# 棒高跳びロボットのポール曲げ動作による跳躍高さ向上

○福島俊彦(東京大学) 西川鋭(東京大学,学振特別研究員 DC) 國吉康夫(東京大学)

# 1. 序論

ロボットの多様な行動を実現するため、ダイナミッ クなロコモーションを行うことが求められている.ロ ボットのロコモーションにおいて、弾性要素は重要な 役割を果たしており、Raibert らは空気圧シリンダによ る弾性力を生かしたホッピングや走行を行った [1].ま た、コイルスプリングを用いたエネルギー回生 [2] やブ レードバネを用いたロボットの重量比高出力化 [3] が行 われてきた.

一方,人は腱[4]に代表される身体内の弾性要素を活 用し跳躍・走行を行っている.また,柔軟な道具を使用 することでさらなる運動性能の向上を図ることができ る.特に,棒高跳びは柔軟なポールを用いることで身 体の持つ弾性容量の限界を拡張することができる[5].

これまでのロボットに用いられてきた身体内の弾性 要素に対して、棒高跳びのポールは身体に対する弾性 容量・長さ・柔軟性の観点から大きく異なる.ロボッ トがこのような身体外におけるポールのような弾性要 素を扱うことができれば、ロボットのデザインの幅が より広がることが考えられる.

スポーツ科学の分野では,跳躍高さ向上に向けてポー ルの剛性や長さの選定について研究が行われている[6, 7].確かにポールの性質が跳躍高さに与える影響は大 きな割合を占めるが,跳躍中のポールに対する曲げ動 作も跳躍高さに大きな影響を与える.事実,バーを飛 び越える瞬間の競技者のエネルギーは,踏切時に持つ エネルギーの120%になることが知られている[8].

この曲げ動作に関する研究として, Frère らは筋電計 測により跳躍中の上半身の働きを調査した [8]. また, McGinnis らは逆運動学を用いて腕が発生する曲げモー メント量を計算した [9]. このような跳躍中の競技者の 動作は調査されてきたが,競技者の動作がポールを含 む系全体へ与える影響は研究されてこなかった.

そこで著者らは、曲げ動作が系に与える影響を考慮 できる「遷移座屈モデル」を提案し、シミュレーショ ンにより曲げ動作の効果を検証した [10]. さらに本研 究では、この曲げ動作を行うロボットを開発し、曲げ 動作が跳躍高さに与える影響を調査する.

# 2. ポール曲げ動作

逆運動学計算 [8] や筋電測定の結果 [9], 熟達した競 技者は跳躍時に以下のように動作していることが知ら れている (図 1).

フェーズ 1: ポール突っ込み・湾曲フェーズ

前方の腕を上に突き上げることでポールをたわみ が増加する方向に曲げる (positive bend).

ポールに体を引き付けることでポールをたわみが 減少する方向に曲げる (negative bend).



図1 遷移座屈モデル.赤色の矢印は腕からの力の方向 を表し,青色の矢印はポールに対する曲げモーメン トの方向を表す.



図2座屈による棒高跳びモデル

続いて,棒高跳びのモデルを立てる.詳細は文献 [10] で発表済みのため,ここでは要旨のみを述べる.曲げ 動作を含まない Euler 座屈モデルを用いた棒高跳びモ デル (図 2) は以下の運動方程式で表される.

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ l \\ \dot{l} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\theta} \\ -\frac{1}{l+l_0}(2\dot{l}\dot{\theta} + g\cos\theta) \\ \dot{l} \\ -(l+l_0)\dot{\theta}^2 + g\sin\theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{f_s}{m} \end{pmatrix}.$$
 (1)

$$\mathcal{Z}\mathcal{T}\mathcal{T} \quad f_{\rm s} = C \frac{\pi^2 E I}{l_0^2} = (\text{const.}). \tag{2}$$

