遊脚足部の着地時刻の早まり/遅れ情報に基づく

歩行機械の対地適応機構の研究*

(第2報, 対地適応機構を有する歩行機械の動特性)

樋口 勝^{*1}, 武田 行生^{*1}
舟橋 宏明^{*2}, 松下 知己^{*3}A Terrain Adaptive Strategy of a Biped Walking Machine Based on an
Information of Advance/Delay of Landing Time of a Transfer Foot(2nd Report, Dynamic Characteristics of a Walking Machine
with the Terrain Adaptive Mechanism)Masaru HIGUCHI^{*4}, Yukio TAKEDA,
Hiroaki FUNABASHI and Tomoki MATSUSHITA^{*4} Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology,
2-12-1 Oh-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

This paper has proposed the range of design parameters of a walking machine for a leg-disabled persons and aged persons. In order to make clear this range, we presented its dynamic model with consideration of joint clearances and elasticity of legs. A general model for analyzing contact conditions-collision, stick and slip-between bodies has been introduced for dynamic simulation of motions at several states of walking including stumbling and falling of the machine. In order to realize a stable walking a delay time of clutch control has been introduced, and its appropriate value has been clarified. The influences of joint clearance, leg stiffness and center of gravity on the stability of walking have been analyzed. The region of leg stiffness and center of gravity by which walking machine can walk stably have been made clear. A prototype of the walking chair has been designed and manufactured based on the simulation result. While walking on terrain with random steps, the body attitude angle of the prototype has been kept within ± 2 degree.

Key Words: Robotics, Biped Walking Machine, Terrain Adaptation, Multibody Dynamic Simulation, Collision, Friction, Stick-Slip

1. 緒 論

福祉社会の高度な発展が求められる今日, 下肢障害者の日常生活環境全般における移動支援技術の確立が急務である. 著者らはその一つとして「歩行椅子」と呼ぶ福祉用移動機械を提案し, その研究・開発を行ってきた⁽¹⁾⁽³⁾. 歩行椅子は常に同一の運動を行う本体の外側につけられた2本の脚とこれらの脚の内側にあり半周期位相のずれた運動を行う1本の脚, これら脚の先端に取り付けられた足部および座面の固定された本体より構成される. 歩行椅子のような福祉用の移動機械は, 凹凸を含む水平面, 階段, 傾斜面, 段差等の歩行面を直進および旋回移動する機能を経済性, 信頼性, 耐久性等を十分に確保して実現できる機構系と制御系により実現されなければならない. このような背景から, 著者らは第1報において, 水平面, 傾斜面, 階段等の

歩行面の巨視的な形状の変化に対して予め半固定的に計画された周期運動により歩行椅子の脚運動を創成することとし, 歩行面の巨視的な形状の変化の上に存在する不規則かつ微小な凹凸, うねり, 段差等の微視的な形状の変化に対しては高度なセンサや複雑な制御アルゴリズムを用いることなく安定な歩行を実現する脚機構の構成およびその制御アルゴリズムについて論じた. そしてその機構を具体的に提案するとともにその有効性を準静的な歩行実験により明らかにした.

実際の歩行椅子においては, 脚の弾性, 軸受すきま, 減速機のバックラッシュ等が存在し, また脚は不等速運動を行う. 設計時にはこれらの影響を考慮して歩行の安定性を評価し, 歩行椅子の脚節の剛性, 重心位置等の機構部分の動的パラメータおよび制御系のパラメータを同時に最適化することが重要である. 特に歩行椅子のように, 遊脚の着地とともに脚内のクラッチの状態を切り替えて対地適応を行う歩行機械においては, 遊脚の着地前後の微小時間内の挙動を詳細に評価しなければならない. 従来歩行機械の動特性に関する研究は種々行われており⁽⁴⁾⁽⁵⁾, 支持脚切り替え問題を扱った研究はいくつかあるものの⁽⁶⁾⁽⁷⁾, 支持脚切り替え時の歩行機械の動特性, 特に遊脚着地直後の微小時間内の安

* 原稿受付 2002年6月20日.

^{*1} 正員, 東京工業大学大学院理工学研究科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1).^{*2} 正員, フェロー, 芝浦工業大学工学部(〒108-8548 東京都港区芝浦3-9-14).^{*3} (株)三菱総合研究所.

