

揺動質量の能動上下動を用いた2足ロボットの高速リミットサイクル歩行

Fast Limit Cycle Walking for Biped Robots using Active Up-and-Down Motion of Wobbling Mass

正花澤 雄太(東工大) 林 映光(東工大) 山北 昌毅(東工大) 浅野 文彦(北陸先端大)

Yuta HANAZAWA, Terumitsu HAYASHI and Masaki YAMAKITA Tokyo institute of technology,
 {hanazawa, hasyahi, yamakita}@ac.ctrl.titech.ac.jp
 Fumihiko ASANO, Japan Advanced Institute of Science and Technology, fasano@jaist.ac.jp

In this paper, we propose a novel method for fast limit cycle walking using active control of a wobbling mass. Limit cycle walkers achieving energy-efficient walking have been developed in the last decade. Many researchers have recently been studied methods for improving walking speed of limit cycle walkers. In human walking, humans swing their arms according to walking phases. We consider that this motion is an up-and-down motion for a mass and improves biped walking speed. We show that a biped robot with an upper body achieving fast limit cycle walking by the proposed method.

Key Words: Biped Robot, Limit cycle walking, Wobbling mass, Active walking

1. 緒言

直立2足歩行は床接地面積が狭く、狭い場所での方向転換が容易であることや、高い不整地踏破能力といった他の移動ロボットにはない大きな利点があり、これまでに様々な環境で安定した歩行を実現するロボットが開発されている [1][2]。さらに、歩行時のエネルギー効率を向上させるための研究が盛んに行われるようになってきており、McGeer が提唱した受動歩行 [3] の原理を利用した能動歩行ロボットが注目されている。近年、このようなロボットはリミットサイクル規範型ロボットと呼ばれ、ロボット自身の動特性を利用することでエネルギー効率の良い能動歩行を実現することができる [4][5][6][7]。

リミットサイクル型歩行の研究の主流は安定でエネルギーの良い歩行の実現であったが、歩行のエネルギー効率の改善だけではなく、歩行の高速化に関する研究も行われるようになってきた。リミットサイクル型歩行を高速化させる手法として、Asano らは円弧形状の足を持つロボットが優れたエネルギー効率と速度を両立した歩行を容易に実現できることを解析的に示している [6]。Hobbelen らはロボットの上半身姿勢を前方に傾けることで歩行速度が向上することを示している [4]。また、Hanazawa らは足首にバネとイナーターを有するロボットを開発しており、高速歩行に適した足首の機械的インピーダンスの設計をすることで、高速でエネルギー効率の良い能動歩行を実現している [7]。

これらの手法の適用によって、リミットサイクル歩行を高速化させることができるが、我々は現在の ZMP 規範の歩行ロボット [1][2] と同等以上の高速なリミットサイクル歩行の実現を目指している。この高速リミットサイクル歩行の実現には、既存の歩行の高速化手法とは大きく異なる概念の手法が必要であると考えられる。

この歩行を高速化する手法として、我々は歩行中の質量の上下運動に注目している。Rome らは、ヒトが重い荷物を背負っているとき、荷物をゴム (弾性要素) を用いて上下に揺動させることによって歩行中のエネルギー消費が抑制されることを示している [10]。Tanaka らは質量をバネで受動的に上下動させることによって連結リムレスホイールの歩行速度が向上することを示している [11]。また、Hanazawa らは2足歩行ロボットにおいても上部の一部の質量をバネで上下動させることで、類似した効果が得られることを確認している [12]。

さらに、ヒトの歩行時の腕振り運動を矢状面から観察すると、ある種の揺動質量の能動的な上下運動と見ることができる。低速な歩行時には腕を小さく振り、高速な歩行時には腕を大きく振る

