

上体を考慮したコンパスモデルの歩容生成

安藤 知晃*, 山崎 容次郎**, 吉永 慎一**

Gait Generation of a Compass-Like Biped Model in Consideration of the Upper Body

Tomoaki ANDO*, Yojiro YAMASAKI** and Shinichi YOSHINAGA**

Abstract

In recent years, many walking robots are developed. However, their gaits are awkward and more unnatural than actual gaits human dose. Passive Dynamic Walking is enumerated as one of the solution. But, Passive Dynamic Walking has problems that the range of initial conditions on which Passive Dynamic Walking is realized is limited.

In this study, the region composed of initial angular velocity of both legs by which walking more than ten cycles becomes possible is defined as feasible region of walking. And we examine the expansion of the feasible region of walking. We first add the upper body to a compass-like biped model. In the second, we consider expansion of the feasible region of walking effect of frequency entrainment phenomenon by swinging the upper body. From the simulation results of the walking, we show effectiveness of the method using frequency entrainment phenomenon in expansion of the feasible region of walking.

Key Words: Biped robot, Passive Dynamic Walking

1. はじめに

現在、本田技研工業の ASIMO⁽¹⁾、川田工業の HRP-2⁽²⁾など、さまざまな 2 足歩行ロボットが開発されており、歩行が実現しているものが多くある。しかし、従来の 2 足歩行ロボットでは歩行動作中の脚の動作を示す歩容は人間が実際に行うなめらかな歩容と比べるとごちなく不自然である。この問題点の解決方法の一つとされるのが受動歩行(Passive Dynamic Walking)である。

受動歩行とは緩やかな坂道の上に置かれたアクチュエータを持たない歩行機械に適切な初期条件を与えると、坂道を歩き下るというものである。この受動歩行は、1990 年に McGeer⁽³⁾が、実験でその実現

の可能性を示した。受動歩行の歩容はなめらかで人間の歩容に近く、重力、慣性力をうまく利用しているため、アクチュエータによるエネルギー入力がなくとも歩行を繰り返すことができる。また、Goswami⁽⁴⁾、大須賀⁽⁵⁾らにより、歩行ロボットは、fig. 1 のようなコンパスモデルにモデル化され、シミュレーション解析が行われた。しかし、実験、シミュレーション解析から受動歩行にもいくつか問題点が挙げられている。まず、受動歩行が成立する初期条件の範囲が狭いという問題がある。モデルに与える初速度などの初期入力によっては歩行が不可能な場合がある。また、歩き下る斜面の角度、モデルの質量などのパラメータにも制限がある。

そこで、本研究では 10 周期以上歩行が成立する脚の初期角速度の領域を歩行可能領域と定義し、受

原稿受理 平成 19 年 11 月 30 日

*高松工業高等専門学校専攻科 機械電気システム工学専攻

**高松工業高等専門学校 機械工学科

動歩行の初期入力により制限される歩行可能領域の拡大を目的とする。まず、コンパスモデルに上体を付加し、その上体の振動により歩行可能領域を拡大することを検討した。コンパスモデルの歩容がリミットサイクルになることから、引込み現象を利用し、上体を一定周期で振動させることにより、歩行可能領域を拡大する手法を提案した。そこで、上体を一定周期で振動させたときのシミュレーション解析を行い、歩行可能領域が拡大されていることを示し、提案した手法の有効性を示した。

2. コンパスモデル

コンパスモデルにおける受動歩行の運動方程式を求める。まず、fig. 1 に示すコンパスモデルを構築する。つぎに、解析を簡単化するための解析条件を設定する。運動方程式については受動歩行を遊脚相と衝突相の二つに分けて求める。ここで、fig. 1 の地面に接している leg1 を支持脚、地面に接していない leg2 を遊脚と呼ぶ。遊脚が自由振動している状態を遊脚相と呼び、遊脚が地面に接触した状態を衝突相と呼ぶ。

2.1 モデル

本研究で扱うコンパスモデルの概要を fig. 1, table. 1 に示す。モデルは二本の剛体棒からなり、互いの端が摩擦のない joint により接続されている。歩行が実現すると leg1 と leg2 の役割は入れ替わる。

