

棒高跳びにおけるスイング動作タイミングが ボールの挙動に与える効果のロボットによる検討

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

1. 序論

ダイナミック運動には、衝撃吸収・エネルギー回生の観点から弾性要素が重要な役割を果たす。そのため、ダイナミック運動を行う多くのロボットには弾性要素が備えられている。これらのロボットは、エネルギー回生による効率の良いホッピング [1] や宙返り [2] のようなダイナミックな運動を実現している。

一方、ヒトや動物はその身体に筋腱などの弾性要素を備え、それを活かすことで運動パフォーマンスを向上させていることが知られている [3]。さらに、身体のみならず、棒高跳びにおけるボールやトランポリンのようにはるかに大きな容量を備えた弾性体を扱うことで飛躍的にその運動能力を向上させる。棒高跳びの研究において、跳躍能力における弾性ボールの剛体ボールに対する優位性が世界記録の向上 [4] やモデル [5] において示されており、大きな弾性要素を使うことの有用性が期待される。加えて、ボール突っ込み後のボールのみで接地しているフェーズ（以下空中期）における運動によるエネルギーの向上が確かめられており [6]、受動的ではなく能動的に身体を動かすことで弾性要素をさらに活かすことができると考えられる。

これまでに筆者らは、空中期にボールに対して適切に曲げモーメントの方向を変化させることで、ボールの挙動を変化させ、跳躍高さを向上できることを、シミュレーションにより検証してきた [7]。そこでは、曲げモーメントが棒高跳びに与える影響を調べたが、身体を持つヒトは曲げモーメントを加える際に慣性力を利用するため、回転方向のモーメントに加えて並進方向の反力も受ける。腕を備えたロボットで棒高跳び運動をする際には、この反力の効果も併せて考える必要がある。そこで、本研究では、筋骨格系の腕を備えたロボットを開発、ボールを用いた跳躍実験を通して慣性力の効果について検討を行った。

2. 棒高跳びにおける身体運動の効果

体を振ることによる慣性力の反作用は、モーメントと反力に分けられる。この章ではそれぞれの効果について述べ、それを活かす方法を検討する。

2.1 モーメント

以前の研究により、空中期の前半にボールを曲げる側に、空中期の後半にボールを伸ばす側に曲げモーメントを加えることで、跳躍性能が向上することが示唆されている [7]。この曲げモーメントを慣性力により発生させるためには、前半にボールから離れる側に、後半にボールに近づく側に力を加えるのが適切であると考えられる (図 1(a))。競技者も、まずボールにぶら下がった後にスイング動作に移行しており、筋の活動も

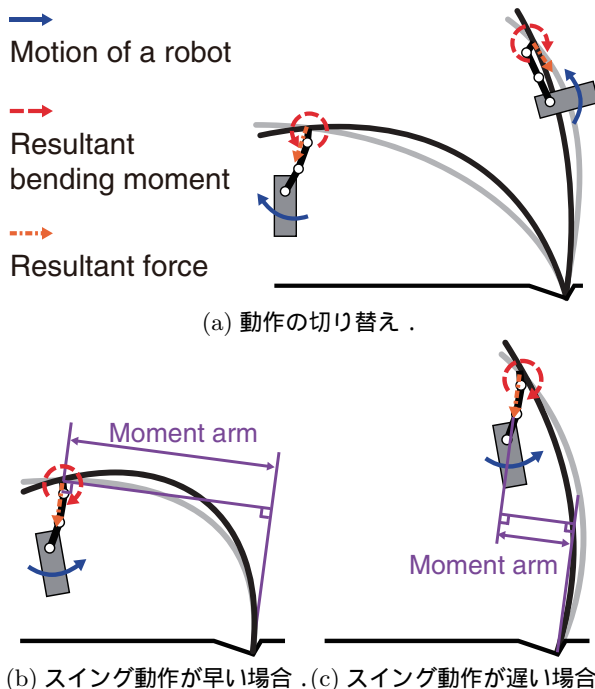


図 1 動作の切り替えがボールに及ぼす影響。薄線は動作の少し前のボールを示す。

その運動をするのに適切な側の活動が高まっていることが、競技中の筋電データから見て取れる [6]。

2.2 反力

慣性力の反力は棒の握り手から身体の重心方向に向かう (図 1 橙一点鎖線)。スイングをする際には、身体の加速度による反力のボール突っ込み台（以下ボックス）回りのモーメントは、ボールのボックス回りの回転を妨げる方向に作用するため、パフォーマンスの低下につながる。身体がボックスから遠い時にスイングを始めると、このモーメントは、モーメントアームが大きいため大きくなる (図 1(b))。一方、身体がボックスの真上に近付いた時にスイングを始めると、モーメントアームを小さくできるため、この作用を抑えることができる (図 1(c))。以上の考えにより、スイング開始タイミングは身体がボックスに近付いた時に行うのが良いという仮説が立てられる。本研究ではこの仮説の検証のためにロボット実験を行う。

3. 棒高跳びロボットの開発

3.1 ロボットの開発

棒高跳び中に慣性力を加えられる長い腕を備えたロボットとして、Pneumatic Actuated Upper-Limb-Type

表 1 ロボットのスペック.

