滑りを考慮した二足歩行及び動的形状変更能力に基づく評価

○李 想　馮 陶然　今西 裕紀　見浪 護　松野 隆幸　矢納 陽（岡山大学）

Bipedal Walking in Consideration of Slip and The Evaluation Based on Dynamic Reconfiguration Ability

∗X.Li T.Feng H.Imanishi M.Minami T.Matsuno A.Yanou (Okayama University)

Abstract– Humanoid's bipedal walking realized by controllers' based on Zero Moment Point (ZMP) known as reliable control method deems to be different from human's walking on the view point that ZMP-based walking does not include falling state. However, the walking control including falling state is vulnerable to turnover. Therefore, keeping the event-driven walking dynamical motion stable is important issue for realization of human-like walking. In this thesis, walking model of humanoid including slipping of supporting foot and contacting foot, bumping, surface-contacting and point-contacting of foot is discussed, and its dynamical equation is derived by Newton-Euler method. Then, we propose walking stabilizer named "Visual Lifting Stabilization" strategy to enhance standing robustness and prevent the robot from falling down. Besides, in order to investigate the flexibility of angular acceleration of each joint of robot, a new concept named Dynamic Reconfiguration Manipulability (DRM) which indicates dynamical shape-changeability by using redundancy is proposed as an index to optimize design and posture control of robots. And then, we apply the DRM into humanoid robot to research its dynamical reconfiguration ability during walking.

Key Words: Dynamic Reconfiguration Manipulability, Shape-changeability, Humanoid Robot

1 緒言

ヒューマノイドの歩行制御に関しては，Zero-Moment Point (ZMP) と呼ばれる床半力の圧力中心を参照することによって二足歩行を実現する方法[1,2] が最も有力で現実的な手法であることが知られている．なぜならば，支持多角形の凸包内に ZMP を留めておくことによって，ロボットが転倒することなく安定な歩容が維持されるということが保証されているためである．本田技術研究所の ASIMO を始めとして，多くの実機によるヒューマノイドが ZMP に基づいて現実世界における二足歩行を達成している．ZMP 規範の制御以外にも，リミットサイクルに収束する歩行軌道や関節角度軌道を生成し，これらを参照して二足歩行を生成する手法も存在する[3]．

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) を含む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．その一方で，文献[4] は足 (foot) の存在によって多様な歩容が生成されることを明確に指摘し，様々な歩容を含む歩行モデルを作成している．本研究においても，可能な限り詳細に導出されたつま先，足 (foot)，腕，両足の滑り，足の衝突などを含むダイナミクスに基づいた議論を行う．本研究と文献[4] の観点は共通しているが，本研究は脚だけではなく腰や腕なども含めた全身のモデルを扱う．そして，ヒューマノイドのモデル化において著者らが重要と考えている事は，歩容の変化に応じてダイナミクスに含まれる状態変数の次元が変化するという点である．一例を挙げると，面接地状態 (つま先と踵が接地) から踵が離地する場合にはその足の回転運動を表す変数が新たに必要となるため，状態変数の数が増加する．このような議論は文献[5] において，"one-legged hopping robot"の運動を対象として行われているが，歩行運動に関しては言及されていない．さらに状態変数の次元が運動の結果に応じて変化する系に対して，制御器の設計や安定性の判別を議論している報告はない．

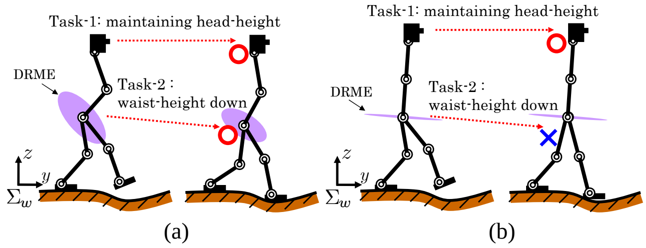

Fig. 1: Applications of dynamic reconfiguration manipulability for humanoid robot walking on uneven ground

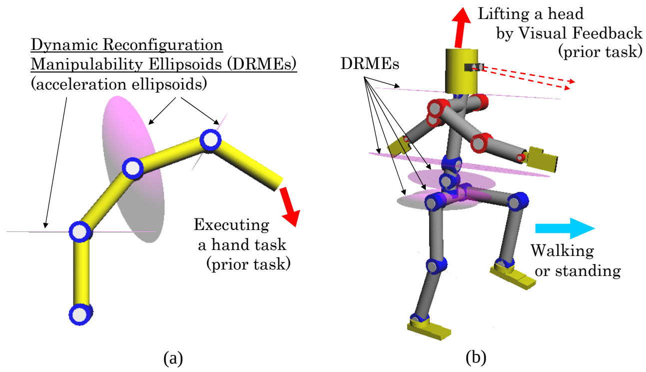

Fig. 2: Applications of dynamic reconfiguration manipulability for (a) redundant manipulator and (b) humanoid robot.

また，足が接地している状況は拘束運動として表現可能であり，文献[6] は物体が環境と接触しながら運動を行っている状態を滑り摩擦を含めて代数方程式に基づいて表現し，ヒューマンフィギュアへの応用を提案している．これらの文献に基づいて，本論文では分岐を持つマニピュレータとして模擬されたヒューマノイドのダイナミクスを Newton-Euler 法を用いて導出する．マニピュレータに基づいたモデル化は文献[7] でも行われているが，分岐のない脚のみのモデルが対象となっている．

