

ヒト走行時の骨盤運動解析に基づくヒューマノイドによる跳躍運動

Hopping by Humanoid based on Pelvic Movement during Human Running

○ 大谷拓也（早大） 橋本健二（早大） 阪口正律（カルガリー大）

川上泰雄（早大） 林憲玉（神大） 高西淳夫（早大）

Takuya OTANI, Waseda University
Kenji HASHIMOTO, Waseda University
Masanori SAKAGUCHI, Calgary University
Yasuo KAWAKAMI, Waseda University
Hun-ok LIM, Waseda University
Atsuo TAKANISHI, Waseda University

Abstract: A human running motion can be modeled by a spring-loaded inverted pendulum (SLIP). However, the SLIP model does not include human-like pelvic movement. On the other hand, in previous studies of the authors, the pelvic movement may help to increase the force for a pushing-off the ground. However, it is not analyzed that human changes the strategy of the pelvic movement for changing running speed. In this study, the authors aimed to analyzing the pelvic movement during human running in condition of various running speed, and verify the influence of the amplitude of the pelvic movement with the real robot. Based on the human motion analysis, human increases his/her pelvic amplitude according to the increase of running speed. And, the jumping height of the robot with the pelvic movement also increased according to the pelvic amplitude.

Key Words: Humanoid Robot, Running, Human motion analysis, Biomechanics

1. 緒元

近年，競技目的だけでなく趣味なども含めてランニング人口は増加しているが，それに伴うランニング障害の発生も問題となっている⁽¹⁾。障害が発生する原因を明らかにするためにヒトの走行の運動計測が行われているが，実験時に被験者に怪我をさせることはできない。そのため，怪我の可能性のある実験は非常に困難であり，障害の発生原因や障害の発生率の低い安全な走行法の検証が効率的に進められない。そこで演者らは，ヒューマノイドロボットをヒト被験者の代わりに用いることを提案する。これにより，ヒト被験者では怪我の危険性のある動作も実世界において検証できるため，上記のような倫理的な問題も解決できると考える。

既存のヒューマノイドロボットでは，本田技研のASIMO⁽²⁾やKAISTのHUBO⁽³⁾などが走行運動そのものを実現している。一方演者らは，脚の関節における1000[W]もの大出力⁽⁴⁾や関節のばねのような振舞⁽⁵⁾といったヒトの走行時の特徴に着目した。さらに，ヒトの走行を解析し，前額面における骨盤の揺動が跳躍力の獲得に寄与している可能性があることを確認したため，これらの特徴を取り入れた下半身走行ロボットを開発している⁽⁶⁾。しかし，走行速度が異なる場合のように跳躍力を変化させる際に骨盤運動が変化するか，すなわち，この骨盤運動を走行時に積極的に使用しているのかどうかについては調査されていない。このため，ロボットの動作戦略として骨盤揺動を常に一定にするべきかどうか，積極的に変化させるべきかが定かではなかった。

そこで本研究では，ヒトの走行速度が異なる場合について前額面における骨盤運動の振幅などのパラメータがどのように変化するかを明らかにし，またそれをロボットの動作に取り入れることで跳躍力向上に対して効果が得られるかを検証することを目的とした。その結果，ヒト走行時には走行速度が速くなるに応じて骨盤の振幅も増大すること

を確認した。また，ヒトと同等の質量やサイズ・脚弾性などを模擬した2足ロボットにより骨盤振幅が異なる場合の跳躍高さを比較したところ，ヒトと同様に骨盤振幅が大きくなることで跳躍力が増大することを確認したので報告する。

2. ヒト走行時の前額面における骨盤運動解析

2.1 骨盤運動を取り入れた走行モデル SLIP²

演者らはこれまでに同一走行速度時におけるヒト走行時の骨盤運動解析を行ってきた⁽⁷⁾。それまで，ヒト走行時の脚や体幹・腕部に着目した研究は多く見られるが，骨盤運動に注目した走行解析の先行研究例はあまり見られなかった。走行時の人体計測データから，前額面における骨盤の運動は，着地から離地にかけて骨盤は一度遊脚を下降させるように回転した後，遊脚を上昇させるように回転していることが確認された。これより，ヒトは骨盤を回転させることで蹴り出しの力の補助を行っているという仮説を立てた。また，この際の骨盤運動が正弦波に近く，その固有振動数が重心の鉛直方向の運動の固有振動数と同程度であることから，骨盤運動は脚の弾性を利用するように行われて

