連続型遅延フィードバック制御に基づく脚ロボットの 準受動的歩行安定化制御

杉 本 靖 博^{*1} 大須賀 公 一^{*2} 杉 江 俊 治^{*1}

Stabilizing Control of Quasi Passive-Dynamic-Walking for a Legged Robot based on Continuous Delayed Feedback Control

Yasuhiro Sugimoto^{*1}, Koichi Osuka^{*2} and Toshiharu Sugie^{*1}

Recently, Passive-Dynamic-Walking (PDW) has attracted much attention in the research of biped walking robots. In this paper, we provide a new control method of Quasi-PDW. Quasi-PDW means that a robot usually does PDW without any input torques, and the actuators of the robot are used just only when the walking begins or disturbances come in. The first feature of the control method is that $(k-1)$ -th trajectory of the walking robot is used as a reference trajectory of the k -th step. The second feature is that a kind of gain scheduled PD control is adopted and its gains are regulated depending on the state of the contact phase of swing leg. As a result, it is expected that the robot will continue walking and the gait of the robot will shift from an active walking to PDW. The effectiveness of the control method is shown through several simulations and experiments with real walking robot "Quartet-III".

Key Words: Passive Dynamic Walking, Delayed Feedback Control, Quartet-III

1. は じ め に

ホンダの2足歩行ロボットの発表を契機として、数多くの2足歩行ロボットの研究開発がなされてきている。そうした研究開発はある程度の成果を出してきているとはいえ、近年では単なるロボットの歩行の実現というテーマではなく、より滑らかなヒトの歩行に近い歩行、あるいは、よりエネルギー的に効率のよい歩行の実現といったテーマに、焦点を当てた研究が多くなされるようになってきた。そんな中、McGeer [1] により提案された Passive Dynamic Walking (受動的歩行) が着目を浴びている。この運動の特徴として、振り子のように前方に倒れこむ動作を繰り返し行うことで巧みに重力場を利用していることから、非常に高効率な運動である点や、平坦な緩斜面を歩き降りだけの運動ならば制御をしなくても自然に滑らかな歩容を行っていく、つまり、ロボットのダイナミクスだけでその歩容が実現可能であるという点が知られている[†]。

そこで、McGeer により受動的歩行に関して実験的にその実現可能性を示されて以来、より滑らかなエネルギー効率のよいロボットの歩行の実現を目指し、受動的歩行の解析およびその応用に関する様々な研究がなされてきた[2]~[5]。これらの研究

において、多くのシミュレーション解析が行われ、受動的歩行に引き込み現象や分岐現象が現れるという結果が報告されていることは興味深く重要である。さらに実際の歩行ロボットにて、歩容の分岐現象が実験により観測されている[6]。

また、受動的歩行の応用に関しても、その特徴を2足ロボットの歩行制御に活かそうという研究も多くなされてきている[7]~[14]。文献[9]では、受動的歩行がカオス現象を示すことから、カオス制御の一手法である OGY 法を用いた歩行制御則を提案している。また、文献[7][10][11]では、運動中のロボットのエネルギーに着目し、力学的エネルギーへの追従制御を行うことで歩行のロバスト安定化を行っている。しかしながら、文献[9]では収束先の目標平衡点の正確な情報を、文献[7][10][11]では、目標とする理想的な力学的エネルギーの正確な値やその正確な軌道を前もって求めることが必要であった。筆者らのグループでは、歩き始めや外乱の入った際にはアクチュエータからのトルクを用いるが、それ以外はトルク入力を用いない受動的歩行を行うという準受動的歩行の制御法に関して、いくつかの方法を提案してきた[8][14]^{††}。文献[8]で提案されている制御則は、歩行の安定度に応じて追従制御の重みをうまく調整することで、追従制御を行う際の目標軌道 r_d と受動的歩行を行っている際の軌道 r_{id} との間に誤差があったとしても、 r_{id} のほうに脚の軌道を収束させることが期待できるものであった。しかしなが

原稿受付 2004 年 5 月 12 日

^{*1}京都大学

^{*2}神戸大学

^{*1}Kyoto University

^{*2}Kobe University

[†]この性質より、受動的歩行は究極のダイナミクスベース制御の一つでもあるといわれている

^{††}ただし、この場合の受動的歩行は一周期歩行を行うものとして考える。

ら, r_{id} にある程度近い目標軌道 r_d を前もって設計しておく必要があることから, ロボットのダイナミクス自身が歩容を作り出すという受動的歩行の性質を十分活かしているといえるものではなかった. 一方, 文献[14]で提案されている制御則は, 遊脚が着地した際のロボットの状態(衝突点)に着目し, さらに Delayed Feedback Control (DFC) [15] の考えを用いた制御則である. この制御則は非常に簡単な制御則で, かつ, 受動的歩行を行っている際の脚の軌道の情報を全く必要とせずに準受動的歩行の安定化ができるものの, 歩き始めには対応できない点や, 衝突点の情報のみに着目しているため制御性能はあまり良いものではなく, 歩行の途中に大きな外乱が入った際に対応できないという問題点があった.

