

CRB 角運動量および VRP 擬似逆行列に基づく 全身制御による動的二足歩行

宮原笙 (東京都市大学) 金宮好和 (東京都市大学)

1. 緒言

人型ロボットのバランス制御、歩行制御に関しては、数多くの研究が行われており、近年では運動量に基づくバランス制御や Divergent Component of Motion (DCM) を用いた歩行制御がよく用いられている。

バランス制御に関しては、はじめに、梶田らによって運動量を入力として人型ロボットの関節を制御する分解運動量制御が提案された [1]。その後、Orin らは、動力学におけるバランス制御に運動量制御を適用した [2]。しかし、運動量を制御するための DCM の制御は行われていない。また、重心の姿勢は定義されないため、明確な重心回りの角運動量の目標値を与えることは困難となる。そのため、梶田らは目標値を 0 として制御していたが、0 とするための運動が自己干渉や特異点を招くため、確実に満たされることも問題視されている [1]。これに対して、Wiedebach らは Centroidal Moment Pivot (CMP) と Center of Pressure (CoP) の差を用いてモーメントを発生させているが、最適化によって実現している [3]。そこで、我々は関節を固定と仮定した場合のシステムの角運動量 (CRB 角運動量) を用いた重心回りの角運動量制御を提案する。

歩行制御に関しては、全身制御は運動学で解かれるものが多くアーム先端の接触力を考慮した研究は少ない。その中で、Koolen らは目標のアーム先端のレンチを与え、歩行動作を実現している [4]。しかし、繰り返し計算によって最適化問題を解いている。そこで我々は、レンチ分配問題に対して、非繰り返し計算によって解を求める DCM 擬似逆行列を提案しており、三次元にも対応した [5]。しかし、DCM 擬似逆行列は重心の静的安定および未知の外乱に対するバランス制御のために提案された手法であり、重心のエネルギーの変化によって分配比を決定する。このことから、エネルギーが発生しない限り分配比が変化しないため、アーム先端のレンチが DCM ダイナミクスにおける制御入力とならない。また、加速する方向側の支持脚に大きな力を分配するため、支持脚のモーメントが過大となる問題が存在する。そのため、歩行制御には適していない。これらの問題から、文献 [5] では、Virtual Repellent Point (VRP) を指標とした VRP 擬似逆行列の有用性も示唆されている。

以上より本稿では、先行研究において明確に考慮されていなかった重心回りの角運動量に対して、CRB 角運動量を用いた制御を提案するとともに、歩行制御における VRP 擬似逆行列の有用性を検証する。そのため、DCM 制御に基づく人型ロボットの運動量制御コントローラを構成し、非繰り返し計算による接触力を考慮した歩行動作をシミュレーションにより検証する。

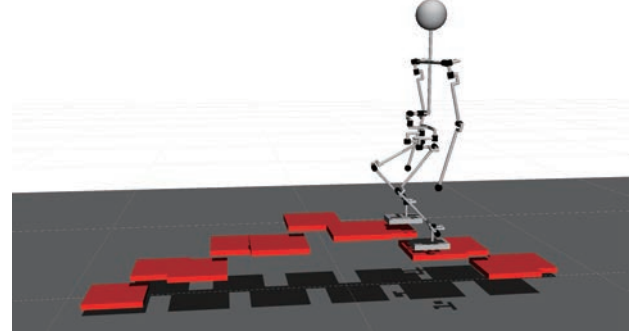


図 1 本稿の制御を用いた階段昇降のシミュレーション

2. 人型ロボットのダイナミクス

2.1 浮遊ベースロボットの運動方程式

人型ロボットの動力学的干渉を考慮するためには、運動方程式を用いるのが一般的である。それらは、ラグランジュの運動方程式などから導出されるが、人型ロボットのバランス制御においては、重心を制御することが重要であるため、以下が用いられる [6][7]。

$$\begin{bmatrix} ME & 0 & 0 \\ 0 & I_C & H_C \\ 0 & H_C^T & M_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r}_C \\ \dot{\omega}_B \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ c_m \\ c_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Mg \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{cf} \\ C_{cm} \\ \hat{J}_c^T \end{bmatrix} \bar{\mathcal{F}}^c \quad (1)$$