E-mail: masaru@mech.titech.ac.jp

定性について設計を意識して検討したものは著者の知る限り見受けられない。

本報では、著者らが開発中の歩行椅子を具体的な適用対象として取り上げ、脚の弾性や遊び等が存在しても安定な歩行を実現するための制御アルゴリズムの提案および動的パラメータの領域の決定を動的シミュレーションにより行うとともに、それらの妥当性について実験的に検討を加える。

2. 対地適応機構

第1報において、歩行面上の不規則かつ微小な凹凸、うねり、段差等の微視的な形状に対して安定な歩行を実現する機能を対地適応機能と呼び、この機能を両脚支持状態における推進・従動足部の選択および足部と本体姿勢角の従属/独立関係の切り替えを遊脚足部の着地時刻の早まり/遅れに応じて行うことで実現するアルゴリズムを提案した。そしてその具体的な脚機構として図1に示す脚機構を提案した。図において、原動軸が J_2 である4節近似直線運動機構($J_1 \sim J_5$)により半周期にわたる近似等速直線運動区間(x_b 軸に平行)を有する運動が創成され、これがパンタグラフ機構($J_5 \sim J_{10}$)により拡大されて足関節 $A(J_{10})$ の基本運動となっている。二つの擬似平行クランク機構(J_5, J_7, J_{13}, J_{14})、($J_7, J_{10}, J_{11}, J_{12}$)により本体姿勢が歩行面とほぼ平行に保持されると共に遊脚着地時刻が計画値より若干早まるように機構寸法が定められている。着地センサとして足部のつま先および踵にリミットスイッチのような on/off のセンサが装着され、直進対偶 J_{18} および足関節 A にそれぞれクラッチが配置されている。そしてこれら二つのクラッチを図2に従って固定/解放することにより足部の x_b 軸方向並進運動(XM)および足関節 A 回りの回転運動(RM)を断続する。このような構成により静的な範囲では対地適応が可能であることをすでに実験により確認している⁽¹⁾。

3. 歩行機械の動的シミュレーション

3.1 歩行機械モデル 脚節や本体の不等速運動による慣性力や遊脚着地時の衝撃力等の無視できない動的な歩行速度において、脚の弾性や遊びを考慮して対地適応機能を論じるには、遊脚着地前後の微小時間内の足部に作用する力および足部の運動を含め、歩行機械の挙動を詳細に解析する必要がある。特に遊脚着地情報によりクラッチの制御を行うことから足部の歩行面に対する滑りや躓きを含む接触状態と足部と歩行面間の接触力を精密に把握する必要がある。そこで任意の物体間の衝突、滑り、分離を考慮して複数の物体の動力学解析が可能な、著者らがブレーキの解析で用いた個別要素法⁽⁸⁾を用いて解析を行う。

歩行機械は進行方向を含む鉛直面内(O-XZ)で運動す

Fig.1 Construction of a leg mechanism

Fig.2 Control schedule of the clutches installed at J_{18} (XM) and A (RM)

るものとし、その解析モデルとして図3に示すように本体、二つの足部および歩行面の4物体がばね-ダッシュポットで結合された系を考える。ただし、足部と本体間には基本運動を与えるためのアクチュエータを置く。

本体を $i=0$ 、外脚を $i=1$ 、内脚を $i=2$ とし、それぞれに動座標系 $o_i-x_i z_i$ を固定する。また鉛直軸と本体座標系の z_0 軸のなす角を本体の姿勢角 β とし図のように前傾した場合を正とする。質量および重心回りの慣性モーメントをそれぞれ m_i 、 I_i と表す。このとき、各物体の運動方程式は次のようになる。

$$F_{Ei} = M_i \ddot{X}_{Gi} \quad (i=0,1,2) \quad \dots(1)$$

$$F_{Ei} = \{F_{xi}, F_{zi}, M_i\}^T : \text{物体に作用する外力}$$

$$M_i = \begin{bmatrix} m_i & 0 & 0 \\ 0 & m_i & 0 \\ 0 & 0 & I_i \end{bmatrix} : \text{物体 } i \text{ の慣性行列}$$

$$X_{Gi} = \{X_{Gi}, Z_{Gi}, \beta_i\}^T : \text{静止座標系から見た物体 } i \text{ の重心の位置}$$

