

ゼロモーメント点の操作による歩行機械の制御

Control of legged walking robots by manipulating the zero moment point

○水戸部和久, 矢島克知, 仲野隆司, 那須康雄

○Kazuhisa Mitobe, Katsutomo Yajima, Takashi Nakano and Yasuo Nasu

山形大学工学部

Yamagata University

キーワード: 歩行ロボット (walking robot), ゼロモーメント点 (zero moment point), 制御 (control), 安定性 (stability)

連絡先: 〒992-8510 米沢市城南4-3-16 山形大学工学部 機械システム工学科

水戸部和久, Tel.: (0238)26-3232, Fax.: (0238)26-3205, E-mail: mitobe@nasu2.yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

産業用ロボットの制御において、多くの場合、タスクの記述は手先位置の軌道として記述される。これに対し、歩行ロボットの制御においては、どの物理量を制御量として選ぶべきかは明確に定まっておらず、歩行の解釈の違いにより異なったものが考えられる。したがって、タスクの記述方法においてもさまざまなものが考えられる。たとえば、歩容を各関節角度、またはその軌道としてあらかじめ定め、それを目標軌道として軌道追従制御を行う方法¹⁾、ロボットと地面との接地点まわりの角運動量を目標の値に制御する方法³⁾、などがある。しかし、どのような制御量を選択する場合でも、以下の2点は歩行ロボットにおいて共通の制御目的と考えられる。

1 ロボットの地面に対する相対位置の移動、

2 バランスの確保 (転倒の防止)。

本研究では問題を以上の2つの制御目的に限定して、歩行ロボットの制御則に関する議論を行う。

1 番目の制御目的は地面に固定した座標系でのロボットの位置または軌道の制御の問題と考えることができる。これは通常の産業用ロボットのタスクの記述と同様である。ただし、歩行ロボットはベースリンクが地面に固定されていないために制御の難しさが生ずる。2 番目の制御目的はゼロモーメント点 (ZMP) を安定領域の内部に限定する問題として定式化されることが一般的である^{4) 5)}。これらの二つの制御目的は互いに独立ではない。なぜならば、ロボットの地面に対する位置を制御するためには地面とロボットの間の方の相互作用を能動的に操作する必要があり、そのためにはロボットがバランスを失わないことが必要である。また、逆にロボットのバランスはロボットの運動に影響されるからである。

これらの2つの問題を同時に解決するために、これまでに提案されている多くの研究では、安定領域内に計画された軌道をZMPが追従するようなロボットの運動をあらかじめ計画し、その軌道に追従するようにロボットを制御する方法がとられている。これを人間に当てはめて言い換えると、上体の運動を規定することにより足から床への反力を制御することに相当する。

この方法の問題点の一つは、計画された運動への追従性能がロボットのバランスに直ちに影響することである。ZMPは関節角度のみでなく角加速度の影響も受けるので、制御においては加速度レベルまでの軌道追従性が要求される。実際にはこのような制御は困難であるので計画されたZMPと実際のZMPとの間のずれを補償する方法が種々提案されている。もう一つの問題点は、ロボットの運動計画と制御が分離されているために、地面状況の変化などにロボットが実時間で適応して歩行することが難しいことである。

本研究では、上述の方法と逆に、ZMPを操作することによりロボットの位置の制御を行う制御則を検討する。これは、人間が足から床への反力を操作することにより上体のバランスを確保し、あるいは歩行速度を加減速する状況に相当し、自然な方法と思われる。これにより、計画軌道への厳密な追従性を必要とせず、また、運動の計画と制御を分離することなく2つの制御目的を達成することを目的とする。

なお、作業に対して冗長な自由度を持つことは人間の器用さを与える上で重要なことと考えられるが、本研究では冗長な自由度に関する考察を目的とせず、ロボットの地面に対する移動の制御問題のみを考察することにする。

