遊脚と支持脚で切り替えなしのインピーダンス制御にもとづく歩行支援制御

中村隆央*, 園川真太, 青木元伸, 金潤河, 藤本博志, 堀洋一(東京大学)

Walking Assistant Control based on Unswitched Impedance Controller between Swing and Stance Phases

Takahiro Nakamura $^{\ast},$ Shinta Sonokawa, Motonobu Aoki, Yunha Kim,

Hiroshi Fujimoto, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

This paper proposes a novel control method for walking assist devices using unswitching impedance control, which is more robust against parameter variation that arises during walking. It is shown that the proposed method is effective in reducing acceleration and jerk. Relevant simulations and experiments are conducted and the results are provided with discussion.

キーワード:歩行安定化,倒立振子,パワーアシスト,インピーダンス制御 (walking stabilization, inverted pendulum, power assist, impedance control)

1. はじめに

近年,日本では高齢化が進んでおり,その懸念事項とし て歩行困難者の増加が挙げられる。歩行困難者は,歩行に障 害があることにより外出頻度が減少する⁽¹⁾。その結果,ま すます身体が衰え,寝たきりになるというケースも少なく ない。このような患者にとって,歩行機能をアシストする 歩行補助具が求められており,今後需要はますます高まっ ていくと考えられる。

歩行補助具には用途により様々な種類があるが,近年で はモータを搭載し,動力をもつ歩行補助具の開発が進んで いる⁽²⁾⁽³⁾。

歩行補助具のメカトロニクス化により,歩行補助具が人 に合わせた出力をすることが可能となる。これにより,人は 違和感なく通常の歩行と同じ感覚で歩行補助具を使えるよ うになると考えられ,人と相性の良い出力をするための研 究が構造,制御などの面からのアプローチがなされている。

人の歩容生成方法に近い歩行動作を実現させる研究は盛ん に行われている。McGhee が受動歩行⁽⁴⁾を発表して以来,こ の手法を基本とした歩行の研究が数多く行われてきた (5)(6)。 この受動歩行を応用した歩行支援具の歩行安定化制御手法 として, Hata の歩幅推定アルゴリズムがある⁽⁷⁾⁽⁸⁾。この アルゴリズムは歩行のための指令値として、従来用いられ ていた関節角度ではなく歩幅を用いている。より人の感覚 に近い歩幅を指令値として用いることにより、人の歩容に 近いアルゴリズムの生成を提案している。本研究では、安 全で快適な歩行補助具の開発への取り掛かりとして、人の 歩容生成アルゴリズムにより近い歩行安定化制御手法を構 築することを目的とする。そのため本稿では, 文献(7)で 提案された先行研究である歩幅推定アルゴリズムを歩行安 定化アルゴリズムとして用いた際の問題点である、衝撃力 を考慮していないという点について、支持脚と誘客で歩行 が移り変わる期間での切り替えがないインピーダンス制御 の適用により解決する手法を提案する。さらに本手法の有



効性を検証するため,歩行ロボットを制作し,行った実験 について述べる。

2. 歩幅推定アルゴリズム

〈2・1〉歩行モデルの概要本節では、セミパッシブ な二足歩行モデルを用いた歩幅推定による歩行安定化アル ゴリズムについて述べる。歩行は矢状面に限定し、図1の ように倒立振子にモデル化する。足の質量は全体の質量の 10%程度なため、歩行に影響を与えにくいと考え無視して いる。

図 1 において, m [kg] は重心の質量, r [m] は脚長の長 さ, l [m] は股から重心までの長さ, ϕ_1 [rad] は支持脚の倒 れこみ角, ϕ_2 [rad] は上体の倒れこみ角, F [N] は脚長の半 径方向にかかる力, τ [Nm] は上体にかかるトルクである。

〈2・2〉 歩行モデルの運動方程式の導出 図1のモデ ルにおいて, *r*, *φ*₁, *φ*₂ を変数とし, ラグランジュ法を用い て運動方程式を導出すると

$$\dot{\phi} = \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\phi}_1 \\ \ddot{\phi}_2 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} -r\dot{\phi}_1^2 - l\cos(\phi_1 - \phi_2) + g\cos\phi_1 \\ \frac{l\sin(\phi_1 - \phi_2)\dot{\phi}_2^2 - g\sin\phi_1 + 2\dot{r}\dot{\phi}_1}{r} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} (1)$$

