

筋収縮力の能動制御による二足歩行ロボットの降段動作獲得

北川 周平† 加藤 昇平† 伊藤 英則†

名古屋工業大学 大学院 工学研究科 情報工学専攻†

1 はじめに

降段動作とは段差を降りる歩行動作のことである。この動作は、片足立ちや片足着地などの高度なバランス能力を必要とするため、下肢機能障害者や高齢者等にとって難易度の高い動作として知られている。そのため、リハビリテーション医学等の分野では人間による降段動作の分析が多数行われている [1]。一方、二足歩行ロボットの分野では、脊椎動物のリズム運動を規範とした Central Pattern Generator (CPG) を用いることでロボットによる平地歩行を実現している [2]。しかし、降段動作を必要とするような段差のある環境では歩行を継続することができない。そこで本研究では、人間による降段動作の分析結果に基づき降段動作の獲得手法を考え、CPG を用いた平地歩行制御と混合することで、段差のある環境でも歩行継続可能な制御手法を提案する。

2 ロボットモデル

本研究では、多賀らが用いている CPG を用いたロボットモデル (以後、CPG モデル) [2] を採用する。このロボットは、体幹部、腰部、両脚の大腿部、下腿部、足部の計 8 リンクで構成され、各リンク間は 1 自由度で繋がり計 7 自由度を有している。大きさは人間の成人男性程度の大きさを想定し、身長 1.75[m]、70.0[kg] とした。実験では、図 1 に示すような歩容を獲得した状態から降段動作を開始する。なお、同図は 0.4[s] 毎の状態を表示したものである。

3 降段動作獲得手法

3.1 制御期間と制御部

CPG モデルは「相互引き込み」により環境の変化に頑健な歩行を実現していると言われているが、実際にどの程度の段差がある環境まで歩行を継続できるか実験したところ、0.005[m] より大きい段差がある環境になると歩行の継続ができなかった。また、人間による降段動作の分析結果 [1] によると、段差が小さい場合には、後脚 (あとから段差を越える脚) の膝関節によって体幹を下方へ制動させ、先脚 (先に段差を越える脚) の足首関節によって下肢の屈曲方向への回転モーメントを制動している。そこで本研究では、図 2 に示すよう

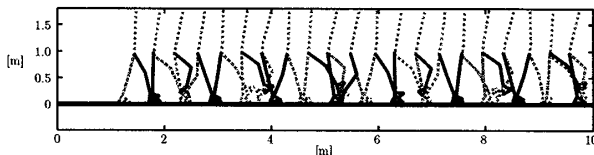


図 1: CPG モデルによる平地歩行時の歩容

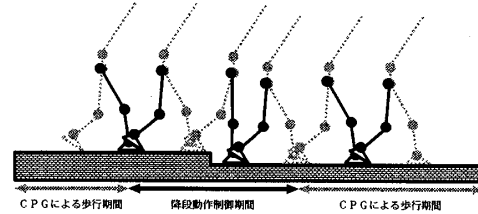


図 2: 制御期間

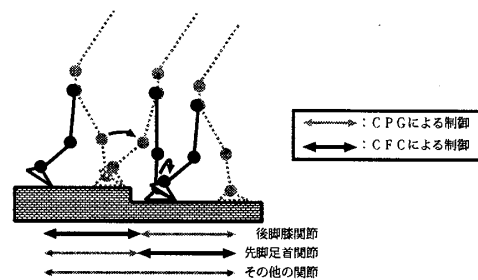


図 3: 降段動作制御期間内の制御

に、段差を越える直前の後脚の支持脚期間 (地面に足裏が接地している期間) と段差を越えた直後の先脚の支持脚期間を「降段動作制御期間」とし、この期間を筋収縮力の能動制御 (以後、CFC: Contraction Force Control) で制御し、他の期間は CPG モデルで制御する切替え制御を提案する。降段動作制御期間においては、図 3 に示すように、後脚支持脚期間における後脚の膝関節と先脚支持脚期間における先脚の足首関節を CFC の制御対象とする。

