

腕の振りを利用したヒューマノイドロボットのジャンプの解析

Analyses of Jumping Motion of Humanoid Robot Using Arms' Swinging

西口 淳平 (岡山大) 学 前場 友秀 (岡山大)
 正 見浪 護 (岡山大) 正 矢納 陽 (岡山大)
 正 松野 隆幸 (岡山大)

Jumpei NISHIGUCHI, Okayama University
 Tomohide MAEBA, Okayama University
 Mamoru MINAMI, Okayama University
 Akira YANOUE, Okayama University, yanou@suri.sys.okayama-u.ac.jp
 Takayuki MATSUNO, Okayama University

The objective of this research is to analyze humanoid's jumping and landing motions on a view point of arms' dynamical coupling for jumping. Humans use arms' swing to walk or run effectively and to jump highly by swinging arms up. Therefore, we deemed that humanoid robot can jump effectively by using dynamical coupling of arms. So, we focused on human's vertical jump, and gave input to arms in such a way as to swing arms similar to humans, and compared the jumping motion with arms' swinging motion and the ones without that. The results show what conditions causes the jumping be higher.

Key Words: Vertical jump, Constraint motion, Arms' swing

1. 緒 言

人間は効率的に腕を利用して、歩行やジャンプを行っており、ヒューマノイドにおいても腕を利用すれば効率的に制御できると考えられる。そこで著者らは腕を利用したヒューマノイドの運動や腕と胴体の動力学の干渉に着目している。

多くの研究ではヒューマノイドのモデルは簡略化されているが、文献 [1] では点接地や面接地を含む様々な足の歩容を考慮している。本研究でも、文献 [1] と同様に厳密な歩容のダイナミクスを導出し、ジャンプについて考えることにする。

本報では人間の腕を利用した垂直跳びに着目し、ジャンプ動作のモデル化を行った。人間のジャンプのモデリングは文献 [2], [3] でも行われているが、いずれも腕がないモデルであり腕の影響は考慮されていない。垂直跳びにおいては、人間は腕を振り上げ、頭の位置で腕を静止させることによってより高くジャンプしている。そこで、上記の腕振りを行うよう両腕に力を与え、ヒューマノイドのジャンプシミュレーションを行い、腕を振らない場合に比べて、腕を振った場合の方がより高くジャンプすることを確認した。また、腕を振るタイミングを変化させてシミュレーションを行い、運動エネルギーや地面からの抗力等の変化を調べ考察した。

2. ヒューマノイドの動力学モデル

ヒューマノイドのモデル及びリンク、関節、関節角度 q_i 、位置 d_i の定義を図 1 に示す。モデルは 15 本の剛体リンクと質量や長さを持たない 14 個の回転関節で構成されており、足 (foot)、胴体、腕などの全身モデルを位置を含む 17 自由度で表現している。

以降では、link-1, ..., 3 によって構成される脚を「支持脚」、link-5, ..., 7 によって構成される脚を状態に応じて「遊脚」または「接地脚」と呼ぶ。

2.1 Newton-Euler 法による運動方程式の導出

本節では n 本の剛体リンクを持つ n 自由度の直列接続マニピュレータを考え、link- i に固定された座標系 Σ_i に基づき運動方程式を導出する。なお、 z 方向、 y 方向の位置 d_1 , d_2 は質量 0、リンクの長さ d_1 , d_2 の 2 つの直動関節リンクと見なして