となる。ただし,

$a_{11} = \frac{-\cos(2(\phi_{1} - \phi_{2}))l^{2} + l^{2} + 2J}{2J} \cdots \cdots$
$a_{12} = \frac{-l(r+l\cos(\phi_1-\phi_2))\sin(\phi_1-\phi_2)}{Jr} \cdots \cdots$
$a_{21} = \frac{l^2 \sin(2(\phi_1 - \phi_2))}{2Jr} \cdots \cdots$
$a_{22} = -\frac{l^2 \cos^2(2(\phi_1 - \phi_2)) + l^2 + 2rl \cos(\phi_1 - \phi_2) + 2J}{2Jr} \cdots \cdots \cdots (5)$
$a_{31} = -\frac{l\sin(\phi_1 - \phi_2)}{J} \cdots \cdots$
$a_{32} = \frac{r + l \cos(\phi_1 - \phi_2)}{Jr} \cdots \cdots$
$u_1 = \frac{F}{m} \cdots \cdots$
$u_2 = \frac{\tau}{m} \cdots \cdots$

である。

次に、歩行の際上体はほとんど傾かないため、式 (1) を 1 $\gg \phi_1 \gg \phi_2$ として非干渉化、線形化する。非干渉化の ため、入力 u_l はフィードフォワード項として、式 (10) と する。

すると,式(1)は

$\dot{\phi}=$	$\mathbf{A}_l \boldsymbol{\phi}$	$+ \mathbf{B}_l \mathbf{u}$	$1_l \cdots$	 	 • • • •	 	(11)
$\phi =$	$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix}$			 • • • • •	 ••••	 	(12)
$\mathbf{A}_l =$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{array}{c} 0\\ \frac{g}{r+l}\\ 0\end{array}$	$\begin{array}{c} 0\\ -\frac{gl^2}{Jr}\\ \frac{gl}{J} \end{array}$		 	 	(13)
$\mathbf{B}_l =$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{array}{c} 0\\ -\frac{J+r}{J}\\ \frac{r+}{Jr} \end{array}$	$\left[\frac{l+l^2}{r^2}\right]$	 	 	 	(14)

と線形化される。式 (11) を用いると, r と φ₂ に関して式 (15) と式 (16) が成り立つ。

〈2・3〉 歩行安定化のための制御入力式の導出 rにつ いての極を λ_1^r [rad/s], λ_2^r [rad/s], ϕ_2 についての極を $\lambda_1^{\phi_2}$ [rad/s], $\lambda_2^{\phi_2}$ [rad/s] とし, r^{ref} [m] を脚長の指令値とする。 式 (15), (16) の式より $r \to r^{ref}, \phi_2 \to 0$ と安定化させるた めのフィードバック制御器を,極配置法により設計する。

$$u_{1} = -\lambda_{1}^{r}\lambda_{2}^{r}(r^{ref} - r) + (\lambda_{1}^{r} + \lambda_{2}^{r})\dot{r}\dots\dots(17)$$
$$u_{2} = -\frac{Jr}{r+l}\left(\lambda_{1}^{\phi_{2}}\lambda_{2}^{\phi_{2}} + \frac{gl}{J}\right)\phi_{2} + \frac{Jr}{r+l}\left(\lambda_{1}^{\phi_{2}} + \lambda_{2}^{\phi_{2}}\right)\dot{\phi}_{2}(18)$$

式 (17), (18) により,入力 u₁, u₂ → 0 と安定化されると,式 (11) より式 (19) が得られる。

次に,式(19)は不安定極を持つため,脚の切り替えを離散 的な制御入力と考えることで倒れこみ角 φ₁を安定化させ る。人の歩行モデルを倒立振子で仮定すると

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_1\\ \ddot{\phi}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1\\ \frac{g}{r_{ref}+l} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1\\ \dot{\phi}_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1\\ 0 \end{bmatrix} u_D[k]\delta(t-kT)(20)$$

と表される。 $u_D[k]\delta(t - kT)$ は脚の切り替えによる入力で あり幾何学的には歩幅に相当する,この切り替えを用いて ϕ_1 を安定化する。式 (20)を一歩進むのに必要な時間T [s] で離散化したとき