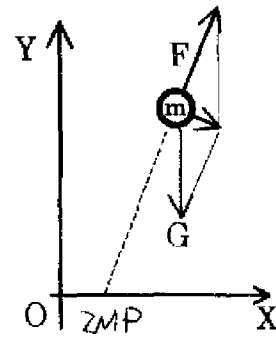


Fig. 1 質点の運動

2. ZMPを操作量とする制御則

2.1 問題の記述

Fig.1に本研究で考察の対象とするシステムを示す。このシステムは平面内を一つの質点が運動するものである。質点の運動は重力および床から作用する力により支配される。ベクトル F が床から質点に作用する力を表し、 G は重力を表す。制御の目的を床からの力 F を操作することにより平面内における質点の位置を制御することとする。床からの力 F は実際には脚の機構を経由して質点に作用するが、本研究では脚機構を特定せずに質点位置の制御の問題を考察する。

F を延長した線が地面と交わる点がZMPである。単脚支持の場合、ZMPがロボットを支持する足底領域内にあればその足底は床面と密着している。質点の加速度は力 F と重力 G の合力方向に生じ、その運動方程式を水平方向と鉛直方向に分けて書けば、次式となる。

$$m\ddot{x} = f_x, \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = f_y - mg, \quad (2)$$

ここで、 g は重力加速度であり、 f_x および f_y は床反力 F の水平および鉛直成分であり、次式のとおり表される。

$$f_x = |F|\cos(\theta), \quad f_y = |F|\sin(\theta), \quad (3)$$

$$\cos(\theta) = \frac{x - x_{zmp}}{\sqrt{(x - x_{zmp})^2 + y^2}}, \quad (4)$$

$$\sin(\theta) = \frac{y}{\sqrt{(x - x_{zmp})^2 + y^2}}. \quad (5)$$

以上の関係式より ZMP を質点の状態 x, \dot{x}, y, \dot{y} で表せば次式となる。

$$x_{zmp} = \frac{x(\dot{y} + g) - y\dot{x}}{\dot{y} + g}. \quad (6)$$

地面より質点に作用する力 F を任意に操作することが可能であれば平面内での質点の位置 (x, y) を制御することは容易である。実際のロボットでは F を操作可能か否かは脚の機構などに依存すると考えられる。脚機構に関しては後に具体例を示し考察することとし、ここでは以下の仮定のもとで制御則を検討する。

- A1 ZMP の座標 x_{zmp} は床面上で任意に操作することができる。
- A2 ZMP から質点に作用する力の大きさ $|F|$ は任意に操作することができる。

実際には ZMP のとり得る範囲は任意ではなく、たとえば、単脚支持期では足底内に限定される。ZMP を限定した制御については 4. 節で考察する。

2.2 ZMP を操作量とする制御則

ZMP を目標軌道に沿わせるような運動をあらかじめ計画することによりロボットの転倒を防ぐ方法がある⁴⁾。これを上の問題に適用すると、まず ZMP の軌跡 $x_{zmp}(t)$ の目標を定める。これを (6) 式の左辺に代入し時間で積分することにより質点軌跡 $(x(t), y(t))$ の目標軌道 $(x_d(t), y_d(t))$ を計画する。その際、(6) 式より $(x_d(t), y_d(t))$ は一意に定まらないので自由度のうちの一つをあらかじめ定めなければならない。例えば、鉛直方向への高さ y の目標値は一定値 $y = h_{ref}$ とし、

$$x_{zmp}(t) = \frac{x_d g - h_{ref} \ddot{x}_d}{g}. \quad (7)$$

を積分して $x_d(t)$ を計画する。このように定めた ZMP および質点の軌道はノミナル軌道と呼ばれ

る。制御においては計画された軌道に対して質点位置を追従させる。十分な追従性が得られれば ZMP はノミナル軌道に追従すると考えられる。文献⁴⁾には多自由度を有するロボットに対する軌道計画および制御方法が示されている。(6) 式よりわかるとおり、実際の ZMP がノミナル ZMP に追従するためには (x, y) のノミナルな軌道への加速度レベルまでの追従が必要である。ロボットの軌道制御においては伝達機構における摩擦やバックラッシュなどの外乱、制御におけるモデル化誤差の影響により目標軌道への厳密な追従は難しい。したがって、実用上はバランス確保のためには、外乱などに起因する ZMP のノミナルな軌道からのずれの補償が必要である。文献⁴⁾では床反力の実測値に基づき補償入力を生成する一方法が示されている。