そして，本文では ZMP に依存しない人間らしい自然

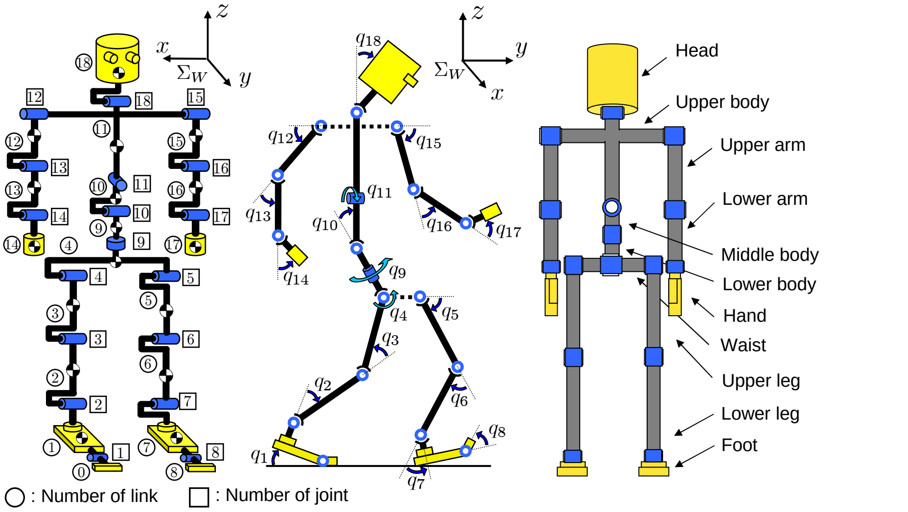

Fig. 3: Definition of humanoid's link, joint and angle number

Table 1: Physical parameters

Link	l_i	m_i	d_i
Head	0.24	4.5	0.5
Upper body	0.41	21.5	10.0
Middle body	0.1	2.0	10.0
Lower body	0.1	2.0	10.0
Upper arm	0.31	2.3	0.03
Lower arm	0.24	1.4	1.0
Hand	0.18	0.4	2.0
Waist	0.27	2.0	10.0
Upper leg	0.38	7.3	10.0
Lower leg	0.40	3.4	10.0
Foot	0.07	1.1	10.0
Total	1.7	63.8	

な二足歩行の実現を考える．ZMP が支持多角形の境界上に存在している時，ヒューマノイドは転倒状態にあり，歩容は不安定となる可能性が高い．このような問題に対して，本研究では “Visual-lifting Stabilization” と名付けた姿勢安定化を行うための戦略をビジュアルサーボとインピーダンス制御[8]の概念に基づいて提案する．この戦略は文献[9,10]において提案されている “visual pose estimation”を利用しており，ヒューマノイドが目標物体を実時間で認識することによって取得可能な物体に対する自身の位置／姿勢の偏差をフィードバックすることにより，直立及び歩行状態における姿勢安定化を可能とする．

さらに，ロボットの各関節の角加速度の出しやすさを考察するため，本論文では運動学と動力学的な観点を含めた上での冗長性利用により実現可能な形状変更性を示した概念「動的形状変更可操作性 (Dynamic Reconfiguration Manipulability, DRM)」を提案し，Fig.1 と Fig.2 に示すように冗長マニピュレータのみでなくヒューマノイドロボットの最適設計や姿勢最適化のために運動性能の一つの評価指標を与える．そして，DRM をヒューマノイドロボットに適用し，歩行時における各関節の動的形状変更能力について考察する．

2 ヒューマノイドの二足歩行モデル

ヒューマノイドのリンク，関節，関節角度 q_i の定義を Fig.3 示す．物理的なパラメータ設定を Table.1 に示す．モデルは 19 本の剛体リンクと質量や長さを持たない 18 個の回転関節で構成されており，つま先を含む足 (foot)，胴体，腕などの全身モデルを 18 自由度で表現している．下半身は矢状面内の運動しか行わないが，上半身は joint-9, 10, 11 により 3 次元空間内の運動が可能である．

以降では，link-0, $\cdots$, 3 によって構成される脚を「支持脚」，link-5, $\cdots$, 8 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．

3 Visual-lifting Approach

一般的に ZMP を参照しない連続歩行は不安定な歩容が現れるため，困難であるとされる．不安定な歩容とは転倒状態を意味し，一旦転倒状態が生じると安定な姿勢に復帰することは難しい．本章ではこのような問題

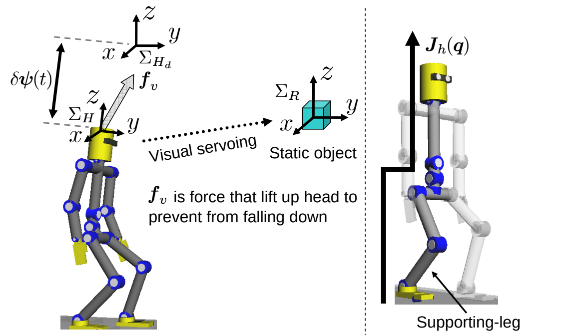

Fig. 4: Concept of Visual-lifting Approach

を避けるために，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” と呼ぶ戦略を提案する．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，その概略図を Fig. 4 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 Σ_H の偏差を表す同次変換行列 ${}^{H}\boldsymbol{T}_{H_d}$ は以下の式によって求まる．

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

式 (1) において，${}^{H}\boldsymbol{T}_R$ は文献[9,10]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により計算される．

$$ \boldsymbol{\tau}_h(t) = \boldsymbol{J}_H(\boldsymbol{q})\boldsymbol{K}_p\delta\boldsymbol{\psi}(t) \quad (2) $$

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

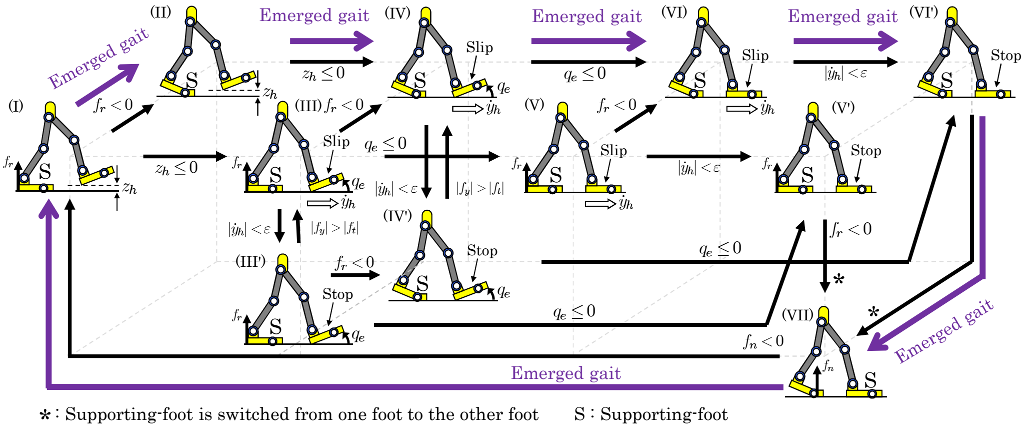

Fig. 5: Gait's transition

なわち式 (2) 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 (2) の制御器は本論文で述べる実験の全ての歩容において適用され，歩容の違いに対する Visual-lifting Approach の有効性は第 5 章において検証される．

