ヒューマノイドロボットモデルによるフィードフォワード制御を利用したアイススケート運動

Ice Skating Motion Using Feedforward Control System by Model of Humanoid Robot

非　井澤 大時 (岡山大)　非　李 想（岡山大）
正　見浪 護（岡山大）　正　松野 隆幸（岡山大）　正　矢納 陽（川崎短大）

Daiji IZAWA, Okayama University, p1k85fm3@s.okayama-u.ac.jp
Xiang LI, Okayama University
Mamoru MINAMI, Okayama University
Takayuki MATSUNO, Okayama University
Akira YANOU, Kawasaki College of Allied Health Professions

The research of humanoid is widely discussed whether by simulations or real machines. To bipedal walking, inverted pendulum has been used frequently for making a stable controller that enables researchers to realize stable gait through well-known control strategy. In our research, a model of humanoid robot including slipping, bumping, surface-contacting and point-contacting of foot is discussed, and its dynamical equation is derived by Newton-Euler method.

Our research purpose aims to create a control system by utilize slip and stop slip using the model. In this paper, the ice skating, which is a kind of typical utilize slip motion will be discussed. And a new feedforward control method was prepared for realize this motion. Also some discussion from the viewpoint of step cycle, slipping speed and slipping distance during the ice skating motion will be introduced.

Key Words: Humanoid Robot, Simulation, Dynamical Equation

1　緒言

ヒューマノイドによる二足歩行はシミュレーション実験や実機実験を問わず幅広く研究されている．その中でも線形近似などを用いることなく，かつ複雑なダイナミクスを避けるために，ヒューマノイドを倒立振子と見なしてモデル化を行っている研究 [1]-[5] が多数存在する．ヒューマノイドを線形倒立振子モデルに置き換えることによって，従来の線形制御理論を用いた制御器が容易に設計可能となることや，計算コストの減少によって歩行軌道や関節軌道などが実時間で生成できるなどのメリットがあるため，安定な二足歩行が数多く実現されてきた [6]-[8].

しかしながら上記のモデル化や制御器設計の手法は全て単純化された二足歩行モデルが対象であり，足 (foot) の点接地，面接地を考慮したモデルの作成や足の滑りなどが歩行に与える影響に関する議論は避けられる傾向にある [9]-[11]. 本研究では摩擦係数が小さい劣悪環境（濡れた路面，雪，氷の上）における歩行中の足の滑りを考慮し，かつ足 (foot) を含むモデルの作成によって接地時における衝突 (遊脚の着地)，面 (足裏) ／点 (踵，つま先) 接地を明確に区別した歩容モデルを考えた．これらのダイナミクスの運動方程式を Newton-Euler 法を用いて導出する．またこれらの歩容モデルを用いて二足歩行，また本論文の主題である滑りを利用するアイススケート運動において，予想される歩容遷移図を作成した．この歩容遷移図に基づいて，先行研究より提案している"Visual-Lifting Appraoch"という姿勢安定化のための制御と脚の振り上げなどを行わさせるフィードフォワード制御を用いることにより運動を実現する．運動中は運動方程式が歩容遷移図に沿った歩容モデルの切り替えを行う．本論文では動力学的なヒューマノイドモデルを用いてアイススケート運動を行ったこと示しており，歩行周期や距離について考察したことを報告する．

2　ヒューマノイドモデル

2.1　運動学モデル

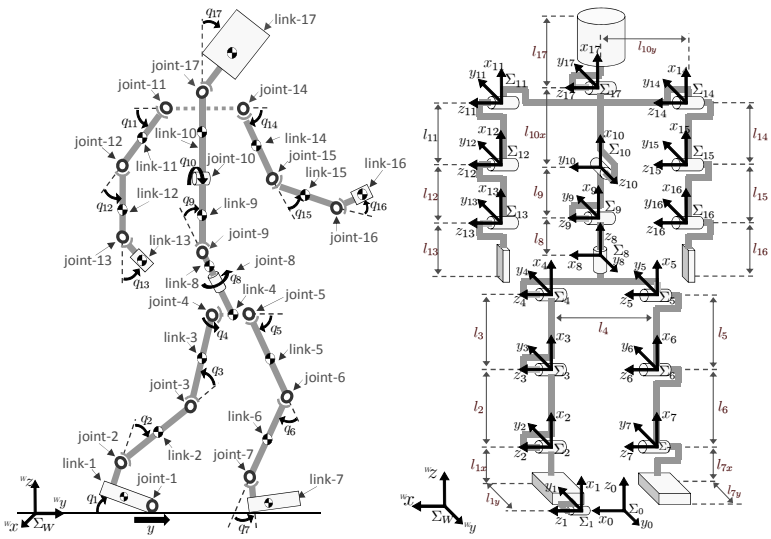
動力学モデルを導出する対象のヒューマノイドモデルの基準座標系 $\sum_W$, 各関節角度 q_i[rad] の定義を図 1(a) に各リンク座標系 $\sum_i$，各リンク長さ l_i[m] の定義を図 1(b) に示す．表 1 には各リンクの長さ，質量を示しており，全長 1.7m, 全質量 63.8[kg] のヒューマノイドモデルを作成した．モデルは 17 本の剛体リンクと質量や長さを持たない 17 個の回転関節，1 個の直動関節で構成されている．直動関節は主脚の $\sum_W$ の y 軸方向の滑りを表現している．したがって主脚が滑る場合は，つま先を含む脚，胴体，腕などの全身モデルを 18 自由度を持つ．図 1(a) に示すように脚は，$\sum_W$ の y 軸方向の並進と x 軸回りの回転の自由度を持つが，図 1(b) に示す脚の $\sum_W$ の y 軸回りの回転の自由度は与えていない．したがって下半身は矢状面内の運動しか行わないが，上半身は joint-8,9,10 により 3 次元空間内の運動が可能である．以降では，link-1, $\cdots$, 3 によって構成される脚を「支持脚」，link-5, $\cdots$, 7 によって構成される脚を状態に応じて「遊脚」と呼ぶ．link-1 につけられている直動関節は接地面との滑りを表現する関節である．ただし $\sum_0$ は図 1(a) の右下に示すように主脚つま先に固定されて $\sum_0$ の y 軸が $\sum_W$ の y 軸と一致している座標である．図 1 中の $\sum_0$ の運動は足の滑りを，$\sum_1$ の運動は link-1 の回転を表している．