3.2 制御手法

CPG による歩行期間の制御手法については多賀らの手法 [2] を参考にした。ここでは、降段動作制御期間の CFC による制御手法について述べる。

人間は筋肉を弛緩または収縮することで、関節の動きを柔らかくしたり、固くしたりしている。本研究では、この筋肉による関節の制御が、ロボットの降段動作でも有効であると考え、筋肉をモデル化した筋粘弾性モデル [3] を用いる。以下に、ひとつの関節を取り巻く単関節筋の筋粘弾性モデルの式を示す。

$$\tau_f = d \times (u_f - k \times u_f \times \theta - b \times u_f \times \dot{\theta}) \quad (1)$$

$$\tau_e = d \times (u_e + k \times u_e \times \theta + b \times u_e \times \dot{\theta}) \quad (2)$$

ここで、 τ は筋肉の出力、 d は筋粘弾性モデルのモーメントアーム長、 u は筋肉の収縮力、 k は筋肉の粘性係数、 b は筋肉の弾性係数、 θ は関節角度、 $\dot{\theta}$ は同角速度を表す。定数 d 、 k 、 b は橋本らの研究 [4] を参考にそれぞれ $d = 0.01$ 、 $k = 17.0$ 、 $b = 1.33$ とした。また、式 (1)

*Descending Step Motion Acquisition for Biped Robots based on Contraction Force Control.

† Shuhei KITAGAWA, Shohei KATO, and Hidenori ITOH, Department of Computer Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology.

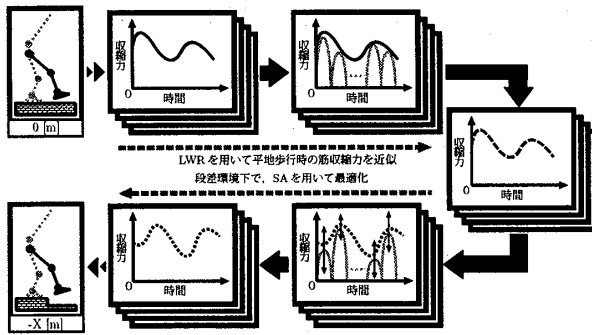


図 4: 制御手法の概略

と式 (2) はそれぞれ屈筋と伸筋を表している。関節は、この屈筋と伸筋が互いに引っ張り合うことによって制御される。つまり、屈筋と伸筋それぞれの収縮力 u を制御することで、関節の曲げ伸ばし (屈曲および進展) を柔らかくも固くも制御することができる。そこで、図 3 に示す後脚膝関節の CFC による制御では後脚膝関節の屈筋と伸筋を制御し、先脚足首関節の CFC による制御では先脚足首関節の屈筋と伸筋を制御する。次に筋の収縮力 u の制御方法について述べる。

筋の収縮力 u は最適化手法の一つである Simulated Annealing (SA) を用いて最適化する。図 4 に制御手法の概略を示す。具体的には、まず平地歩行時における筋の収縮力の近似軌道を Locally Weighted Regression (LWR) を用いて生成する。ここで、人間は比較的小さい段差に対しては平地歩行を変形することで降段動作を生成していると考え、平地歩行時における近似軌道を降段動作のベースとした。LWR は重みを調節することで軌道を変更することができるため、これにより降段動作に最適な筋の収縮力の軌道を新たに獲得する。LWR の重み調節にも SA を用いる。

4 降段動作獲得実験

上記の降段動作獲得手法の効果を確認するため、シミュレーションを用いて実験を行った。実験は、2.5[m] 地点に段差が 1 つのみある環境 (歩行を開始してから 3 歩目で段差を越える位置) で行った。段差の高さは 0.01~0.30[m] まで 0.01[m] 毎に用意した。それぞれの環境で、CFC による制御パラメータを最適化させながら 20,000 回試行し、その過程で歩行を開始してから 10[s] 間以上歩行を継続することができれば、その環境で降段動作を獲得できたとみなして成功とした。