アクチュエータ	McKibben 型空気圧人工筋
バルブ	5 ポートバルブ 4 個 (CKD, 4GA130-C6-E2-3)
コンプレッサ	アネスト岩田, SLP-221EBD(外部)
エアバンプ	外部タンク (10 l) 6 個 搭載タンク (0.5 l) 1 個
制御基板	General Robotix, Lepracaun
OS	linux-2.6.21.1-ARTLinux
内圧センサ	フジクラ, XFGM-6001MPGSR
角度センサ	村田製作所, PVS1A103A01
6 軸加速度センサ	Microstrain, 3DM-GX3
素材	ナイロン, CFRP
質量	2.0 kg
腕全長	0.42m

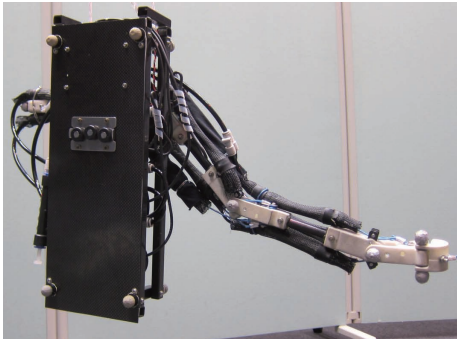


図 2 Pneumatic Actuated Upper-Limb-Type Experimental Robot(Paulter) の外観 .

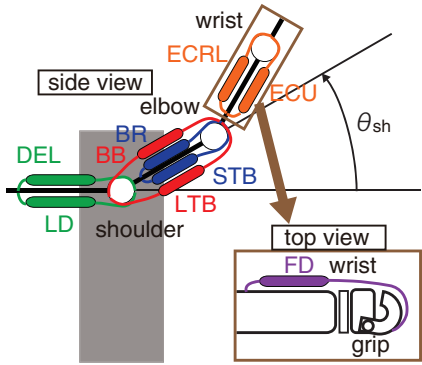


図 3 筋配置 . DEL:三角筋, LD:広背筋, BB:上腕二頭筋, LTB:上腕三頭筋長頭, BR:上腕筋, STB:上腕三頭筋短頭, ECRL:長橈骨手根伸筋, ECU:尺側手根伸筋, FD:指屈筋. θ_{sh} は肩の関節角の定義である .

Experimental Robot (Paulter)(表 1, 図 2)を開発した . ヒトの筋配置を参考にロボット腕部の筋配置を決定した (図 3) . ポールとの衝突を避け, ポールの向こう側に体を移動しやすくするために, 腕は体の横にずらして配置した . また, ポールを握る部分はシリコンゴム (Engraving, PROSILICONE RUBBER RTV-S40/360III) を張ることで摩擦を大きくし, 動作中にポールが抜けないようにした .

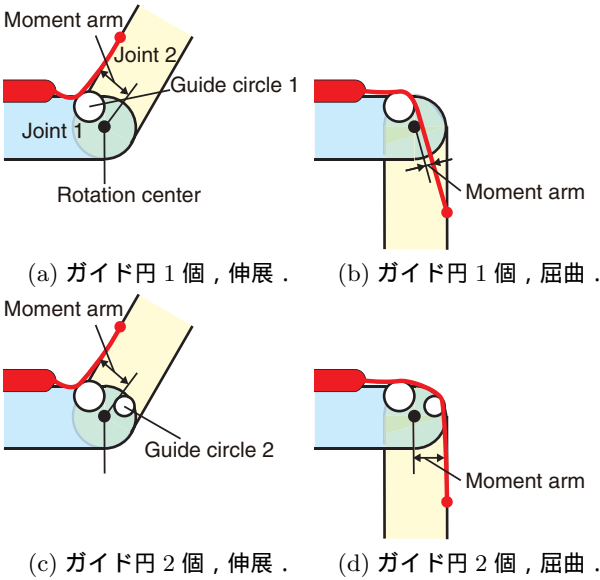


図 4 腱ガイドの設計 .