本体から足部に作用する力 F_i を脚機構の剛性行列 K_i および減衰係数行列 C_i を用いて次のように表す。

$$F_i = K_i(x_{i0} - x_i) + C_i(\dot{x}_{i0} - \dot{x}_i) \quad \dots(2)$$

$$K_i = \begin{bmatrix} k_{xi} & 0 & 0 \\ 0 & k_{zi} & 0 \\ 0 & 0 & k_{\beta} \end{bmatrix} : \text{脚機構の剛性行列}$$

Fig.3 A Dynamic model of a walking machine

$$C_i = \begin{bmatrix} c_{xi} & 0 & 0 \\ 0 & c_{zi} & 0 \\ 0 & 0 & c_{\beta i} \end{bmatrix} : \text{脚機構の減衰係数行列}$$

ここに、アクチュエータにより駆動される本体座標系に対する足部運動の目標ポーズを $x_{i0} = \{x_{i0}, z_{i0}, \beta_{i0}\}^T$ 、実際の足部のポーズを $x_i = \{x_i, z_i, \beta_i\}^T$ とする。ただし対地適応機構の制御則に基づいて、本体から足部へ伝達される運動(XM, RM)が四つのクラッチにより on/off されるので、クラッチが off のとき、対応する剛性行列の要素を零とし、対応する減衰係数行列の要素はクラッチが解放された受動的な運動に対応した値を用いる。本体と足部に作用する外力 F_{Ei} は次のようになる。

$$F_{E0} = -F_1 - F_2 + G_0 \quad \dots(3)$$

$$F_{Ei} = F_i + F_{i,h} + F_{i,t} + G_i \quad (i=1,2) \quad \dots(4)$$

G は物体に作用する重力、 $F_{i,t}$ 、 $F_{i,h}$ はつま先および踵において歩行面から足部に作用する接触力である。

足部の目標運動は歩行周期 T の半分の期間において x_0 軸に平行かつ距離が S_0 の等速直線運動を含む閉ループの運動であり、これは第1報で提案した脚機構により創成されるものと同一である。さらに試作機の脚剛性を実測したところ軸受すきまによる脚の遊びのため z_0 軸方向のばね定数は2段階に変化していたとみなせることから、脚の遊びにより剛性の小さい変形の範囲を脚の遊び量 z_{ci} と定義し、このばね定数を次のように脚の変形量 z_i により2段階に変化させる。

$$\begin{aligned} k_{zi} &= k_{zai} & (|z_{i0} - z_i| < z_{ci}) \\ k_{zi} &= k_{zbi} & (|z_{i0} - z_i| \geq z_{ci}) \end{aligned} \quad \dots(5)$$

ここで k_{zai} は脚の遊びにより剛性の低い変形量におけるばね定数、 k_{zbi} は脚の遊びが無くなったとみなせる変形量でのばね定数である。足部の歩行面との接触点におけるばね定数 k_n 、 k_t は足部が歩行面に接触したときに大きな力が発生して足部が大きなばね返りをするものの無い値を、また足部の歩行面との接触点にお

Table 1 Parameters used in the simulation

m_0	60kg	c_{x1}, c_{x2}	$5.0 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{s/m}$
I_0	$20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	c_{z1}, c_{z2}	$5.0 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{s/m}$
m_1, m_2	10kg	$c_{\beta 1}, c_{\beta 2}$	$5.0 \text{ Nm} \cdot \text{s}^\circ$
I_1, I_2	$1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	z_{c1}	$2.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
k_{x1}	$5.5 \times 10^5 \text{ N/m}$	z_{c2}	$4.0 \times 10^{-3} \text{ m}$
k_{x2}	$2.5 \times 10^5 \text{ N/m}$	k_n, k_t	$1.0 \times 10^6 \text{ N/m}$
k_{z01}	$1.3 \times 10^5 \text{ N/m}$	c_n, c_t	$1.0 \times 10^2 \text{ Ns/m}$
k_{z02}	$6.4 \times 10^4 \text{ N/m}$	μ_s, μ_k	0.9, 0.8
k_{z01}	$3.5 \times 10^5 \text{ N/m}$	(x_{G0}, z_{G0})	(0, 0)m
k_{z02}	$2.5 \times 10^5 \text{ N/m}$	H	0.6m
$k_{\beta 1}$	$4.1 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{m}^\circ$	H_f	0.1m
$k_{\beta 2}$	$2.5 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{m}^\circ$	S_0	0.3m