Cは端末状態係数,Eはヤング率,Iは断面二次モー メントを表す.端末状態係数Cはポール端末の固定状 態で決定し,両端ともヒンジ端と仮定しC = 1となる. ここで,本研究では端末状態係数C = C(u)とし, ポールから受ける力 $f_s$ を $f'_s$ として再定義する遷移座 屈モデルを提案する.C(u)を入力曲げモーメントuに

# RSJ2013AC2F2-08





|関する変数とすることで曲げ動作を表現する (式 (3)).

$$f'_{\rm s} = C(u) \frac{\pi^2 EI}{l_0^2}.$$
 (3)

フェーズ 1: C(u) < 1 positive bend

 $f'_{
m s} < f_{
m s}$ となり,ポールがたわみやすくなる.ポールを小さな力で大きく押し縮めることができる.

# フェーズ 2: C(u) > 1 negative bend

 $f'_s > f_s$ となり,ポールがたわみづらくなる.ポー ル伸展時により大きな力を得ることができる.

# 3. シミュレーション実験

曲げ動作の跳躍高さに与える影響を調査するため, 式(1)の微分方程式を初期条件を用いて数値的に解く ことで、シミュレーション実験を行った(タイムステッ プ:1 [ms]).ここで、跳躍高さ H<sub>v</sub> はポールがまっす ぐ伸びたときに手を放し、その後放物運動を行った場 合の最高到達点と定義する.

#### **3.1** 実験1:曲げ動作の効果

曲げ動作が跳躍高さ  $H_v$  に与える影響を調査するため、複数の初速度で従来の Euler 座屈モデルと提案する遷移座屈モデルでの跳躍高さを比較した (図 3). 遷移座屈モデルではフェーズ 1 で  $C_1 = 0.8$ , フェーズ 2 で  $C_2 = 1.2$  とした.結果、全ての初速度において提案 モデルの方が跳躍高さ  $H_v$  が大きかった.このことから、曲げ動作に効果があることが確認できた.

#### 3.2 実験2:曲げ動作切替タイミング

曲げ動作のタイミングやスピードが跳躍高さ H<sub>v</sub> に 与える影響を調査するため,曲げ動作の方向の切り替 えタイミングと切り替えスピードを変化させてシミュ レーション実験を行った.結果,ポールがたわみきっ た直後に素早く切り替えることが重要であることがわ かった.

# 4. 曲げ動作ロボットの開発

シミュレーションで得られた知見から,ポール曲げ 動作ロボット (Pole Active Bending RObot: PABRO) を開発した (図 4,表 1). このロボットは搭載する直動

表1曲げ動作ロボットのスペック	
パラメータ	値
ロボット	
質量	1.5  [kg]
大きさ (L-W-H)	220-220-280 [mm]
自由度	2 (直動 ×1+ 受動回転 ×1)
制御基板	Arduino Uno R3
アクチュエータ	エアシリンダ
バルブ	5ポート on-off
センサ	発射タイミング検出器
電源	12 [V] 乾電池 ×3
圧力供給源	500 [ml] アルミタンク
ポール	
ヤング率	19.3 [GPa]
断面二次モーメント	$77.3  [mm^4]$



⊠ 4Pole Active Bending RObot: PABRO.



図5シリンダによる曲げ動作

アクチュエータを動作させることにより,ポール先端 に曲げモーメントを加えることができる(図 5).アク チュエータとして,軽量化およびバックドライバビリ ティの観点からエアシリンダを選定した.また,電源 ケーブルや空気供給チューブなどの外的要因を最大限 排除するため,マイコンボードと電源および空気貯蔵 タンクを用いた自立型のロボットとした.

#### 5. 実機実験

#### 5.1 実験セットアップ

以下に示す流れで棒高跳び実験を行った (図 6).

- (i) 発射装置 (図 6(a)) でロボットに初期速度を与える.
- (ii) ポールをポール突っ込み台 (図 6(b)) に差し込む.
- (iii) ポールがたわむ.このフェーズでポールにぶら下 がったロボットがアクチュエーションを行う.
- (iv) ポールが伸びきったタイミングでロボットがポー ルから手を離す.