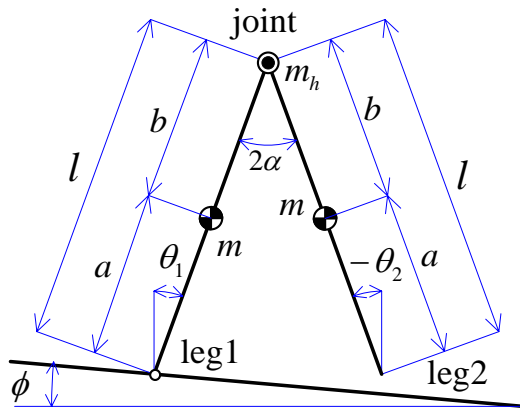


Fig. 1 Compass-like biped model

また、歩行運動の解析を簡単化するためモデルに以下の6つの条件を付加する。

- (1) 支持脚と地面の接点は滑らない。
- (2) 遊脚と地面が衝突するとき完全塑性衝突とする。
- (3) 衝突の際、二本の脚により支持される状態になるが瞬間的なものとして扱う。
- (4) 遊脚と支持脚がすれ違うとき遊脚は微小長さだけ縮むこととする。
- (5) 脚の慣性モーメントを無視する。
- (6) joint 部の摩擦を無視する。

Table. 1 Symbol explanation of Compass-like biped model

Symbol	Definition	Unit
l	Leg length	m
a	Distance between leg tip and lumped mass m	m
b	Distance between hip and lumped mass m	m
m	Lumped mass of each leg	kg
m_h	Lumped mass of hip	kg
θ	Leg angle	rad
α	Half inter leg angle	rad
ϕ	Ground slope	rad

2.2 運動方程式

2.2.1 遊脚相

遊脚相では、コンパスモデルを支持脚と地面の接点を支点とする二重振子の運動とみなせ、式(1)、式(2)の Lagrange 方程式により運動方程式を求めることができる。

$$\frac{d}{dt} \frac{dL}{dq} - \frac{dL}{dq} = 0 \quad (1)$$

$$L = T - U \quad (2)$$

運動方程式は、

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \quad \theta_2]^T \quad (3)$$

とすると、次式で表せる。

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{B}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = 0 \quad (4)$$

ここで、慣性行列である $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$ は、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} m(a^2 + l^2) + m_h l^2 & -mlb \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ -mlb \cos(\theta_1 - \theta_2) & mb^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

となり、遠心力項や重力項を含むベクトルである $\mathbf{B}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ は、

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} mlb\dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + \{m(a+l) + m_h l\}g \sin \theta_1 \\ -mlb\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - mbg \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。

この運動方程式は、leg1 が支持脚の場合を示しており、歩行が進行し、脚が入れ替わった場合は leg1 と leg2 の添え字を入れ替えればよい。

2.2.2 衝突相

衝突相は角運動量保存則によって、遊脚の地面との衝突による角速度の変化として導くことができる^{(4),(6)}．そこで、モデルの座標を fig. 2 のように設定し、衝突相の関係を求める．

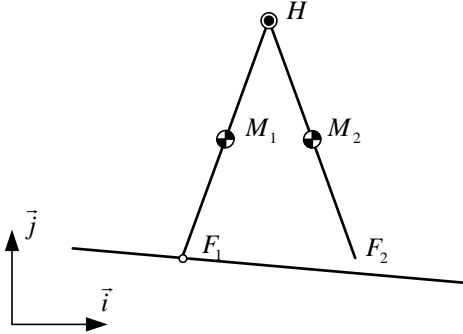


Fig. 2 Coordinates of Compass-like biped model

角運動量保存則は、fig. 2 の F_2 に示す衝突前の遊脚の先端まわりの系全体と、fig. 2 の H に示す2つの脚をつなぐ joint まわりの衝突前の遊脚の角運動量保存を考慮する．ここで、joint 部 H の速度を \vec{v}_h 、衝突前の遊脚の質点 M_1 の速度を \vec{v}_1 、衝突前の支持脚の質点 M_2 の速度を \vec{v}_2 とし、各量の右上付き添え字 “-” は、衝突直前の状態，“+” は、衝突直後の状態を表す．衝突相は、

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2]^T \quad (7)$$

とすると、次式で表せる．

$$\mathbf{a}^-(\theta^-)\dot{\theta}^- = \mathbf{a}^+(\theta^+)\dot{\theta}^+ \quad (8)$$

ここで、 \mathbf{a}^+ は、

$$\mathbf{a}^+ = \begin{bmatrix} m_h l^2 + ma^2 + ml(l - b \cos 2\alpha) & mb(b - l \cos 2\alpha) \\ -mbl \cos 2\alpha & mb^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