上述の方法は、計画された運動を忠実に実行することにより歩行ロボットのバランスを確保するものである。しかし、目標軌道への厳密な追従が要求される点は人間の柔軟な歩行とは異なるように思われる。そこで本研究では、目標軌道への厳密な追従性を要求することなくロボットのバランスの確保および移動を行うための制御方法について検討する。

人間は重心の移動やバランスをとるために床に対する反力を積極的に操作する。たとえば重心を後ろに移動させるためにはつま先側を地面に対して踏ん張り、逆に重心を前に移動するためにはかかと側を地面に対して踏ん張る。ZMP は床から受ける力の中心点と考えることができるので、このような重心制御は、ZMP の操作を経由して重心の位置を制御していると解釈できる。これは、重心位置の軌道追従制御を経由して ZMP をノミナルな軌道に近づけようとする上述の方法と逆であり、本研究ではこのような立場から重心を制御するための制御則を検討する。

問題とするシステムでは ZMP の座標は質点の

座標 (x, y) を用いて, (6)式で表される. この式を x_{zmp} を入力 (x, y) を出力とするシステムと考えて Fig.2 のシステムと見なす. ZMP を操作することにより質点位置 x を制御する. 高さ y は ZMP から質点に作用する力の大きさ F を操作することで x と独立に制御することにする. 歩行運

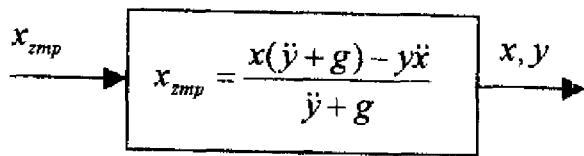


Fig. 2 ZMP の操作による制御

動へ応用可能なように, 質点を鉛直方向に一定の高さ h_{ref} を保ちながら x の正方向へ一定速度で移動させる制御則を考える. まず, 質点の高さを制御するために F の鉛直成分 f_y を次式のとおり定める.

$$f_y = h_{ref} - y - \dot{y} + mg. \quad (8)$$

これにより y は次の関係を満足するので h_{ref} に指数関数的に収束する.

$$m\ddot{y} + \dot{y} + y = h_{ref}, \quad (9)$$

次に, 質点の水平方向への座標 x を ZMP の座標の操作により制御することを考える. x の運動は(1)式を用いて,

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= \frac{\cos(\theta)}{\sin(\theta)}(h_{ref} - y - \dot{y} + mg), \\ &= \frac{x - x_{zmp}}{y}(h_{ref} - y - \dot{y} + mg). \end{aligned} \quad (10)$$

で表される. β を以下のとおり定義すれば,

$$\beta = \frac{my}{h_{ref} - y - \dot{y} + mg}, \quad (11)$$

式(10) は単純に次式で表される.

$$\beta\ddot{x} - x + x_{zmp} = 0. \quad (12)$$

y が h_{ref} へ指数関数的に収束するので, $\beta(t)$ は $\frac{h_{ref}}{y}$ へ指数関数的に収束する. そこで, \dot{x} を目標値に収束されるために ZMP の座標 x_{zmp} を次式に従い操作する.

$$x_{zmp} = x + k_v(\dot{x} - v_{ref}), \quad (13)$$

ここで, v_{ref} は質点の水平方向への速度の目標値であり, k_v 正のは設計ゲインである. \dot{x} の v_{ref} への収束は正定値関数 $V = (\dot{x} - v_{ref})^2$ がリアプノフ関数となっていることから理解できる. V を(12)および(13)式の解に沿って微分すれば,

$$\dot{V} = -\frac{2k_v}{\beta}(\dot{x} - v_{ref})^2 = -\frac{2k_v}{\beta}V. \quad (14)$$

となる. したがって, 正数 ε が存在して $\frac{1}{\beta} \geq \varepsilon > 0$, を満足すれば,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}(t) = v_{ref}. \quad (15)$$

すなわち質点は高さを一定に保ちながら水平方向へ一定速度で移動する. y が h_{ref} に収束しているものとし, $y = h_{ref}$ に固定して考えれば, 上の条件は $\frac{g}{h_{ref}} \geq \varepsilon > 0$ となる. したがって, \dot{x} の収束性は重力が存在しなければ補償されない. このことは無重力下で人間の歩行が困難であることと類似であり興味深い.