とすると

$$\begin{split} \phi_D[k+1] \\ &= A\phi_D[k] - Bu_D[k] \\ &= \begin{bmatrix} \cosh bT & \frac{1}{b}\sinh bT \\ b\sinh bT & \cosh bT \end{bmatrix} \phi_D[k] - \begin{bmatrix} \cosh bT \\ b\sinh bT \end{bmatrix} u_D[k](22) \end{split}$$

と表される。ただし, $b^2 = \frac{g}{r_{ref} + l}$ である。

次に,式 (22) をもとに $u_D = F\phi_D$ として,状態フィー ドバックにより安定化を行う。 $F = \begin{pmatrix} f_1 & f_2 \end{pmatrix}$ は極配置に より求める。A - BFの固有値を $\mu_1^{\phi_1}$ [rad/s], $\mu_2^{\phi_1}$ [rad/s], ϕ_{ref} [rad/s] を倒れこみ角の指令値, ϕ_{ref} [rad/s] を倒れこ み角速度の指令値とすると, u_D は式 (23) のようになる。

$$u_D = f_1\left(\phi_{end}\left[k\right] - \frac{\phi^{ref}}{2}\right) + f_2\left(\dot{\phi}_{end}\left[k\right] - \dot{\phi}^{ref}\right) + \phi^{ref} \dots \dots \dots \dots (23)$$

このとき式 (23) において第一項と第二項は切り替わる直前 の支持脚を指令値に追従させるための項であり,第三項は 着地した脚から次の支持脚への切り替えを行うための歩幅 指令値の項となっている。

以上の制御系をブロック図で表すと図 2、図 3 となる。 ϕ_1 の安定化には、脚の切り替えを用いて安定になる歩幅 u_D を入力として用いる。



図 2 歩幅推定アルゴリズムの歩行制御系 Fig. 2. Block diagram of stride-estimation algorithm



図 3 歩幅推定アルゴリズムの詳細 Fig. 3. Detail of stride-estimation algorithm

〈2・4〉 脚の切り替え時における脚長と倒れこみ角の条 件 図 4 に脚の切り替え時の歩行モデルを示す。 ϕ_{end} [rad], r_{end} [m] は切り替え前の倒れこみ角度と脚長, ϕ_{st} [rad], r_{st} [m] は切り替え後の倒れこみ角度と脚長を表す。脚の切 り替え時には、重心の位置と速度が連続になる条件より、歩 幅 u_D を用いて、図 4 より幾何学的に、式 (25)-式 (28) が 導ける。

ϕ_{st}	$=\phi_{end}-u_D \cdots \qquad (25)$	
r_{st}	$= r_{end} \frac{\cos \phi_{end}}{\cos \phi_{st}} \dots $	
$\dot{\phi}_{st}$	$=\frac{\dot{r}_{end}}{r_{st}}\sin u_D + \frac{r_{end}}{r_{st}}\dot{\phi}_{end}\cos u_D\cdots\cdots\cdots(27)$	
\dot{r}_{st}	$= \dot{r}_{end} \cos u_D - r_{end} \phi_{end} \sin u_D \cdots \cdots (28)$	

〈2・5〉 歩行のシミュレーション結果本節では,前節 まで示したアルゴリズムについて,支持脚の動きと足の切 り替えのシミュレーションを行った。各パラメータを表1 に示す。

シミュレーションでは、直立の状態から歩行を開始して



図 4 切り替え時の歩行モデル Fig.4. Walking model when changing legs

表 1 足に関する各パラメータ Table 1. Parameters of leg

Mass m [Kg]	50
Leg length r_0 [m]	1.0
Reference of leg length r^{ref} [m]	0.95
Reference of angular velocity $\dot{\phi}^{ref}$ [rad]	-1.0
Reference of angle ϕ^{ref} [rad]	-0.5
Walking cycle T [s]	0.5
Inertia of leg J [kgm ²]	0.41
Initial value of angle ϕ_0 [rad]	0.0
Initial value of leg length r_0 [m]	1.0
Pole $\lambda_1^r \text{ [rad/s]}$	-10
Pole $\lambda_2^r \text{ [rad/s]}$	-20
Pole $\lambda_1^{\phi_2}$ [rad/s]	-5
Pole $\lambda_2^{\phi_2}$ [rad/s]	-6
Pole $\mu_1^{\phi_1}$ [rad/s]	0.1
Pole $\mu_2^{\phi_1}$ [rad/s]	0.1