となり、 \mathbf{a}^- は、

$$\mathbf{a}^- = \begin{bmatrix} (m_h l^2 + 2mal)\cos 2\alpha - mab & -mab \\ -mab & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

となる．

3. コンパスモデルの解析

2. で求めた運動方程式を用いてコンパスモデルのシミュレーション解析を行った．まず、受動歩行の歩容を確認し、つぎに、初期角速度 $\dot{\theta}(0)$ の変化に対する歩行周期の変化を調べた．ここで、歩行周期とは一歩の歩行に要する時間を意味し、一方の脚が遊脚になった瞬間から支持脚になる瞬間までを一歩と呼ぶ．

3.1 解析条件

fig. 1 のコンパスモデルの各パラメータを $m=5[\text{kg}]$, $l=1[\text{m}]$, $a=0.5[\text{m}]$, $b=0.5[\text{m}]$, $m_h=10[\text{kg}]$ と、初期角度を $\theta_1(0) = -0.3 + \phi [\text{rad}]$, $\theta_2(0) = 0.3 - \phi [\text{rad}]$ と設定した．

まず、受動歩行の歩容を調べた．斜面角度 $\phi = 0.03[\text{rad}]$ 、初期角速度 $\dot{\theta}(0)$ を $\dot{\theta}_1(0) = 1.1 [\text{rad/s}]$, $\dot{\theta}_2(0) = -1.2 [\text{rad/s}]$ としたときの歩容を調べた．

つぎに、斜面角度 ϕ を $0.03 [\text{rad}]$ として、初期角速度 $\dot{\theta}(0)$ を table. 2 に示すように変化させたときの、歩行周期の変化について調べた．

Table. 2 Conditions of initial angular velocity $\dot{\theta}(0)$

	$\dot{\theta}_1(0) [\text{rad/s}]$	$\dot{\theta}_2(0) [\text{rad/s}]$	$\phi [\text{rad}]$
Case 1	1.0	-2.5	0.03
Case 2	1.1	-1.2	0.03
Case 3	1.2	0.0	0.03

3.2 解析結果

まず、受動歩行の歩容を調べた．コンパスモデルにおける leg1 の角度変化を fig. 3 に示す．縦軸が leg1 の角度、横軸が時間である．fig. 3 よりコンパスモデルの受動歩行は脚角度が周期的に変化しているため、歩行が成立していることがわかる．

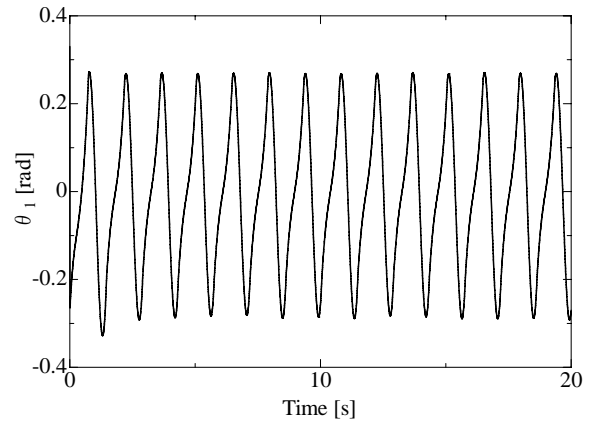


Fig. 3 Angle variation of leg1

つぎに、table. 2 の条件において解析を行い、結果を fig. 4, fig. 5 に示す．fig. 4 に table. 2 の条件で初期角速度 $\dot{\theta}(0)$ を変化させたときの $\theta_1 - \dot{\theta}_1$ 平面上の振る舞いを示す．縦軸が leg1 の角速度、横軸が leg1 の角度である．初期角速度 $\dot{\theta}(0)$ に依らず、軌道が同様に

閉じているため、受動歩行はリミットサイクルであることがわかる。

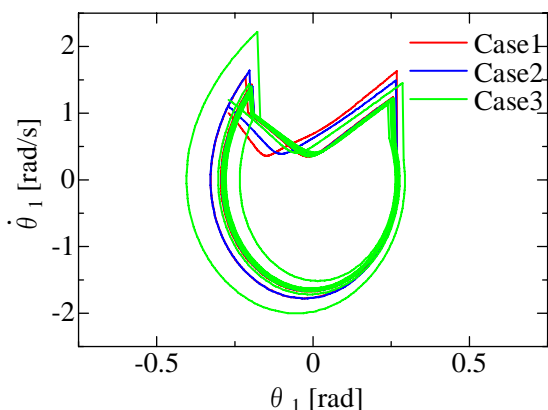


Fig. 4 Phase plane

fig. 5 に table. 2 の条件で初期角速度 $\dot{\theta}(0)$ を変化させたときの歩行周期の変化を示す。縦軸が歩行周期、横軸が歩行の回数である。fig. 5 より、斜面角度 ϕ が一定のときは初期角速度 $\dot{\theta}(0)$ に依らず歩行周期は一定値に収束していることがわかる。