2.2　動力学モデル

運動方程式を Newton-Euler 法を用いて導出を行う．まず，Newton-Euler 法の順動力学計算として根元リンクから各リンクの先端に向かって link-i の関節角速度 ${}^i\boldsymbol{\omega}_i$，関節角加速度 ${}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$，リンク座標系の原点における並進加速度 ${}^i\ddot{\boldsymbol{p}}_i$，リンクの質量中心における並進加速度 ${}^i\ddot{\boldsymbol{s}}_i$ を以下の式から導出する．

$$
\begin{aligned}
{}^i\boldsymbol{\omega}_i &= {}^{i-1}\boldsymbol{R}_i^{T\,i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1} + {}^i\boldsymbol{e}_{zi}\dot{q}_i && (1)\\
{}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i &= {}^{i-1}\boldsymbol{R}_i^{T\,i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1} + {}^i\boldsymbol{e}_{zi}\dot{q}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times ({}^i\boldsymbol{e}_{zi}\dot{q}_i) && (2)\\
{}^i\ddot{\boldsymbol{p}}_i &= {}^{i-1}\boldsymbol{R}_i^T\{{}^{i-1}\ddot{\boldsymbol{p}}_{i-1} + {}^{i-1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1} \times {}^{i-1}\hat{\boldsymbol{p}}_i \\
&\quad + {}^{i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1} \times ({}^{i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1}\hat{\boldsymbol{p}}_i)\} && (3)\\
{}^i\ddot{\boldsymbol{s}}_i &= {}^i\ddot{\boldsymbol{p}}_i + {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times {}^i\hat{\boldsymbol{s}}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times ({}^i\boldsymbol{\omega}_i \times {}^i\hat{\boldsymbol{s}}_i) && (4)
\end{aligned}
$$

第 i 関節が直動関節の場合の計算は以下のように行う．このモデルにおいて直動関節は地面と link-1 の間に設置されている．こ



(a) World coordinates and coordinates fixed at i-th link

(b) Definition of links, joints and joint's angles

Fig.1 Definition of Humanoid model

Table 1 Physical parameters

Link	l_i[m]	m_i[kg]	d_i[Nms/rad]
Head (l_{17})	0.24	4.5	0.5
Upper body (l_{10x})	0.41	21.5	10.0
Middle body (l_9)	0.1	2.0	10.0
Lower body (l_8)	0.1	2.0	10.0
Upper arm (l_{11}, l_{14})	0.31	2.3	0.03
Lower arm (l_{12}, l_{15})	0.24	1.4	1.0
Hand (l_{13}, l_{16})	0.18	0.4	2.0
Waist (l_4)	0.27	2.0	10.0
Upper leg (l_3, l_5)	0.38	7.3	10.0
Lower leg (l_2, l_6)	0.40	3.4	10.0
Foot (l_{1x}, l_{7x})	0.07	1.3	10.0
Total weight [kg]	—	64.2	—
Total hight [m]	1.7	—	—

れによって支持脚の滑りを表現している．

$$
\begin{aligned}
{}^{i}\boldsymbol{\omega}_i &= {}^{i-1}\boldsymbol{R}_i^{T\,i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1} && (5)\\
{}^{i}\dot{\boldsymbol{\omega}}_i &= {}^{i-1}\boldsymbol{R}_i^{T\,i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1} && (6)\\
{}^{i}\ddot{\boldsymbol{p}}_i &= {}^{i-1}\boldsymbol{R}_i^{T}\{{}^{i-1}\ddot{\boldsymbol{p}}_{i-1} + {}^{i-1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{i-1}\times{}^{i-1}\hat{\boldsymbol{p}}_i \\
&\quad + {}^{i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1}\times({}^{i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1}\times{}^{i-1}\hat{\boldsymbol{p}}_i)\} \\
&\quad + 2({}^{i-1}\boldsymbol{R}_i^{T\,i-1}\boldsymbol{\omega}_{i-1})\times(\boldsymbol{e}_y\dot{q}_i) + \boldsymbol{e}_y\ddot{q}_i && (7)\\
{}^{i}\ddot{\boldsymbol{s}}_i &= {}^{i}\ddot{\boldsymbol{p}}_i + {}^{i}\dot{\boldsymbol{\omega}}_i\times{}^{i}\hat{\boldsymbol{s}}_i + {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i\times({}^{i}\boldsymbol{\omega}_i\times{}^{i}\hat{\boldsymbol{s}}_i) && (8)
\end{aligned}
$$