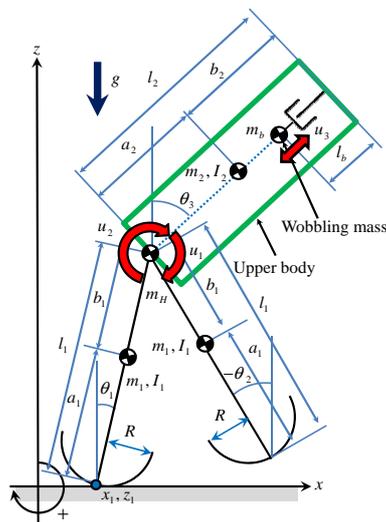


Fig.1 Model of biped robot

ことから、能動的な質量の上下動 (腕の振り運動) が歩行の高速化に寄与していると考えられる。そこで、本研究では上部に内蔵された揺動質量の上下運動によって、リミットサイクル歩行を高速化させる手法を提案する。数値シミュレーションによって提案手法の有効性を示し、さらに解析的にこの高速化メカニズムを示す。

2. 上部に揺動質量を有する歩行ロボットのモデリング

2.1 運動方程式

図1は本章で扱う歩行ロボットのモデルである。このロボットは円弧形状の足 (円弧足) を有しており、上部に質量 (揺動質量) を上下動させるためのアクチュエータを備えている。

モデルの運動方程式は次式で与えられる。

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = S_1 u + J_c(q)^T \lambda \quad (1)$$

ただし、 $q = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, l_b, x_1, z_1]^T$ は各関節角、揺動質量の位置、支持脚先端の座標ベクトル、 $M(q) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は慣性行列、 $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ はコリオリ・中心力項、 $G(q) \in \mathbb{R}^6$ は重力項、

$\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3]^T$ はアクチュエータからの入力トルクベクトル， $\mathbf{S}_1 \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$ は以下のアクチュエータトルクの変換行列，

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\mathbf{J}_c(\mathbf{q})^T \in \mathbb{R}^{N \times 6}$ はロボットの支持脚の拘束条件から得られるヤコビアン， N は拘束の数，そして $\lambda \in \mathbb{R}^N$ は以下の式により算出される拘束力ベクトルである．

$$\lambda = -\mathbf{X}(\mathbf{q})^{-1}(\mathbf{J}_c(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{T}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{u}) + \dot{\mathbf{J}}_c(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}) \quad (3)$$

$$\mathbf{X}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}_c(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{J}_c(\mathbf{q})^T \quad (4)$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{u}) = \mathbf{S}_1\mathbf{u} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (5)$$

2.2 ロボットの拘束条件

本稿では質量揺動時と質量固定時のロボットについて歩行解析を行う．この2つの場合ではロボットの拘束条件は異なるため， $\mathbf{J}_c(\mathbf{q})$ ， $\dot{\mathbf{J}}_c(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ は，質量揺動時と質量固定時において異なる行列を用いる．

2.2.1 質量揺動時

歩行中にロボットの支持脚の接地点が床面に拘束されることから，以下の拘束条件式が導かれる．

$$R(\cos \theta_1 - 1)\dot{\theta}_1 + \dot{x}_1 = 0 \quad (6)$$

$$-R \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 + \dot{z}_1 = 0 \quad (7)$$

これらの支持脚接地点の拘束条件式より，以下の $\mathbf{J}_c(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{N \times 6}$ と $\dot{\mathbf{J}}_c(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{N \times 6}$ を得る．

$$\mathbf{J}_c(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} R(\cos \theta_1 - 1) & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -R \sin \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{2 \times 1} \quad (8)$$

$$\dot{\mathbf{J}}_c(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} -R\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R\dot{\theta}_1 \cos \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.2.2 質量固定時

さらに，揺動質量が上下動しないよう機構的にロックしているとき ($l_b = l_0$) には次の拘束条件式が導かれる．

$$\dot{l}_b = 0 \quad (10)$$

したがって，式(6)，式(7)，そして式(10)から以下の揺動質量が拘束されているときの拘束行列 $\mathbf{J}_c(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{N \times 6}$ と，その時間微分 $\dot{\mathbf{J}}_c(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{N \times 6}$ が得られる．

$$\mathbf{J}_c(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} R(\cos \theta_1 - 1) & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -R \sin \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0}_{3 \times 1} \quad (11)$$

$$\dot{\mathbf{J}}_c(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} -R\dot{\theta}_1 \sin \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R\dot{\theta}_1 \cos \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.3 衝突方程式