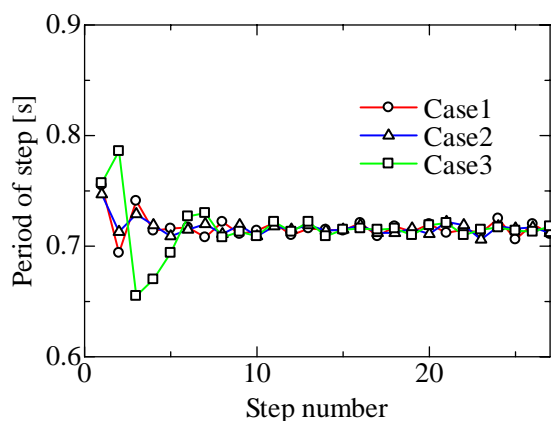


Fig. 5 Change of the gait cycle by the difference in initial angular velocity

4. 上体を付加したコンパスモデル

上体の振動により、歩行可能領域が拡大できることを検証するために、fig. 1 のコンパスモデルに上体を付加する。上体を付加したコンパスモデルを fig. 6 に示す。まず、上体を付加したコンパスモデルの運動方程式を求める。つぎに解析を簡単化するための解析条件を設定する。運動方程式については受動歩行を遊脚相と衝突相の二つに分けて求める。ここで、10 周期以上歩行が成立した状態のことを歩行可能と呼び、歩行可能な脚の初期角速度の領域を歩行可

能領域と呼ぶ。

4.1 モデル

fig. 1 のコンパスモデルに上体を付加したモデルの概要を fig.6, table. 3 に示す。モデルは fig. 1 の joint 部に剛体棒を接続したものである。モデルの条件は fig. 1 で設定した6つの条件と同様に設定する。また、上体は歩容に関係なく強制的に固定、振動といった動作をすると仮定する。

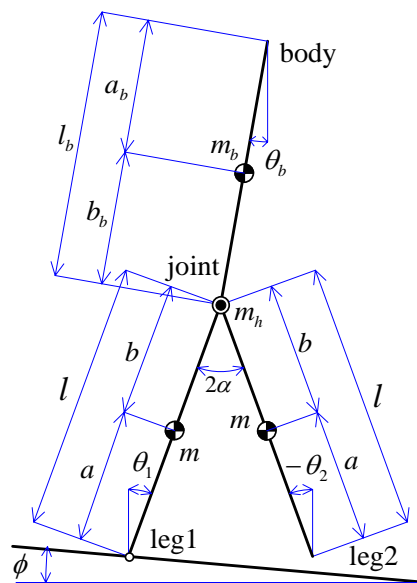


Fig. 6 Compass-like biped model which added the upper body

Table.3 Symbol explanation of Compass-like biped model which added the upper body

Symbol	Definition	Unit
l	Leg length	m
a	Distance between leg tip and lumped mass m	m
b	Distance between hip and lumped mass m	m
m	Lumped mass of each leg	kg
m_h	Lumped mass of hip	kg
l_b	Body length	m
a_b	Distance between body tip and lumped mass m_b	m
b_b	Distance between hip and lumped mass m_b	m
m_b	Lumped mass of body	kg
θ	Leg angle	rad

α	Half inter leg angle	rad
ϕ	Ground slope	rad

4.2 運動方程式

4.2.1 遊脚相

fig. 6 の上体を付加したコンパスモデルでは支持脚の地面との接点を支点とする二重並列振子の運動とみなせ、運動方程式はコンパスモデルと同様に

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_b]^T \quad (11)$$

とすると、Lagrange 方程式により次式で表せる。

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{B}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = 0 \quad (12)$$

ここで、慣性行列である $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$ は、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (13)$$