そこで本論文では, 文献[8]および文献[14]にて提案されている制御則をうまく組み合わせることで, 受動的歩行を行っている際の脚の軌道の情報を前もって知ることなしにロボットの歩行を受動的歩行に安定化でき, また, 両制御則よりも良好な制御性能が期待できる制御則を提案する. ここで, 提案する制御則では, 追従制御を行う際の目標軌道として, 前もって設計した軌道ではなく, 1歩前に脚が実際に描いた軌道が用いられるため「連続型 DFC (Delayed Feedback Control) に基づく制御則」と呼べる制御則となっている. そして最後に, シミュレーションおよび実機“Quartet-III”を用いた検証実験にて提案した制御則の有効性の確認を行う.

2. 歩行ロボットモデル

本論文では, Fig. 1 のようなコンパス型のモデルを考える.

支持脚, 遊脚の角度をそれぞれ θ_p, θ_w かつ $\theta = (\theta_p, \theta_w)^T$ とし, α を地面の傾斜角, また, 支持脚, 遊脚に対して胴体から与えるトルクを $\tau(t) = (\tau_p, \tau_w)^T$ とすると, ロボットの運動方程式は

$$M(\theta)\ddot{\theta} + N(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta, \alpha) = \tau(t) \quad (1)$$

で与えられる. ここで, $M(\theta)$ は慣性行列, $N(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ は遠心, コリオリ項, $g(\theta, \alpha)$ は重力項である. また, 遊脚着地時における支持脚と遊脚の速度の切り替え方程式は, 着地する際, 支持脚と遊脚が瞬間的に入れ替わり, 遊脚の跳ね返りが生じないとすれば,

$$P_b(\beta)\dot{\theta}^- = P_a(\beta)\dot{\theta}^+ \quad (2)$$

と表すことができる. ここで, β を衝突時の支持脚の角度, $\dot{\theta}^-, \dot{\theta}^+$

Fig. 1 Compass model of walking robot

はそれぞれ着地する直前, 直後の脚の速度, $P_b(\beta), P_a(\beta)$ はロボットの物理パラメータおよび β から決まる行列である(モデルに関する詳細は, 文献[14]参照).

また, これ以降, 遊脚が地面に k 回目に着地する直前の支持脚の角度 β_k , 支持脚, 遊脚の速度 $\dot{\theta}_{p,k}^-, \dot{\theta}_{w,k}^-$ をまとめて,

$$p_k = (\beta_k, \dot{\theta}_{p,k}^-, \dot{\theta}_{w,k}^-)^T \quad (3)$$

と書き, この p_k を衝突点と呼ぶことにする.

3. 衝突点に関する離散力学システム

各 k 歩目の間の入力トルクが一定 ($\tau_k = \text{Const}$) とした際, いくつかの仮定をおくと, 衝突点 p_k に関する離散力学システム $p_{k+1} = \mathcal{P}(p_k, \tau_k)$ が存在し, また, このシステムにおける p_k の安定性と受動的歩行の安定性が等価であることがいえる[14]. ここではそれを拡張し, $\tau(t) \in \mathcal{R}^n$ が各 k 歩目から $k+1$ 歩目の間で $t, x = (\theta_p, \theta_w, \dot{\theta}_p, \dot{\theta}_w)^T$ に関して区分的に連続かつ微分可能である場合にも, 衝突点 p_k の安定性とロボットの受動的歩行の安定性が等価であることを示す.

定理 1 衝突点 p_k および各 k 歩目間で連続かつ微分可能な入力 $\tau(x(t))$ に対して,

$$p_{k+1} = \mathcal{P}_{cl}(p_k, \tau(x(t))) \quad (4)$$

なる写像が定義できる. また, この写像 (4) に関して, p^* が $\tau(t) = 0, T_p(k-1) \leq t < T_p(k)$ としたときの $p_{k+1} = \mathcal{P}_{cl}(p_k, \tau(x(t)))$ の安定な平衡点である必要十分条件は, 衝突点 p^* を通る連続的なロボットの軌道がリャプノフ安定であることである. ただし, $T_p(k)$ は k 回目の衝突が起こる時間である.

証明 基本的には文献[14]の補題 1, 2 の証明に沿って行う. まず,

$$f_{cl} := f(x(t)) + g(x(t))\tau(x(t)) \quad (5)$$

とおくと, 対象とするシステムは,

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{x}(t) = f_{cl}(x(t)) & (x^-(t) \notin \mathcal{S}) \\ x^+(t) = \Delta(x^-(t)) & (x^-(t) \in \mathcal{S}), \end{cases} \quad (6)$$

ただし,

$$f(x(t)) = \begin{bmatrix} (\dot{\theta}_p, \dot{\theta}_w)^T \\ -M^{-1}(\theta)(N(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta, \alpha)) \end{bmatrix}$$

$$g(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(\theta) \end{bmatrix}$$

である. ここで, $\tau(x(t))$ の条件から各 k 歩間で $f_{cl}(t)$ は連続かつ, 初期条件に一意的で連続的に依存する解を持つため, 文献[16]より $\mathcal{P}_{cl,x}(x, \tau)$ なる写像が定義できることがいえる. 後は,

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

を用いれば,

$$p_{k+1} = FP_{cl,x}(Ep_k, \tau(t)) = \mathcal{P}_{cl}(p_k, \tau(x(t))) \quad (7)$$

とすることで, $p_{k+1} = \mathcal{P}_{cl}(p_k, \tau(x(t)))$ なる写像が定義できる.