4　滑りを考慮した二足歩行

人間は歩いたり走ったりする時，両足が地面の摩擦状況により接地脚や支持脚を問わず滑りを生じるはずである．本研究で扱う二足歩行は，Newton-Euler 法を用いることで，衝突などの拘束だけではなく，両足の滑りも考慮することができる．本章ではヒューマノイドの歩行運動中に生じる足の滑りについて述べる．

4.1　接地脚の滑り

ヒューマノイドは Fig. 5 に示す状態遷移を繰り返しながら歩行する．Fig. 5 の (II)、(IV)、(VI)、(VI′) 及び (III)、(V)、(V′) に示すように，歩行中に生じる接地脚の滑りはダイナミクスに依存している．また，接地脚の進行方向の力 f_y が静摩擦力を上回った場合，すなわち $|f_y| > |f_t|$ のとき条件 C_{hy} を外して，接地脚は進行方向に滑りを生じる．

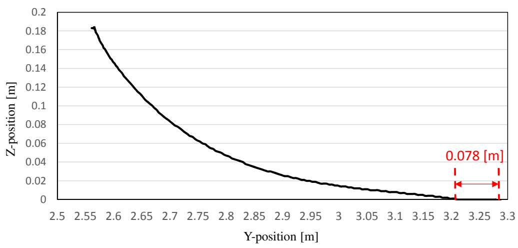

Fig. 6: One step of contacting foot ($K = 0.7$)

Fig. 6 は Fig. 5 の (II)、(IV)、(VI)、(VI′) に示した接地脚の踵の位置変化について，比例ゲイン $\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 1100]$，摩擦係数 $K = 0.7$ 時の状態を表している．Fig. 6 より，接地脚が接地した後，前方に $0.078[m]$ 滑ってから止まるという運動が分る．この結果により，本研究で扱うモデルは接地脚の滑りを考慮していることが確認できた．

また，摩擦係数と滑り距離の関係を確認するため，摩擦係数を 0.4 から 0.9 まで 0.1 ずつ変化させ，滑り距離との関係について調べた．その結果を Fig. 7 に示す．この図から現実の運動と同じように，摩擦係数の増加に従って，滑り距離が減少していることが分かる．よって，本研究で扱う接地脚滑りのモデルの妥当性を検証することができた．

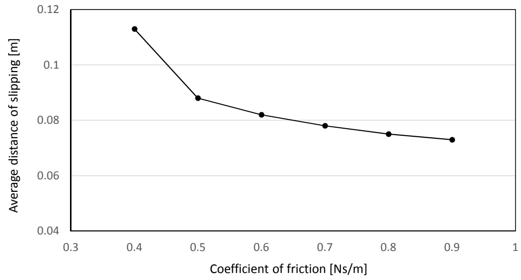

Fig. 7: Average distance of slipping

4.2　支持脚の滑り

支持脚滑りのモデルは接地脚滑りのモデルと異なり，根元 (支持脚の爪先) が固定されないという前提で考察する．支持脚の進行方向に対する変位 y_0 を追加すれば支持脚の滑りが表現される．ここで，y_0 を追加した場合の支持脚が滑る状態での運動方程式の導出方法について述べる．座標系 Σ_W における link-1 の根元の変位は ${}^W\boldsymbol{p}_1 = [0, y_0, 0]^{\mathrm{T}}$ となり，順動力学計算において Σ_i の原点における加速度 ${}^1\ddot{\boldsymbol{p}}_1$ は以下の式で導出される．

$$
{}^1\ddot{\boldsymbol{p}}_1 = {}^W\boldsymbol{R}_1^{\mathrm{T}} \left\{ {}^W\ddot{\boldsymbol{p}}_W + {}^W\ddot{\boldsymbol{p}}_1 \right\} \tag{3}
$$

また，逆動力学計算において，支持脚の並進方向の運動方程式は式 (4) のように計算される．

$$
{}^1\boldsymbol{f}_1 = {}^1\boldsymbol{R}_2 {}^2\boldsymbol{f}_2 + m_1 {}^1\ddot{\boldsymbol{s}}_1 \tag{4}
$$

支持脚の滑りを含む歩行の状態遷移は Fig. 8 に示す．ここで，$\boldsymbol{f}_t$ は支持脚の並進力，$\boldsymbol{f}_s$ は支持脚の最大静摩擦力，$\dot{\boldsymbol{y}}_0$ は支持脚の並進速度である．状態遷移の経路はヒューマノイドの歩行運動によって決定される．つまり，ダイナミクスの解に依存する．Fig. 9 は支持脚のつま先の位置と状態の時間変化を表す．支持脚の滑りを実現するには滑り条件により摩擦係数を非常に小さくしなければならないので，このシミュレーションでは $K = 0.05$ とした．また，状態 0 は支持脚がつま先点接地，状態 1 は面接地を表す．Fig. 9 より，支持脚が $0.8[s]$ から $1.0[s]$ の間に点接地として後方に滑り，$1.5[s]$ から $1.75[s]$ の間に面接地として前方に滑ることが分かる．