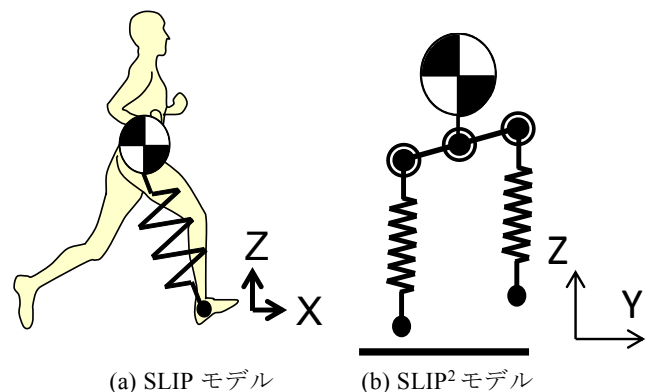


Fig. 1 Running model of human.

いると考えられる。ヒト走行運動については、1つの質点と1つの減衰のないばねによるSLIP（Spring Loaded Inverted Pendulum）モデルがよく用いられている⁽⁸⁾（Fig. 1(a)）。SLIPモデルはヒトの走行を簡略化したモデルであるが、前述の走行時の前額面における骨盤運動を反映させるため、骨盤を有するSLIP²（Spring Loaded Inverted Pendulum using Pelvis）モデルを考案した（Fig. 1(b)）。このモデルを用いたシミュレーションなどにより、ヒトと同等の骨盤運動と脚弾性を利用することで跳躍力を獲得できることを確認した。このように骨盤運動そのものが跳躍力の獲得に寄与することは示唆されたが、異なる走行条件下において、この骨盤運動が変化するかどうかは明らかではなかった。

2.2 走行速度が異なる場合の骨盤運動解析

走行速度が異なる場合におけるヒトの走行時の骨盤運動について解析を行った。8台の赤外線カメラ（Motion Analysis Corp., Santa Rosa, CA, USA）によるモーションキャプチャシステムを用いて、被験者の腰部に取り付けた計測用赤外線反射マーカの3次元位置を240[Hz]で計測した。被験者は日常的にスポーツ競技を行う大学生7名(男性)とし、平均身長が1724±36[mm]，平均体重が64±6[kg]である。どの被験者にも運動に影響のある障害がないことは確認しており、また、本計測実験は早稲田大学研究倫理オフィスの承認の元、被験者の安全に十分に配慮し行った。各被験者は、上記のモーションキャプチャシステムのある計測エリアの数十[m]手前から走行を開始し、走行速度が大きく変化しない定常走行になった状態で計測エリアに到達し、計測エリアを通過した後停止する。この際、各被験者は普段どおりの自然な走行フォームにおいて指定した走行速度（2.0, 3.5, 5.0[m/s]）で計測エリアに到達できるように十分に試走を行っている。計測した走行速度と指定した走行速度の差が5[%]以上あった場合は、その計測データは用いず再試行することとし、各試行のたびに被験者に計測した走行速度を伝えることで走行速度を変更してもらいながら、各被験者において5試行分の計測を行った。この際、疲労の影響を除外するため、各試行の間には十分に休息時間をおいた。