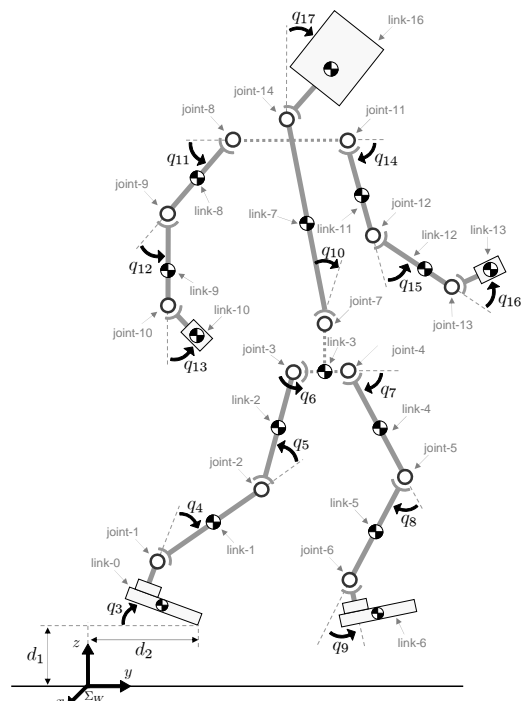


Fig. 1 Definition of links, joints and joint's angles

運動方程式を導出する。

まず、Newton-Euler 法の順動力学計算として根元のリンクから先端のリンクに向かって link- i の角速度 ${}^i\omega_i$ 、角加速度 ${}^i\dot{\omega}_i$ 、原点における並進加速度 ${}^i\ddot{p}_i$ 、質量中心における並進加速度 ${}^i\ddot{s}_i$ を計算する。 ${}^i\ddot{p}_i$ 、 ${}^i\ddot{s}_i$ は以下の式で与えられる。

$${}^i\ddot{p}_i = {}^{i-1}R_i^T [{}^{i-1}\ddot{p}_{i-1} + {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1}\hat{p}_i + {}^{i-1}\omega_{i-1} \times ({}^{i-1}\omega_{i-1} \times {}^{i-1}\hat{p}_i)] \quad (1)$$

$${}^i\ddot{s}_i = {}^i\ddot{p}_i + {}^i\dot{\omega}_i \times {}^i\hat{s}_i + {}^i\omega_i \times ({}^i\omega_i \times {}^i\hat{s}_i) \quad (2)$$

ここで、 ${}^{i-1}R_i$ は Σ_{i-1} から Σ_i への回転行列、 ${}^{i-1}\hat{p}_i$ は Σ_{i-1} の原点から Σ_i までの位置ベクトル、 ${}^i\hat{s}_i$ は Σ_i の原点から link- i

の質量中心までの位置ベクトルを表している。

次に逆動力学計算に基づいて、先端のリンクから根元のリンクに向かってリンク i における Newton の方程式及び Euler の方程式を以下のように導出する。

$${}^i f_i {}^i R_{i+1} {}^{i+1} f_{i+1} + m_i {}^i \ddot{s}_i \quad (3)$$

$${}^i n_i {}^i R_{i+1} {}^{i+1} n_{i+1} + {}^i I_i {}^i \dot{\omega}_i + {}^i \omega_i \times ({}^i I_i {}^i \omega_i) + {}^i \dot{s}_i \times (m_i {}^i \dot{s}_i) + {}^i \dot{p}_{i+1} \times ({}^i R_{i+1} {}^{i+1} f_{i+1}) \quad (4)$$

全ての関節が z_i 軸回りの回転を行うように Σ_i を定めた場合、単位ベクトル $e_z = [0, 0, 1]^T$ によって、各関節の運動方程式が以下のように計算される。

$$\tau_i = (e_{zi})^T {}^i n_i + D_i \dot{q}_i \quad (5)$$

$i = 1, \dots, n$ における式 (5) を一般的な表現に改めると式 (6) を得る。

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = \tau \quad (6)$$

ここで、 $M(q)$ は $n \times n$ の慣性行列、 $h(q, \dot{q})$ 、 $g(q)$ はそれぞれ遠心力・コリオリ力の項及び重力項を表す $n \times 1$ のベクトル、 D は関節の粘性摩擦係数を表す $n \times n$ 対角行列 $D = \text{diag}[D_1, D_2, \dots, D_n]$ 、 τ は $n \times 1$ の入力トルクベクトル、 $q = [d_1, d_2, q_1, q_2, \dots, q_{n-2}]^T$ は $n \times 1$ の関節角度・位置ベクトルである。

2.2 空中・支持脚接地モデル

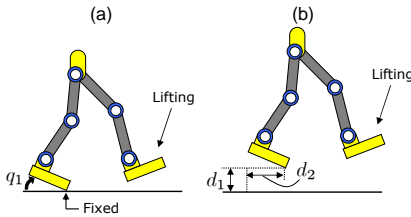


Fig. 2 Phase (IV) and (V)