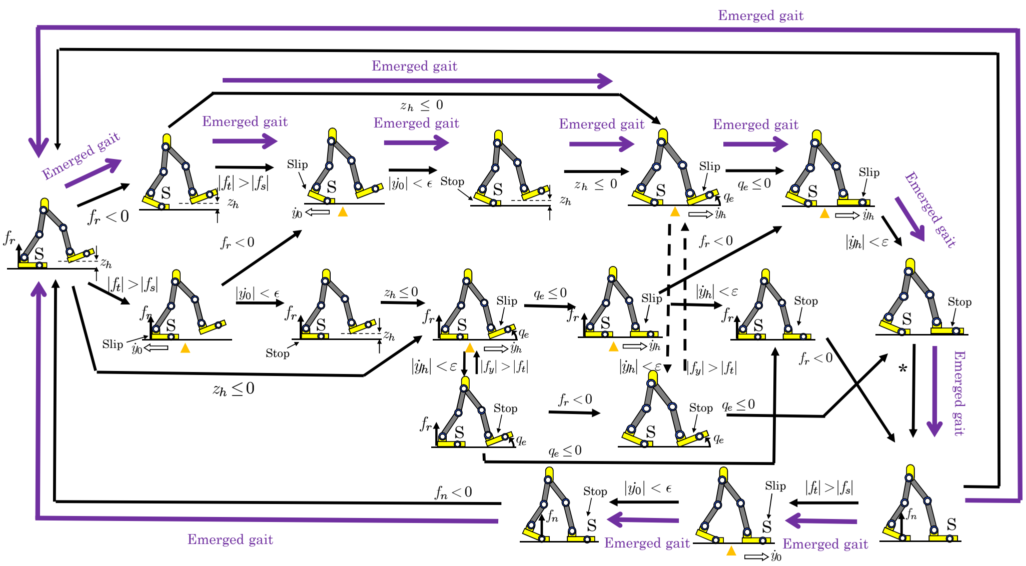

Fig. 8: States and gait transition including slip motion

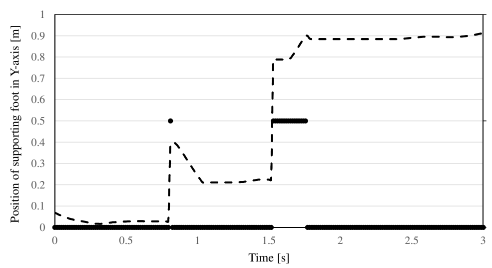

Fig. 9: Distance and state of slipping

5 動的形状変更可操作性 (DRM)

本章ではマニピュレータの可操作性について議論する．リンク動的可操作性は動的可操作性をマニピュレータの各リンク先端に適用した概念であり，他にタスクが与えられていない状態のマニピュレータの動かしやすさを表す．動的形状変更可操作性は動的可操作性と形状変更可操作性をヒントにし本論文で提案される概念であり，手先タスクが与えられている状態でのマニピュレータの動かしやすさを表す．

5.1 リンク動的可操作性

リンク動的可操作性は，マニピュレータのハンドにタスクが与えられていない場合，あるリンクの先端がどの方向にどれだけ加速度を出せるのかを表す概念である．各リンクの動きやすさを関節トルクを用いて考える．マニピュレータの運動方程式は一般的に式 (5) で表される．

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{\tau} \tag{5}$$

ここで，$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q}) \in \mathrm{R}^{n\times n}$ は慣性行列，$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) \in \mathrm{R}^n$ は遠心力，コリオリ力を表す項，$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \in \mathrm{R}^n$ は重力を表す項，$\boldsymbol{D} = \mathrm{diag}[d_1, d_2, \cdots, d_n]$ は粘性抵抗行列であり，$\boldsymbol{\tau} \in \mathrm{R}^n$ はトルク，$\boldsymbol{q} \in \mathrm{R}^n$ は関節角度である．一方，第 i リンク先端の位置 $\boldsymbol{r}_i$ と関節角度 $\boldsymbol{q}$ の関係は次式で表される．

$$\boldsymbol{r}_i = \boldsymbol{f}_i(\boldsymbol{q}) \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{6}$$

式（6）を時間 t で微分すると，第 i リンク先端の速度 $\dot{\boldsymbol{r}}_i$ と角速度 $\dot{\boldsymbol{q}}$ の関係が次式のように表される．

$$\dot{\boldsymbol{r}}_i = \boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} \tag{7}$$

ここで，$\boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q}) \in \mathrm{R}^{m\times n}$ は $\dot{\boldsymbol{r}}_i$ の $\boldsymbol{q}$ に関するヤコビ行列であり，0 の成分を含んだ行列 $\boldsymbol{J}_i = [\tilde{\boldsymbol{J}}_i,\ \boldsymbol{0}]$ として表される．さらに式 (7) を時間 t で微分することで，

$$\ddot{\boldsymbol{r}}_i = \boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \dot{\boldsymbol{J}}_i(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}} \tag{8}$$

が得られる．$\dot{\boldsymbol{J}}_i(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}$ は $\boldsymbol{q}$ と $\boldsymbol{r}_i$ を表す 2 つの座標系空間の関係が非線形であることに起因する加速度と解釈できる (遠心加速度を発生させる成分 $\dot{q}_i^2$ やコリオリ加速度を発生させる成分 $\dot{q}_{i-1}\dot{q}_i$ などが含まれる項が見られる)．ここで，式 (5)，(8) より $\ddot{\boldsymbol{q}}$ を消去すると，

$$\ddot{\boldsymbol{r}}_i - \dot{\boldsymbol{J}}_i\dot{\boldsymbol{q}} = \boldsymbol{J}_i\boldsymbol{M}^{-1}[\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) - \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}}] \tag{9}$$

が得られる．さらに，

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} \triangleq \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) - \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) - \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{10}$$

$$\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_i \triangleq \ddot{\boldsymbol{r}}_i - \dot{\boldsymbol{J}}_i\dot{\boldsymbol{q}} \tag{11}$$

によって新たな変数 $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ と $\tilde{\boldsymbol{r}}_i$ を導入すると式（9）は次式の様に表せる．

$$\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_i = \boldsymbol{J}_i\boldsymbol{M}^{-1}\tilde{\boldsymbol{\tau}} \tag{12}$$

リンク動的可操作性は式 (12) を基礎式として，ダイナミクスのある制約下での関節トルク $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ によって各リンク先端加速度 $\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_i$ の出しやすさの度合いを定量化し指標とする，という考え方である．ここで $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ の一般解を求めると，

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = (\boldsymbol{J}_i\boldsymbol{M}^{-1})^{+}\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_i + [\boldsymbol{I}_n - (\boldsymbol{J}_i\boldsymbol{M}^{-1})^{+}(\boldsymbol{J}_i\boldsymbol{M}^{-1})]\ \boldsymbol{k} \tag{13}$$

ただし，$(\boldsymbol{J}_i\boldsymbol{M}^{-1})^{+}$ は $(\boldsymbol{J}_i\boldsymbol{M}^{-1})$ の擬似逆行列，$\boldsymbol{I}_n \in \mathrm{R}^{n\times n}$ は単位行列，$\boldsymbol{k} \in \mathrm{R}^n$ は任意ベクトルである．ここで，$\|\tilde{\boldsymbol{\tau}}\|$ が $\|\tilde{\boldsymbol{\tau}}\| \leq 1$ を満足するような関節トルク $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ を用いて実現し得る各リンクの先端加速度 $\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_i$ の全てからなる集合を考えると，以下の式 (14) で表され，$\boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q})$ の値域空間の次元を持つユークリッド空間内の楕円体（Fig.10）となる．

$$\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_i^{\mathrm{T}}\left[\boldsymbol{J}_i\left(\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\right)^{-1}\boldsymbol{J}_i^{\mathrm{T}}\right]^{+}\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_i \leq 1, \text{ and } \quad \ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_i \in R(\boldsymbol{J}_i\boldsymbol{M}^{-1}) \tag{14}$$