となり、各要素は次のように表せる。

$$a_{11} = m(a^2 + l^2) + m_h l^2 + m_b l^2$$

$$a_{12} = a_{21} = -mlb \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$a_{22} = mb^2$$

$$a_{13} = a_{31} = m_b l b_b \cos(\theta_1 - \theta_2)$$

$$a_{23} = a_{32} = 0$$

$$a_{33} = m_b b_b^2$$

遠心力項や重力項を含むベクトルである $\mathbf{B}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ は

$$\mathbf{B} = [b_1 \quad b_2 \quad b_3]^T \quad (14)$$

となり、各要素は次のように表せる。

$$b_1 = -mlb\dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + m_b l b_b \dot{\theta}_b^2 \sin(\theta_1 - \theta_b) - \{m(a+l) + m_h l + m_b l\} g \sin \theta_1$$

$$b_2 = mlb\dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + mgb \sin \theta_2$$

$$b_3 = -m_b l b_b \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_b) - m_b g b_b \sin \theta_b$$

4.2.2 衝突相

コンパスモデルと同様に衝突相の関係式を角運動量保存則より求めることができる。また、上体は強制的に動作すると仮定しているの上体の動作は衝突による影響は受けないと仮定し、衝突前後の上体の角速度の変化はないとする。そこで、簡単化のため joint 部の質量と上体の質量を同一と考え、上体の質量が joint 部に作用していると考え。衝突相は

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \quad \theta_2]^T \quad (15)$$

とすると、次式で表せる。

$$\mathbf{a}^-(\boldsymbol{\theta}^-)\dot{\boldsymbol{\theta}}^- = \mathbf{a}^+(\boldsymbol{\theta}^+)\dot{\boldsymbol{\theta}}^+ \quad (16)$$

ここで、 \mathbf{a}^+ は、

$$\mathbf{a}^+ = \begin{pmatrix} (m_h + m_b)l^2 + ma^2 + ml(l - b\cos 2\alpha) & ml(b - l\cos 2\alpha) \\ -mlb\cos 2\alpha & mb^2 \end{pmatrix} \quad (17)$$

となり、 \mathbf{a}^- は、

$$\mathbf{a}^- = \begin{pmatrix} \{(m_h + m_b)l^2 + 2mal\}\cos 2\alpha - mab & -mab \\ -mab & 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

となる。

5. 上体を付加したコンパスモデルの解析

4. で求めた運動方程式を用いて上体を付加したコンパスモデルのシミュレーション解析を行った。まず、受動歩行の歩容を確認した。つぎに、初期入力に依存している歩行可能領域について調べた。

5.1 解析条件

fig. 6 の上体を付加したコンパスモデルの各パラメータを $m=5[\text{kg}]$, $l=1[\text{m}]$, $a=0.5[\text{m}]$, $b=0.5[\text{m}]$, $m_h=10[\text{kg}]$, $m_b=5[\text{kg}]$, $\phi=0.03[\text{rad}]$ とし、初期角度を $\theta_1(0)=-0.3+\phi$ [rad], $\theta_2(0)=0.3+\phi$ [rad], $\theta_b(0)=0.3+\phi$ [rad] と設定する。また、上体を固定しているという仮定の下で解析を行った。

まず、受動歩行の歩容を確認する。初期角速度を $\dot{\theta}_1(0)=1.2$ [rad/s], $\dot{\theta}_2(0)=-1.5$ [rad/s], $\dot{\theta}_b(0)=0.0$ [rad/s] としたときの歩容を調べた。つぎに、初期角速度をさまざまに変化させ、歩行可能領域について調べた。

5.2 解析結果

fig. 7 に上体を付加したコンパスモデルにおける leg1 の角度変化を示す。縦軸が角度、横軸が時間である。fig. 7 より上体を付加したコンパスモデルの受動歩行は脚角度が周期的に変化しているため、歩行が成立していることがわかる。

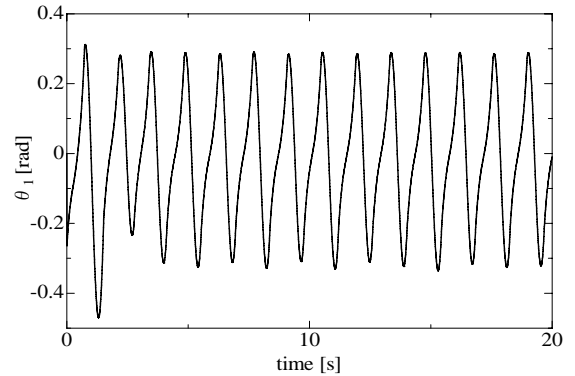


Fig. 7 Angle variation of leg1

fig. 8 に歩行可能領域を示す. 縦軸が leg2 の初期角速度, 横軸が leg1 の初期角速度を示す. fig. 8 中の ■印が歩行可能領域を表す.