足と地面との衝突を考慮するために，本稿では衝突方程式を用いる．

2.3.1 質量揺動時

本稿ではロボットの遊脚衝突直後に支持脚が切り替わるものとしており，このときロボットの幾何学的関係から以下の拘束条件式が導かれる．

$$l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + \{(R - l_1) \cos \theta_2 - R\} \dot{\theta}_2 + \dot{x}_1 = 0 \quad (13)$$

$$-l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 + (l_1 - R) \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 + \dot{z}_1 = 0 \quad (14)$$

これらの拘束条件から，以下の衝突時の瞬間的な拘束行列 $\mathbf{J}_I(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{N \times 6}$ が得られる．

$$\mathbf{J}_I(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 & (R - l_1) \cos \theta_2 - R & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -l_1 \sin \theta_1 & (l_1 - R) \sin \theta_2 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

2.3.2 質量固定時

揺動質量が上下動しないように機構的にロックしているとき ($l_b = l_0$) には次の拘束条件式が導かれる．

$$\dot{l}_b = 0 \quad (16)$$

したがって，式(13)，式(14)，そして式(16)より，以下の質量固定時における衝突時の瞬間的な拘束行列 $\mathbf{J}_I(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{N \times 6}$ が得られる．

$$\mathbf{J}_I(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 & (R - l_1) \cos \theta_2 - R & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -l_1 \sin \theta_1 & (l_1 - R) \sin \theta_2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

そして，衝突時の瞬間的な力ベクトル $\lambda_I \in \mathbb{R}^N$ と衝突直後の速度ベクトル $\dot{\mathbf{q}}^+ \in \mathbb{R}^6$ は下記の式で算出される．

$$\lambda_I = -\mathbf{X}_I(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{J}_I(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}^- \quad (18)$$

$$\mathbf{X}_I(\mathbf{q}) = \mathbf{J}_I(\mathbf{q})\mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{J}_I(\mathbf{q})^T \quad (19)$$

$$\dot{\mathbf{q}}^+ = (\mathbf{I} - \mathbf{M}(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{J}_I(\mathbf{q})^T\mathbf{X}_I(\mathbf{q})^{-1}\mathbf{J}_I(\mathbf{q}))\dot{\mathbf{q}}^- \quad (20)$$

ただし， $\dot{\mathbf{q}}^- \in \mathbb{R}^6$ は衝突直前の速度ベクトル， N は拘束条件の数である．したがって，質量揺動時の $\mathbf{J}_I(\mathbf{q})$ は式(15)，質量固定時の $\mathbf{J}_I(\mathbf{q})$ は式(17)を用いる．

そして，本稿で用いるロボットの機械的パラメータを表1に示す．

Table 1 Mechanical parameters

Symbol	Unit	Value
l_0	m	0.25
l_1	m	1.0
l_2	m	1.0
$a_1 = b_1 = l_1/2$	m	0.5
$a_2 = b_2 = l_2/2$	m	0.5
R	m	0.1
m_1	kg	5.0
m_2	kg	5.0
m_H	kg	5.0
m_b	kg	2.5
I_1	kg·m ²	4.17×10^{-1}
I_2	kg·m ²	4.17×10^{-1}

3. 制御則

3.1 遊脚振り運動と上体姿勢の制御

まず、平地歩行を実現するために、遊脚振り運動と上体の直立姿勢の維持のために以下の PD 制御を行う。

$$u_1 = -K_{P_1}(\phi_d - (\theta_1 - \theta_2)) - K_{D_1}(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) \quad (21)$$

$$u_2 = -K_{P_2}(\theta_3 - \theta_{3_d}) - K_{D_2}\dot{\theta}_3 + u_1 \quad (22)$$

ただし、 K_{P_1} と K_{P_2} は比例ゲイン、 K_{D_1} と K_{D_2} は微分ゲインであり、 ϕ_d は股関節の目標相対角、 θ_{3_d} は上体の目標角である。