ここで，${}^{i-1}\boldsymbol{R}_i$ は $\sum_{i-1}$ から $\sum_i$ への回転行列，$\boldsymbol{e}_{zi} = [0,0,1]^T$，$\boldsymbol{e}_y = [0,1,0]^T$ は link-i の回転軸，直動軸を表す単位ベクトル，${}^{i-1}\hat{\boldsymbol{p}}_i$ は $\sum_{i-1}$ 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．ただし，link-4 が link-5 と link-8 につながっていることから，式 (1)〜(4) においてこれらの式によらない．また link-10 においても link-11，14，17 につながっているため，同様なことが言える．次に逆動力学計算に基づいて，先端リンクから根元のリンクに向かって link-i におけるニュートンとオイラーの動力学的な力のつり合いをを以下の式に基づいて導出する．

$$
\begin{aligned}
{}^{i}\boldsymbol{f}_i &= {}^{i}\boldsymbol{R}_{i+1}\,{}^{i+1}\boldsymbol{f}_{i+1} + m_i\,{}^{i}\ddot{\boldsymbol{s}}_i && (9)\\
{}^{i}\boldsymbol{n}_i &= {}^{i}\boldsymbol{R}_{i+1}\,{}^{i+1}\boldsymbol{n}_{i+1} + {}^{i}\boldsymbol{I}_i\,{}^{i}\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + {}^{i}\boldsymbol{\omega}_i\times({}^{i}\boldsymbol{I}_i\,{}^{i}\boldsymbol{\omega}_i) \\
&\quad + {}^{i}\hat{\boldsymbol{s}}_i\times(m_i\,{}^{i}\ddot{\boldsymbol{s}}_i) + {}^{i}\hat{\boldsymbol{p}}_{i+1}\times({}^{i}\boldsymbol{R}_{i+1}\,{}^{i+1}\boldsymbol{f}_{i+1}) && (10)
\end{aligned}
$$

リンク座標系の設定方法としてよう用いられるように全ての関節が ${}^{i}z_i$ 軸回りの回転を行うように $\sum_i$ を定めた場合，単位ベクトルは $\boldsymbol{e}_{zi} = [0,0,1]^T$ となり，回転関節の運 link-i の逆動力学計算は式 (11) となる．

$$
\tau_i = \boldsymbol{e}_{zi}^{T}\,{}^{i}\boldsymbol{n}_i + d_i\dot{q}_i \tag{11}
$$

link-0 は $\sum_0 y$ 軸方向に滑るため，この並進運動の逆動力学計算は次式で計算される．

$$
\tau_i = \boldsymbol{e}_{zi}^{T}\,{}^{i}\boldsymbol{f}_i + k_{fi}\dot{y}_i \tag{12}
$$

link-0〜link-17 の以上の式を一般的な表現に改めると以下のようになる．

$$
\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{\tau} \tag{13}
$$

ここで，$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$ は慣性行列，$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$，$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})$ はそれぞれ遠心力/コリオリ力の項及び重力項を表すベクトル，$\boldsymbol{D}$ は関節の摩擦係数を表す対角行列 $\boldsymbol{D}$，$\boldsymbol{\tau} = [f_0, \tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_{17}]$(ただし足の滑りは受動的であるため $f_0 = 0$) は入力トルクベクトル，$\boldsymbol{q} = [y_0, q_1, \cdots, q_{17}]$ は関節角度ベクトルである．

3　拘束条件付運動方程式

遊脚の地面への接地は拘束条件を用いて表現している．その条件を加えた運動方程式は式 (14) となる．

$$
\begin{aligned}
&\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}} \\
&\quad = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{j}_{\mathrm{cz}}^{\mathrm{T}} f_{\mathrm{nz}} - \boldsymbol{j}_{\mathrm{t}}^{\mathrm{T}} f_{\mathrm{t}} + \boldsymbol{j}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{T}}\tau_{\mathrm{n}} \quad + \quad \boldsymbol{j}_{\mathrm{cy}}^{\mathrm{T}} f_{\mathrm{ny}} && (14)
\end{aligned}
$$

f_{nz}，f_{t}，τ_{n}，f_{ny} はそれぞれ抗力 (Σ_{W} の z 方向)・摩擦力・拘束トルク・抗力 (Σ_{W} の y 方向) である．また，$\boldsymbol{j}_{\mathrm{c_z}}$，$\boldsymbol{j}_{\mathrm{t}}$，$\boldsymbol{j}_{\mathrm{r}}$，$\boldsymbol{j}_{\mathrm{c_y}}$ は以下の式で定義されるベクトルである．