ロボットの停止状態への応用を考慮し, x を一定値 x_{ref} へ収束させるためには(13)式を以下のとおり変更する.

$$x_{zmp} = x + \beta\{k_p(x - x_{ref}) + k_v\dot{x}\}. \quad (16)$$

ここで, k_v および k_p は正の設計ゲインである. この場合には, 収束性を保証するためには $\beta \geq \varepsilon_2 > 0$ を満たす正数 ε_2 が存在すれば,

$$\ddot{x} + k_v\dot{x} + k_p(x - x_{ref}) = 0 \quad (17)$$

より x は x_{ref} に収束する.

2.3 簡単な例題

ここまでの議論は, 脚の機構に関しては具体的に考えていない. 本節では簡単な脚機構に対して

上述の制御則の適用例を示す。ただし、脚の質量が十分に小さいものと仮定し、支持脚のみを考慮することで議論を簡単化する。また、ロボットの運動は進行方向平面内に限定されるものとする。式の記述においては $\sin(\theta_i)$ および $\cos(\theta_i)$ を s_i および c_i により表す。

2.4 例 1

Fig.3の脚を考える。脚の質量を無視すれば、質

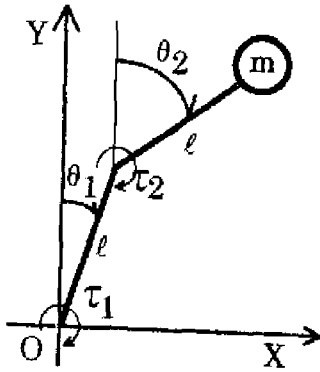


Fig. 3 例 1

点の運動は次式を満足する。

$$c_1\ddot{x} - s_1\ddot{y} - g s_1 = \frac{\tau_1}{ml}, \quad (18)$$

$$c_2\ddot{x} - s_2\ddot{y} - g s_2 = \frac{\tau_2}{ml}. \quad (19)$$

ZMPの座標はFig.1の問題と同様に表される。

$$x_{zmp} = \frac{x(\ddot{y} + g) - y\ddot{x}}{\ddot{y} + g}. \quad (20)$$

上式は関節へのトルク入力 τ_1 および τ_2 で表すことができる。

$$x_{zmp} = \frac{(\tau_1 + \tau_2)(s_1 c_2 - c_1 s_2)l}{c_2 \tau_1 - c_1 \tau_2}, \quad (21)$$

したがって、トルク入力に拘束を与えることにより x_{zmp} を足底の範囲内で任意に操作することができる。たとえば、 $x_{zmp} = \delta$ とするためには τ_1 および τ_2 は次の関係を満足すればよい。

$$\alpha_1(\theta_1, \theta_2, \delta)\tau_1 + \alpha_2(\theta_1, \theta_2, \delta)\tau_2 = 0, \quad (22)$$

ここで、

$$\alpha_1 = (s_1 c_2 - c_1 s_2)l - \delta c_2, \quad (23)$$

$$\alpha_2 = (s_1 c_2 - c_1 s_2)l + \delta c_1. \quad (24)$$

新たに入力信号 u を導入することにより τ_1 および τ_2 を次式で定める。

$$\tau_1 = \alpha_2 u, \quad (25)$$

$$\tau_2 = -\alpha_1 u. \quad (26)$$

$s_1 c_2 - c_1 s_2 \neq 0$ を仮定し、(25)および(26)式を(18)および(19)式に代入すれば次式を得る。

$$\begin{aligned} ml\ddot{x} &= \frac{s_1 \alpha_1 + s_2 \alpha_2}{c_1 s_2 - s_1 c_2} u \\ &= -(s_1 + s_2)l + \delta u \\ &= -x + \delta u, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} ml(\ddot{y} + g) &= -\frac{c_1 \alpha_1 + c_2 \alpha_2}{c_1 s_2 - s_1 c_2} u \\ &= -(c_1 + c_2)lu \\ &= -yu. \end{aligned} \quad (28)$$