3.2 揺動質量の能動制御

ヒトの定常歩行を観察すると、腕の振り運動(揺動質量)は上体の上下動に対してほぼ逆位相となっており、支持脚交換直後には両腕の質量は上体に対して高い位置に存在し、立脚中期では両腕の質量は上体に対して低い位置に存在し、支持脚交換直前には両腕の質量は再び上体に対して高い位置へと移動する。そして、この関係は低速歩行時でも高速歩行時においても、ほぼ常に成り立っている。このため、上体の揺動質量の上下運動の目標軌道として、次式で示すように上体の質点の上下運動の逆位相となるように与える。

$$u_3 = -K_{P_3}(l_b - l_{bd}) - K_{D_3}(\dot{l}_b - \dot{l}_{bd}) \quad (23)$$

$$l_{bd} = k(p_{u_z} - p_0) \quad (24)$$

ただし、 K_{P_3} は比例ゲイン、 K_{D_3} は微分ゲイン、 l_{bd} は l_b の目標軌道であり、 p_{u_z} は上体質点の高さ、 p_0 はオフセット、 k は制御ゲインである。

表 2 に本稿で使用する制御パラメータを示す。これらのパラメータはロボットが平地歩行を実現するように、簡単な試行錯誤によって決定した。

Table 2 Control parameters

Symbol	Value	Symbol	Value
K_{P_1}	100	θ_{3_d}	0.00
K_{D_1}	25	K_{P_3}	100
K_{P_2}	300	K_{D_3}	25
K_{D_2}	50	k	6
ϕ_d	0.60	p_0	8.5/6

4. 歩行解析

4.1 質量の能動的揺動による歩行速度向上

はじめに、構築した動力学シミュレータを用いて、提案手法の有効性を数値的に示す。図 2(a) は歩行中の支持脚の角度、図 2(b) は歩行中の上体質点の位置(高さ)、図 2(c) は揺動質量の上下動(高さの変動)を示している。これらの図から揺動質量の上下動が上体質点の上下動に対して、ほぼ逆位相となっていることが確認できる。つまり、揺動質量がロボット全体の CoM の上下動を抑制するような運動を行っている。

表 3 は、揺動質量を搭載していない時の歩行速度、揺動質量を搭載し位置を機能的に固定している時の歩行速度、そして提案手法により質量を能動的に上体の上下動に対して逆位相になるように揺動させた場合の歩行速度を示している。揺動質量を搭載し固定したものと揺動質量を搭載しない物を比較すると、重量の軽い揺動質量を搭載しない方が速い。しかしながら、提案手法を用いて質量を能動的に上下動することによって、質量を搭載しないものよりも歩行速度が大幅に向上しているのが確認できる。

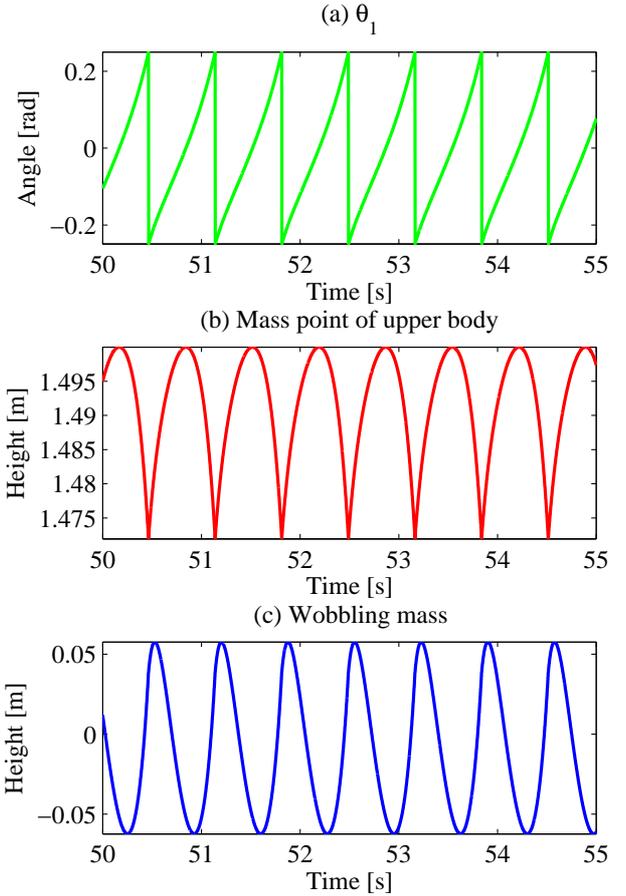


Fig.2 Stance leg angle, height of mass of upper body and up-and down motion of wobbling mass with respect to time