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{j}_{cz}^{T} &= \left(\frac{\partial \boldsymbol{r}}{\partial \boldsymbol{q}^T}\right)^T \left\{\left(\frac{\partial C_{hz}}{\partial \boldsymbol{r}}\right) / \left\|\frac{\partial C_{hz}}{\partial \boldsymbol{r}}\right\|\right\} && (15)\\
\boldsymbol{j}_{t}^{T} &= \left(\frac{\partial \boldsymbol{r}}{\partial \boldsymbol{q}^T}\right)^T \frac{\dot{\boldsymbol{r}}}{\|\dot{\boldsymbol{r}}\|} && (16)\\
\boldsymbol{j}_{r}^{T} &= \left(\frac{\partial C_{fr}}{\partial \boldsymbol{r}^T}\right)^T / \left\|\frac{\partial C_{fr}}{\partial \boldsymbol{r}}\right\| && (17)\\
\boldsymbol{j}_{cy}^{T} &= \left(\frac{\partial \boldsymbol{r}}{\partial \boldsymbol{q}^T}\right)^T \left\{\left(\frac{\partial C_{hy}}{\partial \boldsymbol{r}}\right) / \left\|\frac{\partial C_{hy}}{\partial \boldsymbol{r}}\right\|\right\} && (18)
\end{aligned}
$$

C_{hz}, C_{fr}, C_{hy} はそれぞれ，接地脚の踵を地面に拘束 ($z_{\mathrm{h}} = 0$)，接地脚の回転を拘束 ($q_e = q_0 + q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 = 0$)，進行方向に対する接地脚の運動を拘束 ($y_{\mathrm{h}} =$ 一定) という条件を意味しており，図 2 の (b)(c)(d) に示す．また Σ_{W} に基づく接地脚の踵の位置ベクトルを $\boldsymbol{r}_{\mathrm{h}}(\boldsymbol{q})$ と定義したとき以下の式で表現される．

$$
\boldsymbol{C}(\boldsymbol{r}_{\mathrm{h}}(\boldsymbol{q})) = \begin{bmatrix} C_{hz}(\boldsymbol{r}_{\mathrm{h}}(\boldsymbol{q})) \\ C_{fr}(\boldsymbol{r}_{\mathrm{h}}(\boldsymbol{q})) \\ C_{hy}(\boldsymbol{r}_{\mathrm{h}}(\boldsymbol{q})) \end{bmatrix} \tag{19}
$$

式 (19) を時間 t で 2 階微分し，式 (14) とを連立させることにより，以下に示すダイナミクスを得る．

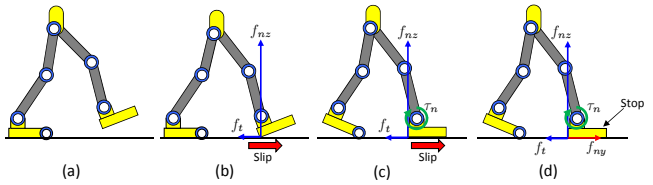


Fig.2 Gaits including contacting-foot with surface-contacting

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) & -(\boldsymbol{j}_{\mathrm{cz}}^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{j}_{\mathrm{t}}^{\mathrm{T}} K) & -\boldsymbol{j}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{T}} & -\boldsymbol{j}_{\mathrm{cy}}^{\mathrm{T}} \\ \partial C_{hz}/\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 \\ \partial C_{fr}/\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 \\ \partial C_{hy}/\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{q}} \\ f_{\mathrm{nz}} \\ \tau_n \\ f_{\mathrm{ny}} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) - \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}} \\ -\dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}} \left(\frac{\partial C_{hz}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}} \right) \right\} \dot{\boldsymbol{q}} \\ -\dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}} \left(\frac{\partial C_{fr}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}} \right) \right\} \dot{\boldsymbol{q}} \\ -\dot{\boldsymbol{q}}^{\mathrm{T}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{q}} \left(\frac{\partial C_{hy}}{\partial \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}} \right) \right\} \dot{\boldsymbol{q}} \end{bmatrix} \tag{20}$$

4 歩容モデル

4.1 ダイナミクスの拡張

ここまで支持脚の表現を次元数を用いて，遊脚の表現を拘束条件を用いて紹介してきた．これらの表現を組み合わせることで歩行中に見られる歩容モデルを 16 種類作成した．また歩行中には遊脚が浮いている状態も考えられるため，この 16 種類の他に支持脚だけが設置した 4 種類の歩容モデルが作成されるため合計で 20 種類の歩容モデルが作成される．また表 2 には 20 種類の歩容モデルにおける支持脚の次元数，遊脚の拘束状態を示している．