る減衰係数 c_n 、 c_t を含む各減衰係数は各物体が実際に起こりえない高周波の振動をしなくなる最小値をそれぞれシミュレーションから求めた。本解析に用いる歩行機械および歩行面と足部との接触部のパラメータを表1に示す。第1報で対象とした歩行椅子の試作機と等しい足部の長さ H 、足間接の高さ H_f 、歩幅 S_0 とし、本体質量、足部質量、脚のばね定数および歩行面と足部間の静および動摩擦係数 μ_s 、 μ_k は試作機を実測することにより決定した。なお脚質量を足部と本体に半分ずつ分配して本体質量と足部質量を決定した。ここでは現象を分かりやすくするために、Foot1 と Foot2 で同じ値(Foot1 の値)を用いた。

3. 2 歩行安定性 以上のモデルを用いて動的な影響が無視できない歩行速度において脚に弾性および遊びが存在する場合の歩行安定性について検討する。

まず対地適応機構が機能できず歩行椅子が転倒に至る原因を検討する。転倒に至る過程で見られる現象はどのパラメータを変更して転倒させた場合においてもほぼ共通していることから、代表的な例として k_z を表1より小さい値である $1.0 \times 10^5 \text{ N/m}$ にした場合の歩行を取り上げる。なお歩行周期 T は 4s である。時刻 $t=0$ で静止状態から徐々に加速して $t/T=2$ で目標の歩行周期と以後は一定の歩行周期で歩行を行った場合の歩行の様子を図4に示す。なお、以後の結果は全て同様に歩行を開始したシミュレーションによるものである。また、両脚支持期間において両脚の x_0 軸方向速度が異なるため、対地適応機構は両脚支持期間では前脚の x_0 軸方向(XM)のクラッチを解放する。このクラッチにおいて生じる変位を図4に示すように両足部間の x_0 軸方向相対変位吸収量 Δs_1 と表し、本体姿勢角 β および Δs_1 の変化を図5に、 $t/T=4$ 近傍における Foot1 のつま先の接触状態 $state_{1,t}$ と接触力 $F_{1,t}$ を図6に示す。図6において A, C はそれぞれ両脚支持期間における前脚、後脚の接触状態および接触力を、B は片脚支持期間の接触状態および接触力を表し、 $state_{1,t}$ は 2 が付着状態を、1, -1 が滑りを、0 が分離を意味する。

Fig.4 Simulation result

Fig.5 Changes of β and Δs_1 Fig.6 Changes of $state_{1,t}$ and $F_{1,t}$

図5より本体姿勢角 β の増大に従い両足部間の x_b 軸方向相対変位吸収量 Δs_1 も増大することが分かる。これは、本体姿勢角 β が大きいためだけではなく、図6からも分かるように両脚支持期間Cにおいて後脚の鉛直方向荷重は減少し、後脚が進行方向にすべり($state_{1,t}=1$ は進行方向への滑り)を生じているためである。この吸収量 Δs_1 は前脚で生じるため、 Δs_1 の増大は前脚の足関節位置に対する本体の重心位置が本体姿勢角が小さい場合よりも進行方向に大きく移動することを意味し、そのため両脚支持期間においてゼロモーメントポイント⁹⁾における力の作用線が前脚の足関節よりも外側になり、前脚の足関節回りに本体が進行方向へ回転し転倒する。この本体姿勢角を変動させる原因としては次の2点が考えられる。

(1)着地センサが着地したと検出した時刻(これを着地検出時刻と呼ぶ)に脚を支持脚とみなすため、脚の弾性および遊びのため支持脚になった瞬間には脚にほとんど荷重が作用しておらず、クラッチの解放に伴いこの着地した脚にも本体の重量が作用し、これに釣合う荷

重が脚に作用するまで急激に脚が変形し本体姿勢角が増加する(図5の①)。よってこれは脚の遊びおよび k_z が支配的である。

(2)片脚支持期間において本体重心位置が支持脚足関節に対して後方から進行方向へ移動する。これに伴い足関節周りの本体の重量によるモーメントが変化するため脚が弾性変形し本体姿勢角が増加する(図5の②)。これは k_θ が支配的である。

そこで、安定性を評価する指標を提案し、次章以降では安定な歩行を実現するための現実的なクラッチの制御アルゴリズムおよび脚剛性を含む歩行椅子の動的設計パラメータと歩行安定性の関係について検討する。