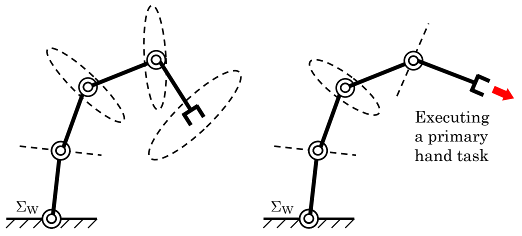

Fig. 10: (a) Dynamic manipulability ellipsoids (DMEs) represent the realizable accelerations $\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_i$ for each link without prior task at hand, and (b) dynamic reconfiguration manipulability ellipsoids (DRMEs) represent the realizable accelerations $\Delta\,^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j$ for intermediate links with a hand task being executed as a primary acceleration task.

5.2 動的形状変更可操作性 (DRM)

マニピュレータのハンドにタスクが与えられた場合 $(i=n)$ の形状変更能力の良し悪しを考える．$\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_n$ と $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ の関係は式 (12) より次式の様に表される．

$$\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_n = \boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1}\tilde{\boldsymbol{\tau}} \tag{15}$$

ハンド目標加速度 $\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_{nd}$ が優先タスクとして与えられる場合，$\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_{nd}$ を実現するための $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ は，上式の一般解を求めることによって得られる．

$$\tilde{\boldsymbol{\tau}} = (\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})^{+}\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_{nd} + \left[\boldsymbol{I}_n - (\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})^{+}(\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})\right]\,^1\boldsymbol{l} \tag{16}$$

$^1\boldsymbol{l} \in \mathrm{R}^n$ は任意ベクトルであり，$[\boldsymbol{I}_n - (\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})^{+}(\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})]$ の単位は無次元であることから $^1\boldsymbol{l}$ の単位は関節トルクと一致する．式 (16) の右辺第一項は $\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_{nd}$ を実現する $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ の中で $\|\tilde{\boldsymbol{\tau}}\|$ を最小にする解を与える．また第二項は，第一項による $\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_{nd}$ の実現には無関係にマニピュレータの形状を変更する関節トルクを $^1\boldsymbol{l}$ によって与えることを表す．以下では形状変更のための第 j リンク $(1{\le}j{\le}n-1)$，すなわち中間リンクの動的形状変更可操作性について考える．ハンド目標タスクの次に優先するタスクを第一動的形状変更タスクと呼び，その優先順位を左肩添え字の "1" で表す．冗長自由度が多い場合には，第二，第三の複数の動的形状変更タスクを実行できる可能性がある．ここで，ハンド目標加速度 $\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_{nd}$ を実現している際の第 j リンク加速度 $^1\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_j$ との関係は，式 (12) と式 (16) より $\tilde{\boldsymbol{\tau}}$ を消去することによって次式のように表される．

$$\begin{aligned}^1\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_j = \boldsymbol{J}_j\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})^{+}\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_{nd}\\ +\boldsymbol{J}_j\boldsymbol{M}^{-1}\left[\boldsymbol{I}_n - (\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})^{+}(\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})\right]\,^1\boldsymbol{l}\end{aligned} \tag{17}$$

さらに式 (11) の関係により式 (17) は次式のように書き直すことができる．

$$\begin{aligned}^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j - \dot{\boldsymbol{J}}_j\dot{\boldsymbol{q}} - \boldsymbol{J}_j\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})^{+}(\ddot{\boldsymbol{r}}_{nd} - \dot{\boldsymbol{J}}_n\dot{\boldsymbol{q}}) =\\ \boldsymbol{J}_j\boldsymbol{M}^{-1}\left[\boldsymbol{I}_n - (\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})^{+}(\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})\right]\,^1\boldsymbol{l}\end{aligned} \tag{18}$$

ここで，

$$^1\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_j \triangleq \dot{\boldsymbol{J}}_j\dot{\boldsymbol{q}} + \boldsymbol{J}_j\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})^{+}(\ddot{\boldsymbol{r}}_{nd} - \dot{\boldsymbol{J}}_n\dot{\boldsymbol{q}}) \tag{19}$$

$$\Delta\,^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j \triangleq \,^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j - \,^1\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_j \tag{20}$$

$$^1\boldsymbol{\Lambda}_j \triangleq \boldsymbol{J}_j\boldsymbol{M}^{-1}\left[\boldsymbol{I}_n - (\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})^{+}(\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})\right] \tag{21}$$

によって新たな変数を定義することで，式 (18) は次式のように表せる．

$$\Delta^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j = \,^1\boldsymbol{\Lambda}_j\,^1\boldsymbol{l} \tag{22}$$

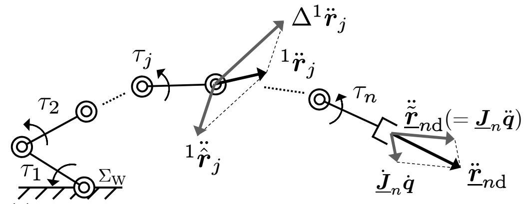

Fig. 11: Reconfiguration relation of j-th intermediate link during hand executing task $\ddot{\boldsymbol{r}}_{nd}$. $^1\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_j$ means influence of hand task to j-th link as shown in Eq.(19). $\boldsymbol{J}_j\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{J}_n\boldsymbol{M}^{-1})^{+}\ddot{\boldsymbol{r}}_{nd}$ is a induced acceleration of j-th link by $\ddot{\boldsymbol{r}}_{nd}$. If $^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j$ is required to be generated at j-th link, $\Delta^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j$ determined by Eq.(20) have to be realized through $^1\boldsymbol{l}$ in Eq.(22).