また, 写像 $\mathcal{P}_{cl,x}(x, \tau)$ の存在がいえるので, 文献 [14] の補題 2 の証明と同じようにすれば, p^* が $\tau(x(t)) = 0$, $T_p(k-1) \leq t < T_p(k)$ としたときの $p_{k+1} = \mathcal{P}_{cl}(p_k, \tau(x(t)))$ の安定な平衡点である必要十分条件は, 衝突点 p^* を通る連続的なロボットの軌道がリアプノフ安定であるといえる. $\square$

この定理より, 入力トルクを各 k 歩間で連続かつ微分可能なものとした場合においても, 衝突点 p_k の安定性と受動的歩行の安定性が等価であるといえ, 言い換えれば, p_k の安定性が受動的歩行の安定性の指針になっていると考えられる.

4. 準受動的歩行の安定化制御則

4.1 既存の準受動的歩行安定化制御

この章で, 新たな準受動的歩行安定化制御則を提案するが, その制御則は弱誘導制御則 [8] および離散型 Delayed Feedback Control (DFC) に基づく制御則 [14] の二つの制御則をうまく組み合わせたものとなっている. そこで, 新たな制御則を提案する前に, 元になる二つの制御則に関して述べておく.

4.1.1 弱誘導制御則

準受動的歩行安定化制御則の一つとして, 大須賀, 猿田らは次に挙げるような制御則を提案している [8] (我々はこの制御則を“弱誘導制御則”と呼ぶことにする).

弱誘導制御則

$$\begin{aligned} \tau &= K_f(\delta_k)[M(\theta)s + N(\theta)\dot{\theta}^2 + g(\theta, \alpha)], \quad (8) \\ s &= \ddot{\theta}_d + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_p(\theta_d - \theta), \\ \delta_k &= \beta_k - \beta_{k-1}, \end{aligned}$$

ただし, β_k は, 第 k 回目の衝突直前の支持脚の角度で, $K_f(x)$ は以下のように定義される関数である.

$$K_f(x) = \begin{cases} 1 & \|x\| \geq \gamma \\ (-\cos(\frac{x\pi}{\gamma}) + 1)/2 & \|x\| \leq \gamma. \end{cases} \quad (9)$$

$K_f(x)$ の一例を Fig. 2 に示す.

この制御則の特徴として, $|\beta_k - \beta_{k-1}|$ を歩行の安定性の評価関数に採用し, また, K_f とともに軌道追従制御の重みを司

Fig. 2 An example of function K_f with $\gamma = 1.0$

るものとして使われているという点が挙げられる. この特徴および受動的歩行の特徴の一つである引き込み現象により, 追従制御に使われる目標軌道 $r_d = (\theta_d, \dot{\theta}_d)$ と実際にロボットが受動的歩行を行っている際の脚の軌道 $r_{id} = (\theta_{id}, \dot{\theta}_{id})$ との間に誤差が存在したとしても, この制御則 (8) がうまく働くことによってロボットが歩行を継続していくうちに, ロボットの脚の軌道を r_{id} の方に収束させることができ, また $|\beta_k - \beta_{k-1}|$ も徐々にゼロに近づかせていくことが期待できる. そして最終的に $|\beta_k - \beta_{k-1}|$ がゼロになることで入力トルクもゼロとなって, 受動的歩行を行うようになることから, この制御則により準受動的歩行の実現が期待できる.

しかしながら, この制御則 (8) には,

- どうやって初めに与える目標軌道 r_d を求めるのか?
- 安定性の評価を β_k を用いて行っているが, 3 章の結果より, 衝突点 p_k を用いた安定性の評価を行ったほうがいいのか?

という問題点が挙げられる.

特に目標軌道 r_d に関して, 前述の通り, r_d と r_{id} の間に誤差があっても引き込み現象が起こるため脚の軌道を r_{id} のほうに収束させることが期待できる. しかし, 制御性能の向上という観点から考えると r_d と r_{id} の間の誤差はできるだけ小さいほうが望ましいため, 結局十分に妥当な r_d を前もって作っておく必要が生じる. したがって, この制御則は, 自身のダイナミクスにより歩容が生成されるという受動的歩行の特性を十分に活かしているとはいえない.

