ゼロモーメント点の操作による歩行ロボットの制御

水戸部 和 久* 矢 島 克 知* 那 須 康 雄*

Control of Walking Robots by Manipulating the Zero Moment Point

Kazuhisa Mitobe*, Katsutomo Yajima* and Yasuo Nasu*

This paper proposes a control method for walking robots by manipulating the zero moment point of the motion. The control law is developed based on a simple model, in which motion of a point mass in a sagittal plane is governed by the gravitation and reaction force from the ground. Stability of the system under the control is analyzed by using the state plots of the motion trajectory.

The objective of the control method is to control the balance of the robot without depending on the strict tracking control, which is required, in conventional methods, in order to prevent the robot from falling down.

Key Words: Walking Robot, Zero Moment Point, Control, Stability

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様々なものが考えられる。例えば、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での角運動量を目標の値に制御する方法 [2]、ロボットの重心軌道および支持脚切り換えタイミングを複合的に制御量とする方法 [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二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] [6]。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力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。

これらの二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 ZMP の目標軌道を設定し、それに基づいてロボットの運動をオフライン的に計画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、計画された運動を実現するための追従制御の性能がロボットのバランスにただ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。例えば、Vukobratovich らは脚を構成する関節の中の一つに補償入力を加える方法を示している [4]。また、近年脚光を浴びている本田技術研究所の人間型ロボットの制御においては ZMP の目標値を操作することでロボットの転倒を防ぐ方法を用いている [5]。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 を制御における操作量として扱う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

原稿受付 1998 年 11 月 19 日

*山形大学工学部

*Faculty of Engineering, Yamagata University

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しに二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もつことは人間の器用さを与えるうえ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。

2. ZMP の操作に基づく制御則

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 a 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、次式のとおき表される。

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

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

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

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。

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

Fig. 1 Motion of a point mass

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 のとりうる範囲は任意ではなく、例えば、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 章で考察する。

2.2 ZMP の操作則

ZMP の目標軌道に基づいてロボットの運動をオフライン的に計画する方法 [4] を、問題とするシステムに適用すれば以下の手順となる。まず ZMP の軌跡 $x_{zmp}(t)$ の目標を定める。これを式 (6) 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、式 (6) 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。式 (6) より分かるとおり、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、計画された運動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、計画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。例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

Fig. 2 Manipulation of the ZMP

る. このことを制御系の構成の観点から考えると, 重心位置が被制御量であり, ZMP が操作量であるものと解釈できる. このことは, 重心軌道を経由して ZMP の軌道を制御する従来方法において, ZMP が被制御量 (あるいはその一部) として扱われているのと逆の解釈である. 本研究では ZMP を操作量とする立場から, 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, 式 (6) 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ると 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 を次式のとおき定める.

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

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 の運動は式 (1) 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 を以下のとおき定義すれば,

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

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 $\frac{h_{ref}}{g}$ へ指数関数的に収束する. そこで, $\dot{x}$ を目標値に収束させるために 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 は正の設計ゲインである. $\dot{x}$ 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 を式 (12) および式 (13) の解に沿って微分すれば,

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

Fig. 3 Example 1

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保証されない. 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.

歩行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式 (13) 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 簡単な脚機構による例

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単純化する. 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, 質点の運動は次式を満足する.

$$c_1\ddot{x} - s_1\ddot{y} - gs_1 = \frac{\tau_1}{ml}, \quad (18)$$

$$c_2\ddot{x} - s_2\ddot{y} - gs_2 = \frac{\tau_2}{ml}. \quad (19)$$

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.

$$x_{zmp} = \frac{(\tau_1 + \tau_2)(s_1c_2 - c_1s_2)l}{c_2\tau_1 - c_1\tau_2}, \quad (21)$$

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。例えば、 $x_{zmp} = \delta$ 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、式 (25) および式 (26) を式 (18) および式 (19) に代入すれば次式を得る。

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

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

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。この仮定は式 (14) において、 $\frac{2}{\beta} \geq \varepsilon > 0$ を仮定したことに相当している。

以上の制御系のブロック図を **Fig. 4** に示す。本制御系は質点の位置制御ループおよび ZMP を指定位置へ拘束するための制御ループにより構成されている。位置制御ループでは ZMP の指令値 δ および入力 u に質点座標 (x, y) をフィードバックしている。ZMP の制御ループでは、位置制御ループで算出された δ に ZMP を拘束するようにロボットの関節トルク τ_1 および τ_2 に拘束をあたえている。また、ZMP はロボットの運動に依存して算出されるので常に安定領域、例えば単脚支持期における支持脚足底内におさまるとは限らない。ZMP を安定領域に制限するために図に示すとおり信号 δ に飽和要素を付加することが考えられる。この影響については 4 章で検討する。

2.5 例 2

Fig. 5 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。

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

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

Fig. 4 Block diagram of the controller

Fig. 5 Example 2

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。

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

そのために τ および f を以下のとおり定める。

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

$$\tau = -\delta cl u, \quad (35)$$

これにより質点の運動は次式に従う。

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

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

質点位置を制御するために、 u および ZMP を次式で定める。

$$u = \frac{1}{y} \{-k_{py}(y - y_{ref}) - k_{vy}\dot{y} + mg\}, \quad (38)$$

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

Fig. 6 Experimental leg mechanism

Fig. 7 Step response of the trunk position

3. 実験による検討

上述の制御則の歩行運動制御への適用可能性を検討するために、Fig. 6 に示す脚ロボットを用いてロボットの重心位置を制御する実験を行った。本ロボットの脚は平行リンクを組み合わせた構成であり、足底が床面に密着している限り胴体の姿勢が床面に対して一定に保たれる。ロボットの運動は平面内に限定されており、モータおよび減速機構が胴体部分に集中されているので脚の質量は胴体部分に比べ十分に小さいものと見なす。また、胴体位置の移動を質点移動と見なし、Fig. 3 と同様