式 (8)，(11)，(19) および (20) の関係を Fig.11 に示す．式 (19) 中の $^1\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_j$ はマニピュレータのハンドの加速度タスクが原因となり発生する第 j リンクの加速度成分を表しており，右辺第 1 項は第 j リンクに発生する遠心・コリオリ加速度であり，右辺第 2 項は手先目標タスク達成に伴い第 j リンクに発生する加速度である．式 (20) より $^1\ddot{\tilde{\boldsymbol{r}}}_j$ に対して加速度 $^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j$ を実現するには，$\Delta^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j$ を入力トルクの一部である $^1\boldsymbol{l}$ によって発生させる必要があることがわかる．ここで，動的形状変更可操作性 (Dynamic Reconfiguration Manipulability, DRM) は，式 (22) を基礎式として，目標手先加速度 $\ddot{\boldsymbol{r}}_{nd}$ に影響を与えない関節トルク $^1\boldsymbol{l}$ によって発生できる中間リンク加速度 $\Delta^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j$ の出しやすさの度合いを定量化した指標である．$\Delta^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j$ を通して $\forall^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j{\in}\mathrm{R}^m$ を実現できるかどうかは，$^1\boldsymbol{\Lambda}_j$ に依存しており，$^1\boldsymbol{\Lambda}_j$ により $\forall\Delta^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j$ の実現の可能性を判定できる．式 (22) より $\Delta^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j$ を実現する一般解 $^1\boldsymbol{l}$ を求めると次式となる．

$$^1\boldsymbol{l} = \,^1\boldsymbol{\Lambda}_j^{+}\Delta^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j + (\boldsymbol{I}_n - \,^1\boldsymbol{\Lambda}_j^{+}\,^1\boldsymbol{\Lambda}_j)\,^2\boldsymbol{l} \tag{23}$$

式 (23) で，$^2\boldsymbol{l} \in \mathrm{R}^n$ はトルクの次元を持つ新たな任意ベクトルである．$\boldsymbol{I}_n - \,^1\boldsymbol{\Lambda}_j^{+}\,^1\boldsymbol{\Lambda}_j$ にランクが残っている場合には第 j リンク以外の中間リンクの加速度を指定できる余裕がある．$^1\boldsymbol{l}$ が，$\|^1\boldsymbol{l}\| \le 1$ を満たすように制約を受ける場合には，式 (23) より次式が得られる．

$$(\Delta^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j)^{\mathrm{T}}(^1\boldsymbol{\Lambda}_j\,^1\boldsymbol{\Lambda}_j^{\mathrm{T}})^{+}\Delta^1\ddot{\boldsymbol{r}}_j \le 1 \tag{24}$$

$\boldsymbol{\Lambda}_j$ が行フルランクの場合，つまり $\mathrm{rank}(^1\boldsymbol{\Lambda}_j) = m$ が成立する場合には，式 (24) は m 次元空間に広がる楕円体となる．$\mathrm{rank}(^1\boldsymbol{\Lambda}_j) < m$ の場合には式 (24) が縮退した楕円体となることは明らかであり，これらの楕円体は，Fig.10(b) に示されている．

次に，DRM の概念に基づきマニピュレータ形状を比較するための指標について考える．行列 $^1\boldsymbol{\Lambda}_j$ は特異値分解により，

$$^1\boldsymbol{\Lambda}_j = \,^1\boldsymbol{U}_j\,^1\boldsymbol{\Sigma}_j\,^1\boldsymbol{V}_j^T \tag{25}$$

$$^1\boldsymbol{\Sigma}_j = \begin{array}{c c} & \begin{array}{cc} r & n-r \end{array} \\ \begin{array}{c} r \\ \\ m-r \end{array} & \left[\begin{array}{ccc|c} ^1\sigma_{j,1} & & \boldsymbol{0} & \\ & \ddots & & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & & ^1\sigma_{j,r} & \\ & \boldsymbol{0} & & \boldsymbol{0} \end{array}\right] \end{array} \tag{26}$$

ただし，$^1\boldsymbol{U} \in \mathrm{R}^{m\times m}, ^1\boldsymbol{V} \in \mathrm{R}^{n\times n}$ は直交行列であり，$\mathrm{rank}(^1\boldsymbol{\Lambda}_j) = r \leqq m$，かつ $^1\sigma_{j,1}{\ge}\cdots{\ge}^1\sigma_{j,r} > 0$ であ

る．第 j リンクの楕円体の体積に比例する動的形状変更能力は次の式で表される．

$$ {}^{1}w_j = {}^{1}\sigma_{j,1} \cdot {}^{1}\sigma_{j,2} \cdots {}^{1}\sigma_{j,r} \tag{27} $$

本論文では，${}^{1}w_j$ を正規化された関節トルクによって第 j リンク先端に作業空間の任意な方向へ加速度を発生できる度合として定義し，第一動的形状変更可操作度 (Dynamic Reconfiguration Manipulability Measure, 以下 DRMM) と呼ぶことにする．ここで注意しておきたい点は，DRME, DRMM とも ${}^{1}\boldsymbol{\Lambda}_j$ のみに依存して定まり，${}^{1}\boldsymbol{\Lambda}_j$ は式 (21) に示すように $\boldsymbol{J}_i(\boldsymbol{q})$，$\boldsymbol{J}_n(\boldsymbol{q})$ と $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})$ の関数，すなわち $\boldsymbol{q}$ の関数である．したがって DRME, DRMM ともロボットの形状に直接依存して定まることがわかる．

5.3 ヒューマノイドの二足歩行に対する DRM に基づく評価

本節ではまず 3 種類の比例ゲインによる歩行の違いを動的形状変更可操作性を適用して考察する．与えるゲインは安定な歩行を実現できる範囲内で，高ゲイン（$\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 1100]$），中ゲイン（$\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 950]$），低ゲイン（$\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 900]$）とする．ヒューマノイドは Fig. 12(a), (b), (c) のようにそれぞれ歩行した．楕円体は見やすさのためにスケーリングしている．Fig. 12 において，(a), (b) (c) の左から 4 番目のヒューマノイドロボットの状態では支持脚が面接地しているため膝関節に DRM 楕円体が見られない（厳密には線分は存在している）．つまり，変数の次元は $\boldsymbol{q} = [q_2, q_3, \cdots, q_{18}]^T$ となっている．それ以外では，点接地であり $\boldsymbol{q} = [q_1, q_2, \cdots, q_{18}]^T$ となっているため膝関節にも楕円体が見られる（厳密には楕円である）．また，Fig. 12(c) の形状は (a) と比べ腰を落とした形状であるので，DRM 楕円体の体積は (c) の方が大きい．Fig. 13 からも，比例ゲインが大きいほど楕円体の体積の総和を表した動的形状変更可操作値 (DRMSI) が小さくなっていることが確認できる．これは，(c) の形状変更能力が (a) の形状より大きいことを意味しているが，(c) の歩行は人間らしい歩行とは言い難い．