4.1 降段動作の獲得結果と考察

表 1 に実験結果を示す。本実験では、0.01~0.17, 0.19~0.21, 0.23, 0.25[m] の段差がある環境で降段動作を獲得することができた。図 5, 6 に、得られた歩容の例として 0.10[m] と 0.20[m] の段差がある環境で得られた歩容を示す。

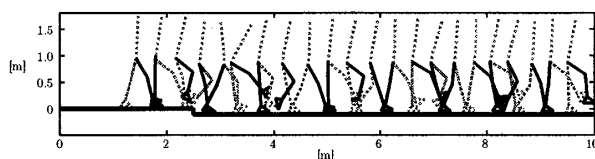


図 5: 0.10[m] の段差がある環境で得られた歩容

表 1: 降段動作の獲得結果

段差	成功	段差	成功	段差	成功
0.01[m]	✓	0.11[m]	✓	0.21[m]	✓
0.02[m]	✓	0.12[m]	✓	0.22[m]	
0.03[m]	✓	0.13[m]	✓	0.23[m]	✓
0.04[m]	✓	0.14[m]	✓	0.24[m]	
0.05[m]	✓	0.15[m]	✓	0.25[m]	✓
0.06[m]	✓	0.16[m]	✓	0.26[m]	
0.07[m]	✓	0.17[m]	✓	0.27[m]	
0.08[m]	✓	0.18[m]		0.28[m]	
0.09[m]	✓	0.19[m]	✓	0.29[m]	
0.10[m]	✓	0.20[m]	✓	0.30[m]	

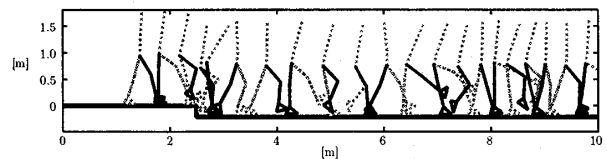


図 6: 0.20[m] の段差がある環境で得られた歩容

人間の降段動作を分析した研究 [1] によれば、0.10, 0.20[m] の段差時においては後脚の膝関節によって体幹を下方へ制動させ、先脚の足首関節によって下肢の屈曲方向への回転モーメントを制動している。本研究においても CFC の制御対象として後脚の膝関節と先脚の足首関節を考慮することで、0.20[m] 程度の段差がある環境下での降段動作獲得に成功している。一方で、0.25[m] を超える段差がある環境下での降段動作は本実験では獲得できなかった。しかし、人間は 0.30[m] の段差時には先脚の足首関節に加えて先脚の股関節と膝関節も使って下肢の屈曲方向への回転モーメントを制動している。そこで、今後 CFC の制御対象に先脚の股関節と膝関節を追加することで、本実験で獲得できなかった段差がある環境下でも降段動作が実現できると期待できる。

5 おわりに

本研究では、人間による降段動作の分析結果に基づいた降段動作の獲得手法を考え、CPG を用いた平地歩行制御と混合することで、段差のある環境でも歩行継続可能な制御手法を提案した。これにより、二足歩行ロボットが歩行可能な環境を広げることができた。

参考文献

- [1] 黒後 裕彦, 飛松 好子, 毛利 光宏: “関節モーメントによる健常者の段昇降分析”, リハビリテーション医学, Vol. 37, No. 6, pp. 389-397 (2000).
- [2] G. Taga: “A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion I. Emergence of basic gait” Biological Cybernetics, Vol. 73, pp. 97-111 (1995).
- [3] 伊藤 宏司, 伊藤 正美: “生体とロボットにおける運動制御”, 計測自動制御学会 (1991).
- [4] 楠本 秀忠, 朴 炯俊, 吉田 正樹, 赤澤 堅造: “脳による筋の発生張力と力学特性の同時調節”, バイオメカニズム 12, pp. 211-220 (1994).