図6棒高跳び実験システム



(a) launcher

(b) pole plant box

図7実験装置

表 2 実験パラメータ	
パラメータ	値
ポール長	1.00 [m]
初期速度	4.2  [m/s]
初期角度	20  [deg]
初期高さ	$0.55 \; [m]$

本実験ではロボットに手を離す機構が未実装のため,跳 躍高さ H<sub>v</sub> は (iv) のタイミングで手を離したと仮定し, その後放物運動を行った場合の最高到達点とする.

また,実験パラメータはシミュレーション実験に基 いて決定した (表 2).

#### 5.2 実験1:曲げ動作の効果

曲げ動作の効果を検証するため、ロボットの「曲げ 動作なし」の場合と「曲げ動作あり」の場合の跳躍高 さ H<sub>v</sub>の比較を行った.跳躍の様子を図 8 に示す.「曲 げ動作あり」の場合,「曲げ動作なし」と比較し,はじ めポールが大きくたわみ、その後ポールが素早く伸び た.その結果、ロボットはより多くの弾性エネルギー を受け取ることが出来た.

「曲げ動作なし」の場合ポールを離した時にロボットが持つ上方向の速度は 0.29 [m/s] であったのに対し, 「曲げ動作あり」の場合 1.61 [m/s] であり, 跳躍高さ  $H_v$ は有意に向上した (図 9). 跳躍高さ差分  $\Delta H_v$  は 0.15 [m] であり, 13%向上した.

ここで、供給エネルギーのうち跳躍高さ向上に使われたエネルギーの割合を算出した.シリンダのストロークは neutral  $\rightarrow$  positive  $\rightarrow$  negative 0.3/2 ストローク



図 9 曲げ動作による跳躍高さの向上. "neutral" は「曲 げ動作なし」, "active-bend" は「曲げ動作あり」 を表す. エラーバーは標準偏差を表す.  $P = 9.1 \times 10^{-7} < 0.05$  (Student's t-test).



図 10 (a) 曲げ動作切替タイミング変化による跳躍高さ 変化. 横軸はポール突っ込み時からの経過時間,赤 線はポールが最大湾曲したタイミングを表す. (b) 曲げ動作切替タイミングによるポール振動. 横軸は negative bend 開始時からポールリリース時までの 時間を正規化した時間,縦軸はポール両端を直線で 結んだときの距離を表す.

であることから,シリンダからの最大供給エネルギー *E*<sub>sup</sub> は以下のように求まる.

$$E_{\rm sup} = \int_{V/2}^{V} P(V)dV + \int_{V}^{0} P(V)dV \qquad (4)$$

$$\leq P_{\max} \frac{\pi D^2}{4} L \times \frac{3}{2} = 10.2 [J].$$
 (5)

ここで P はシリンダの内圧,  $P_{\text{max}}$  はシリンダに供給 される最大圧力, D はシリンダの内径, L はシリンダ のストロークである.次にシリンダの供給するエネル ギーが全て跳躍高さ向上に使われた場合の跳躍高さ差 分  $\Delta H_{\text{vsup}}$  は以下のように求まる.

$$\Delta H_{\rm vsup} = \frac{E_{\rm sup}}{mg} = 0.69[\rm m]. \tag{6}$$

ここで, m はロボットの質量であり, g は重力加速度 である.実験結果の跳躍高さ差分  $\Delta H_v$  が 0.15 [m] で あることから, 22%以上のエネルギーが跳躍高さ向上 に使われたといえる.

#### 5.3 実験2:曲げ動作切替タイミング

曲げ動作切替タイミングが跳躍高さ H<sub>v</sub> に与える影響を調査するため,曲げ動作切替タイミングをいくつ か変化させて実験を行った.切替タイミング変化に対





(b) active-bending

図 8 棒高跳び実験 (1 コマあたり 1/6 [s]).