Table 3 Simulation results

	Walking speed [m/s]
揺動質量無し	0.609
揺動質量固定	0.528
提案手法(能動上下揺動)	0.746

4.2 提案手法による歩行速度向上メカニズムの解析

提案手法によって、歩行ロボットの速度が大幅に向上することを数値的に示した。これは我々の提案手法の有効性を示すに十分な結果であると考えられるが、何故ロボットの上下動に対して、能動的に揺動質量を逆位相に動かすことがこのような結果を有むのかを示すには至っていない。そこで、さらに動力学の観点から、提案手法によって歩行速度が向上するメカニズムを示す。

まず、原点から上体質点までの位置ベクトルは次式で定義することができる。

$$\mathbf{p}_u = \begin{bmatrix} x_1 + l_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin \theta_3 \\ 0 \\ z_1 + l_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (25)$$

ただし、ベクトルの各成分はそれぞれ図 1 で表わされる歩行モデルでの x , y , z 軸方向の成分である(2次元なので y 軸方向は 0)。このうち、揺動質量の目標軌道として利用している次式の上体質点の高さ(z 成分)に着目する。

$$z_1 + l_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos \theta_3 \quad (26)$$

5. 結言

本研究では、リミットサイクル型歩行ロボットの歩行を高速化する新しい手法として、能動的な揺動質量の上下動制御による高速化手法を提案した。はじめに、数値シミュレーションにより提案手法を用いることによって、リミットサイクル歩行の速度が大幅に向上することを示した。さらに、この歩行速度が向上するメカニズムを動力学の観点から解析し、歩行速度が向上するメカニズムを解析的に示した。

現在、本研究で示した理論を検証するための実験機を開発しており、今後はこの実験機を用いて提案手法の有効性を検証する予定である。また、本稿では詳細を述べなかったが、歩行の高速化に伴い遊脚衝突時のエネルギー損失が多少増加してしまうため、これを改善するような機構なども提案していきたいと考えている。

文献

- [1] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa: "Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point", *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1620–1626, 2003.
- [2] HONDA, "Humanoid Robot ASIMO," [Online]. Available: <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>.
- [3] T. McGeer: "Passive dynamic walking", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 9, no. 2, pp. 62–82, 1990.
- [4] D.G.E. Hobbelen and M. Wisse: "Controlling the walking speed in limit cycle walking", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 27, no. 9, pp. 989–1005, 2008.
- [5] D. Hobbelen, T. de Boer, and M. Wisse: "System overview of bipedal robots flame and tulip: Tailor-made for limit cycle walking", *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2586–2491, 2008.
- [6] F. Asano and Z. W. Luo: "Efficient dynamic bipedal walking using effects of semicircular feet", *Robotica*, vol. 29, no. 3, pp. 351–365, 2011.
- [7] Y. Hanazawa, H. Suda, Y. Iemura and M. Yamakita: "Active walking robot mimicking flat-footed passive dynamic walking", *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 1281–1286, 2012.
- [8] S. H. Collins, A. Ruina, R. Tedrake, and M. Wisse: "Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers", *Science*, Vol. 307, No. 5712, pp. 1082–1085, 2005.
- [9] D. G. E. Hobbelen and M. Wisse: "Limit cycle walking", *Humanoid Robots, Human-like Machines*, chapter 14, 2007.
- [10] L. C. Rome, L. Flynn and T. D. Yoo: "Biomechanics: Rubber bands reduce the cost of carrying loads", *Nature*, vol. 444, no. 7122, pp. 1023–1024, 2006.
- [11] D. Tanaka, F. Asano and I. Tokuda: "Gait Analysis and Efficiency Improvement of Passive Dynamic Walking of Combined Rimless Wheel with Wobbling Mass", *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 151–156, 2012.
- [12] 花澤 雄太, 林 映光, 山北 昌毅, 浅野 文彦: "揺動質量を利用した能動2足ロボットの歩行性能改善", 第18回ロボティクスシンポジウム予稿集, 2013.