Table 2 Possible states for humanoid's walking

Number of States	State variables and constraining force and torque (Lagrange Multiplier)	Constraints (Referrence)
1	$\boldsymbol{q} = [q_2, q_3, \cdots, q_{17}]^T$	Nothing
2	$\boldsymbol{q} = [q_1, q_2, \cdots, q_{17}]^T$	Nothing
3	$\boldsymbol{q} = [y_0, q_2, q_3, \cdots, q_{17}]^T$	Nothing
4	$\boldsymbol{q} = [y_0, q_1, q_2, \cdots, q_{17}]^T$	Nothing
5	$\boldsymbol{q} = [q_2, q_3, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}$	$C_{hz} = 0$
6	$\boldsymbol{q} = [q_1, q_2, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}$	$C_{hz} = 0$
7	$\boldsymbol{q} = [y_0, q_2, q_3, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}$	$C_{hz} = 0$
8	$\boldsymbol{q} = [y_0, q_1, q_2, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}$	$C_{hz} = 0$
9	$\boldsymbol{q} = [q_2, q_3, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}, f_{ny}$	$C_{hz}, C_{hy} = 0$
10	$\boldsymbol{q} = [q_1, q_2, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}, f_{ny}$	$C_{hz}, C_{hy} = 0$
11	$\boldsymbol{q} = [y_0, q_2, q_3, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}, f_{ny}$	$C_{hz}, C_{hy} = 0$
12	$\boldsymbol{q} = [y_0, q_1, q_2, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}, f_{ny}$	$C_{hz}, C_{hy} = 0$
13	$\boldsymbol{q} = [q_2, q_3, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{fr} = 0$
14	$\boldsymbol{q} = [q_1, q_2, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{fr} = 0$
15	$\boldsymbol{q} = [y_0, q_2, q_3, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{fr} = 0$
16	$\boldsymbol{q} = [y_0, q_1, q_2, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{fr} = 0$
17	$\boldsymbol{q} = [q_2, q_3, \cdots, q_{17}]^T, f_{ny}, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{hy}, C_{fr} = 0$
18	$\boldsymbol{q} = [q_1, q_2, \cdots, q_{17}]^T, f_{ny}, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{hy}, C_{fr} = 0$
19	$\boldsymbol{q} = [y_0, q_2, q_3, \cdots, q_{17}]^T, f_{ny}, f_{nz}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{hy}, C_{fr} = 0$
20	$\boldsymbol{q} = [y_0, q_1, q_2, \cdots, q_{17}]^T, f_{nz}, f_{ny}, \tau_n$	$C_{hz}, C_{hy}, C_{fr} = 0$

4.2 歩容遷移図

前節で作成した各歩容モデルに基づいて、図 3 に示す歩容遷移図を作成した．図中の各歩容モデル左上にある番号は前節で示した表 2 と対応している．歩容遷移の経路に関してはヒューマノイドの歩行運動によって運動方程式が決定する．つまり式 (20) で表現されるダイナミクスの解に依存している．各歩容に応じて前節で導出したダイナミクスや状態変数が選定され，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．各条件分岐は次節より説明を行う．

5 モデルの評価方法

5.1 力学的エネルギーの保存則

我々は複雑なモデルの検証するため，力学的エネルギーの保存則を用いる事にした．導出した運動方程式の整合性としを確認する方法として力学的エネルギーの変化を観測する．モデルの入力トルク及び各関節の粘性摩擦，接地面との摩擦を 0 にして自由落下をさせる．摩擦による損失エネルギーは発生せず，力学的エネルギーの初期値を保ったまま，運動を行っていくと考えられる．力学的エネルギーを導出するには，位置エネルギー U，並進エネルギー T_{ti}，回転エネルギー T_{ri} の 3 つのエネルギーが必要となる．各エネルギーの導出は，以下の様になる．

$$U = \sum_{i=1}^{l} m_i g^{w} r_{zgi} \tag{21}$$

$$T_{ti} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{l} m_i^{W} \dot{\boldsymbol{r}}_{gi}^{T\,W} \dot{\boldsymbol{r}}_{gi} \tag{22}$$

$$T_{ri} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{l} {}^{W}\boldsymbol{\omega}_i^{T\,W} \boldsymbol{I}_i {}^{W}\boldsymbol{\omega}_i \tag{23}$$

ここで l はリンク数, ${}^{w}\boldsymbol{r}_{gi}$ は基準座標系から見た各リンクの重心位置ベクトル，また ${}^{w}r_{zgi}$ はその z 座標を表す．これらのエネルギーによって力学的エネルギー Q を求める．

$$Q = U + T_{ti} + T_{ri} \tag{24}$$

ここまで紹介してきた歩容モデルに関しては力学的エネルギーの保存則に基づいて検証を行っており、シミュレーションとして正しく動作することを確認している．

6 シミュレーション (アイススケート運動)

6.1 シミュレーション環境，条件

本章からは我々が作成したヒューマノイドモデルに運動させるための接地面との摩擦係数や入力トルクについて示す．

6.1.1 接地面との摩擦係数について

今回目指す運動は滑りを利用した歩行運動であるアイススケートを模した運動である．図 1 において y 軸正の方向を進行歩行としている．進行歩行に進む際は，足と地面の間の摩擦係数を 0.2 としている．しかし進行方向への加速力をつま先の蹴り出しによって得るため，進行歩行と逆向きに力が働くときは摩擦係数を 0.9 としている．これはアイススケートにおいてスケートシューズのトウピックを意識したためである．

6.1.2 滑り運動のための歩容遷移図

4 章で示した歩容遷移図 (図 4) は二足歩行だけを考慮した歩容遷移図である．これに加え図 4 に示す，滑りを維持するための切り替えと足がつま先から接地することを考慮した歩容遷移図を加えて運動の実現を行う．

6.1.3 入力トルク

- Visual-Lifting Appraoch
  ヒューマノイドの直立時または歩行時の安定性向上を目的として""Visual-Lifting Approach"なる戦略を先行研究より提案している．本戦略の概念は頭部の位置／姿勢を一定に保つことである．まず，本戦略の概略図を図 5 に示す．
  ヒューマノイドの頭部に固定された座標系 Σ_H に基づいて，固定目標物体の位置／姿勢を測定するために Model-based matching 法を使用する．固定目標物体に対して設定された座標系 Σ_R と Σ_H の関係は同次変換行列 ${}^{H}\boldsymbol{T}_R$ として定義される．その結果，頭部の目標位置を表す座標系 Σ_{H_d} と