ヒューマノイドを分岐を持つマニピュレータと考えた場合、直列接続されているリンクに関しては 2.1 節の議論に基づいて運動方程式が計算できる。しかし、図 1 に示すヒューマノイドには 2 箇所に分岐があるため、link-4, 8, 12, 15 に関しては以下に示す計算式を用いる。

まず順動力学計算に関して、link-8 には link-4 から角速度及び角加速度が直接伝達されるため、link-4 の原点における加速度を以下の式で表現できる。

$${}^8 \ddot{p}_8 = {}^4 R_8^T \left\{ {}^4 \ddot{p}_4 + {}^4 \dot{\omega}_4 \times {}^4 \dot{p}_8 + {}^4 \omega_4 \times ({}^4 \omega_4 \times {}^4 \dot{p}_8) \right\} \quad (7)$$

一方で、link-12, 15 には link-8 から角速度及び角加速度が直接伝達されるため、式 (7) と同様にして計算を行う。

次に逆動力学計算においては、link-5, 8 の力及びトルクが link-4 に伝達されることより、式 (3), (4) に対応する計算を以下の式で行う。

$${}^4 f_4 = {}^4 R_5^T f_5 + {}^4 R_8^T f_8 + m_4 {}^4 \ddot{s}_4 \quad (8)$$

$${}^4 n_4 = {}^4 R_5^T n_5 + {}^4 R_8^T n_8 + {}^4 I_4 {}^4 \dot{\omega}_4 + {}^4 \omega_4 \times ({}^4 I_4 {}^4 \omega_4) + {}^4 \dot{s}_4 \times (m_4 {}^4 \dot{s}_4) + {}^4 \dot{p}_5 \times ({}^4 R_5^T f_5) + {}^4 \dot{p}_8 \times ({}^4 R_8^T f_8) \quad (9)$$

同様に、link-8 には link-9, 12, 15 から力及びトルクが伝達されるため、link-8 に関する Newton の方程式及び Euler の方程式は式 (8), 式 (9) と同様にして求められる。

ヒューマノイドの運動方程式に関して、式 (5), (6) で表現される方程式は図 2(a) のように片足が接地している状態における運動を意味する。ここで、図 2(a) のように踵が地面から離れてい

る場合、 $q = [q_1, q_2, \dots, q_{15}]^T \in \mathbf{R}^{15}$ とする。一方、図 2(b) のように支持脚が地面から離れた場合、足の高さや横変化を表わす変数 d_1, d_2 を q に追加し $q = [d_1, d_2, q_1, q_2, \dots, q_{15}]^T \in \mathbf{R}^{17}$ とする。

本報で作成するモデルは上記のように歩容次第で変数の次元が変化する。次節で議論するモデルも同様に扱い、図 3(a) のように支持脚が面接地している場合、link-1 が地面に対して滑りを起こさないと仮定し、足と地面が一体化していると考え、変数 q を $q = [q_2, q_3, \dots, q_{15}]^T \in \mathbf{R}^{14}$ と考える。

2.3 接地脚点接地モデル

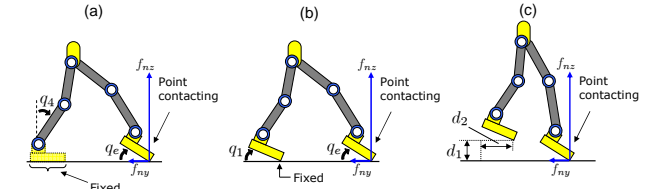


Fig. 3 Phase (II), (III) and (IV')

図 2(a) を維持している状態で遊脚のつま先が接地した場合、図 3(b) の歩容が生じる。遊脚は地面に対して滑りが生じないと仮定すると、接地脚のつま先を地面 (Σ_W の z, y 軸方向) に対して拘束する必要がある。この拘束条件を C_{1z}, C_{1y} と置くと Σ_W における踵の位置ベクトル $r(q)$ によって、式 (10) として定義できる。

$$C_{1z}(r(q)) = 0, \quad C_{1y}(r(q)) = 0 \quad (10)$$

拘束運動時には、抗力 f_{nz}, f_{ny} が生じる。これらを考慮した運動方程式は式 (11) となる。

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = \tau + j_{cz}^T f_{nz} + j_{cy}^T f_{ny} \quad (11)$$