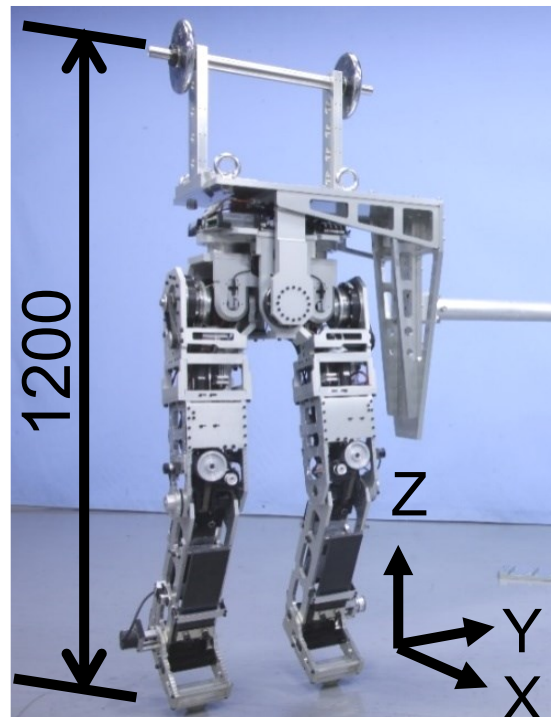
各走行速度時における前額面での骨盤振幅の平均値をTable 1に示す。これより、走行速度が速くなるにつれて、骨盤振幅の大きさが増大していることが分かる。これにより、ヒトは骨盤振幅を走行速度に応じて変化させることで、走行速度を調節している可能性があることが示唆された。

3. 跳躍実験

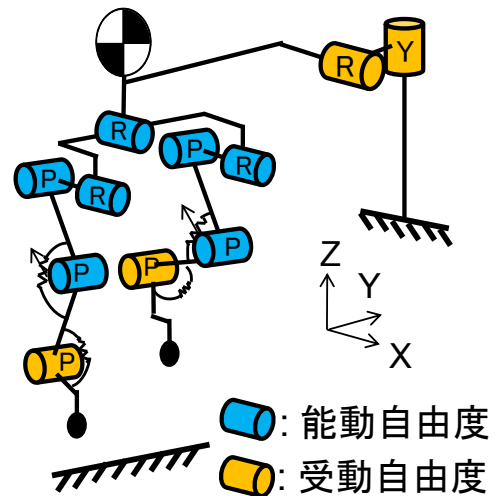
3.1. 脚弾性と骨盤揺動を取り入れた2足走行ロボット

上記の骨盤振幅の変化による跳躍力への影響を実際のロボットを用いて検証するため、演者らがこれまでに開発した2足走行ロボットを用いる（Fig. 2）。このロボットは、各部においてヒトと同等のサイズ・重量⁽⁹⁾を実現することで、運動時に発生する慣性力などの影響をヒトと同等にしている。上半身には、ヒトと同等の重心位置や慣性モーメントを模擬するための質量を持たせている。機体各部の重量・寸法をTable 2にまとめる。また、9自由度を有し、特

にヒトと同等の骨盤運動や脚弾性を模擬することで、ヒト走行時の脚関節に見られる大出力を実現している。脚弾性の模擬には、関節部に弾性要素として炭素繊維強化プラス



(a) Overview



(b) DoF configuration with constraint
Fig. 2 New developed running robot.

Table 2 Robot specifications

Parameters		Human	Robot
Whole Mass	kg	60	60
Thigh mass	kg	6.7	6.8
Shank mass	kg	3.3	3.3
Foot mass	kg	0.9	1.1
Thigh length	mm	374	377
Shank length	mm	339	339
Foot length	mm	220	228
Distance between hip joints	mm	180	180

Table 1 Pelvic amplitude of human running

	Running speed m/s		
	2.0	3.5	5.0
Pelvic Amplitude deg	3.5	4.3	5.0

チック CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastic）製の板ばねを搭載している．これにより，ヒト走行時のような大出力の発揮および走行速度に応じた弾性値の変更を容易に行うことが出来る機構となっている⁽¹⁰⁾．骨盤運動は，ヒト走行時のデータを元にし，跳躍力を獲得するために立脚中には式(1)のように重心の上下動と同等の固有振動数の正弦波状に制御する．

$$\theta_{\text{pelvis_stance}}(t_{\text{stance}}) = A \sin(\omega t_{\text{stance}} + \varphi) \quad (1)$$

ここで， A は骨盤振幅， ω は系の固有振動数， t_{stance} は立脚してからの時間， φ は重心の鉛直方向の運動に対する骨盤運動の位相ずれであり，ヒトの骨盤運動において，より地面を強く蹴ることに寄与している．また，跳躍後には以下のように，次の着地に備え骨盤を同じ着地角度に線形補間により回転させる．これにより，各着地時において同じ条件で着地することができる．

$$\theta_{\text{pelvis_flight}}(t_{\text{flight}}) = \begin{cases} \frac{\theta_{\text{pelvis_stance}}(0) - \theta_{\text{pelvis_off}}}{T_{\text{transition}}} t_{\text{flight}} & \text{for reaching initial angle} \\ \theta_{\text{pelvis_stance}}(0) & \text{for reached} \end{cases} \quad (2)$$