3.3 歩行安定性の指標 安定性の評価指標として動歩行に対しては転倒安定余裕¹⁰⁾が提案されている。しかし、脚に弾性や遊びがある場合においては遊脚着地時に瞬間的に大きな力が作用するためこの指標では不安定と評価される状態となることがあるが、それが一瞬であるために安定に歩行を継続することができている場合が多い。そこで、瞬間的な安定性で無く歩行が継続できるかどうかを評価する指標を考える必要がある。

まず、脚剛性 k_z を変化させて歩行周期 $T=4s$ の水平面歩行をさせた場合の本体姿勢角 β の時間 t に対する変化を調べた結果を図7に示す。この図より転倒しない場合には、対地適応機構により β の変動が安定し $t/T=10$ ではほぼ定常状態に落ち着く。逆に転倒する場合には $t/T=10$ までに転倒し、本体姿勢角 β がある値(この場合には約 2°)より大きくなると急速に転倒に至ることが分かる。また、脚に作用する力および足関節に作用するモーメントについても解析したが、 β と同様に β が転倒に至る閾値を超えるとこれらの値も急激に大きくなっていた。

本研究では、歩行椅子を対象としており、人間が歩行椅子に乗ることを考えれば本体姿勢角の変化が小さい必要があることから、歩行安定性の指標として本体姿勢角 β を用いることを考える。本体姿勢角 β の平均値、振幅、最大値について評価したところ、これらはどれも同様の傾向を示したことから、その平均値である β_{ave} を指標として用いることとする。その平均値を求める範囲は歩行が定常となっている $t/T=[12.5, 15]$ と定めた。

なお図7で安定に歩行を継続している $k_z=5.0 \times 10^5 \text{ N/m}$ の場合において、転倒安定余裕は全ての両脚脚支持期間において -0.08m と歩行が不安定であることを示す値となっている。

4. 脚の弾性と遊びを考慮した制御アルゴリズム

4.1 支持脚判断 第1報では脚は剛体であり変形が生じないものとして二つのクラッチの制御アルゴリズムの議論をした。しかし実際の脚には遊びや弾性が存在するため着地検出時刻には脚にほとんど荷重は作用しておらず、そのためこの着地検出時刻にクラッチの制御(後脚 RM の解放および前脚 XM の解放)を行うと脚の弾性や遊びによる変形が大きく生じ、本体姿勢角が急激に変化し歩行が不安定になる。そこでこの脚の大きな変形を生じさせるだけの荷重が脚に作用し本体を支持しているとみなせる状態を支持脚状態とし、遊脚が支持脚状態になったかどうかの判断を支持脚判断と呼びこれに基づきクラッチの制御を行うことを考える。この支持脚判断は対地適応機構の基本コンセプトに基づいて力センサを用いずに行う必要がある。着地検出時刻からの時間経過に伴い荷重も増加すると考えられるので、この経過時間 t_d を用いて支持脚判断を考えることにする。しかし、支持脚判断を考える経過時間 t_d は歩行周期 T に依存すると考えられるので、歩行周期 T で標準化した t_d/T により支持脚判断を考える。また、着地検出時刻からの時間経過に伴い、本体を支持する Z 軸方向の荷重だけでなく、脚に作用する過大な内力となりうる X 軸方向の荷重や足関節回りのモーメント荷重も増加すると考えられるので、これらを考慮して t_d/T を決定する必要がある。

4.2 シミュレーションによる支持脚判断の決定 支持脚判断を行ってクラッチの制御を行う場合、支持脚の足関節 A と遊脚の関節 J_{18} の二つのクラッチを着地検出時刻より遅らせて解放することになる。そこで歩行が定常状態となっている歩行中(ここでは26歩目)に遊脚が着地した($t/T=13$ 付近)後に、これら二つのクラッチをそれぞれ解放しなかった場合について本体姿勢角 β 、本体から遊脚に作用する力の X 方向成分 F_{1X} および支持脚に作用するモーメント M_2 の変化を調べた。