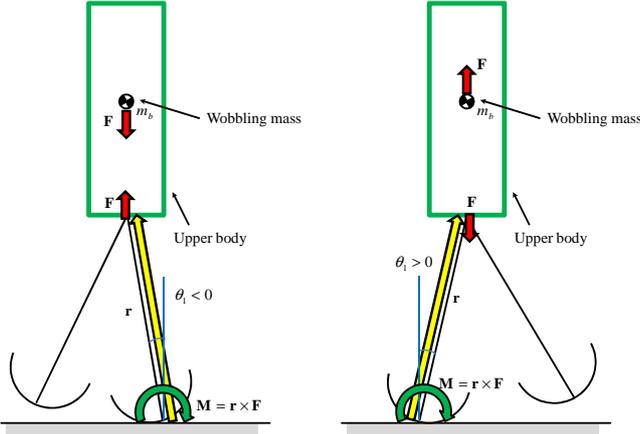


Fig.3 $\theta_1 < 0$ (when wobbling mass is dropped)

Fig.4 $\theta_1 > 0$ (when wobbling mass is raised)

解析の簡単化のために、足の円弧半径が小さい ($R \approx 0$) のものとして考えると、 $z_1 \approx 0$ となり、また $a_2 \cos \theta_3$ についても、PD 制御によって上体姿勢角を垂直 ($\theta_3 \approx 0$) となるように制御しているので、

$$a_2 \cos(\theta_3) \approx a_2 \times 1 \approx a_2 \quad (27)$$

となる。これらより、上体質量中心の高さを決定するのは式 (26) の第二項 ($l_1 \cos \theta_1$) であり、これは支持脚角度 θ_1 の大きさに依存する。このため、支持脚切り替え直後から上体質量中心の高さはほぼ単調に増加し、 $\theta_1 = 0$ で上体質点の高さは最大となる。そして、 $\theta_1 = 0$ を超えて θ_1 が単調増加していくと、上体質点の高さはほぼ単調に減少することとなる。揺動質量はこの上体質量中心の上下動に対して逆位相に動くように制御している。このため、図 3 に示すように、提案手法による揺動質量の制御は $\theta_1 < 0$ の時、ロボットを前方へと推進させる反力を生み出すことになる。そして、図 4 に示すように、 $\theta_1 > 0$ の時にもロボットを前方へと推進させる反力を生み出す。結果として、この反力は接地点周りのモーメントを生み出すこととなり、このモーメントは次式で定義される。

$$M = r \times F \quad (28)$$

ただし、 r は接地点から腰までの位置ベクトル、 F は揺動質量が生み出す力の反力のベクトルである。この効果は、接地点周りに仮想的な足首を持ち、仮想的な足首トルクを生み出していると考えることができる。

ここで、支持脚角度 θ_1 が単調増加し、かつ厳密に $\theta_1 < 0$ の期間では揺動質量の生み出す反力の向きが正、 $\theta_1 > 0$ の期間では揺動質量の生み出す反力の向きが負の関係を満たすものとする。このとき、平衡点近傍でこの仮想的な足首トルクが生み出すエネルギーは次式のように与えられる。

$$E = \int_{T_s}^{T_0} \dot{\theta}_1 (-F l_1 \theta_1) dt + \int_{T_0}^{T_e} \dot{\theta}_1 (F l_1 \theta_1) dt \quad (29)$$

仮定を満たす時、式 (29) の T_s から T_0 の間の右辺第一項は常に正となり、そして、 T_0 から T_e の間の第二項についても正となる。つまり、この仮定を満たすように揺動質量の制御を行った場合、揺動質量の生み出す仮想的なトルクは歩行を推進するためのエネルギーを生み出すことができる。

我々の提案手法では、歩行中の上体質量の位置と逆位相になるように揺動質量の制御を行なっているため、結果としてほぼこの仮定を満たすこととなり、ロボットの歩行を推進するための力学的エネルギーを生み出す。この結果として、提案手法によって 2 足歩行ロボットの速度が大幅に高速化していると考えられる。