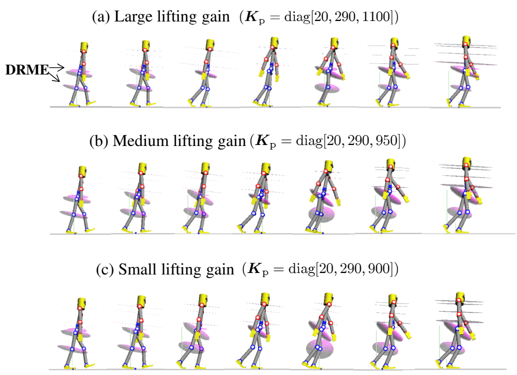

Fig. 12: Screenshot of humanoid walking on uneven ground

さらに，不整地上を歩くヒューマノイドの動的形状変更能力を考察するため，Fig. 14 に示すような軌道を設計した．

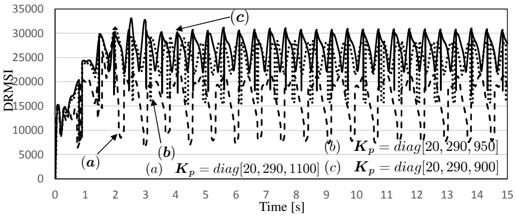

Fig. 13: DRMSI until t=15.0[s]

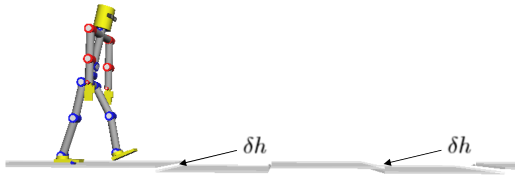

Fig. 14: The uneven ground

また，軌道の段差の大きさの変化により動的形状変更能力が変わると考えたため，段差 δh を $0.01[m], 0.02[m], 0.03[m]\cdots$ のように設定した．安定な歩行を実現できる範囲内のゲイン $\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 950]$(腰を落とした歩行) と $\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 1100]$(腰を伸ばした歩行) を対象とし，段差の違いによる各ゲインでの歩行の動的形状変更能力を考察する．DRMSI の時間変化を Fig. 15 から Fig. 26 に示す．各図の丸印は足が一つ目の階段を下る時の DRMSI を意味している．

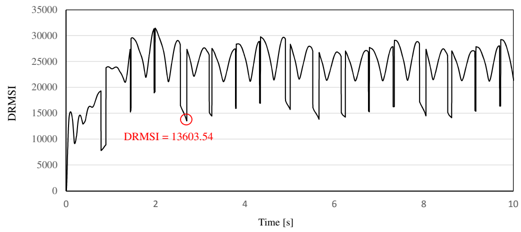

Fig. 15: Case: Low lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 950]$), $\delta h = 0.01[m]$

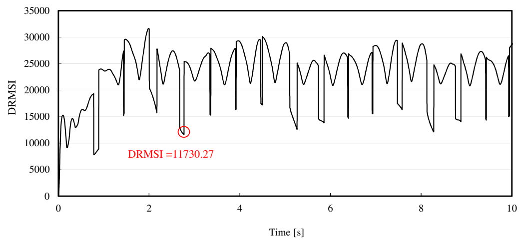

Fig. 16: Case: Low lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 950]$), $\delta h = 0.02[m]$

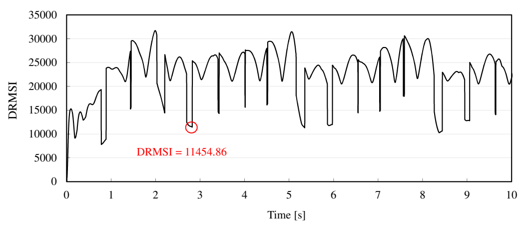

Fig. 17: Case: Low lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 950]$), $\delta h = 0.03[m]$

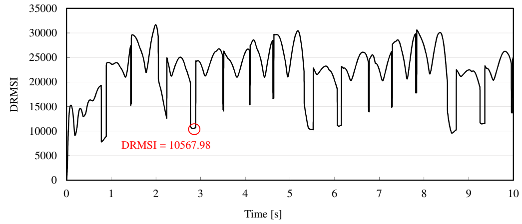

Fig. 18: Case: Low lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 950]$), $\delta h = 0.04[m]$

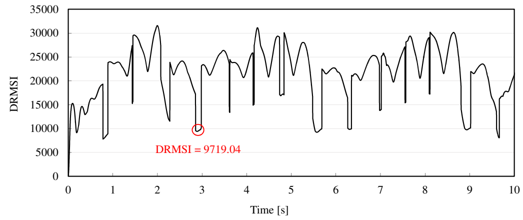

Fig. 19: Case: Low lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 950]$), $\delta h = 0.05[m]$

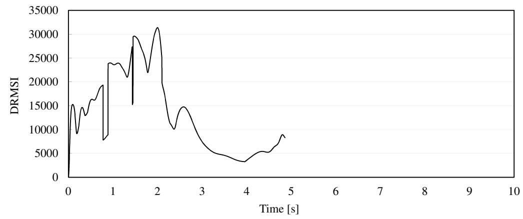

Fig. 20: Case: Low lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 950]$), $\delta h = 0.06[m]$

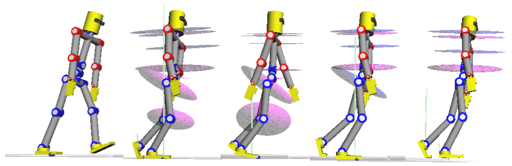

Fig. 21: Screenshot of humanoid walking on uneven ground with Low lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 950]$), $\delta h = 0.01[m]$