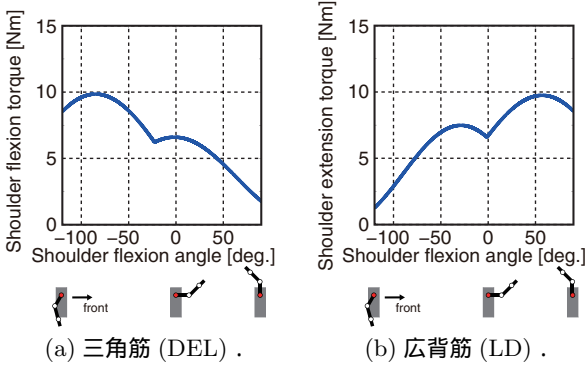


図 5 筋のトルク-角度特性 (内圧 0.8 MPa における理論値) .

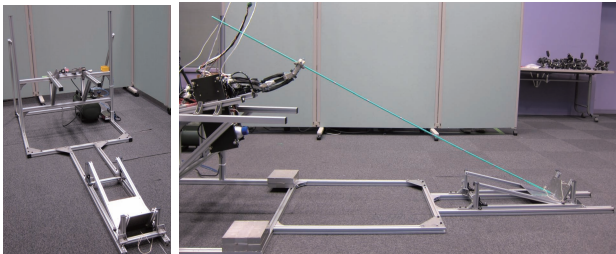
3.2 角度依存モーメントアーム機構の改良

スイング動作を行う際には大きな可動域が必要となり, 変化する姿勢の中でボールの動きに抗うためには大きな曲げモーメントを広い範囲で発揮できることが必要と考えられる . そこで, モーメントアームを角度依存にすることで, トルク-角度特性を適切なものにするを考える [8] . しかし, モーメントアームのガイド円の中心をずらした機構では, 可動域が大きい場合, 極端にモーメントアームが小さくなる領域ができてしまう (図 4(a)(b)) . そこで, ガイド円を 2 つにし, それぞれの担当角度を設けることでこの問題を解消する (図 4(c)(d)) .

各筋が関節に与えることができるトルクは, トルク出力の偏りを減らすように設計した (図 5) .

3.3 実験装置

棒高跳びの実現に当たり, ポール突っ込み時の速度は重要な要素である . 本研究では, 空中中期の動作の効果を調べるため, 速度については発射装置から押し出すことで簡略化する . 発射装置として, ヒトの踏切の角度 [9] を参考に水平面に対し 20 deg. の方向にレールを設置, 車輪を取り付けたロボットを後ろからエアシ



(a) 発射装置 . (b) 実験の初期状態 .

図 6 実験装置 .

表 2 実験に使用したボール (宇部日東化成, ダンボール P マル 85 グリーン) の特性.

長さ	1.10 m
断面 2 次モーメント	213.7 mm ⁴
弾性係数	17438.9 N/mm ²

表 3 実験条件.

	溜め動作時間	試行回数
条件 1	0.10s	3
条件 2	0.15s	3
条件 3	0.25s	2

リンダ (SMC, CDM2B32-200) で押し出す装置を開発した. エアシリンダは 3 ポートバルブ (SMC VQZ332-6L1-C8)2 個により 0.9 MPa の圧縮空気を供給することで駆動した. ボックスの距離を調節, 固定するために, 発射装置の足にボックスをつなぎ, スライド可能のようにフレームを設置した. ボールは座屈モデルによるシミュレーション [7] を用いて選定した (表 2).

4. 弾性ボールを用いた実験

4.1 実験設定

開発したロボットの運動の効果を調べるため, スイング動作の開始タイミングを複数変化させて実験を行った. ロボットの運動は, 内蔵センサによる計測 (サンプリングタイム: 100 Hz) に加え, 光学式モーションキャプチャシステム (Vicon Motion Systems, VICON624) により外部からも計測した (サンプリングタイム: 60 Hz). 電源ケーブル, LAN ケーブル, 空気の供給チューブは天井から吊るしたクレーンからたるませて吊るすことで運動の阻害を最小限にした.

4.2 運動指令

2 章で論じた挙動を起こすために, ロボットに次の順に指令を与えた.

- 1. 初期姿勢 (0.02 s の間, DEL に給気して固定)
- 2. 腕の上側の筋全てに給気 (溜め動作)
- 3. 腕の下側の筋全てに給気 (スイング動作)

肩の角度センサより $\theta_{sh} > 25$ [deg.] (角度の定義は図 3 参照) を検知する瞬間に 1. から 2. への切り替えを行った. これは, ボールが差し込まれると腕が上がるため, 確実にボックスに突っ込みを行った後に動作を開始するためである. 2. の時間は実験パラメータとし, 3. は運動終了まで行った. 2. の時間に関しては 3 種類のも

ので実験した (表 3). ロボットがボールにぶつかるなど明らかに動作が異なるものについては試行数に加えなかった. なお, これらの動作中 FD に給気することでボールを握らせた.