4.1.2 離散型 DFC に基づく制御則

もう一つの準受動的歩行安定化制御則として, 我々は離散型 DFC に基づく制御則を提案している [14]. この制御則では, まず受動的歩行の安定性が,

衝突点 p_k に関する離散力学システム:

$$p_{k+1} = \mathcal{P}(p_k, \tau_k), \quad (10)$$

における衝突点 p_k の安定性と等価であることが証明できることに着目する. そこで, 式 (10) を安定化するような

離散型 DFC に基づく制御則

$$\begin{aligned} \tau_k &= K(y(k) - y(k-1)) \\ &= K \begin{bmatrix} P_p(k) - P_p(k-1) \\ P_w(k) - P_w(k-1) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (11)$$

なる入力トルク τ_k にて, 準受動的歩行を安定化しようというものである. ここで, $P_p(k)$, $P_w(k)$ はそれぞれ衝突点 p_k における支持脚, 遊脚の運動エネルギーである. この制御則は, 式 (11) から明らかなように, 非常に簡単な制御則で歩行を安定化させることができ, また, Delayed Feedback Control (DFC) [15] のアイデアを利用することで, 離散力学システム (10) の平衡点 p^* の情報, つまりは受動的歩行を行っている際の脚の軌道 r_{id} の情報が全くなくても, ロボットの脚の軌道を r_{id} に収束させることが期待できる. しかし, この制御則は衝突点の情報のみに着目しているため, その制御性能はそれほどよいものとはならないので, 大きな外乱に弱く, そのまま実機に適用す

るのはなかなか難しいと考えられる。また、歩行を始めるのに適切な初期値、特に、適切な初期速度が必要であることも、この制御則に関する問題点として挙げられる。

4.2 提案する準受動的歩行安定化制御則

そこで、4.1.1 項と 4.1.2 項で紹介した二つの準受動的歩行安定化制御則、および、受動的歩行の安定性が衝突点の安定性と大きく関係しているという 3 章の結果を受けて、以下の準受動的歩行安定化制御則を提案する。

連続型 DFC に基づく制御則

$$\begin{aligned}\tau_k(t) &= K_f(\delta_k) \cdot [K_v(\dot{\theta}_{k-1}(\xi_{k-1}) - \dot{\theta}(t)) \\ &\quad + K_p(\theta_{k-1}(\xi_{k-1}) - \theta(t))] \quad (12) \\ \delta_k &= \|p_k - p_{k-1}\|_\phi, \\ \xi_k &= t - (T_p(k) - T_p(k-1))\end{aligned}$$

ここで、 $\theta_k(t)$ は第 k 歩めの脚の軌道

$$\theta_k(t) = (\theta_p(t), \theta_w(t))^T, \quad T_p(k-1) \leq t \leq T_p(k)$$

で、 $K_f(\cdot)$ は式 (9) で定義される関数、 $\phi \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ は定数行列、 $\|\cdot\|_M$ は定数行列 $M \in \mathcal{R}^{m \times n}$ を用いて $\|x\|_M = \sqrt{x^T M x}$ と定義されるノルムである。

この制御則は、初めに紹介した二つの制御則、式 (8) および式 (11) の特徴をうまく組み合わせており、以下のような特徴を持つ。

- $\|p_k - p_{k-1}\|_\phi$ を歩行の安定性を評価する評価関数と考え、その値に応じて追従制御を行うゲインを各歩ごとに調整している点。
- 追従制御を行う際の目標軌道として、前もって設計した軌道 r_d ではなくて、1 歩前に実際にロボットの脚が描いた軌道 r_{k-1} が用いられており、その結果、各歩ごとに目標軌道が更新されている点（この特徴が連続型の DFC を行うことにほかならないことから、我々はこの制御則を「連続型 DFC に基づく制御則」と名付けた）。

一つ目の特徴より、歩行の安定度に応じて追従制御を行うことになるため、提案した制御則 (12) を用いた場合には、離散型 DFC に基づく制御則 (11) を用いた場合よりも、歩行の継続がより容易になることが期待できる。また、弱誘導制御則 (8) でも用いられている K_f という関数の影響により、より容易にロボットの歩行を受動的歩行に収束させることができると考えられる。

また、二つ目の特徴より、連続型の DFC を行うことになることから、受動的歩行を行っている際の脚の軌道 r_{id} を前もって知ることなく、歩行を継続していきながら、徐々に脚の軌道を r_{id} に収束させることができると期待できる。また、提案した制御則にも第一歩目の目標軌道 r_0 を与える必要があるが、歩行を継続していくうちに受動的歩行を行っている際の軌道 r_{id} をロボット自身が作り出していくことになるので、 r_0 の設計は歩き始めに転倒しない程度のラフなもので十分であると考えられる。この特徴は、弱誘導制御 (8) における問題点であった、

目標軌道をどうすればよいかという問題を克服するものである。

Remark 当然ではあるが、制御性能を向上させるために、 r_0 はできるだけ r_{id} に近いことが望まれる。したがって、実際に実機への実装を行う際は、いきなり提案した制御則 (12) を適当に設計した r_0 を用いて実装するのではなく、まずは、適当な目標軌道を r_0 としてシミュレーションを行い、その際求まった受動的歩行を行っている際の軌道 r_{id-sim} を実機に実装する際の 1 歩目の目標軌道 r_0 とするのが妥当と思われる。ただし、 r_{id-sim} は r_0 に比較すると r_{id} に近くはあるものの、シミュレーションと実験の間にはどうしても差が存在するので、 r_{id} と r_{id-sim} が完全に一致することは考えにくい。したがって、 r_{id-sim} を用いた場合においても、正確な r_{id} の情報を必要とせず、さらに歩行を継続しながら r_{id} を生成していく本手法の有用性は残ったままである。