いる。倒れこみ角が増え 0.5 s 毎に脚を切り替えているため, 0.5 s 毎に同じ歩容が現れていれば歩行が安定化していることになる。

シミュレーション結果を図5に示す。図5(a)より,脚を 切り替えた直後は脚長が減少し,2.0 s 以降は脚の切り替え から0.3 s あたりから指令値に追従していることがわかる。 また,図5(b)より,2.0 s 以降は0.5 s 毎の規則的な周期に 収束し,歩行が安定化されており,歩幅が安定化のための 制御入力として機能していることがわかる。

また, 2.0 s 以降は 0.5 s 毎に ϕ_1 が -0.1 rad から 0.1 rad に切り替わっているため、歩幅は 0.2 rad で安定している。 このことより、脚の切り替えによって歩行が安定化していることがわかる。

〈2・6〉脚の切り替え時にかかる衝撃力 前節までに、 歩行モデルを運動方程式で表し、歩行安定化のために必要 な歩幅を求めた。しかし、従来のアルゴリズムは脚の切り 替え時の着地の衝撃力を考慮していない。本節では、従来 のアルゴリズムにおいて鉛直方向に発生する衝撃力につい て検証する。足の切り替えの直後の Δt [s] の間に速度が Δv [m/s] 変化したと仮定する。切り替え時に受ける衝撃力をデ カルト座標で計算すると、衝撃力は、式 (29) で計算できる。



衝撃力の計算のために,速度ベクトルを水平方向の *x* 成分 と鉛直方向の *y* 成分に分割する。

足の切り替え前後の脚長 r_{old}, r_{new} と倒れこみ角度 ϕ_{old}, ϕ_{new} を,図 6(a)のように定義する。また,足の切り 替え直前の足の速度ベクトルを v_{old} [m/s], Δt [s] 後の足 の速度ベクトルを v_{new} [m/s] とする。速度ベクトル v は図 6(b)のように半径方向のベクトル r と,回転方向のベクト $\nu r \dot{\phi}_1$ の和であり,鉛直方向と水平方向の速度ベクトルを 計算すると式 (30),(31)と表すことができる。

$$v_x^{old} = \dot{r}_{old} \cos \theta_{old} - r_{old} \dot{\theta}_{old} \sin \theta_{old} \qquad \dots \dots (30)$$

$$v_x^{old} = \dot{r}_{old} \sin \theta_{old} + r_{old} \dot{\theta}_{old} \cos \theta_{old} \qquad \dots \dots (30)$$

$$v_y^{new} = \dot{r}_{new} \cos \theta_{new} - r_{new} \dot{\theta}_{new} \sin \theta_{new} \qquad \dots (31)$$

$$v_x^{new} = \dot{r}_{new} \sin \theta_{new} + r_{new} \dot{\theta}_{new} \cos \theta_{new}$$

この足の切り替え前後における鉛直方向の速度の変化は, 式 (32) のように計算できる。

歩幅推定アルゴリズムにおける,心の鉛直方向の速度と加 速度のシミュレーション結果を図 7(a),図 7(b)に示す。衝 撃力は加速度に比例するため,0.5 s 毎の足の切り替えの 着地時には,重心に大きな衝撃力がかかっていることがわ かる。

そこで,次章では脚の切り替えの着地時に生じる衝撃力 緩和のため,歩幅推定アルゴリズムにインピーダンス制御 の適用について述べる。

3. 切り替えなしインピーダンス制御の適用

(3・1) 切り替えがない歩行制御系 従来のインピー ダンス制御による歩行制御系は、歩行のフェイズによって 制御器の切り替えを用いていた。従来のインピーダンス制 御系を図8に示す。Cはコントローラ、Pはプラント、G_m はモデルインピーダンスを示す。インピーダンス制御では G_mの慣性や粘性や弾性を変更し、みせかけのプラントを 変えることができる。