したがって、質点の位置は u および ZMP に以下の制御則を適用すれば制御することが可能である。

$$u = \frac{1}{y} \{k_{py}(y - y_{ref}) + k_{vy}\dot{y} - mlg\} \quad (29)$$

$$x_{zmp} = \delta = x - \frac{1}{u} \{k_{px}(x - x_{ref}) + k_{vx}\dot{x}\}. \quad (30)$$

ここで、 (x_{ref}, y_{ref}) は (x, y) に対する目標値である。 k_p および k_v はフィードバックゲインである。また、 $|y|, |u| > 0$ を仮定している。この仮定は(14)式において、 $\frac{2}{\beta} \geq \epsilon > 0$ を仮定したことに相当している。

2.5 例 2

Fig.4の脚を考える。質点の座標 (x, y) の運動を力 f およびトルク τ で表せば次式となる。

$$mlc\ddot{x} - mls\ddot{y} - mgl s = \tau, \quad (31)$$

$$ms\ddot{x} + mc\ddot{y} + mgc = f. \quad (32)$$

ここで、 s および c は $\sin(\theta)$ および $\cos(\theta)$ をそれぞれ表す。 $x_{zmp} = \delta$ に指定するために τ および f に次式の拘束を与える。

$$\delta c f + (l - \delta s)\tau = 0. \quad (33)$$

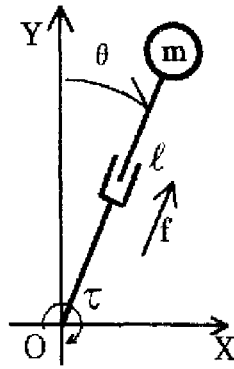


Fig. 4 例2

そのために τ および f を以下のとおり定める。

$$f = (l - \delta s)u, \quad (34)$$

$$\tau = -\delta ctu, \quad (35)$$

これにより質点の運動は次式に従う。

$$m\ddot{x} = (x - \delta)u, \quad (36)$$

$$m\ddot{y} = yu. \quad (37)$$

質点位置を制御するために、 u および ZMP を次式で定める。

$$u = \frac{1}{ly} \{-k_{py}(y - y_{ref}) - k_{vy}\dot{y} + m\ddot{y}_{ref}\} \quad (38)$$

$$x_{zmp} = \delta = x + \frac{1}{lu} \{k_{px}(x - x_{ref}) + k_{vx}\dot{x}\}. \quad (39)$$

3. 実験による検討

前述した制御則を直動関節を持つロボットに適用し、歩行実験を行った。実験に使用したロボットの外観を Fig.5 に示す。このロボットは、高さ 400 mm、幅 200 mm、全重量 1750 g である。Fig.6 に単脚時の脚機構の外観を示す。Fig.4 の脚を考える。制御性を向上させるために、モーター、エンコーダなどを胴体部に集中させ脚部をできるだけ軽量化している。また、上下動する胴体部からも足首へトルクを伝達する事を可能にするため、胴体部、脚部ともに平行リンクとした。これにより、胴体部にあるモーターから直動関節を経由し足首にトルクを伝達する事を可能にした。平行リンクの動き

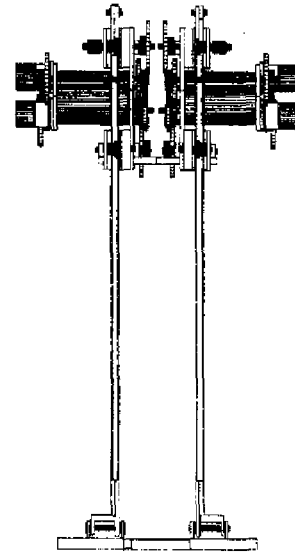


Fig. 5 制作したロボットの外観

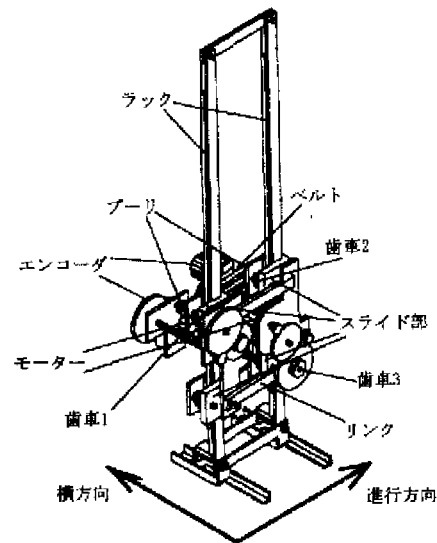


Fig. 6 脚の機構 (単脚のみ)