Fig. 8 Step response under ZMP limitation

にモデル化する。リンク長さ $l = 138$ [mm] であり、総重量は 1.54 [kg]、一脚あたりの重量は 0.32 [kg] である。本ロボットの詳細に関しては文献 [7] に記されている。ロボットが一方の脚のみで重心を支持している状態で、胴体位置の床からの高さの目標値を 320 [mm] とし、 x を正方向へ 8 [mm] 移動したステップ応答を Fig. 7 に示す。グラフにおいて座標の原点はロボット足底部分の中央であり、 ± 27 [mm] の範囲が足底の範囲に相当している。また、グラフ中に示した ZMP の位置は制御則式 (30) により与えられる ZMP の指令値 δ の値を表す。本実験では胴体位置が目標位置に到達した後に行き過ぎを生じ、ロボットの足底が床から浮き上がり転倒してしまった。理論上は ZMP が足底内に限定されるならば足底の床からの浮き上がりは生じないものと考えられるので、制御則の ZMP の操作に Fig. 4 に示すとおり飽和要素を付加して限定を与え同じ実験を行った。この結果を Fig. 8 に示す。ZMP の限定により胴体位置の急激な立ち上がりが抑制されていることが分かる。また、胴体位置が最終的に目標位置へ収束し、ロボットが転倒することなく追従制御が有効に働いていることが分かる。なお、本実験においては ZMP の範囲の幅は 80 [mm] としている。この値は、減速機および伝達機構に存在する摩擦の影響を考慮し、実際の足底幅よりも大きく設定している。

4. ZMP を限定した制御則

2 章の議論において、質点の軌道追従に関する解析は ZMP の操作範囲を限定せずに行った。ここでは、再び Fig. 1 のモデルを用いて、ZMP の操作範囲に Fig. 4 に示すとおり制限を与

えて同様の制御を行った場合の解析を行う。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。制御則式 (16) において ZMP を操作する範囲に飽和を与え、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、例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収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 軸との交点座標 x_1 および x_2 を $\underline{x}_{zmp}$ および $\bar{x}_{zmp}$ と比較すれば次式を満足する。

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

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

したがって、次の関係がある。

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

Fig. 9 $\underline{x}_{zmp}$ and $\bar{x}_{zmp}$

Fig. 10 Phase plane for $k_v = 1.7, k_p = 2.9, h_{ref} = 0.3, x_{zmp} = -0.2, \bar{x}_{zmp} = 0.3$

各領域内での x の運動は式 (12) および式 (40) より、以下のとおり表される。領域 I および III においては ZMP は固定点となるので、質点の運動は文献 [3] に示されている線形倒立振子モードと等しくなる。

● 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

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

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. 10** 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 より出た軌跡、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。

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

これより、質点の高さ h_{ref} が十分に高くなれば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** は直線の傾きが $-\frac{1}{\sqrt{\beta^*}}$ より小さい場合、すなわち、

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

のときの軌跡の例である。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。条件式 (50) 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。

Fig. 11 Phase plane for $k_v = 0.9, k_p = 0.6, h_{ref} = 1.0, x_{zmp} = -0.2, \bar{x}_{zmp} = 0.3$

5. お わ り に

本論文は歩行ロボットのZMPの操作に基づく制御則を提案し、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に、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、平面内を質点が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,

- vol.102, pp.233-239, 1980.
 [2] 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", 計測自動制御学会論文集, vol.26, no.4, pp.459-466, 1990.
 [3] 梶田, 小林: "位置エネルギー保存軌道を規範とする動的2足歩行の制御", 計測自動制御学会論文集, vol.23, no.3, pp.281-287, 1987.
 [4] M. Vukobratovich, B. Borovac, D. Surla and D. Stokic: Biped Locomotion, Dynamics, Stability, Control and Application. Springer Verlag, 1990.
 [5] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: "The Development of Honda Humanoid Robot," Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.1321-1326, 1998.
 [6] 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", 日本ロボット学会誌, vol.3, no.4, pp.67-78, 1985.
 [7] 水戸部, 森, 相田, 那須: "非線形フィードバックによる二足歩行ロボットの制御", 日本ロボット学会誌, vol.14, no.8, pp.1194-1199, 1996.

水戸部和久 (Kazuhisa Mitobe)

1963年6月18日生。1988年新潟大学大学院工学研究科修士課程精密工学専攻修了。1990年新潟大学大学院自然科学研究科博士課程生産科学専攻中退, 山形大学工学部機械システム工学科助手, 1998年同助教授, 現在に至る。博士(工学)。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本機械学会, 精密工学会, IEEEの会員。(日本ロボット学会正会員)

那須康雄 (Yasuo Nasu)

1939年3月7日生。1964年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。同年山形大学工学部精密工学科助手, 1965年同講師, 1977年同助教授, 1984年同教授。現在, 同機械システム工学科教授, 工学博士。ロボットを用いた各種手作業代替システム, 2足歩行機械, 人工関節コンポーネントの高性能化に関する研究などに従事。日本機械学会, 精密工学会, 溶接学会, 日本材料学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)

矢島克知 (Katsutomo Yajima)

1974年5月17日生。1999年山形大学大学院工学研究科博士前期課程機械システム工学専攻修了, 現在(株)トキメック勤務。(日本ロボット学会学生会員)