

## 論文の内容の要旨

論文題目     筋骨格ロボットによる棒高跳び実現のための  
姿勢・ポール弾性特性活用戦略

氏     名     西川   鋭

動物やヒトはその身体機構である筋骨格系や環境にある弾性体を活かすことで、跳躍や走行のようなダイナミック運動を行うことができる。ダイナミック運動においては弾性体の使用による運動性能の向上が知られている。中でも棒高跳びは身体外部の大きな弾性要素を用い、飛躍的に運動性能を高める。このタスクは大きな弾性要素の活用に加え、運動中に大きな姿勢の変化を起こす難しいタスクである。リンク系においては姿勢によって外部に発揮できる力が変化する。そのため、姿勢に応じて適切な出力を発揮することが運動性能を高める上で重要と考えられる。そこで、本研究では、姿勢特性、弾性特性に着目することで、ロボットにより棒高跳びを実現することを目指す。実現にあたり、ポールの大きな反発力を柔軟に受け止められる身体として筋骨格系に着目し、筋骨格ロボットを用いる。

まず、筋骨格ロボットの運動性能を高める身体の出力特性を検討した。ここでは、ダイナミック運動の基本となる垂直跳びを扱った。身体の出力特性として筋骨格系の筋トルク - 角度関係に着目し、その特性を変化させるために、角度依存のモーメントアームを実現する機構を提案した。空気圧人工筋にその機構を用いることで出力特性を変化させ、モーメントアーム一定の際に跳躍高さが低くなる脚が伸びた姿勢での跳躍高さを向上させ、姿勢による運動のばらつきを抑えることが出来ることをシミュレーション、ロ

ボットを用いて確認した。さらに、各関節の出力特性が跳躍性能に与える効果を調べるために、各関節のトルク - 角度特性におけるトルクピークの位置を変化させた時にそれぞれの特性を持つ身体が可能な最大跳躍を比較した。結果として、近位関節から遠位関節に向かって、トルクピークが屈曲位から伸展位にシフトした出力特性が最大跳躍高さを得た。跳躍中の姿勢における各関節のトルクが運動に与える効果を調べたところ、各関節のトルクピークのずれが姿勢によるトルクの有効性の差で説明できることを確かめた。

次に、棒高跳びにおいて跳躍性能を高める弾性ポールの扱い方を検討した。競技者はポール挿入後の前半に曲げを増加する方向に、後半に曲げを減少させる方向に曲げモーメントを発揮していることが知られている。本研究では、前半の動作を**Positive Bending**、後半の動作を**Negative Bending**と呼ぶ。これを座屈モデルの端末条件係数を変化させることでモデル化した。このモデルを用いてシミュレーションを行い、この動作が跳躍高さを向上させることを確認し、さらに以下の知見を得た。**Positive Bending**は低い速度域での跳躍を可能とする跳躍の成否に関わる要素、**Negative Bending**は成功跳躍の跳躍高さを向上させる要素となっていた。これらの適切な切り替えタイミングは、ポールが奥に倒れない場合はポールの最大湾曲時、奥に倒れる場合はそれよりも早いタイミングであった。実世界でも曲げ機構を備えたロボットによって棒高跳び運動をさせることで、これらの局所曲げが跳躍方向の垂直化、跳躍速度の向上をもたらすことで跳躍高さを高めていることを実証した。さらに、実機においては、切り替えタイミングの後方シフトが見られた。このシフトの原因は、限られた曲げ動作時間、ポールの伸展と曲げ動作時間の非同期、さらにはこの後検討した身体運動による遠心力の効果が考えられた。

続いて、身体を持ったロボットが棒高跳びを行う上での、身体構造、身体運動の効果について検討した。まず、身体の粘弾性が棒高跳びの外乱応答性に与える効果をシミュレーションにより調べた。その結果、粘弾性要素を持つ身体では、外乱による棒高跳びの跳躍性能のずれが抑えられた。次に、長い1本腕を持つロボットによって切り替えタイミングが棒高跳びの挙動に与える効果を検討した。その結果、**Negative Bending**への早い切り替えはポールの起き上がりを妨げ、エネルギーロスが大きくなった。続いて、ロボット重心がポールから離れた振り子モデルのシミュレーションによって、遠心力が働く場合の適切な切り替えタイミングを検討した。結果として、**Negative Bending**による一時的なポール伸展とポール最大伸展が一致した時に、最大跳躍が得られた。このタイミングが前方へずれた場合はポールの伸展後に大きくポールが湾曲した。これは、ポール湾曲時はロボットの回転による遠心力がポール湾曲を増す方向に働きやすくなったことが原因と考えられた。

最後に、これまでの結果を統合して、筋骨格二腕ロボットによる棒高跳びの実験を行った。まず、跳躍実験の結果を応用して、ロボット腕部のモーメントアームを設計した。次に、ポール局所曲げとその切り替えタイミングの効果を確かめた。さらに、ロボット

により棒高跳び動作を実現した。

本研究では、ダイナミック運動において重要な姿勢特性、弾性特性に着目し、それらを活かす身体特性、運動戦略について検討した。本研究では、姿勢特性、弾性特性が共に大きな影響を及ぼす棒高跳びを題材として扱い、そのパフォーマンスに与える要素を抽出した。本研究を発展、一般化していき、こうした姿勢特性と弾性特性の活用が融合したタスクをロボットが実現できる方法論が確立すれば、ロボットの運動の幅が大いに広がることが期待される。