4.3 ボールを用いた跳躍実験

まず, ロボットの性能確認のために, 発射高さ 0.52 m, 溜め動作時間 0.10 s の実験を 5 試行行った. 4.25 ± 0.09 (平均 $\pm$ 標準偏差) m/s で発射された後, ボールの曲げ伸ばしの後に前方へ大きく跳ぶ動作が生成された (図 7). 最大跳躍距離はボックスから 1.38 m であった. しかし, 最大高さは 0.73 m であり, 上方向への十分な運動を行うことはできなかった. これは, 腕の長さによるモーメントが大きく, ボールの選定の際に用いたボールの先に質量のあるモデルとの誤差が大きかったため, 柔らかすぎるボールを選んだことが原因と考えられる.

4.4 スイングタイミングを変化させた実験

動作タイミングが運動に与える影響を調べるため, 表 3 の条件下で発射時の力学的エネルギー E_i に対するボールがボックスから離れる時の力学的エネルギー E_f の割合 $r = E_f/E_i$ を求めた. 発射高さは 0.42 m に設定し, 発射速度は 4.22 ± 0.09 m/s であった. 結果, スイングタイミングが遅いものほどエネルギーが有意に高くなった (図 8).

4.5 考察

実験結果よりスイングタイミングが遅いものの方が, 損失エネルギーが少ないことが分かったが, これが曲げモーメントによるボールの伸展の強化 [7] によるものなのか, 慣性力の反力によるボール曲げによるものなのかは自明ではない. そこで, 動作タイミングを変化させたものにおいて, スイング動作に移る前後でのボールとロボットの挙動を調べた (図 9). まず, 動作開始と共にロボットが回転を始めるため, ロボット高さが上昇している (図 9(d)). 少し遅れてボールの立ち上がりの停滞 (図 9(a)), ボール上端のボックスへの接近 (図 9(b)), ボール上端高さの低下 (図 9(c)) が起こっている. これは特にタイミングが早いもので顕著である. 曲げモーメントによる効果だとスイング時にボールの伸びが加速することになる. よって, この実験における早いタイミングでのスイングによるエネルギー低下は, ボール伸ばし動作の早さではなく, 慣性力による負の効果の大きさに起因すると考えられる.

5. 結論

本研究では, 棒高跳びという大きな容量を持つ弾性体を扱うタスクにおいて身体運動の与える効果を調べるために, 慣性力を発揮できる身体を備えたロボットを開発し, 弾性ボールを用いた実験を行った. 遅いタイミングでのスイングの方が慣性の与える負の影響が小さくできるという仮説を立て, その検証のために, スイング動作タイミングを変えた条件下でのボールとロボットの挙動を調べた. 結果, 遅いタイミングでのスイングの方がエネルギー損失が少なく, また, それが慣性による効果に起因することを確かめた. 今後はパフォーマンスを最大化する反力とモーメントの balan