ここで， $\theta_{\text{pelvis_off}}$ は地面から跳躍した瞬間の骨盤の角度， t_{flight} は跳躍してからの経過時間， $T_{\text{transition}}$ は補間時間である．

3.2. 異なる骨盤振幅による跳躍高さ検証実験

走行時における骨盤振幅の大きさによる跳躍力獲得への影響を検証するため，2足走行ロボットを用いて，骨盤振幅が異なる条件下における走行実験を行う．実験条件として，影響を比較する．本実験においては，床反力が重心を通るように脚の状態を設定し，立脚している状態から骨盤揺動により跳躍力を獲得し，跳躍を行う（Fig. 3）．跳躍していることを判定するためには，足関節部の関節角度を測定するエンコーダにより，着地時の床反力による足関節の屈曲を測定することとした．上記の骨盤振動制御における骨盤揺動角度や位相ずれなどのパラメータは，ヒトの走行時の動きを元に求めた．膝関節および足関節の関節弾性は，ヒトの走行時のデータを元にそれぞれ 7, 9[Nm/deg]とした⁽¹¹⁾．骨盤振幅角度は 3.5, 5[deg]の2条件とした．機体は矢状面方向にのみ移動できるようにガイドにより拘束しており，ガイドの周囲を走行する．また，ガイドの Roll 回転軸に取り付けたエンコーダにより胴体部の高さを測定する．実験条件を Table 3 にまとめる．

骨盤振幅角度を 3.5, 5[deg]とした場合の機体の重心高さ変位の遷移を Fig. 4 に示す．重心高さ変位は 20[mm]の時点で脚が地面から離れるものであることを実験的に確認している．骨盤振幅角度 3.5[deg]の場合は，重心変位が大きくても 20[mm]を超えていないことから，跳躍が実現できていないことが分かる．一方，ヒトの走行時と同様である骨盤振幅 5[deg]の場合には跳躍が実現できていることが分かる．本実験結果より，骨盤振幅により跳躍力が獲得できることが確認できた．また，1.5[deg]程度の振幅の違いであっても，跳躍力には大きく影響することも確認できた．

この実験結果より，骨盤振幅を変化させることで跳躍力を制御することが出来ると確認された．ロボットにおける本実験において，ヒトの走行速度 2[m/s]時と同等の骨盤振幅 3.5[deg]時には跳躍が実現できなかったが，ヒトの場合

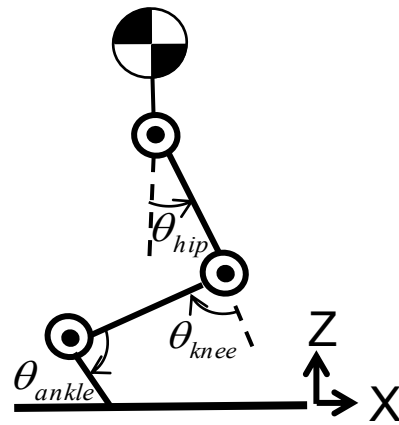


Fig. 3 Experimental condition.

Table 3 Experimental parameters

Parameters			
Pelvic rotation amplitude	A	deg	3.5, 5
Phase difference	φ	rad	$3\pi/8$
Hip angle	θ_{hip}	deg	10
Knee angle	θ_{knee}	deg	140
Ankle angle	θ_{ankle}	deg	90
Knee joint stiffness		Nm/deg	7
Ankle joint stiffness		Nm/deg	9