ここで、式 (11) における f_{nz} 及び f_{ny} の係数である j_{cz}^T と j_{cy}^T は以下のように定義される。

$$j_{cz}^T = \frac{\left(\frac{\partial C_{1z}}{\partial q^T} \right)^T}{\left\| \frac{\partial C_{1z}}{\partial q^T} \right\|}, \quad j_{cy}^T = \frac{\left(\frac{\partial C_{1y}}{\partial q^T} \right)^T}{\left\| \frac{\partial C_{1y}}{\partial q^T} \right\|} \quad (12)$$

式 (11) で記述されたシステムは式 (10) を常に満たさなければならない。式 (10) を時間 t で 2 階微分し、角速度及び角加速度が満たすべき条件を求めると、

$$\left(\frac{\partial C_{1z}}{\partial q^T} \right) \dot{q} + \dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_{1z}}{\partial q^T} \right) \right\} \dot{q} = 0 \quad (13)$$

$$\left(\frac{\partial C_{1y}}{\partial q^T} \right) \dot{q} + \dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_{1y}}{\partial q^T} \right) \right\} \dot{q} = 0 \quad (14)$$

となる。最後に式 (11), (13), (14) を行列形式で表す。

$$\begin{bmatrix} M(q) & -j_{cz}^T & -j_{cy}^T \\ \frac{\partial C_{1z}}{\partial q^T} & 0 & 0 \\ \frac{\partial C_{1y}}{\partial q^T} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_{nz} \\ f_{ny} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau - h(q, \dot{q}) - g(q) - D\dot{q} \\ -\dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_{1z}}{\partial q^T} \right) \right\} \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_{1y}}{\partial q^T} \right) \right\} \dot{q} \end{bmatrix} \quad (15)$$

2.4 接地脚面接地モデル

図 3(a), (b) に示す状態において前足のつま先が接地し、面接地状態となった時に図 4(a), (b) の歩容が現れる。この歩容の表現には $C_{1z} = 0, C_{1y} = 0$ に加え、地面に対する前足の角度 q_e を

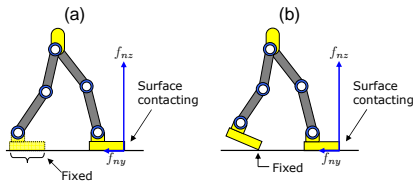


Fig. 4 Phase (I) and (II')

0 に保持するための拘束条件 $C_2(r(q)) = q_e = q_1 + \dots + q_7 = 0$ が必要となる。この場合は以下の運動方程式となる。

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = \tau + j_{cz}^T f_{nz} + j_{cy}^T f_{ny} + j_r^T \tau_n \quad (16)$$

ここで、 j_r は以下の式で定義される。

$$j_r^T = \left(\frac{\partial C_2}{\partial q^T} \right)^T \left(1 / \left\| \frac{\partial C_2}{\partial q^T} \right\| \right) \quad (17)$$

式 (15) の導出と同様に C_{1z}, C_{1y}, C_2 を時間 t で 2 階微分し、式 (16) と組み合わせることで、面接地を表現するダイナミクスを得る。

$$\begin{bmatrix} M(q) & -j_{cz}^T & -j_{cy}^T & -j_r^T \\ \frac{\partial C_{1z}}{\partial q^T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial C_{1y}}{\partial q^T} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial C_2}{\partial q^T} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_{nz} \\ f_{ny} \\ \tau_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau - h(q, \dot{q}) - g(q) - D\dot{q} \\ -\dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_{1z}}{\partial q^T} \right) \right\} \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_{1y}}{\partial q^T} \right) \right\} \dot{q} \\ -\dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\partial C_2}{\partial q^T} \right) \right\} \dot{q} \end{bmatrix} \quad (18)$$