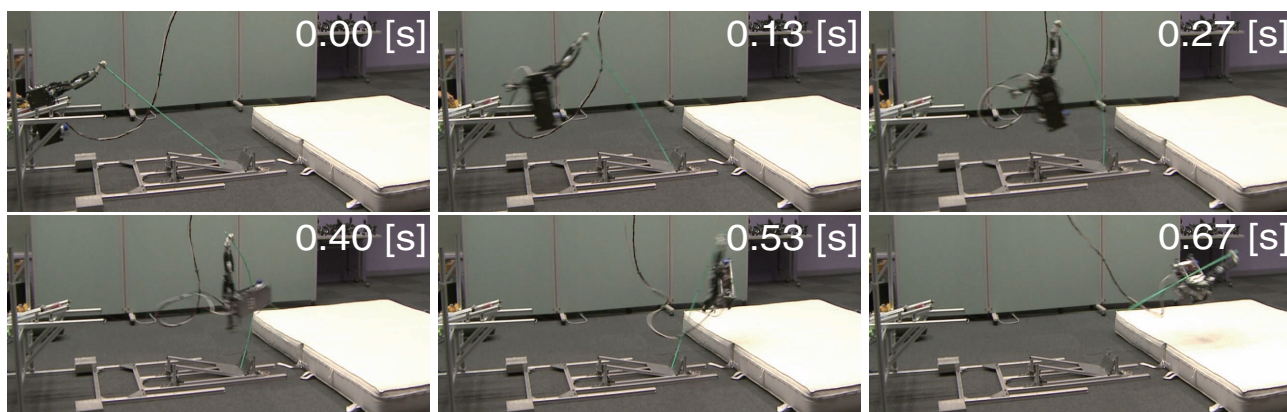


図 7 弾性ポールを用いた跳躍実験の様子．発射高さ 0.52 m，溜め動作時間 0.10 s で最大跳躍距離の試行．

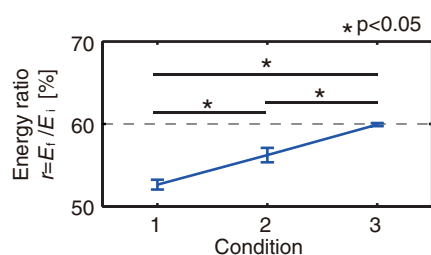


図 8 発射時に対するボールが浮いた瞬間のロボットの力学的エネルギーの割合．力学的エネルギーは並進運動エネルギーと位置エネルギーの和で求めた．エラーバーには標準誤差を用いた．分散分析を行った結果，タイミングの効果は有意であった ($F(2,5)=23.77$, $p=0.0028$)．多重比較には Tukey の HSD 法を用いた．

スをとるスイングタイミングの決定法を探ると共に，動作中の筋骨格系の働きについて調べる．

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

- [1] B. Brown and G. Zeglin: "The bow leg hopping robot," Proc. of International Conference on Robotics and Automation, pp.781-86, 1998.
- [2] R. R. Playter and M. H. Raibert: "Control of a biped somersault in 3D," Proc. of International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.582-589, 1992.
- [3] S. Fukashiro, D. C. Hay and A. Nagano: "Biomechanical behavior of muscle-tendon complex during dynamic human movements," Journal of Applied Biomechanics, Vol.22, No.2, pp.131-147, 2006
- [4] J. Hoepffner: "Models for an alternative pole vault," Physics of sports, pp.1-6, 2012.
- [5] 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, 2000.
- [6] J. Frère and B. Göpfert and 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.

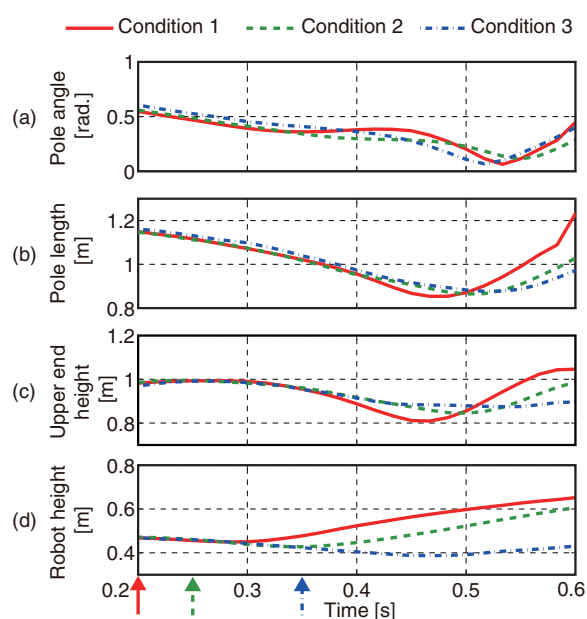


図 9 溜め動作時間を変えた実験におけるポールとロボットの挙動．ポール角度，ポール長さはそれぞれボックスと握り部分を結んだ線の垂直軸からの傾き，長さを示す．上端高さ，ロボット高さはそれぞれ手先マーカ位置，胴体の中心のボックスからの高さを示す．時間は発射時刻を 0 とし，矢印はそれぞれのスイング動作開始時刻を示す．

- [7] T. Fukushima, S. Nishikawa, K. Tanaka and Y. Kuniyoshi: "Transitional buckling model for active bending effect in pole vault," Proc. of International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, P-8, 2013.
- [8] S. Nishikawa, K. Tanaka, K. Shida, R. Niiyama and Y. Kuniyoshi: "Angle-dependent moment arm with biased pivot for jumping from various squatting positions," Proc. of International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, P-24, 2013.
- [9] R. M. Angulo-kinzler, S. B. Kinzler, X. Balus, C. Turro, J. M. Caubet, J. Escoda and J. A. Prat: "Biomechanical analysis of the pole vault event," Journal of Applied Biomechanics, Vol.10, No.2, pp.147-165, 1994.