は、Fig.7 に示すとおりである。このロボットの重心位置を目標軌道に追従させ、制御した歩行実験の結果を Fig.8 に示す。どちらも重心位置の変位を示した。本実験において、ロボットの重心の地面からの高さは上下に変化させている。このグラフより、重心位置の進行方向、高さ方向共によく追従し滑らかに変位しているがわかる。これにより、製作した二足歩行ロボットが、前述した制御則により、重心高さを変化させながらの歩行が可能であること確認された。

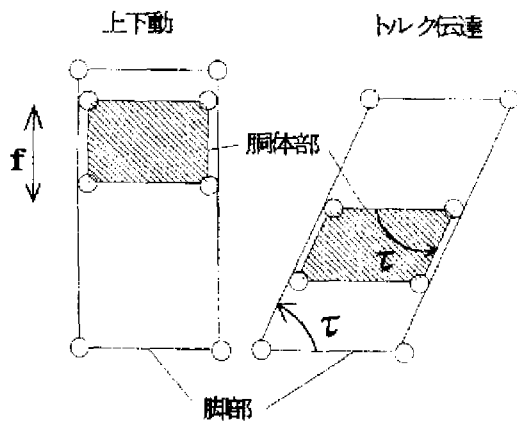


Fig. 7 平行リンクの動き

4. ZMPを限定した制御則

以上の議論は、ZMPが床面上で任意に操作可能との仮定に基づいていた。ここでは、ZMPの操作範囲に制限を与えて同様の制御を行った場合の解析を行う。再びFig. 1のモデルを用いる。質点の鉛直方向座標 y は x と独立に制御し、 h_{ref} に収束させることが可能と考えて、以下の議論は y を一定値 h_{ref} に固定して簡単化する。制御則(16)式において操作量に飽和を与え、次式のとおり変更する。

$$x_{zmp} = \begin{cases} \underline{x}_{zmp} & x + \beta^* \{k_v \dot{x} + k_p(x - x_{ref})\} < \underline{x}_{zmp} \\ \bar{x}_{zmp} & \bar{x}_{zmp} < x + \beta^* \{k_v \dot{x} + k_p(x - x_{ref})\} \\ x + \beta^* \{k_v \dot{x} + k_p(x - x_{ref})\} & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (40)$$

ここで、 $\beta^* = h_{ref}/g$ である。 \underline{x}_{zmp} および \bar{x}_{zmp} はZMPの上限および下限である。具体的なロボットにおいては、たとえば単脚支持期においてはFig. 9のように支持している足底の範囲におさまるようにこれらの値を決定する。 x が静止しているときZMPは質点の真下なので、 x に対する目標値 x_{ref} は \underline{x}_{zmp} および \bar{x}_{zmp} の間の値とする。制御のもとでの質点の運動は位相平面上に軌道をプロットすれば理解が容易である。Fig. 10は位相平面上での軌跡の例である。直線 l_1 および l_2 は飽和にかかる領域との境界を示しており、 x 軸との交