3. 状態遷移

3.1 状態遷移図と歩容の切り替え条件

ジャンプ時の歩容の遷移を図 5 に示す。条件分岐の存在する箇所に関しては、先に条件が満たされた方に遷移する。状態遷移は式 (6), (15), (18) で表現されるダイナミクスの解に依存する。つまり、歩容の遷移を予測することは困難であり、ロボットの初期姿勢、地面の形状、印加される入力により大きな影響を受ける。

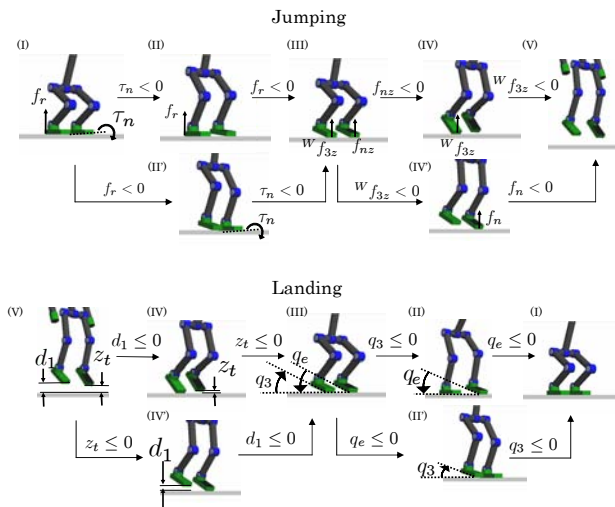


Fig. 5 Phase and gait's transition

3.2 支持脚における踵の離地条件

まず、式 (3), (4) を用いて第 2 リンク原点 (足首) に作用する内力 ${}^2f_2, {}^2n_2$ を導出する。そして回転行列による座標変換を行った後、単位行列を用いて Σ_W における力の z 成分及び x 軸回りのモーメントを ${}^Wf_{2z} = e_z^T ({}^W R_2 {}^2f_2)$, ${}^Wn_{2x} = e_x^T ({}^W R_2 {}^2n_2)$ として求める (図 6(a))。ここで、支持脚の両端に作用する力を f_f, f_r とおく。 f_f と f_r の和が ${}^Wf_{2z}$ となること、及び f_f と f_r がモーメント ${}^Wn_{2x}$ を生成していることを考慮すると以下の関係式を得る。

$${}^Wf_{2z} = f_f + f_r \quad (19)$$

$${}^Wn_{2x} = -f_f \cdot l_f + f_r \cdot l_r \quad (20)$$

式 (19), (20) より f_f, f_r が式 (21) として得られ、 $f_r < 0$ が満たされた時、図 6(b) のように踵が浮き上がる。

$$f_{f,r} = \frac{l_r \cdot {}^Wf_{2z} \pm {}^Wn_{2x}}{l_f + l_r} \quad (21)$$

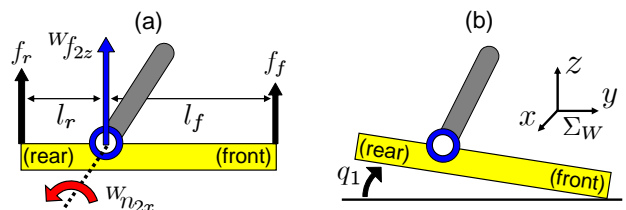


Fig. 6 Force and torque acting on supporting foot

3.3 足接地時における衝突の考慮

図 5 において、状態 (IV) \rightarrow (III) のように遊脚が接地して接地脚となる時、地面に対する遊脚の衝突が生じる。そこで本節では、衝突の影響を考慮する必要がある。本論文では、足の地面に対する完全非弾性衝突を、文献 [1] と同様の方法を用いて表現する。

まず、式 (11) で表現される拘束運動時の運動方程式を積分する。

$$M(q)\dot{q}(t^+) = M(q)\dot{q}(t^-) + j_{cz}^T F_{imz} + j_{cy}^T F_{imy} \quad (22)$$

