302 Swing-leg Retraction 制御による受動歩行規範型歩行制御

Walking Control Based on Passive Dynamic Walking by Swing-leg Retraction Control

○学 横山 昂史 (室工大)

平間 健介 (牧野フライス)

正 疋田 弘光 (室工大)

正 花島 直彦 (室工大)

正 山下 光久 (室工大)

Takafumi YOKOYAMA, Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto-cho, Muroran

Kensuke HIRAMA, Makino Milling Machine Co., Ltd

Hiromitsu HIKITA, Muroran Institute of Technology

Naohiko HANAJIMA, Muroran Institute of Technology

Mitsuhisa YAMASHITA, Muroran Institute of Technology

Key Words: Passive dynamic walking control, Swing-leg retraction, Biped robot

1. はじめに

受動歩行とは、コントローラやアクチュエータを使うことなく、ロボット自身のダイナミクス（重力と慣性力）のみを使って、緩く傾斜した坂を降りてゆく歩行のことである。受動歩行はエネルギー効率の点において最高の歩行形態であり、歩行ロボットを制御する場合手本とすべき歩行方法であると考えられる。

そこで本研究では、受動歩行を平地での歩行へ応用し、高効率な歩容を生成する方法について考察する。また、歩行ロボットの支持脚交換直後の状態に対して初期値探索を行い、これによって制御トルクを与えなくても次の1stepへ到達する脚の角速度の範囲を調べる。この初期値探索の理論をもとに、より安定かつ高効率な歩行方法として Swing-leg retraction 制御を適用し検討する。

2. コンパスモデルの受動歩行規範型歩行制御

2.1 歩行ロボットの制御方法

歩行ロボットのモデルを図1に示す。歩行ロボットに簡単に歩容を生成させる方法として股関節角度拘束制御¹⁾がある。これは、遊脚衝突時の股関節角度 α を一定にすることでリミットサイクルを形成し、安定した歩行を生成させようという制御である。しかし、さらにエネルギー

Fig.1 Compass model

を向上させるには1step間の作業エネルギーを小さくする必要がある。そこでまず、歩行ロボットがある状態（初期値）から出発すると、まったく制御を行わなくても倒れずに多少とも歩行が継続することがあるのか調べるためそのような初期値を探索した。

2.2 初期値探索

以下のような条件で初期値空間の探索を行った。

- ・水平でフラットな床を歩行ロボットが歩行する
- ・歩行ロボットは股関節角度 $\alpha=0.5236[\text{rad}]$ ($\approx 30[\text{deg}]$)で遊脚衝突後、支持脚交換した直後と仮定する。
- ・遊脚支持脚の角速度を表1に示す範囲で初期値として与えた初期値空間を考える。
- ・制御トルクは加えない。

Table.1 Parameter Values

supportleg[rad/s]	-3.0~0.0
swingleg[rad/s]	0.0~3.0

Fig.2 Search result of initial values

初期値空間の探索におけるシミュレーション結果を図2に示す。横軸は支持脚の初期角速度 $\dot{\theta}_1$ 、縦軸は遊脚の初期角速度 $\dot{\theta}_2$ である。①の領域が後方に転倒した初期値、②の領域が前方に転倒（遊脚が支持脚の横を通り過ぎる前に支持脚角度が0[deg]を通過）した初期値、③の領域が次の一步に到達した初期値を示している。その中でも特に、次の一步に到達した後に数歩歩行が継続した初期値を④の領域で示している。図からわかるように $\dot{\theta}_1$ が-1.5~-1.0の範囲で $\dot{\theta}_2$ の値に関係なくほぼ③、④の領域となっている。

この図から、制御を行わなくても（衝突により失ったエネルギーを回復させなくても）、歩行ロボットの持つエネルギーによって歩行が継続する初期値（支持脚交換直後の状態）が存在するということがわかる。

この結果から新たな制御方策、股関節角度遅延拘束制御を提案した。この制御方策は、股関節にアクチュエータによる制御を行わず、ロボットのダイナミクスのみで動く期間（受動期間）と、股関節角度 α が目標股関節角度となるような制御を行う期間（能動期間）を設けることで、高効率かつ、安定な歩行を生成させる制御である。シミュレーションの結果、股関節角度拘束制御に比べ10倍以上エネルギー効率が良くなった。