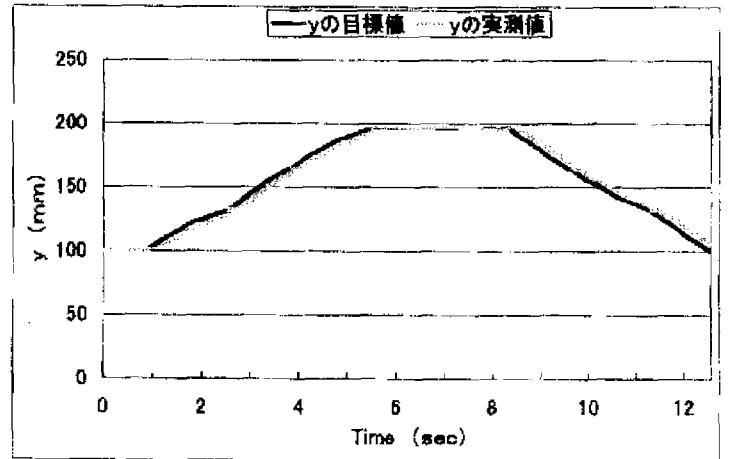
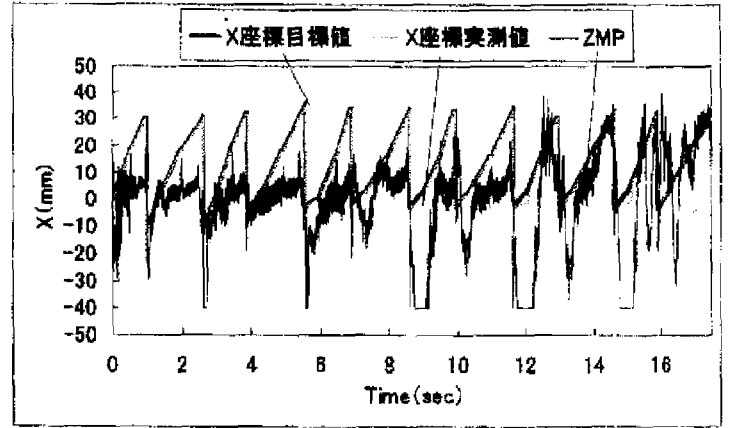


Fig. 8 実験結果

点 x_1 および x_2 は次式を満足する。

$$x_1 - \underline{x}_{zmp} = \frac{\beta^* k_p}{1 + \beta^* k_p} (x_{ref} - \underline{x}_{zmp}) > 0, \quad (41)$$

$$x_2 - \bar{x}_{zmp} = \frac{\beta^* k_p}{1 + \beta^* k_p} (x_{ref} - \bar{x}_{zmp}) < 0. \quad (42)$$

したがって、次の関係がある。

$$\underline{x}_{zmp} < x_1 < x_{ref} < x_2 < \bar{x}_{zmp}. \quad (43)$$

各領域内での x の運動は(12)式および(40)式より、以下のとおり表される。

- 領域I

$$\beta^* \ddot{x} - x + \underline{x}_{zmp} = 0 \quad (44)$$

- 領域II

$$\ddot{x} + k_v \dot{x} + k_p(x - x_{ref}) = 0 \quad (45)$$

- 領域III

$$\beta^* \ddot{x} - x + \bar{x}_{zmp} = 0 \quad (46)$$

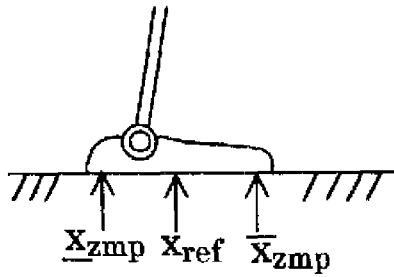


Fig. 9 x_{zmp} および \bar{x}_{zmp}

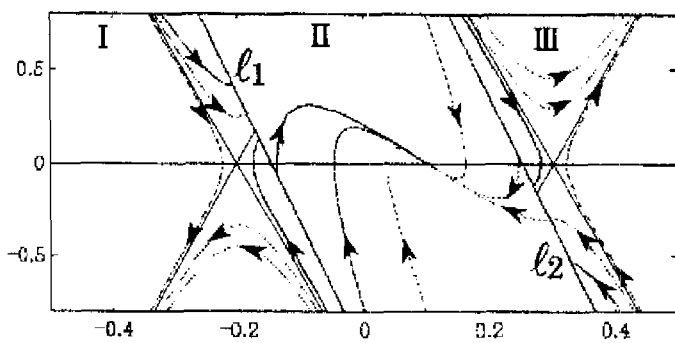


Fig. 10 位相平面 1 $k_v = 1.7, k_p = 2.9, h_{ref} = 0.3$

目標位置 $x = x_{ref}$ の安定性は領域を区別する直線 l_1 および l_2 の傾き $-\frac{1+\beta^*k_p}{\beta^*k_v}$ と領域 I および III における運動を表すシステム行列