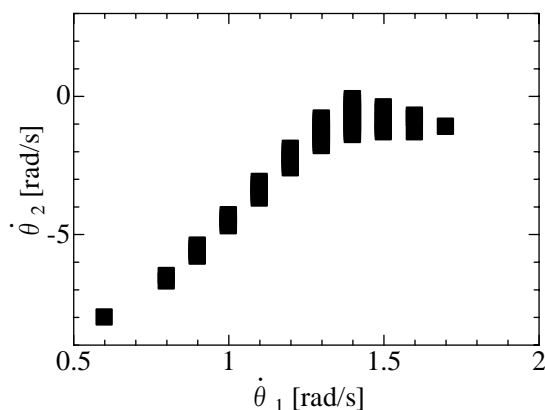


Fig. 8 The walk feasible region when fixing the upper body

6. 歩行可能領域の拡大

歩行可能領域を拡大することを試みる. そのための方法として引込み現象を利用し, 上体を一定周期で振動させる方法を提案する.

6.1 引込み現象

引込み現象とはリミットサイクルを持つシステムの外部から, 周期外力を加えた場合, リミットサイクルの周波数が外力の周波数に引き込まれる現象のことである. fig. 3 より受動歩行はリミットサイクルであると考えられる. そこで, 上体を一定周期で振動させればその周波数に歩行の周波数が引き込まれ, 歩行が持続しやすいと考えられる. したがって, 引込み現象を利用し, 歩行可能領域を拡大することを試みる. そこで, 上体を一定周期の正弦波で振動させる. 正弦波の振幅は 5 [deg]とする. また, 5. の解析結果より歩行周期はおおよそ 0.71 [s]に収束することから正弦波の周期も 0.71[s]とする.

6.2 解析結果

解析結果を fig. 9 に示す. fig. 9 中の ■印が歩行可能領域を表す. fig. 9 に示す歩行可能領域は fig. 8 に示す歩行可能領域より拡大している. よって, 上体の振動は歩行可能領域の拡大に効果があることがわかる.

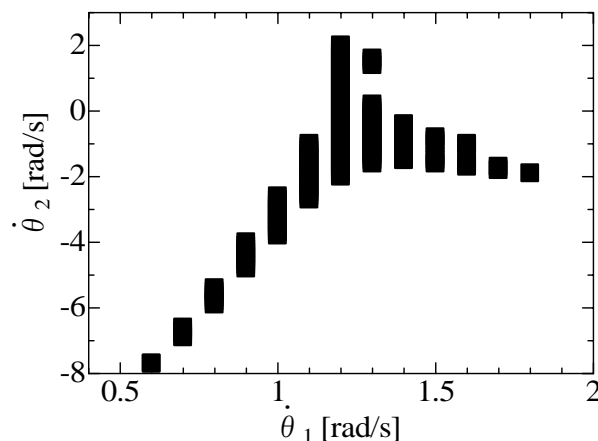


Fig. 9 The walk feasible region when swinging the upper body

7. おわりに

本研究では, 受動歩行の初期入力に依存している歩行可能領域を拡大することを目的とし, コンパスモデルに上体を付加したモデルを考案し, 評価した. その結果, 以下の結論を得た.

- (1) 上体を付加したコンパスモデルの運動方程式を求め, 解析を行い, コンパスモデルと同様に受動歩行が行えることを確認した. また, 上体を付加したコンパスモデルの受動歩行もリミットサイクルであることを確認した.
- (2) 上体の振動による引込み現象を利用し, 上体を歩行周期の収束値である 0.71 [s]の一定周期で正弦波状に振動させることで歩行可能領域を拡大できることを確認した.

参考文献

- (1) 本田技研工業, ASIMO, <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
- (2) 川田工業, HRP-2, <http://www.kawada.co.jp/mechsin dex.html>
- (3) T.McGeer : Passive Dynamic Walking, Int. J. of Robotics Research, Vol.9, No.2, pp.94-100, 1990.
- (4) A.Goswami, B.Thuilot and B.Espiau : Compass-like biped robot-Part I :Stability and bifurcation of passive gaits, Technical report 2996, INRIA, 1996.
- (5) 大須賀, 桐原 : 受動的歩行ロボット Quartet II の歩行解析と歩行実験, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.5, pp. 737-742, 2000.
- (6) 森田, 大塚 : コンパス型歩行モデルの力学的対称性に基づく歩容生成, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.5, pp.509-517, 2004.