本運動方程式では、一般化速度 $\dot{q}_M \in \mathbb{R}^{6+n}$ が重心の速度 $\dot{r}_C \in \mathbb{R}^3$ 、ベースリンクの角速度 $\omega_B \in \mathbb{R}^3$ 、関節速度 $\dot{\theta} \in \mathbb{R}^n$ で表される。 M は人型ロボットの全質量、 $I_C \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 、 $H_C \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ 、 $M_\theta \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は慣性行列、 $c_m \in \mathbb{R}^3$ 、 $c_\theta \in \mathbb{R}^n$ は非線形項、 $g \in \mathbb{R}^3$ は重力加速度ベクトル、 $\tau \in \mathbb{R}^n$ は関節トルク、 $\bar{\mathcal{F}}^c \in \mathbb{R}^c$ は接触部のレンチを表す。また、 $C_{cf} \in \mathbb{R}^{3 \times c}$ は接触部のレンチを重心の力に変換する行列、 $C_{cm} \in \mathbb{R}^{3 \times c}$ は接触部のレンチを重心回りのモーメントに変換する行列、 $\hat{J}_c \in \mathbb{R}^{c \times n}$ はヤコビ行列の接触により拘束された成分を抜き出したものと等価である。ただし、ヤコビ行列は重心を基準としたヤコビ行列であるため、記号 (\circ) を用いて区別する。これにより、重心のダイナミクスがベースリンクの回転運動および関節の運動と非干渉化され、単純な線形の方程式で表すことができる。ただし、浮遊ベースロボットの駆動力は関節トルク τ のみのため、重心およびベースリンクの姿勢に対する駆動力は 0 となる。

2.2 人型ロボットの運動量

2.2.1 DCM に基づく並進運動量変化率

バランス制御では重心制御の次元削減のため、DCM の制御が行われるが、アーム先端のレンチや運動によるアーム先端の加速度とバランスの関係は重心の運動量変化率によって表される。したがって、運動量変化率を用いた DCM の制御のため、VRP と重心の関係を示す。式 (1) における上段の方程式より、非干渉化された重心のダイナミクスは以下で表される。

$$M\ddot{\mathbf{r}}_C = \dot{\mathbf{p}} = M\mathbf{g} + \mathbf{C}_{cf}\bar{\mathbf{F}}^c \quad (2)$$

式中、 $\mathbf{C}_{cf}\bar{\mathbf{F}}^c = \sum_{k=1}^p \mathbf{f}_k$ であり、アーム先端の接触による反力 \mathbf{f}_k の和となる。ここで、式 (2) は以下で表すことができる [8]。

$$\dot{\mathbf{p}} = M\omega_X^2(\mathbf{r}_C - \mathbf{r}_{vrp}) \quad (3)$$

式中、 $\omega_X = \sqrt{g/\bar{z}_{vrp}}$ である。 \bar{z}_{vrp} は位置の次元における重力であり、本稿では初期重心高さを \bar{z}_{vrp} とする。また、 \mathbf{r}_{vrp} は VRP と呼ばれており、VRP および DCM は以下で表される。

$$\mathbf{r}_{vrp} = \mathbf{r}_X - \frac{1}{\omega_X} \dot{\mathbf{r}}_X \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_X = \mathbf{r}_C + \frac{1}{\omega_X} \dot{\mathbf{r}}_C \quad (5)$$

2.2.2 角運動量変化率

重心回りの角運動量変化率は以下の関係が成り立つ。

$$\dot{\mathbf{l}}_C = \mathbf{I}_C\dot{\boldsymbol{\omega}}_B + \mathbf{H}_C\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{c}_m \quad (6)$$

$$\mathbf{c}_m = \dot{\mathbf{I}}_C\boldsymbol{\omega}_B + \dot{\mathbf{H}}_C\dot{\boldsymbol{\theta}}$$

式 (6) より、重心回りに発生するモーメントはベースリンクの角加速度を基準として、ベースリンクの角加速度による角運動量変化率および関節による相対的な干渉角運動量変化率によって構成される。したがって、目標の重心回りの角運動量を設定することによって、目標の $\dot{\mathbf{l}}_C$ を満たす $\dot{\boldsymbol{\omega}}_B$ および $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$ を算出することができる。ここで、CRB 角運動量変化率は以下で表される。

$$\dot{\mathbf{l}}_C = \mathbf{I}_C\dot{\boldsymbol{\omega}}_B + \dot{\mathbf{I}}_C\boldsymbol{\omega}_B \quad (7)$$