式 (22) の導出に際しては非弾性衝突を行い、衝突の前後では角速度のみが変化するという仮定を設けている。 $\dot{q}(t^+)$ と $\dot{q}(t^-)$ はそれぞれ衝突前後の角速度、 $F_{imz} = \lim_{t^- \rightarrow t^+} \int_{t^-}^{t^+} f_{nz} dt$, $F_{imy} = \lim_{t^- \rightarrow t^+} \int_{t^-}^{t^+} f_{ny} dt$ は衝突時の力積である。一方で衝突後に角速度が満たすべき条件は C_{1z}, C_{1y} を t で微分することにより式 (23) として得られる。

$$\frac{\partial C_{1z}}{\partial q^T} \dot{q}(t^+) = 0, \quad \frac{\partial C_{1y}}{\partial q^T} \dot{q}(t^+) = 0 \quad (23)$$

式 (22), (23) より、衝突前後の角速度の関係を表すダイナミクスは以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} M(q) & -j_{cz}^T & -j_{cy}^T \\ \frac{\partial C_{1z}}{\partial q^T} & 0 & 0 \\ \frac{\partial C_{1y}}{\partial q^T} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}(t^+) \\ F_{imz} \\ F_{imy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(q)\dot{q}(t^-) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

踵の接地時に関しても、同様の手順でダイナミクスを導出し衝突を考慮する。

4. 数値シミュレーション

本章では、シミュレーションで使用したジャンプから着地までの入力トルクを決めるコントローラとシミュレーション結果について述べる。シミュレーション環境は Borland C++ Builder

Professional Ver. 5.0”である。

ジャンプ時（両足が地面から離れるまで）のコントローラを式 (25), 式 (28) に示す。\$J_h\$ は支持脚から頭部までのヤコビ行列であり、\$f_h\$ は式 (26) で示される力である。\$k_{ph}\$ は比例ゲインを示しており、\$y_{hd}\$ は頭の目標位置を表す。\$f_{hz}\$ は胴体や頭部を鉛直方向に引っ張り上げるための力である。また、式 (27) に示す \$K_h\$ の \$k_{h1}, \dots, k_{h3}\$ の値を設定することにより脚部のトルク \$\tau_2 \sim \tau_4\$ の重みを調整している。

$$\tau = K_h J_h^T f_h \quad (\text{If } q_3 \geq 1.0) \quad (25)$$

$$f_h^T = [0, k_{ph}(y_{hd} - y_h), f_{hz}] \quad (26)$$

$$K_h = \text{diag}[k_{h1}, k_{h2}, k_{h3}, 1, \dots, 1] \quad (27)$$

$$\tau_i = k_{dh}(0 - \dot{q}_i) \quad (\text{If } q_3 < 1.0) \quad (28)$$

膝が伸び、膝の角度 \$q_3\$ が \$q_3 < 1.0\$ の条件式を満たすようになったとき、式 (28) に示すような速度のフィードバック制御に切り替わる。\$k_{dh}\$ は微分ゲインを表す。各パラメータを次のように設定した。\$k_{ph} = 20.0\$, \$y_{hd} = 0.5[\text{m}]\$, \$f_{hz} = 300[\text{N}]\$, \$k_{h1,2,3} = 4.0\$, \$k_{dh} = 30\$。

腕の振りを加えずにジャンプシミュレーションを行った。基準座標における \$z\$ 方向のモデル全体の重心位置（両腕を除く）の変化を図 8 に示す。図 7 に示すように、両足が地面から離れた瞬間の重心の位置と最高点との差を跳躍高と定義した。

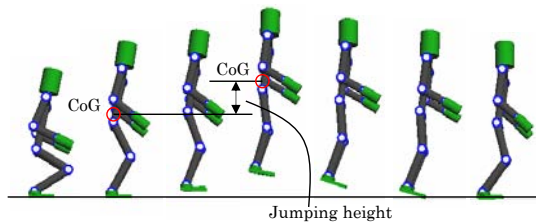


Fig. 7 Screen shot of simulation

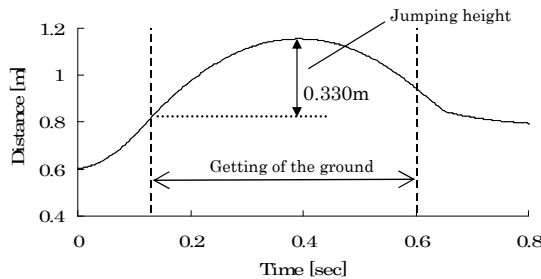


Fig. 8 Center of gravity \$z_g\$

次に腕の振りを加えてシミュレーションを行った。腕の入力は以下のように与えた。式 (29) が腕を振り上げるための入力、式 (30) が振り上げた腕を頭の位置で静止させるための入力を表し、\$t_a\$ は入力を与え始める時間を表す。