しかし,歩行補助具においては人による外乱が入ってく るため,制御器の切り替えがあることで,安定性に問題が 生じる。そこで,本節では脚長の制御系にセンサレスイン ピーダンス制御を適用することで,遊脚と支持脚で切り替







tor of stance leg 図 6 歩行モデルの概要

Fig. 6. Walking model



図 7 歩行シミュレーション時の鉛直方向の速度と加速度 Fig. 7. Vertical velocity and acceleration of walking simulation

えのない制御系を提案する。制御器の切り替えがないこと により、歩行のフェイズに関係なく衝撃力の緩和が可能で ある。また、切り替えの際の位置指令の変化もなくすこと ができる。

提案したインピーダンス制御を用いた支持脚,遊脚の脚 長の制御系のブロック図を図9に示す。*P_n*はノミナルプラ ント,*Q*はローパスフィルタを表している。

次に,図9のブロック図において,支持脚時と遊脚時の 脚長の挙動を説明する。まず,支持脚の際には床反力 F が 生じる。その床反力 F に対して,モデルインピーダンス P_m が衝撃力を吸収する役割を果たす。遊脚の際には,床反力 F が小さいため,モデルインピーダンスからの出力 r* が 小さい。そのため,インピーダンス制御を用いない場合と 同じ挙動を示す。このようにして,インピーダンス制御を 歩行に適用した際は,制御器の切り替えを行うことなく歩 行制御を行うことが可能である。

〈3・2〉シミュレーションによる制御器の切り替えの有無の比較 制御器の切り替えの有無による違いを検証するためにシミュレーションを行う。制御器の切り替えのタイミングは図10に示す。シミュレーションでは、脚長の指令値を遊脚から支持脚となるように与え、支持脚となるときに地面との衝突による外乱を与える。0.0 s-0.5 s は遊脚期で、0.5 s-1.0 s は支持脚期と考え、0.5 sから図11のように外力を与える。シミュレーションの各パラメータは表2に示す。シミュレーションのパラメータは次章にて説明する実験機のものを用いている。

今回は比較のため、切り替えのある制御器には図12の制 御系を用いる。インピーダンス制御は外乱オブザーバを用 いて推定した力を用いて行い、位置制御に切り替えたとき

図 8 従来のインピーダンス制御を用いた歩行制御 Fig. 8. Conventional Walking control using impedance control

図 9 センサレスインピーダンス制御を用いた 脚長の制御系

Fig. 9. Sensorless impedance control of leg length

3 10 前仰益を切り替え、 スイッチの時間 Fig. 10. Time of controller switching

図 11 遊脚と支持脚の 切り替え時に発生する外力 Fig. 11. External force when changing legs

図 12 切り替えのあるインピーダンス制御 Fig. 12. Switched impedance control (Conventional)

表2 シミュレーションの谷パラ

Table 2. Parameters of controller and plant

Walking cycle T [s]	0.5
Mass m [kg]	8
Initial value of swing leg $r_{sw,0}$ [m]	0.25
Pole of closed loop [Hz]	12
Inertia of model impedance m_m [Kg]	80
Elasticity of model impedance k_m [Kg/s ²]	8000

には、位置指令値 r* は切り替えた瞬間を初期値 r₀ として 位置制御の指令値 r^{ref} までローパスフィルタを通して徐々 に変化していく。

図 13, 図 14 にシミュレーションの結果を示す。図 13 よ り、0.5 s 後には床反力が加わることで、インピーダンス制 御によりバネ特性を示していることがわかる。図 14 より、 従来法の場合は 0.6 s 付近において、制御器の切り替え時 に加速度と躍度が大きくなっているのがわかる。これは位 置制御に切り替えたときに指令値の変動があるためであり、

(b) Jerk comparison
 図 14 シミュレーション結果 (脚長の加速度と躍度)
 Fig. 14. Simulation results (leg acceleration and jerk)

加速度と躍度に大きな変動があることは、歩行時の快適性, 安全性に悪い影響を与える。一方,提案した制御器では指 令値の変化がないため加速度の変化が抑えられていること がわかる。以上より,制御器の切り替えをなくすことによ り,加速度の変化を抑え,快適な歩行が実現できると考え られる。