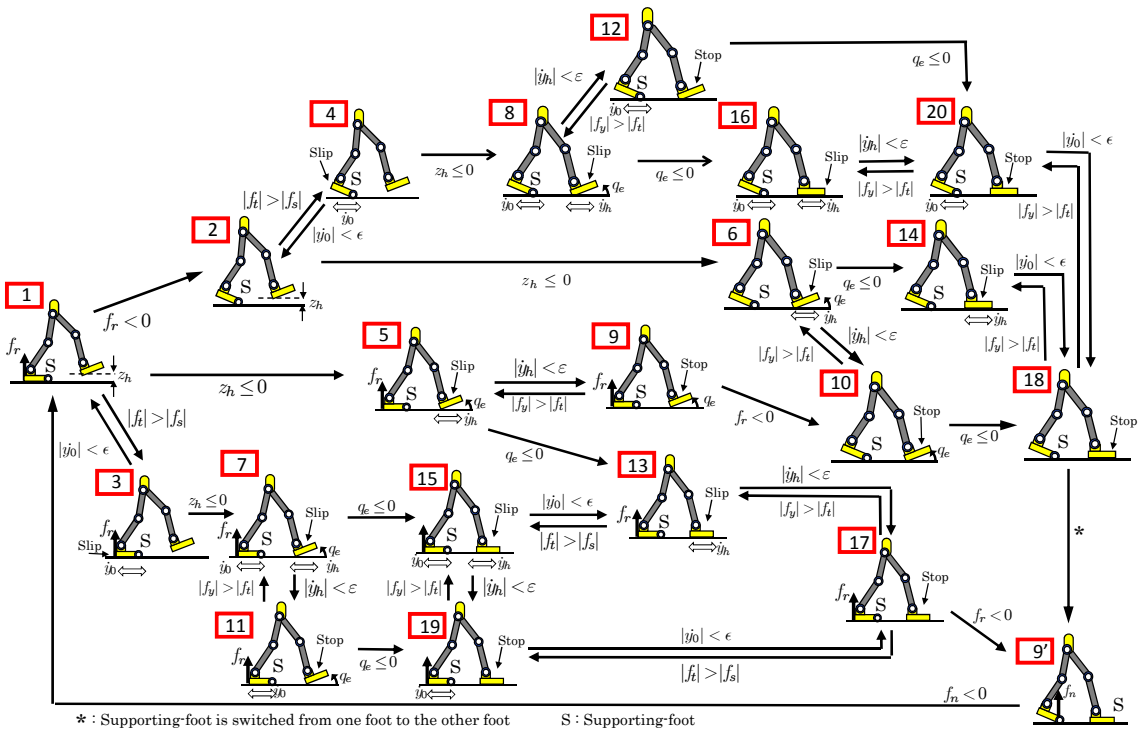


Fig.3 Translation of bipedal walking

Σ_H の偏差を表す同次変換行列 ${}^{H_d}\boldsymbol{T}_H$ は以下の式によって求まる．

$$ {}^{H}\boldsymbol{T}_{H_d}(\boldsymbol{\psi}_d(t), \boldsymbol{\psi}(t)) = {}^{H}\boldsymbol{T}_R(\boldsymbol{\psi}(t)) \cdot {}^{H_d}\boldsymbol{T}_R{}^{-1}(\boldsymbol{\psi}_d(t)) \quad (25) $$

式 (25) において，${}^{H}\boldsymbol{T}_R$ は文献 [12], [13] で提案されている “On-line visual pose estimation” によって測定された $\boldsymbol{\psi}(t)$ を用いて計算可能であるが，本研究では ${}^{H}\boldsymbol{T}_R$ をビジュアルサーボによる認識によって得るのではなく，既知の変数として扱っている．そして，$\delta\boldsymbol{\psi}(t) = \boldsymbol{\psi}_d(t) - \boldsymbol{\psi}(t)$ として定義される頭部の目標値と実際の偏差を最小とするために，関連した関節に入力されるべきトルクが以下の式より計算される．

$$ \boldsymbol{\tau}_h(t) = \boldsymbol{J}_H(\boldsymbol{q})\boldsymbol{K}_p\delta\boldsymbol{\psi}(t) \quad (26) $$

ここで，$\boldsymbol{J}_H(\boldsymbol{q})$ は支持脚から頭部までの位置／姿勢を表すヤコビ行列，$\boldsymbol{K}_p$ は比例ゲインを表している．すなわち式 (26) は頭部を目標位置に引っ張る力 $\boldsymbol{f}_v$ を生み出し，重力による頭部や重心位置の低下及び予測不可能な滑りや外乱による転倒を防止する効果を持つ．式 (26) の制御器は図 3, 図 4 に示される全ての歩容において適用される．

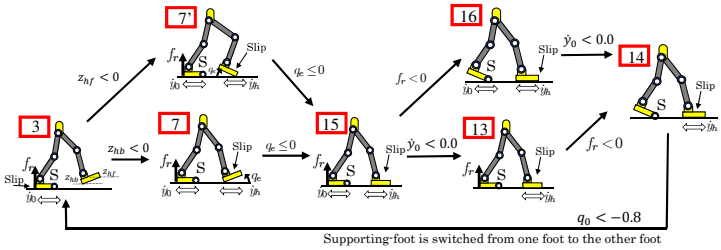


Fig.4 Translation of bipedal walking for the slipping motion

- 脚の踏み込みなどのためのトルク
  普段人間が二足歩行を行う際，フィードバック制御のようにある目標の角度に向かって脚に力を入れるような行為は見られない．それは人間が生きていく上で学習し，慣れた結果なのかもしれないが，今回はそれに倣いフィードフォワード制御を意識した入力トルクを与えている．次頁に各歩容モデルでの入力トルクを示す．

