、共通基盤となる研究プラットフォームの構築が行われ、ヒューマノイドロボット[8]、遠隔操作コックピット、仮想ロボットプラットフォーム[9]が開発された。

ヒューマノイドロボットの基本仕様は、ホンダ技術研究所が開発した P3 ロボットを踏襲している。ロボットプラットフォームは身長 160cm、体重 99kg であり、その主な仕様は 2 足歩行により路面の凹凸±2cm の平面を最大 2km/h で移動可能で、段差 20cm の階段を昇降可能なことである。このロボットのソフトウェア開発のために仮想ロボットプラットフォームが開発され、またその歩行制御についても検討が行われている[10]。

人間との協調や共存を目的に行われた研究は以下の通りである。

- (1) 人間型ロボットによる介護支援作業

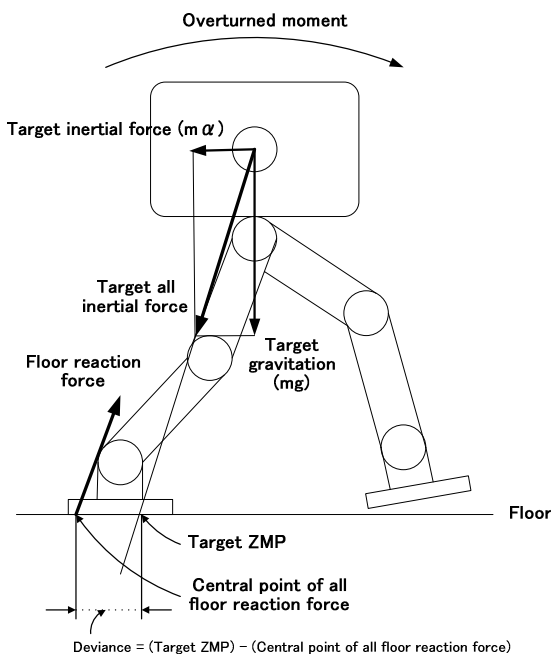


図12 目標 ZMP および床反力中心点

- (2) 人間型ロボットによる留守宅管理作業
- (3) 人間と人間型ロボットの共同作業
- (4) 人間型ロボットによる産業車両代行運転
- (5) 人間型ロボットによるプラントの保守・点検

介護支援は、高齢化社会に伴う労働力不足を背景として、介護者の負担軽減したり、被介護者が気兼ねなく介護が受けられるようにすることを目的として行われている。

今後の少子化、核家族化による家族の構成人数の減少によって日中の留守宅増加という背景から、留守宅を管理する必要があり、それに人間の住環境と親和性の高いヒューマノイドロボットの利用が検討されている。また、携帯端末での遠隔操作が技術的に実現されているということも、この研究の一要因となっている。

人間とヒューマノイドロボットの共同作業では、人間が熟練者、ロボットが非熟練者と仮定し、資材の運搬などを行う。

災害現場や土木建設現場など悪環境の下での作業をヒューマノイドロボットに代行させることにより、人間の安全性を確保することを目的とし、産業車両をロボットに代行運転させるという研究が行われている。

プラントの保守、点検も代行運転と同様に、高温や化学的に危険な環境下での作業を人間に代わり行うことを目的としている。人間が行うことを前提に作られたプラント内部の移動は、ヒューマノイドロボットが適していると考えられる。

6 おわりに

脚を持つロボットの基本的な動作は歩くことであり、その基本的な動作を正しく行うということが、近年のロボット分野における重要な課題の1つであった。特に、ヒューマノイドロボットにおいて、歩行は最優先に解決しなければならない問題の1つであった。しかし、ASIMOなどの誕生により、次の課題へと目標が移りかけている。それは、人間の環境に適応できるような知識を持つということである。

かつて人間は長い時間を経て進化し、二足歩行を獲得した。その後、地球の歴史的には短い期間で知性を得た。ヒューマノイドロボットにおいて、長い2足歩行の研究がある程度の成功を収め、現在、人間との協調などの研究も行われている。ヒューマノイドロボットが知識を獲得し、我々と生活を共にする日もそう遠くはないかもしれない。

今後は、ヒューマノイドロボットのみでも人間の環境に適応可能となるような知識を獲得できるよう、ヒューマノイド

ロボット同士の協調学習などについて研究を行いたいと考えている。

参考文献

- [1] M. Vukobratović and J. Stepanenko: "On the Stability of Anthropomorphic Systems", *Mathematical Biosciences*, vol.15, pp.1-37, 1972.
- [2] H. Hemami and B. F. Wyman: "Modeling and Control of Constrained Dynamic Systems with Application to Biped Locomotion in Frontal Plane", *IEEE AC*, Vol.24, No.4, pp.526-535, 1979.
- [3] 成清, 小林, 伊藤, 細江: "2 足歩行系の両足支持期の制御について", *電気学会論文誌 C*, Vol.103, No.12, pp.281-286, 1983.
- [4] 高西: "上体の運動によりモーメントを補償する 2 足歩行ロボット", *日本ロボット学会誌*, Vol.11 No.3, pp.46-51, 1993.
- [5] 広瀬, 竹中, 五味, 小澤: "人間型ロボット", *日本ロボット学会誌*, Vol.15, No.7, pp.983-985, 1997.
- [6] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: "The Development of Honda Humanoid Robot", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1321-1326, 1998.
- [7] 井上, 比留川: "人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト", *日本ロボット学会誌*, Vol.19, No.1, pp.2-7, 2001.
- [8] 平井, 仲山: "ロボットプラットフォームの製作および高機能ハンドの開発", *日本ロボット学会誌*, Vol.19, No.1, pp.8-15, 2001.
- [9] 中村, 比留川, 山根, 梶田, 横井, 藤江, 高西, 藤原, 永嶋, 村瀬, 稲葉, 井上: "仮想ロボットプラットフォーム", *日本ロボット学会誌*, Vol.19, No.1, pp.28-36, 2001.
- [10] Q. Huang, K. Kaneko, K. Yokoi, S. Kajita, T. Kotoku, N. Koyachi, H. Arai, N. Imamura, K. Komoriya and K. Tanie: "Balance Control of a Biped Robot Combining Off-line Pattern with Real-time Modification", *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.3346-3352, 2000.
- [11] 米田, 広瀬: "歩行機械の転倒安定性", *日本ロボット学会誌*, Vol.14, No.4, pp.47-52, 1996.
- [12] M. Vukobratović, B. Bprvac, D. Surla and D. Stokic: "Biped Locomotion Dynamics, Stability, Control and Application", *Scientific Fundamentals of Robotics 7*, Springer-Verlag, 1990.
- [13] J. Furusho and M. Masubuchi: "Control of a Dynamical Biped Locomotion System for Steady Walking", *Trans. ASME, J. of Dyn. System Mes. and Control*, Vol.108, No.2, pp.111-118, 1986.
- [14] P. Channon, S. Hopkins and D. Pham: "Derivation of Optimal Walking Motions for a Bipedal Walking Robot", *Robotica*, Vol.10, pp.165-172, 1992.
- [15] P. Channon, S. Hopkins and D. Pham: "A Variational Approach to the Optimization of Gait for a Bipedal Robot", *J. of Mechanical Engineering Science C*, Vol.210, pp.177-186, 1996.