Fig.7 Changes of β

クラッチの制御の違いにより脚に生じる力・モーメントの問題は歩行周期によらず同様に現れたことから、現象を見やすい歩行周期 $T=20\text{s}$ の場合を一例として取り上げ、その結果を図8に示す。25歩目までは同じ歩行条件なので、いずれも $t/T=12.86$ で着地検出され、足関節のクラッチを解放しない場合(図中 Delay in RM)では検出後の β の急激な変化が無く、両方のクラッチを解放した場合(図中 No delay)と比べて F_{1X} は増大しておらず、 M_2 は変化が穏やかになっており脚に過大な内力が作用していないことが分かる。つまり足関節のクラッチの解放を遅らせることで歩行安定性が向上することが分かる。一方 J_{18} のクラッチを解放しない場合(図中 Delay in XM)では、クラッチを解放した場合と比べて着地検出後の β は同様に急激に変化しており、 F_{1X} はその大きさが急激に増加していることが分かる。つまり J_{18} のクラッチの解放を遅らせると歩行が不安定になることが分かる。以上より脚に遊び・弾性を有する歩行機械の対地適応機構におけるクラッチの制御アルゴリズムは、足関節のクラッチの解放は支持脚判断により行い、関節 J_{18} のクラッチの解放は着地検出により行うことが良い。

次に足関節のクラッチの解放を行うための支持脚判断を脚の Z 軸方向に作用する荷重を予測して行うことを考える。三つの歩行周期における 26 歩目の Z 軸方向に作用する荷重 F_{1Z} の変化を図9に示す。比較を容易とするため、着地検出時刻を零とした。 $T=20\text{s}$ では脚の遊びのために着地検出時刻から $t/T=0.06$ 遅れて荷重が作用し、その後の荷重は時間に対しほぼ線形に増加している。これより着地センサによる着地検出から荷重が発生するまでの遅れ t_f と F_{1Z} の傾きを予め把握

Fig.8 Changes of β , F_{1X} and M_2 ($T=20\text{s}$)

しておくことにより F_{1z} を予測することができる事が分かる. 表1のパラメータを用いた歩行椅子の場合, 高速歩行と考えられる $T=2s$ では F_{1z} は振動的に変化するので荷重の予測精度が悪くなっているが, $T=4s$ までは $T=20s$ とほぼ同様とみなせるため荷重の予測が可能である. また, 支持脚状態とみなす脚に作用する荷重の大きさであるが, 足関節のクラッチを解放しない場合において歩行安定性, 脚の内力ともに問題が無かったことから, 荷重が増加しなくなる図中Pの状態を支持脚判断とすることにする. これにより歩行周期 $T=4s$ 以下では力センサを用いることなく着地検出からの経過時間により支持脚判断ができることになる. ただし, この歩行周期の限界は脚剛性に依存する.

5. 設計パラメータと歩行安定性の関係

支持脚判断を用いた場合の設計パラメータと歩行安定性の関係をシミュレーションにより明らかにする. この設計パラメータとして脚剛性 k_x , k_z , k_β , 歩行機械本体の質量 m_0 , 慣性モーメント I_0 , 重心の位置 x_{G0} , z_{G0} , 足部の質量 $m_{1,2}$, 慣性モーメント $I_{1,2}$ を考える. 種々のシミュレーションを行ったところ, 脚剛性および本体重心位置 x_{G0} が歩行安定性に及ぼす影響が顕著であることが分かったため, 以後これらについて詳細に述べる.

まず k_z , x_{G0} と β_{ave} の関係を図10に示す. 図中で β_{ave} が 2° あるいは -2° の領域は歩行継続不可能な領域である. β_{ave} は k_z , x_{G0} が歩行継続可能な領域であればその値に大きな変化が無く, この領域の境界を越えると急激に値が変化し歩行継続が不可能になることがわかる. そして歩行継続可能な場合には β_{ave} の値は $-1^\circ \sim$

Fig.9 Changes of F_{1z}

Fig.10 Relation among k_z , x_{G0} and β_{ave} ($T=2s$)

1° の中に収まっている. 次に歩行周期 T が異なる場合について β_{ave} が $-1^\circ \sim 1^\circ$ の値をとる k_z , x_{G0} の領域を図11に示す. 二つの曲線で囲まれた部分がこの領域である. 歩幅が $0.3m$ で足部の長さが $0.6m$ であることから静的な安定性を保てる本体重心位置 x_{G0} の領域 $[-0.15, 0.15][m]$ であるが, 図よりこの領域よりも歩行継続可能な x_{G0} の領域は狭く, T が小さくなるに従い本体および足部の慣性力の影響が大きくなるため安定な歩行が可能な重心の位置の領域が狭くなることが分かる.