する跳躍高さにはポールが最もたわんだ直後に極大値 が存在した (図 10(a)). この結果はシミュレーション の結果とも一致した.また,曲げ動作効果があるタイ ミングの範囲は狭く,切替タイミングは跳躍高さ向上 に対して重要な要素であることがわかった.

切替タイミングが適切なタイミングよりも早かった場 合,ポールが周期の速い振動を起こしていた(図10(b)). 切替タイミングが最適なタイミングの場合,ポールの 振動周期とポールの伸展周期が調和し,ポール先端が ポール突っ込み台から跳ね上がるほどの速度をもった.

# 6. 考察

「曲げ動作なし」と「曲げ動作あり」の跳躍高さ  $H_v$ の分散を比較すると、それぞれ  $6.2 \times 10^{-5}$ ,  $3.3 \times 10^{-3}$ であり、曲げ動作を行った場合の方が分散が大きかった。特に negative bend を行った時にポールの横方向のたわみが増大していた。このことからロボットがアクチュエーションを行い、ポールにエネルギーを与えることで、ポールを突く角度や初期速度等の僅かな誤差が増大していると考えられる。

しかし,これらの初期条件を実機で厳密に揃えることは困難であり,誤差を吸収することのできる柔軟な身体やフィードバックコントロールが必要となる.

# 7. 結論

本研究では棒高跳びにおける曲げ動作に対するモデ ルを提案し、シミュレーション及び実機実験にて曲げ動 作の跳躍高さに与える効果を検証した.その結果、ポー ルにぶら下がったロボットが空中でポールに対して曲 げ動作を行うことで、跳躍高さを有意に向上できるこ とを確認した.さらに、曲げ動作方向の切替タイミン グが跳躍高さを決定づける重要なパラメータであるこ とを確認した.また、アクチュエーションのタイミング や初期条件の僅かな誤差により、跳躍高さが大きく変 化することから、今後こういった誤差を吸収できる柔 軟な身体やフィードバックコントロールを取り入れる.

# 謝辞

本研究は科研費基盤研究 (A) 22240015 の補助を受けた.

#### 参考文献

- M. H. Raibert, Legged robots that balance. MIT press Cambridge, MA, 1986, vol. 3.
- [2] M. Ahmadi and M. Buehler, "Controlled passive dynamic running experiments with the arl-monopod ii," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, no. 5, pp. 974–986, 2006.
- [3] B. Brown and G. Zeglin, "The bow leg hopping robot," in *IEEE International Conference on Robotics* and Automation (ICRA), vol. 1, 1998, pp. 781–786.
- [4] R. M. Alexander, Elastic mechanisms in animal movement. Cambridge University Press, 1988.
- [5] J. Hœpffner, "Elasticity in the physics of sports," *Physics of sports*, 2012.
- [6] N. P. Linthorne, "Energy loss in the pole vault take-off and the advantage of the flexible pole," *Sports Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 205–218, 2001.
- [7] M. Ekevad and B. Lundberg, "Influence of pole length and stiffness on the energy conversion in polevaulting." *Journal of biomechanics*, vol. 30, no. 3, pp. 259–264, 1997.
- [8] J. Frère, B. Göpfert, J. Slawinski, and C. Tourny-Chollet, "Effect of the upper limbs muscles activity on the mechanical energy gain in pole vaulting," *Journal* of Electromyography and Kinesiology, vol. 22, no. 2, pp. 207–214, 2012.
- [9] P. M. McGinnis and L. A. Bergman, "An inverse dynamic analysis of the pole vault," *International Journal of Sport Biomechanics*, vol. 2, no. 3, pp. 186–201, 1987.
- [10] T. Fukushima, S. Nishikawa, K. Tanaka, and Y. Kuniyoshi, "Transitional buckling model for active bending effect in pole vault," in 6th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM), 2013.