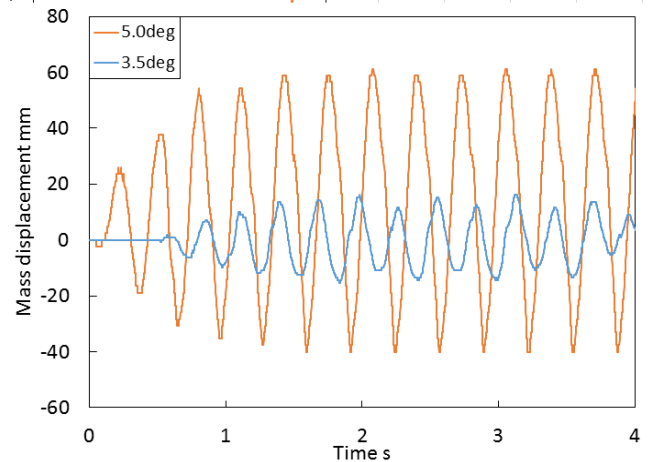


Fig. 4 Comparison of mass displacement with the difference of pelvic amplitude

は脚による能動的な地面の蹴り出しを行うことで，跳躍を行っているものと考えられる．

4. 結論と今後の展望

ヒューマノイドによるヒトの走行運動の模擬を目的に，ヒト走行時の骨盤運動の解析およびそれを取り入れたロボットによる効果の検証を行った．具体的には，人体運動解析によりヒト走行時の走行速度が異なる際の骨盤振幅を調査し，走行速度が上がるにつれ骨盤振幅も増大することを確認した．これを，ヒトの骨盤運動と脚弾性を模擬した2足ロボットに取り入れ，骨盤振幅が異なる跳躍運動を行わせたところ，ヒトと同様に骨盤振幅が大きいほど大きな跳躍高さが実現できることを確認した．

今後は、本研究により得られた骨盤振幅の変化による走行速度の変更に着目し、それを利用した跳躍力・走行速度制御の開発を進める。また、それによりヒトと同様に走行速度に応じて骨盤振幅を変化させて走るヒューマノイドとなるため、走行時の腰部負担の評価などに対してヒト被験者の代わりに用いることで、ヒト走行運動の解明ならびにケガ危険性の少ない走行フォームを明らかにすることを目指す。

謝辞

本研究は早稲田大学理工学研究所および早稲田大学ヒューマノイド研究所、早稲田大学重点領域研究機構アクティヴ・エイジング研究所、早稲田大学次世代ロボット研究機構の下で実施された。本研究で用いられた3DCADソフトはソリッドワークス・ジャパン株式会社より提供され、ケーブル・コネクタは大電株式会社、複合領域物理モデルシミュレータ MapleSim はサイバネットシステム株式会社（開発元:Maplesoft 社）より提供された。また、本研究の一部は文部科学省の科学研究費補助金（25709019）の支援を受けた。多大なるご支援をいただいた各社・官公庁に感謝致します。

参考文献

- (1) 整形外科部会，骨・関節のランニング障害に対する提言，日本臨床スポーツ医学会誌，Vol. 13，2005.
- (2) 竹中透 他，床反力限界を考慮した2脚ロボットの実時間動力学補償，日本ロボット学会誌，Vol. 32, No. 3，pp. 295-306，2014.
- (3) B. K. Cho, et al., Controllers for running in the humanoid robot, HUBO, Proc. of 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 385-390, 2009
- (4) T. McMahon, et al., The Mechanics of Running: How does Stiffness Couple with Speed?, J. Biomech., Vol. 23, pp. 65-78, 1990.
- (5) G. Dalleau, et al., The spring-mass model and the energy cost of treadmill running, Eur J Appl Physiol, Vol. 77, pp. 257-263, 1998.
- (6) T. Otani, et al., Running with Lower-Body Robot That Mimics Joint Stiffness of Humans, Proc. of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2015), pp. 3969-3974, 2015.
- (7) T. Otani, et al., Utilization of Human-Like Pelvic Rotation for Running Robot, Front. Robot. AI, Vol. 2, No. 17, 2015.
- (8) R. Blickhan, The Spring-mass Model for Running and Hopping, J. Biomech., Vol. 22, No. 11, pp. 1217-1227, 1989.
- (9) AIST, 人体寸法データベース，1991-92.
- (10) T. Otani, et al., Joint Mechanism That Mimics Elastic Characteristics in Human Running, Machines 2016, Vol. 4, No. 1, 2016.
- (11) M. Gunther, et al., Joint stiffness of the ankle and the knee in running, Journal of Biomechanics, Vol. 35, pp. 1459-1474, 2002.