また, 各軸方向の剛性を変化させて安定な歩行が可能な最小歩行周期 $T_{min}[s]$ を求めた結果を図12~14に示

Fig. 11 Influence of T on the relations among k_z , x_{G0} and β_{ave}

Fig. 12 Relation between k_x and T

Fig. 13 Relation between k_z and T

Fig. 14 Relation between k_β and T

す。いずれの方向の剛性に対しても、ある値よりも脚剛性が小さくなると安定な歩行が可能な最小歩行周期 $T_{\min}$ が急激に増大する。また、安定な歩行が可能な領域では剛性を高めても安定な歩行が可能な最小歩行周期 $T_{\min}$ はほとんど変化しないことが分かる。つまり、安定な歩行が可能な脚剛性には閾値が存在し、それ以上脚剛性を高くしても歩行周期と歩行安定性の関係にはほとんど影響が無いことが分かる。この場合の各軸方向の剛性の閾値は図に示すとおり、 $k_{x\text{limit}}=2.5 \times 10^4 \text{ N/m}$ 、 $k_{z\text{limit}}=4.0 \times 10^4 \text{ N/m}$ 、 $k_{\beta\text{limit}}=2.0 \times 10^2 \text{ N}\cdot\text{m}^\circ$ となる。歩行椅子の脚はその剛性がこれらの閾値以上になるように設計する必要がある。

6. 歩行実験

実験装置としての歩行椅子試作機の概観を図15に、その主なパラメータを表2に示す。この試作機の脚の各方向の剛性は第5章で求めた閾値よりも大きくなっており、本体重心位置は第5章で求めた安定な歩行を実現できる範囲の中央に位置している。第4章で導いた支持脚判断に基づきクラッチの制御を行い、また、安定かつ滑らかな歩行を実現するため、足部の大部分の質量を占める足関節クラッチに著者らが開発した質量 1.35kg の軽量・小形なものを使用し⁽²⁾慣性の影響が大きい足部を軽量化している。なおこのクラッチの使用による足部の軽量化は安定性だけでなく駆動に必要な消費エネルギーにも効果がある。例えば市販されている多板電磁クラッチを 1/3 に減速して使用した場合はクラッチの質量は $m_c=4.4\text{kg}$ となるので、図16に示すクラッチ質量 m_c と一歩当たりの駆動に必要なとされ

るエネルギー E の関係から分かるように、歩行周期 $T=4\text{s}$ の場合、これと比べて開発したクラッチを用いることで一歩当たりの駆動に必要なとされるエネルギー E は 52.6J/step から 37.5J/step に減少し、歩行椅子全体の質量は 7% しか減少していないがエネルギー E は 30% も減少させることができた。

歩行周期 $T=4\text{s}$ の水平面歩行における本体姿勢角 β の変化の実験結果とシミュレーション結果を図17に示す。同図より試作歩行椅子は安定した歩行を実現していることが分かる。またシミュレーション結果は実験結果に良く一致しており本シミュレーションモデルが歩行椅子の運動を解析するのに有効であることがわかる。さらに水平な平坦面上に厚さ 10mm、幅 200mm の 9 枚の板を進行方向 4m の間に足部のつま先あるいは踵が板の上に完全に乗る位置にランダムに配置した凹凸面上を歩行する実験を行った結果を図18に示す。本体姿勢角がある一定の範囲内に保たれており、また、凹凸面が終わると姿勢角が元の状態に復帰しており、対地適応機構により安定な歩行を実現していることが分かる。また、これらの実験中に本体の振動的な振る舞い

Fig.16 Relations between m_B and E

Table 2 Parameters of the prototype walking chair

m_0	45.6kg	$k_{x1}(\text{outer})$	$5.5 \times 10^5 \text{ N/m}$
$m_1(\text{outer})$	8.7kg ($\times 2$)	$k_{x2}(\text{inner})$	$2.5 \times 10^5 \text{ N/m}$
$m_2(\text{inner})$	19.8kg	$k_{z1}(\text{outer})$	$4.0 \times 10^5 \text{ N/m}$
(x_{Gb}, z_{Gb})	(0.06, -0.15)m	$k_{z2}(\text{inner})$	$3.0 \times 10^5 \text{ N/m}$
S_0	0.3m	$k_{\beta 1}(\text{outer})$	$4.1 \times 10^2 \text{ N}\cdot\text{m}^\circ$
μ_s, μ_k	0.9, 0.8	$k_{\beta 2}(\text{inner})$	$2.5 \times 10^2 \text{ N}\cdot\text{m}^\circ$