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1/\beta^* & 0 \end{bmatrix} \quad (47)$$

の固有ベクトルの傾き, $-\frac{1}{\sqrt{\beta^*}}$ を比較することで判別することができる。Fig. 11(a) は直線の傾きが $-\frac{1}{\sqrt{\beta^*}}$ 以上, すなわち,

$$\frac{1+\beta^*k_p}{\beta^*k_v} \geq -\frac{1}{\sqrt{\beta^*}}, \quad (48)$$

の場合の軌跡の例を示す。図より分かるとおり, 領域 II より出発したどの軌跡も目標値 $(x_{ref}, 0)$ へ収束する。条件式(48)式を $\sqrt{\beta^*}$ に関して整理すれば次式の条件となる。

$$\frac{k_v - \sqrt{k_v^2 - 4k_p}}{2k_p} \leq \sqrt{\beta^*} (= \sqrt{\frac{h_{ref}}{g}}) \leq \frac{k_v + \sqrt{k_v^2 - 4k_p}}{2k_p}. \quad (49)$$

これより, 質点の高さ h_{ref} が十分に高くなるとこの条件は満足されなくなり, 発散する軌道が生じることが分かる。Fig. 11(b) は直線の傾きが $-\frac{1}{\sqrt{\beta^*}}$ より小さい場合, すなわち,

$$-\frac{1+\beta^*k_p}{\beta^*k_v} < -\frac{1}{\sqrt{\beta^*}}, \quad (50)$$

の時の軌跡の例である。このときには初期値に依存して, 解軌道は $(x_{ref}, 0)$ へ収束する場合と発散する場合がある。実際の歩行においては運動軌

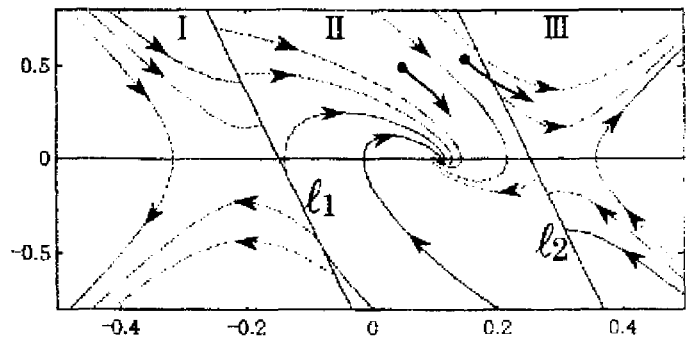


Fig. 11 位相平面 2 $k_v = 0.9, k_p = 0.6, h_{ref} = 1.0$

道が発散する場合には転倒を防ぐため支持脚の切り換えが必要である。条件(50)式より位置制御のフィードバックゲイン k_p が大きくなると発散する運動軌道が生じることが分かる。

5. おわりに

本論文は歩行ロボットのZMPを操作量として用いる制御則を提案し, 安定性に関する検討を行った。その目的は, 計画された運動への厳密な追従を必要とせず, ロボットの移動とバランスの確保を同時に行うことである。得られた結果は, 平面内を質点移動する単純なモデルに基づいているが, ロボット胴体部の姿勢変化が少なく近似的に質点移動と見なせる歩行運動へ応用可能と考えられる。人間に近い多自由度のロボットに対しては制御則の一般化が必要であり, 今後の課題である。

参考文献

- 1) F. Miyazaki and S. Arimoto, A Control Theoretic Study on Dynamical Biped Locomotion, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, **102**, 233 (1980)
- 2) T. Mita, T. Yamaguti, T. Kashiwase and T. Kawase, Realization of a high speed biped using modern control theory, Int. J. Control, **40-1**, 107/119 (1984)
- 3) 佐野, 古荘, 角運動量制御による2足歩行ロボットの3次元動歩行計測時動制御学会論文集, **26-4**, 459/466 (1990)
- 4) M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic, Biped Locomotion, Dynamics, Stability, Control and Application, Springer Verlag, (1990)
- 5) 高西, 石田, 山崎, 加藤 2足歩行ロボット WL-10RDによる動歩行の実現, 高西, 石田, 山崎, 加藤, 日本ロボット学会誌**3-4**, 67/78 (198)