5. シミュレーション検証

提案した制御則 (12) の有効性を確かめるために、いくつかのシミュレーションを行った。

使用した物理パラメータは Quartet-III のもの（文献 [8] 参照）を用い、初期条件は $x_0(0) = (-0.34, 0.34, 0, 0)^T$ とし、制御則 (12) 中の他のパラメータは試行錯誤的に求め、以下のよう設定した。

$$\begin{aligned}\gamma &= 1.0, \quad K_p = \begin{pmatrix} 30 & 0 \\ 0 & 30 \end{pmatrix}, \\ K_v &= \begin{pmatrix} 25 & 0 \\ 0 & 25 \end{pmatrix}, \quad \phi = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{pmatrix}.\end{aligned}$$

また、1 歩目の目標軌道 $r_0(t)$ は、

$$\begin{aligned}\theta_{p,0}(t) &= 2.2667t^2 + 0.79333t - 0.34000, \\ \dot{\theta}_{p,0}(t) &= 4.4894t + 0.79333, \\ \theta_{w,0}(t) &= 8.4524t^2 - 5.0810t - 0.34000, \\ \dot{\theta}_{w,0}(t) &= 16.905t - 5.0810.\end{aligned}$$

とした。これらは、まず、 $\theta_p(t)$ と $\theta_w(t)$ をそれぞれ $[(0, -0.34), (0.25, 0), (0.4, 0.34)]$ および $[(0, 0.34), (0.3, -0.4), (0.4, -0.34)]$ を通るような二次多項式として求め、その後、 $\dot{\theta}_p(t)$ と $\dot{\theta}_w(t)$ を $\theta_p(t)$ と $\theta_w(t)$ をそれぞれ微分することで求めた。また、第 k 歩目の歩行周期が $k-1$ 歩目の歩行周期より大きくなってしまふ場合があるため、第 $k-1$ 歩目に実際に脚が描いた軌道 r_{k-1} に対し、7 次の近似多項式を求め、それを第 k 歩目の目標軌道として用いることにした。また、特に衝突直後において目標状態との差が非常に大きくなり過大なトルクが発生する可能性があるため、 $|20|$ [Nm] 以上のトルクはでないようにサチュレーションをかけてシミュレーションを行った。

さらに、比較のため、弱誘導制御則 (8) を用いた場合のシミュレーションも行った。この制御則には、目標軌道 r_d を設定する必要があるが、上で求めた r_0 と同じものを目標軌道として用いることで、両制御則の性能の比較、特に受動的歩行への収束のしやすさの比較を行うことにする。

(a) Trajectories of θ_p, θ_w

(b) Input torques

Fig. 3 Simulation results (propose control method (12)) (a) Trajectory of θ_p, θ_w

(b) Input torques

Fig. 4 Simulation results (weakly guidance control method)

提案した制御則 (12) および弱誘導制御則 (8) を用いた場合のシミュレーション結果を、それぞれ、**Fig. 3** および **Fig. 4** に示す。Fig. 5 と Fig. 5 がロボットの支持脚、遊脚の軌道、 $\theta_p(t), \theta_w(t)$ を表したグラフであり、Fig. 5 と Fig. 5 が各脚に入力された入力トルク $\tau(t)$ を表したグラフである。ちなみに、これらのグラフでは実線が支持脚、点線が遊脚を表すものとなっている。

これらの図より、提案した制御則 (12) を用いた場合は、歩き始めは歩容もバラバラで大きなトルクが発生しているものの、この制御則がうまく働くことで、歩行を継続していくうちに引き込み現象により、徐々に安定な軌道に引き込まれていき、トルク発生もほとんどなくなり、また K_f も減少していることが分かる。そして、最終的には $r_k = r_{k-1} = r_{id}$ でトルク入力が必要なくなり歩行ロボットは受動的歩行を行っている。一方、弱誘導制御 (8) を用いた方法では、歩行を継続することができるものの、受動的歩行に収束せず、トルクが発生し続けていることが分かる。これは、目標軌道として与えた r_0 と、受動的歩行を行っている際の脚の軌道 r_{id} との間に大きな誤差があるこ

(a) Trajectory of support leg θ_p with proposed control method (b) Trajectory of support leg θ_p with previous control method**Fig. 5** Simulation results (with some disturbance)