Fig.15 Prototype of the walking chair

Fig.17 Experimental and simulated results of walking over the flat terrain ($T=4\text{s}$)

Fig.18 Experimental and simulated results of walking over the random steps ($T=4\text{s}$)

および足部の滑りはほとんど無く、また支持脚判断を行うことによる駆動トルクの増大も無かったことから、支持脚判断が有効であることが分かった。

7. 結 論

本論文では対地適応機構を有する歩行機械の脚の弾性および遊びを考慮した設計を可能とするために、動的な歩行シミュレーションを行い設計パラメータと歩行安定性の関係を理論的に明らかとするとともに、実験的に検討を加えた。得られた結果は次の通りである。

- (1) 脚の弾性および遊びを考慮し、足部と歩行面の衝突および摩擦を連続的に解析できる動的シミュレーションを行い、脚の弾性および遊びの影響により歩行機械が転倒に至るメカニズムを明らかにした。
- (2) 脚の弾性および遊びを考慮した支持脚判断に基づくクラッチの制御アルゴリズムを提案し、シミュレーションにより具体的な数値を決定した。
- (3) 歩行安定性の指標として瞬間的な安定性ではなく歩行の継続性に着目し本体姿勢角の平均値 β_{ave} を用いることを提案した。
- (4) 脚の弾性および本体の重心位置が歩行の安定性に及ぼす影響を把握するとともに安定な歩行を実現するこれらの設計パラメータの関係を明らかにした。
- (5) 以上の結果に基づく適切な本体重心位置、脚剛性を有する歩行椅子の試作機は支持脚判断を行うことで、平坦面上に厚さ 10mm、幅 200mm の板をランダムに置いた凹凸面において歩行周期 $T=4s$ の安定した歩行を実現した。

文献

- (1) 川淵一郎・武田行生・舟橋宏明, 「遊脚足部の着地時刻の早まり/遅れ情報に基づく歩行機械の対地適応機構の研究 (第1報, 適応アルゴリズムの提案と脚機構の構成)」, 機論(C編), 65-630 (1999), pp.850-855.
- (2) H.Funabashi, Y.Takeda, I.Kawabuchi, M.Higuchi, "Development of a Walking Chair with a Self-Attitude-Adjusting Leg Mechanism for Stable Walking on Uneven Terrain", Proc. of the 10th World Congress on TMM, (1999-6, Oulu), pp.1164-1169.
- (3) Y.Takeda, M.Higuchi, H.Funabashi, Y.Oki, K.Shimizu, "Development of a walking chair - fundamental investigations for realizing a practical walking chair", Proc. of the 4th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR2001), pp.1037-1044.
- (4) D.E.Orin, S.Y.OH, "Control of Force Distribution in Robotic Mechanisms Containing Closed Kinematic Chains", Trans. of ASME, J. Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.102, June(1981), pp.134-141.
- (5) J.E.Sutherland, M.K.Ullner, "Footprints in the asphalt", Int. J. of Robotics Research, Vol.3, No.2(1984), pp.29-36.
- (6) 杉山和利・野飼亨, 「接触力を主眼とした歩行ロボット脚関節軌道の生成」, 日本ロボット学会誌, 14-8(1996), pp.1208-1212.
- (7) 成清辰生・小林基・伊藤正美・細江繁幸, 「二足歩行系の両脚支持期の制御について」, 電気学会論文誌(C編), 103-12(1983), pp.281-286.
- (8) 樋口勝・舟橋宏明・武田行生, 「ロボット用ブレーキの開発 (第2報, ソレノイド駆動くさび機構の特性)」, 機論(C編), 68-673(2002), pp.2736-2742.
- (9) M.Vukobratovic, J.Stepanenko, "On The Stability of Anthropomorphic Systems", Mathematical Biosciences, Vol.15, (1972), 1-3.
- (10) 米田完・広瀬茂男, 「歩行機械の転倒安定性」, 日本ロボット学会誌, 14-4(1996), pp.47-52.