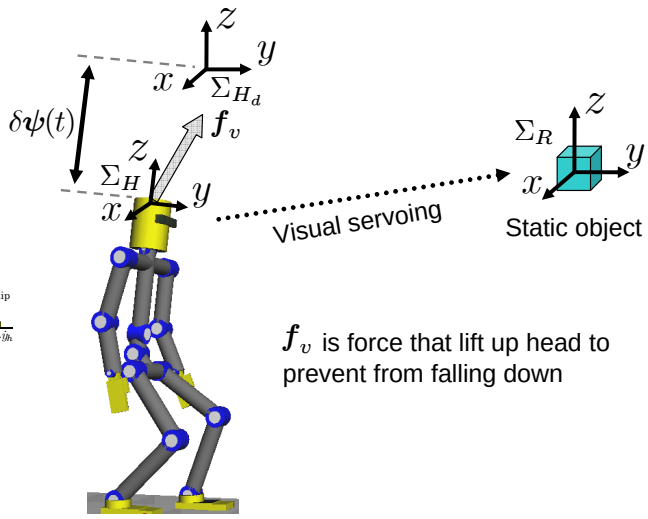


Fig.5 Concept of Visual-Lifting Approach

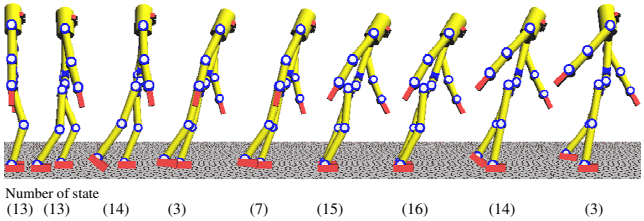


Fig.6 Screenshot while ice skating motion

$$\tau_1 = -150(\text{Case of number of state is 14}) \tag{27}$$

$$\tau_2 = \begin{cases} -205 & (\text{Case of number of states are 7 and 7}') \\ -150 & (\text{Case of number of state is 13}) \\ 75 & (\text{Case of number of state is 14}) \\ 100 & (\text{Case of number of state is 16}) \end{cases} \tag{28}$$

$$\tau_3 = \begin{cases} -50(\text{Case of number of states are 7, 7}', \text{ 13 and 16}) \\ -35(\text{Case of number of state is 14}) \end{cases} \tag{29}$$

$$\tau_5 = \begin{cases} 50 \quad (\text{Case of number of state is 3}) \\ 100 \quad (\text{Case of number of states are 7 and 7}') \\ 50\cos(2\pi(t_n - t_b)/1.45) \\ \qquad (\text{Case of number of state is 13}) \\ 30 \quad (\text{Case of number of state is 16}) \end{cases} \tag{30}$$

$$\tau_6 = 20(\text{Case of number of state is 3}) \tag{31}$$

$$\tau_7 = \begin{cases} -50 & (\text{Case of number of state is 7}) \\ 50 & (\text{Case of number of state is 7}') \\ 60 & (\text{Case of number of state is 3 and } q_7 < 0.5[\text{rad}]) \end{cases} \tag{32}$$

また腕を振るための入力トルクを下記のように与えた．

$$\tau_{11} = \begin{cases} 5\cos(2\pi(t_n - t_b)/4t_{bc}) \\ \qquad (\text{Case of supporting foot is right foot}) \\ -5\cos(2\pi(t_n - t_b)/4t_{bc}) \\ \qquad (\text{Case of supporting foot is left foot}) \end{cases} \tag{33}$$

$$\tau_{14} = \begin{cases} -5\cos(2\pi(t_n - t_b)/4t_{bc}) \\ \qquad (\text{Case of supporting foot is right foot}) \\ 5\cos(2\pi(t_n - t_b)/4t_{bc})) \\ \qquad (\text{Case of supporting foot is left foot}) \end{cases} \tag{34}$$

ここで t_nh は現在時刻，t_b は歩容遷移図中で 14 から 3 に切り替わった時間，t_{bc} は一歩前の歩行周期である．

6.2 シミュレーション結果

前項で示した実験条件をもとにシミュレーションを行った．今回ヒューマノイドモデルが 20 歩歩いた時点でシミュレーションを停止させている．シミュレーション中のスクリーンショットを図 6 に示す．図中の数字は歩容番号を示しており，シミュレーション開始から次の足を踏み出すまでを映している．結果として滑りを利用した運動であるアイススケートの模した運動を実現した．歩容遷移の仕方としては図 4 の 3 → 7 → 15 → 16 → 14 → 3 と 3 → 7' → 15 → 16 → 14 → 3 の二種類の遷移を歩容の状態によって繰り返し行っている．移動距離は 160.2[m] で所要時間は 10.66[s] であった．一歩毎の滑り距離と速度をそれぞれ図 7, 図 8 に示す．また図 9 に 20 歩までの 1 歩毎の歩行周期を示す．この図から分かるように 14 歩以降は 1 歩踏み出すまでの時間が 0.63 秒前後と周期的となっており，安定して運動を行っている事が分かる．