とが原因だと考えられる。このことより、非常にラフに設計された目標軌道では、弱誘導制御則はうまく働かないことが確認できた。

次に、外乱が入った際の挙動をみるために、5~6 [sec] での傾斜角を $\alpha = 6$ [deg] と変化させた場合のシミュレーションを行った (ノミナルの α は 3 [deg])。その際得られた支持脚の軌道を **Fig. 5** に示す。Fig. 5 が提案した制御則 (12) を用いた場合で、Fig. 5 が離散型 DFC に基づく制御則 (11) および弱誘導制御則 (8) を用いた際のシミュレーション結果である。

また、前述の通り、弱誘導制御則 (8) に関しては、初めに与える目標軌道をどう設定するのかという問題があるが、今回のシミュレーションでは、いったん受動的歩行に収束した後以外乱が入った際の挙動を見るため、受動的歩行に収束しやすいように、受動的歩行を行っている際の軌道に近いが完全には一致しないものを目標軌道として与えた。

これらの図より、提案した制御則 (12) を用いた場合は、外乱が入ったのち歩容が乱れるものの、制御則がうまく働くことで、何歩か歩いていくうちに、再びトルク入力を必要としない受動的歩行に収束していることが分かる。一方で、離散型 DFC に基づく制御則 (11) を用いた場合には、外乱が入ったのち歩行を継続させることができず、弱誘導制御則 (8) を用いた場合では、歩行は継続できるものの、再び受動的歩行に収束させることができなかったことが分かる。こうした結果より、提案した制御則がこれら二つの制御則より有効であることが確認できた。

6. 実験検証

次に準受動的歩行の研究のために製作された歩行ロボット、“Quarte-III” を用いて、実際に歩行実験を行い、提案した手法 (12) の有効性を確認する。

6.1 実験システム

歩行ロボット Quartet-III の外観を **Fig. 6** に示す。写真から分かるように Quartet-III は、8 脚の脚を持った歩行ロボットであるが、特殊なリンク構造とその対称性により、Quartet-III

の運動は Fig. 1 のような非常に簡単なロボットモデルにて解析が可能である。Quartet-III に関する詳細は文献 [17] を参照されたい。

実験システム全体を Fig. 7 に示す。実時間制御は PC 上の RT-Linux (FSMlab) で行う。また、制御プログラムの作成およびデータ解析も同じ PC 上の gcc および MATLAB を用いて行う。サンプリングタイムは 1 [msec] とし、坂の傾斜角は約 3 [deg] に設定した。

6.2 実験結果

第 5 章では、第 k 歩目の歩行周期が第 $k-1$ 歩目の歩行周期より大きくなってしまった場合どうするかという問題に対して、第 $k-1$ 歩目の軌道の 7 次の近似多項式を求め、それを目標軌道として用いることでその問題を克服していた。しかし、この節では簡単のために、近似多項式を用いるのではなく、第 k 歩目の入力トルク $\tau_k(t)$ が次の式で定義されるものを用いる。

$$\tau_k(t) = \begin{cases} K_f(\delta_k) \cdot [K_v(\dot{\theta}_{k-1}(\xi_{k-1}) - \dot{\theta}(t)) \\ \quad + K_p(\theta_{k-1}(\xi_{k-1}) - \theta(t))] \\ \text{if } T_p(k-1) \leq t < 2T_p(k-1) - T_p(k-2) \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

この修正した制御則 (13) の意味は、第 $k-1$ 回目の衝突からの時間が、第 $k-1$ 歩目の歩行周期より大きくなった場合、つまり対応する目標軌道がない場合には入力トルクを 0 とし、それ以外の場合には、制御則 (12) で計算されるものと同じ入

Fig. 6 Overview of Quartet III

Fig. 7 Experimental system of waking robot "Quartet III"

力トルクを使うということである。

また、4.2 節の Remark でも述べたように、実験を行う前に傾斜角 α を 3.0 [deg] とした場合における受動的歩行を行っている際の脚の軌道 r_{id-sim} を、シミュレーションにて求め、それを第 1 歩目の目標軌道 r_0 として用いることにした。また、式 (13) 中の設計パラメータは試行錯誤的に求め、

$$\gamma = 0.5, \quad K_p = \begin{pmatrix} 25 & 0 \\ 0 & 25 \end{pmatrix},$$

$$K_v = \begin{pmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{pmatrix}, \quad \phi = \begin{pmatrix} 5.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.1 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.1 \end{pmatrix}.$$

と設定した。

さらに、比較のため、弱誘導制御 (8) を用いた場合の実験も行った。この制御則には目標軌道 r_d を設定する必要があるが、提案した制御則にて実験を行う際に用いた r_{id-sim} と同じものを目標軌道として用いて、どちらがより受動的歩行に収束しやすいかを見ることにする。なお、離散型 DFC に基づく制御のみによる歩行実験も行ったものの、歩行成功例を得ることはできなかった。

提案した制御則 (13) および弱誘導制御則 (8) を用いた際の実験結果を、それぞれ Fig. 8 および Fig. 9 に示す。Fig. 8 (a) および Fig. 9 (a) が支持脚、遊脚の軌道を表したグラフで、Fig. 8 (b) および Fig. 9 (b) が各脚に入力されたトルクを表したグラフである。