4. 歩行ロボットを用いた制御器の切り替えの有無の比較

〈4・1〉 実験機の概要 本節では、歩行アルゴリズムの検証のために、制作したコンパス型ロボットについて述べる。本節では、本実験機の構成について説明を行う。本 実験機は、倒立振子を用いた歩行モデルにおける歩行アル ゴリズムを検証するため、脚に関節機構ではなく直動機構 を用いている。一般に人の歩行モデルは倒立振子にモデル 化されている^(?) そのため、人の歩行アルゴリズムの基礎検 討としては、歩行モデルとして倒立振子を用いることは妥 当であると言える。

本実験機の駆動源は、両脚のモータ、両股のモータの計4 つである。またそれぞれの値を計測するため、両脚、両股 それぞれにエンコーダを取り付けた。また動作は矢状面の みに限定しているため、動作の際はリニアガイドを用いて いる。また、周波数特性を計測しフィッティングを行った結 果、プラントを $P = \frac{1}{J_{S+B}}$ としたときに、 $J = 1.88 \times 10^{-3}$ [Kgm²], B = 0.984 [Kgm²/s] の値が得られた。以降の実験 では、この値をプラントのモデルとして用いる。

〈4・2〉切り替えの有無による脚長の加速度の比較本 実験機を用いて,脚長の制御器に切り替えの有無による加 速度の比較を行った。脚長の指令値は0とした。加速度の 測定は,エンコーダの値を2階微分することで取得した。 本実験機の脚に2.0 s 付近でステップ外乱を与える。さら に制御器の切り替えがあるものはその後にインピーダンス 制御から位置制御に切り替える。実験結果を図16に示す。

制御器のスイッチが行われる 3.8 s において,切り替え がある場合には大きな加速度の変動があるが,切り替えが ない場合には加速度の変動がみられないことより,切り替

図 15 実験機・コンパス型ロボット Fig. 15. Compass type walking robot

図 16 脚長の加速度の比較 Fig. 16. Acceleration comparison

えを用いないことの有効性が示された。

5. まとめと今後の課題

歩行装具にはロボットにおける歩行制御と比べると,より 一層の安全性,快適性が求められる。そこで,本研究では, 歩行装具における歩行安定化アルゴリズムに着目し,快適 性の向上を目指しインピーダンス制御を適用した。さらに, 人によるパラメータ変動に対しロバストである制御器の切 り替えのないインピーダンス制御を提案し,加速度,躍度 を抑制できることをシミュレーションと実験にて示した.

今後の課題として,提案した制御系を歩行へと応用して いくため,実験によって検証していくことが必要である。 また,本稿ではコンパスモデルによる歩行アルゴリズムを 用いたが,人と同じ関節機構を用いた実験機での検証を行 うことも課題としてあげられる。

参考文献

- (1) Tadayoshi Asaga, Kazutaka Kurosawa: "An Analysis of the Factors Affecting Going out for the Physically Disable", Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers, Vol. 7, pp. 1–10 (1994) (in Japanese)
- (2) ottobook:C-leg,
- http://c-leg.ottobock.ocm/jp/index.php?lang=jp
- (3) HONDA:Walking rythem assistance, http://www.honda.co.jp/robotics/rhythm/
- (4) T. McGeer: "Passive Dynamic Walking", The Int. J. of Robotics Research, Vol. 9, No. 2, pp.62–82 (1990)
- (5) Ikemata Yoshito, Akihito Sano: "Phenomenon, Principle and Application of Passive Dynamic Walking", Journal of The Robotics Society of Japan, Vol. 30, No. 4, pp. 350–355 (2012)(in Japanese)
- (6) Fumihiko Asano: "On Physical Principles of Dynamic Gait Generation based on Passive Walking", Journal of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, Vol. 49, No. 10, pp. 405–410 (2005)(in Japanese)
- (7) Naoki Hata, Yoichi Hori: "Walking Stabilization Control for wearable walking assist devices", Proc. IEE of Japan Technical Meeting Record, No. 1, pp. 59–64 (2005) (in Japanese)
- (8) F.Gubina, H.Hemami, Robert B. McGhee: "On the Dynamic Stability of Biped Locomotion", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. BME-21, No. 2, pp. 102–108 (1974)
- (9) Hartmut Geyer, Andre Seyfarth, Reinhard Blickhan: "Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running", proceedings of the royal society, Vol. 273 No. 1603, pp. 2861-2867 (2006)