④または③エリア内に入ることを保証するためには、支持脚交換前後の角速度（ $\dot{\theta}^-$ 、 $\dot{\theta}^+$ ）の関係が分かっている必要がある（ここで-は支持脚交換前、+は支持脚交換後を表す）。衝突方程

式に支持脚交換前の角速度 ($\dot{\theta}_1^-$, $\dot{\theta}_2^-$) を代入して支持脚交換後の脚の角速度 $\dot{\theta}^+$ を求めた。縦軸・横軸を遊脚衝突前の脚の角速度 ($\dot{\theta}_1^-$, $\dot{\theta}_2^-$) とし、衝突後の支持脚の角速度 $\dot{\theta}_1^+$ の等高線図を図3に示す。図を見ると $\dot{\theta}_1^+$ が $-1.5 \sim -1.0$ の範囲において、支持脚交換前後の角速度の関係 ($\dot{\theta}_1^-$, $\dot{\theta}_2^-$) が $\dot{\theta}_1^- > \dot{\theta}_2^-$ となっている。 $\dot{\theta}_1^- > \dot{\theta}_2^-$ とするには、股関節がいったん開ききった後、再び閉じる方向へと動作させる必要がある。このような動作は“Swing-leg retraction”と呼ばれており、リミットサイクルを規範とした歩容において頻繁に見られる。

Fig.3 $\dot{\theta}_1^+$ contour map

3. Swing-leg retraction

“Swing-leg retraction”は歩容安定性の向上にも深く関係していることが報告されている。そこで、この現象を利用することにより安定かつエネルギー効率のよい歩容を生成させることを目指す。

図4に示すように能動期間に入った瞬間 (knot point 0) と予め設定しておいた2点 (knot point 1, knot point 2) を通る“retraction 軌道”を生成し、それに追従させる方法を考える。

また、制御を開始するタイミングを遅らせる、つまり、制御を開始する股関節角度を ϕ [rad] とすると、 ϕ を大きくすることで必要になるエネルギーが少なくなりエネルギー効率が上がることが期待できる。これを検証するためにシミュレーションを行った。今回のシミュレーションでは (1) 式のように制御を行う。 α ($=\theta_1 - \theta_2$) は股関節角度、 α_{sp} は目標とする股関節角度、 α_o は支持脚角度 θ_1 に対する retraction 軌道である。また、 k_p , k_{po} , k_d はゲイン定数である。

$$u = \begin{cases} 0 & \alpha \leq \phi \\ k_p (\alpha_{sp} - \alpha) + k_{po} (\alpha_o - \alpha) + k_d \dot{\alpha} & \alpha > \phi \end{cases} \quad (1)$$

Fig.4 Desired leg-trajectory parameterized with three knot points (six parameters) for the swing.

4. 結果

図5は $\phi=0$ としたときの(a)各脚の角度、(b)各脚の角速度を示している。図5の(a), (b)ともに一定の周期かつ振幅で変化していることがわかるため安定した歩容が生成できているといえる。

図6は各股関節角度 ϕ に対するエネルギー効率 C_{mt} を比例ゲイン k_p の値ごとにまとめたものである。いずれのグラフも右下がりになっていることから、制御を開始する股関節角度 ϕ を遅らせることでエネルギー効率が向上していることがわかる。しかし、これ以上 ϕ を大きくするとトルクが足りずに転倒してしまったため、制御を開始する股関節角度 ϕ には最適な条件が存在すると思われる。

(a) Angular positions (b) Angular velocities

Fig.5 Simulation result

(a) $k_p=1.2$ (b) $k_p=1.3$ (c) $k_p=1.4$ (d) $k_p=1.5$

Fig.6 Simulation result

5. おわりに

本論文では、制御方策として股関節角度拘束制御、初期値空間の探索結果より股関節角度遅延拘束制御、これを発展させた Swing-leg retraction 制御による歩容の生成方法について報告した。制御を開始するタイミングを遅らせることにより、 k_p の値によらずエネルギー効率が向上することを示した。

参考文献

[1] Asano, F. "Asymptotically Stable Gait Generation Based on Mechanical Energy Balance" Proceeding of the 2007 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Akita, Japan, May 10-12, 1P1-E04(4), 2007.