Fig. 8 によると、制御則 (13) を使った場合、歩き始めにおいては歩行の継続のため大きな入力トルクが発生しており、歩容も一様ではないが、歩行を継続していくうちに入力トルクも減少し、最終的にはほぼ 0 に収束している。このことは Quartet-III の歩容が入力トルクが必要な active walking から受動的歩行へと自律的に移行したことを示しており、提案した制御則がうまく働いていることが確認できる。また、約 4.5 [sec] あたりで、坂のたわみ等の影響で歩容が乱れているが、提案した制御則がうまく働くことで、多少の入力トルクを発生しつつ Quartet-III

(a) Trajectories of legs

(b) Input torques

Fig. 8 Experimental results (proposed method)

Fig. 9 Experimental results (Weakly guidance control method)

は歩行を継続することができたと確認できる。

一方, Fig. 9 によると, 弱誘導制御則 (8) を用いた場合においても, 歩行を継続していくうちに, 入力トルクも減少しており, 歩容も次第に様になっていることが確認できるものの, 提案した制御則の場合と比較すると, 歩行の継続に多少ではあるがより大きな入力トルクが必要となっている. この原因は, 真の受動的歩行を行っているときの脚の軌道 r_{id} と, 弱誘導制御則にて目標軌道として用いた軌道 r_d との間に大きな差があるため, その分入力トルクのいらない受動的歩行に収束しにくくなっているものと考えられる. また, DD モータの仕様書よりモータ定数 $0.51 \text{ (N}\cdot\text{m}/\sqrt{\text{W}})$ を得て, 歩行がほぼ落ち着いた 3~6 [sec] の間での (理論上の) モータへ供給されたエネルギーを計算すると, 提案した制御則においては支持脚で 12.033 [J], 遊脚で 12.569 [J], 弱誘導制御の場合では, 支持脚が 32.053 [J], 遊脚で 269.9 [J] となった. したがって, 提案した制御則の方が弱誘導制御の場合より, モータ駆動エネルギーが少ない, つまり, 入力トルクが少なかったことが確認できる.

こうしたことより, 今回提案した制御則は, 準受動的歩行の実現という点において弱誘導制御則よりうまく働くとはいえ, その有効性を確認できた.

最後に, 提案した制御則中の K_f の項の影響に関して考察を行う. 文献 [8] の Remark 1 で述べられているように, 弱誘導制御則 (8) において K_f の項は, その制御則中において大きな役割を果たしている. したがって, 提案した制御則 (12) においても, 関数 K_f は重要な働きを果たしているものと考えられる.

そこで, それを確認するために, 提案した制御則における K_f の項の影響を制限して実験を行った. 具体的には, 式 (9) 中の γ を $\gamma = 0.1$ にすることで, K_f の影響を制限した. その際の実験結果を Fig. 10 に示す.

Fig. 10 (a) および Fig. 10 (b) より, この場合においても Quartet-III は歩行を継続することができたものの, 入力トルクは常に発生したままであり, 歩容も一様にならなかったことが確認できる. つまり, この場合には提案した制御則がうまく

Fig. 10 Experimental results (proposed method with $\gamma = 0.1$)

働かず, Quartet-III の歩容を受動的歩行に移行させることができなかったといえる. こうしたことより, 今回提案した制御則においても, K_f の項は弱誘導制御則の場合と同様に, 大きな役割を果たしていることが実験的に確認できた. また, 提案した制御則をうまく働かせることができる適切な γ を求めることは今後の課題であるといえる.

7. おわりに

本論文では, 以前に提案されている準受動的歩行安定化制御則である弱誘導制御則と離散型 DFC に基づく制御則の二つをうまく組み合わせることで, 連続型 DFC に基づく制御則を提案した. この制御則には二つの特徴を挙げることができる. 一つ目は, 第 k 歩目において追従制御する際の脚の目標軌道として, 第 $k-1$ 歩目の脚の軌道を用いていることであり, 二つ目は, 衝突点のデータに応じて追従制御する際のゲインを調整していることである. この二つの特徴がうまく作用することにより, 以前提案した制御則よりもうまく安定化制御できることが期待できるが, シミュレーションおよび実機 Quartet-III を用いた検証実験にて, 実際に今回提案した制御則の有効性を確認できた.

今後の課題としては, 提案した制御則の理論的な裏付けを取り, 解析的にその有効性を示すこと. また, その過程にて, 制御則 (12) 中の設計パラメータ, 特に 6.2 節の最後でも述べたように適切な γ の設計指針を得ることなどが挙げられる.