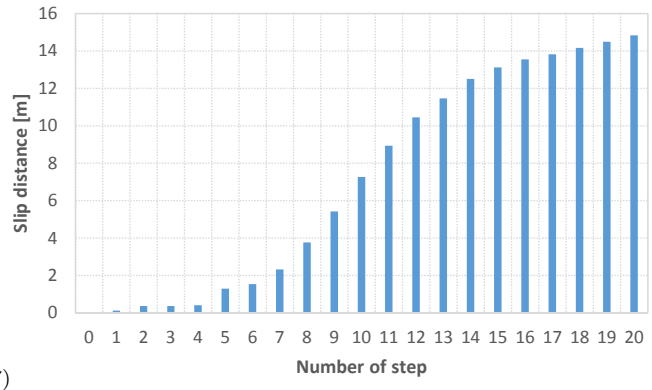


Fig.7 Slip distance per step up to 20 steps

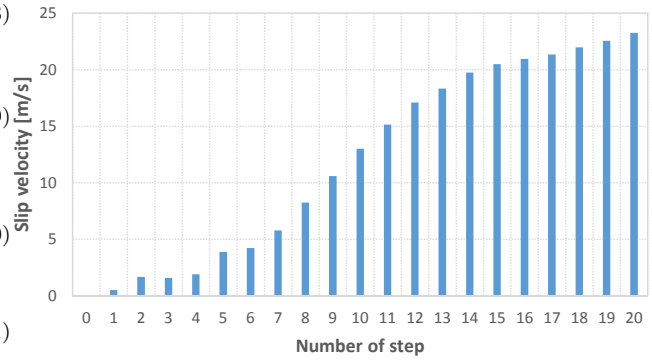


Fig.8 Slip velocity per step up to 20 steps

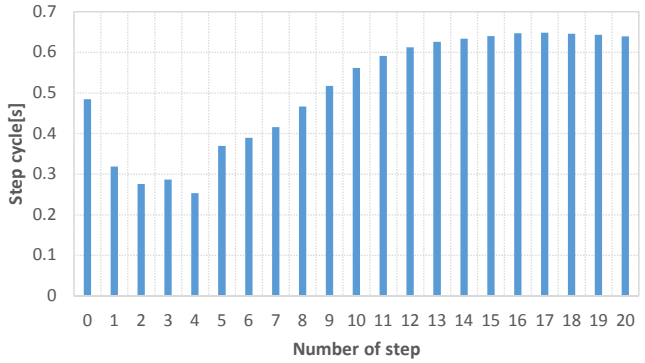


Fig.9 Step cycle per step up to 20 steps

7 結言

本論文では滑りを考慮した動力学的なヒューマノイドのモデルを紹介し，そのモデルを用いてアイススケートを模した運動の実現を行ったことを示した．このような滑りを利用する制御の特性を理解し，一般的な二足歩行中に生じる滑りによる外乱に対処できるような制御器の作成に役立たせたい．

References

[1] S. Kajita, M. Morisawa, K, Miura, S. Nakaoka, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro and K. Yokoi, "Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4489–4496, 2010.

[2] H. Dau, C. Chew and A. Poo, "Proposal of Augmented Linear Inverted Pendulum Model for Bipedal Gait Planning," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.172–177, 2010.

[3] S. Kajita and K. Tani, "Study of Dynamic Locomotion on Rigged Terrain-Derivation and Application of the Linear Inverted Pendulum Mode," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1405–1411, 1991.

[4] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi and H. Hirukawa, "The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2001.

[5] J.H. Park and K.D. Kim, "Biped walking robot using gravity-compensated inverted pendulum mode and computed torque control," *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.4, pp.3528–3593, 1998.

[6] P.B. Wieber, "Trajectory free linear model predictive control for stable walking in the presence of strong perturbations," *Proc. International Conference on Humanoid Robotics*, 2006.

[7] P.B. Wieber, "Viability and predictive control for safe locomotion," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008.

[8] A. Herdt, N. Perrin and P.B. Wieber, "Walking without thinking about it," *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.190–195, 2010.

[9] T.Aoyama, Y.Hasegawa, K. Sekiyama and T.Fukuda: "Stabilizing and Direction Control of Efficient 3-D Biped Walking Based on PDAC", *2009 IEEE/ASME transactions on mechatronics.*, pp.712-718, 2009.

[10] T. Sugihara and Y. Nakamura: "Whole-body Cooperative COG Control through ZMP Manipulation for Humanoid Robots", *Proceedings of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, SaP-III-4, 2003.

[11] Christine Chevallereau, J. W. Grizzle, Ching-Long Shih: "Asymptotically Stable Walking of a Five-Link Underactuated 3-D Bipedal Robot", *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, VOL. 25, NO. 1, FEBRUARY 2009. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.6228–6233, 2010.

[12] W. Song, M. Minami, F. Yu, Y. Zhang and A. Yanou, "3-D Hand & Eye-Vergence Approaching Visual Servoing with Lyapunov-Stable Pose Tracking," *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.5210–5217, 2011.

[13] F. Yu, W. Song and M. Minami, "Visual Servoing with Quick Eye-Vergence to Enhance Trackability and Stability," *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.6228–6233, 2010.