$$\text{If } t_a \leq t < t_a + 0.12$$

$$\tau_{11,14} = 100, \tau_{12,15} = 60, \tau_{13,16} = 10 [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (29)$$

$$\text{If } t_a + 0.12 \leq t < t_a + 0.17$$

$$\tau_{11,14} = -150, \tau_{12,15} = -75, \tau_{13,16} = -10 [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (30)$$

\$t_a\$ の値を \$0.00 \sim 0.08[\text{sec}]\$ の範囲で \$0.02[\text{sec}]\$ ずつ変化させてシミュレーションを行った。表 1 に示すように \$t_a = 0.00, 0.02\$ のときは跳躍高が腕振りがない場合に比べて上昇したが、\$t_a = 0.04, 0.08\$ のときは低下した。また、両足が地面から離れる時間はいずれも腕振りがある方が遅くなっており、腕を振るタイミングが早いほど、跳躍高は上昇し、両足離地時刻が遅くなった。

Table 1 Jumping height and time of getting off the ground

\$t_a\$ [sec]	Jumping height [m]	Time of getting off [sec]
No swinging	0.330	0.132
0.00	0.375	0.141
0.02	0.347	0.138
0.04	0.320	0.135
0.06	0.313	0.135

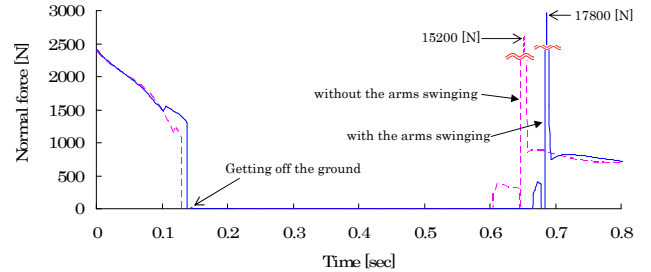


Fig. 9 Normal force to supporting foot

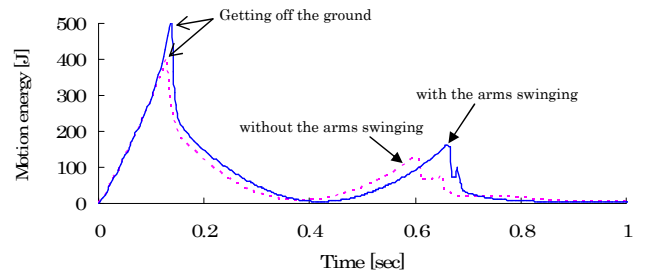


Fig. 10 Motion energy

図 9, 図 10 を見ると、跳躍高が上昇したとき、足が離れる前の抗力、運動エネルギーが上昇するという結果になった。これは腕振りの干渉によって、抗力が増加し、足が離地する時間が遅くなり、それによって力積や運動エネルギーが増加し、跳躍高も上昇したと考えられる。

5. 結 言

本報では、ヒューマノイドのジャンプにおける腕の振りの影響についての議論を行った。シミュレーション結果から、腕の振りによって跳躍高が上昇することを示した。また跳躍高が増加するほど、垂直抗力が大きくなり、足が離地する瞬間の運動エネルギーが大きくなることが確認できた。

文 献

- [1] Y. Huang, B. Chen, Q. Wang, K. Wei and L. Wang, “Energetic efficiency and stability of dynamic bipedal walking gaits with different step lengths,” *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4077–4082, 2010.
- [2] J. Babic, J. Lenarcic, “Vertical Jump: Biomechanical Analysis and Simulation Study,” *Humanoid Robots: New Developments*, pp.551–566, 2007.
- [3] T. Spagele, A. Kistner, A. Gollhofer, “Modelling, simulation and optimisation of a human vertical jump,” *Journal of Biomechanics* 32, pp.521–530, 1999.