最後に受動的歩行に関する研究の今後について少し述べておく. 1 章にて述べたように, 現在, 本論文を含め受動的歩行の応用に関する研究がされ, 数多くの成果が出てきている. しかしながら, 受動的歩行自身の運動解析に関する研究はそれほどされておらず, その運動の力学的原理が充分解明されているとはいえない状況にある. また, 分岐現象等の非線型現象も確認されているが, そのメカニズムに関しては依然として不明なままである. 文献 [10] の 5 章「考察」にて述べられているように, 分岐現象がシミュレーションだけでなく実験にでも確認できるのは, その現象が発生するだけの力学的理由が存在しており, さ

らに、一周期の安定なリミットサイクルが存在する理由と分岐現象等が発生する理由は、決して解離したものではないと考えられる。受動的歩行の研究においては、工学的応用の観点より一周期のリミットサイクルの安定性のみに着目されがちではあるが、受動的歩行の動作原理の全容解明には、分岐現象等の非線形現象の研究も必要不可欠である。以上のことより、今後、これまで提案されてきた制御則の有効性の解析や、受動的歩行のさらなる現実的な工学的応用を行っていくためにも、より本質的な受動的歩行の運動解析、つまり、自然で安定な歩容が生成されるメカニズムや、引き込み現象や分岐現象などの興味深い現象の発生するメカニズムなどを明らかにしていくことも必要不可欠であると考えられる。

参 考 文 献

- [1] T. McGeer: "Passive Dynamic Walking," Int. J. of Rob. Res., vol.9, no.2, pp.62-82, 1990.
- [2] A. Goswami, B. Thuilot and B. Espiau: "A Study of the Passive Gait of a Compass-Like Biped Robot: Symmetry and Chaos," Int. J. of Rob. Res., vol.17, no.12, pp.1282-1301, 1998.
- [3] M. Garcia, A. Chatterjee, A. Ruina and M. Coleman: "The Simplest Walking Model: Stability, Complexity and Scaling," ASME J. of Biomechanical Engineering, vol.120, no.2, pp.281-288, 1998.
- [4] 大須賀, 藤谷, 小野: "8 脚受動的歩行機械 Quartet-挙動解析と実験", 第 27 回 SICE 制御理論シンポジウム資料, pp.71-78, 1998.
- [5] 池俣, 佐野, 藤本: "受動歩行における平衡点とその安定メカニズムの解析", 第 9 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.198-203, 2004.
- [6] 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.
- [7] A. Goswami, B. Espiau and A. Keramane: "Limit cycles and their stability in a passive bipedal gait," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.246-251, 1996.
- [8] K. Osuka and Y. Saruta: "Development and Control of New Legged Robot Quartet III," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.991-995, 2000.
- [9] S. Suzuki and K. Furuta: "Enhancement of stabilization for passive walking by chaos control approach," Proc. of the 15th IFAC Triennial World Congress, 2002.
- [10] M. Spong and F. Bullo: "Controlled symmetries and passive walking," Proc. of the 15th IFAC Triennial World Congress, 2002.
- [11] 浅野, 羅, 山北: "受動歩行を規範とした 2 足ロボットの歩容生成と制御", 日本ロボット学会誌, vol.22, no.1, pp.130-139, 2004.
- [12] M. Ogino, K. Hosoda and M. Asada: "Learning Energy Efficient Walking with Ballistic Walking," Proc. of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM), 2003.
- [13] 川角, 石黒, 川勝: "共同現象を活用した二脚受動歩行機械の引き込み領域拡大", 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 2003.
- [14] 大須賀, 杉本, 杉江: "遅延フィードバック制御に基づく準受動的歩行の安定化制御", 日本ロボット学会誌, vol.22, no.2, pp.193-199, 2004.
- [15] K. Pyragas: "Continuous control of chaos by selfcontrolling feedback," Phys. Lett. A, vol.170, pp.421-428, 1992.
- [16] J.W. Grizzle, F. Plestan and G. Abba: "Poincare's Method for Systems with Impulse Effects: Application to Mechanical Biped Locomotion," Proc. of the 38th Conf. on Decision & Control, pp.3869-3876, 1999.
- [17] 大須賀, 猿田: "受動的歩行に基づいた脚ロボット QuartetIII の歩行制御", 第 8 回制御技術シンポジウム資料, pp.355-360, 2000.

杉本靖博 (Yasuhiro Sugimoto)

1976 年 5 月 20 日生。2000 年京都大学工学部物理工学科卒業, 2002 年京都大学大学院情報学研究科修士課程システム科学専攻修了, 同年同博士課程に進学し, 現在に至る。(日本ロボット学会学生会員)

杉江俊治 (Toshiharu Sugie)

1954 年 3 月 5 日生。1978 年京都大学大学院修士課程精密工学専攻修了, 同年日本電信電話公社入社, 1984 年大阪府立大学工学部助手, 1988 年京都大学工学部助教授, 1997 年同工学研究科教授, 1998 年同情報学研究科教授となり, 現在に至る。工学博士。ロボパスト制御, システム同定, 非線形制御等の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

大須賀公一 (Koichi Osuka)

1959 年 11 月 16 日生。1984 年大阪大学大学院基礎工学研究科制御工学専攻修士課程修了。同年(株)東芝入社, 総合研究所勤務。1986 年大阪府立大学工学部機械工学科助手, 同講師, 同助教授, 1998 年京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻助教授, 2003 年神戸大学工学研究科教授となり, 現在に至る。工学博士。ロボティクス, 制御工学, レスキュー工学の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)