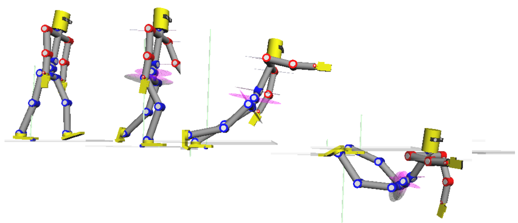

Fig. 22: Screenshot of humanoid walking on uneven ground with Low lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 950]$), $\delta h = 0.06[m]$

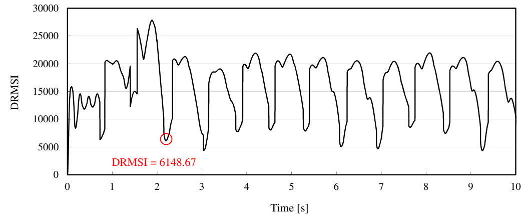

Fig. 23: Case: High lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 1100]$), $\delta h = 0.01[m]$

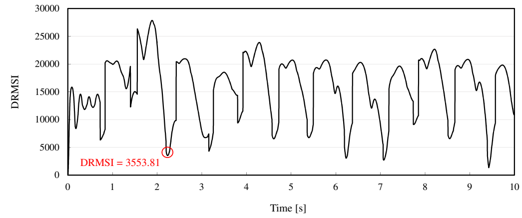

Fig. 24: Case: High lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 1100]$), $\delta h = 0.02[m]$

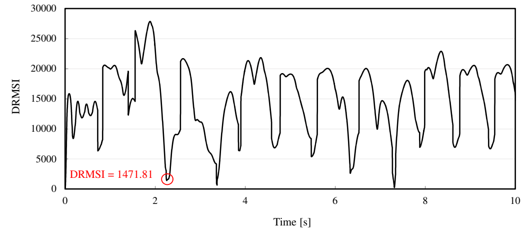

Fig. 25: Case: High lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 1100]$), $\delta h = 0.03[m]$

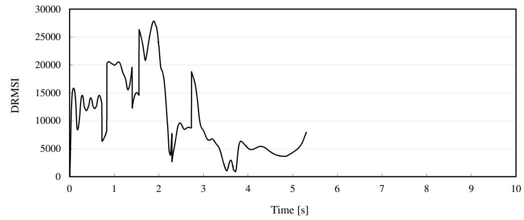

Fig. 26: Case: High lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 1100]$), $\delta h = 0.04[m]$

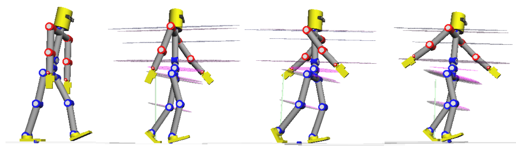

Fig. 27: Screenshot of humanoid walking on uneven ground with High lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 1100]$), $\delta h = 0.01[m]$

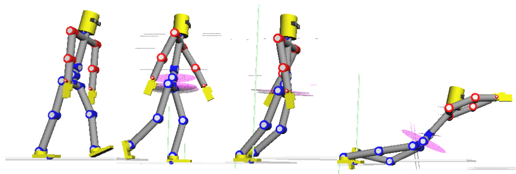

Fig. 28: Screenshot of humanoid walking on uneven ground with High lifting-gain ($\boldsymbol{K}_p = diag[20, 290, 1100]$), $\delta h = 0.04[m]$

Fig. 15からFig. 20より，腰を落とした歩行の場合は，段差の大きさの増加によって足が一つ目の階段を下る時のDRMSIが低くなることが分かる，歩行の様子はFig. 21に示す．なお，δhは$0.06[m]$になるとヒューマノイドロボットは転倒する，転倒の様子はFig. 22に示す．Fig. 23からFig. 26より，腰を伸ばした歩行の場合のDRMSIは腰を落とした歩行の場合より全体的に低いことが分かる，この時の歩行の様子をFig. 27に示す．また，δhは$0.04[m]$になると転倒し，その様子をFig. 28に示す．これらのことから，段差が大きくなると，ヒューマノイドロボットが段差を上がったり下ったりするときの形状変更能力が低くなり，また腰を伸ばした歩行より，腰を落とした歩行のほうが不整地の状況に対する形状変更能力が高くなることが言える．

6 結言

本論文では，可能な限り詳細にモデル化された複雑なダイナミクスを持つヒューマノイドロボットについて議論し，人間らしい自然な歩行を実現させるという目的に基づいて，以下の内容について記述した．

まず，支持脚及び接地脚の面接地／点接地に応じて17種類の歩容を考え，それぞれの歩容に対して拘束運動や変数の次元の変化を利用して接地脚の滑りや衝突だけではなく支持脚の滑りも含めたモデル化を行った．そして，ロボットの運動性能の評価指標の一つである動的形状変更能力を表す概念「動的形状変更可操作性(DRM)」を提案した．DRMは先端リンク（手先や頭部）に与えられたタスクの実現に影響しない中間リンクの加速度の出しやすさを関節トルクとの関係で表した概念である．また，DRMをヒューマノイドロボットに適用することで，その妥当性・有効性をシミュレーションにより確認した．

参考文献

1) M. Vukobratovic, A. Frank and D. Juricic : On the Stability of Biped Locomotion, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol.17, No.1, (1970)

2) M. Vukobratovic and J. Stepanenko : On the Stability of Anthropomorphic Systems, *Mathematical Biosciences*, Vol.15, pp.1/37, (1972)

3) Y. Harada, J. Takahashi, D. Nenchev and D. Sato : Limit Cycle Based Walk of a Powered 7DOF 3D Biped with Flat Feet, *Proc. of International Conference on IROS*, pp.3623/3628, (2010)

4) 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)

5) T. Wu, T. Yeh and B. Hsu : Trajectory Planning of a One-Legged Robot Performing Stable Hop, *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4922/4927, (2010)

6) 中村 仁彦, 山根 克 : 拘束条件が不連続に変化するリンク系の動力学—環境と接触しながら運動するヒューマンフィギュアへの応用—, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.3, pp.435/443, (2000)

7) Y. Fujimoto and A. Kawamura : Three Dimensional Digital Simulation and Autonomous Walking Control for Eight-Axis Biped Robot, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2877/2884, (1995)

8) N. Hogan : Impedance Control; An Approach to Manipulation, Parts I–III, *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control* Vol.107, No.1, pp.1/24, (1985)

9) 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)

10) 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)