2.3 重心の運動量変化率

式 (2)(6) より、重心の運動量変化率は以下で表される。

$$\dot{\mathbf{p}}_C = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}} \\ \dot{\mathbf{l}}_C \end{bmatrix} = \mathbf{A}_M\dot{\mathbf{q}}_M + \dot{\mathbf{A}}_M\mathbf{q}_M \quad (8)$$

式中、 $\mathbf{A}_M \in \mathbb{R}^{6 \times (6+n)}$ は式 (1) の上段および中段で表される方程式の慣性行列である。Orin らが提案した重心運動量行列 [2] とは異なり、重心のダイナミクスが非干渉化された形となっている。

2.4 歩行制御におけるレンチ分配

本稿の目的は、接触力を考慮した歩行動作を実現することである。そこで、文献 [8] における、DCM の軌道生成法を用いる。これにより、重心や床面の高さの拘束が解決される。この歩行制御は、ZMP を規範とする歩行制御が元となっており、重心のダイナミクスから DCM のダイナミクスへ拡張した手法である。そのため、DCM ダイナミクスへの入力として VRP が導入された。また、両脚支持期間が考慮されており、この期間において連続的に VRP が変化するように、DCM の軌道生成が行われている。よって、両脚支持期間における分配指標は、目標 VRP を入力とする歩行動作では、VRP を考えるのは妥当である。この考えは文献 [9] を元としている。これは ZMP を規範とする歩行制御において、参照 ZMP を満たすアーム先端レンチの分配指標に目標 ZMP を用いている。以上より、本稿では参照 VRP を満たすアーム先端レンチの分配のため、目標 VRP を指標に分配を行う。

2.5 アーム先端の運動制約

アーム先端の運動は、接触による拘束および非拘束な方向への運動拘束によって、以下の制約が課される。

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{J}}_c \\ \hat{\mathbf{J}}_m \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_M = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \dot{\hat{\mathbf{v}}}_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{J}}_c \\ \hat{\mathbf{J}}_m \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_M \quad (9)$$

式中、 $\hat{\mathbf{J}}_{(o)} = [\mathbf{C}_{(o)} \hat{\mathbf{J}}_{(o)}]$ であり、力制御のため、拘束 c と非拘束 m を分解して扱う。 $\hat{\mathbf{J}}_m$ はヤコビ行列の非拘束成分を抜き出したものであり、本稿では遊脚の運動制御の制約となる。また、 $\mathbf{0}$ はアーム先端が物理的に拘束されていることを表し、 $\dot{\hat{\mathbf{v}}}_m$ は非拘束の方向に対するアーム先端の加速度を表す。

3. 制御コントローラ

本コントローラは、人型ロボットの運動量を指定し制御を行うが、目標の運動量は、VRP によって駆動される DCM から算出される。また、拘束条件を考慮して、拘束方向に対して力制御を行い、非拘束方向に対して運動制御を行うハイブリッド制御を用いる。

3.1 重心の並進運動量制御

並進運動量変化率指令値は式 (3)(4) より、以下とする。

$$\dot{\mathbf{p}}^{ref} = M\omega_X^2(\mathbf{r}_C - \mathbf{r}_{vrp}^{ref}) \quad (10)$$

$$\mathbf{r}_{vrp}^{ref} = \mathbf{r}_X - \frac{1}{\omega_X} \dot{\mathbf{r}}_X^{ref} \quad (11)$$

また、DCM 速度指令値は以下とする。

$$\dot{\mathbf{r}}_X^{ref} = \dot{\mathbf{r}}_X^{des} + \mathbf{K}_X \mathbf{r}_X^{err} \quad (12)$$

以降、 $(o)^{err} = (o)^{des} - (o)$ であり、現在値と目標値の差を表す。

3.2 重心回りの角運動量制御

重心回りのモーメントの制御入力は、ベースリンクの姿勢制御のためのモーメントを考慮し、干渉角運動

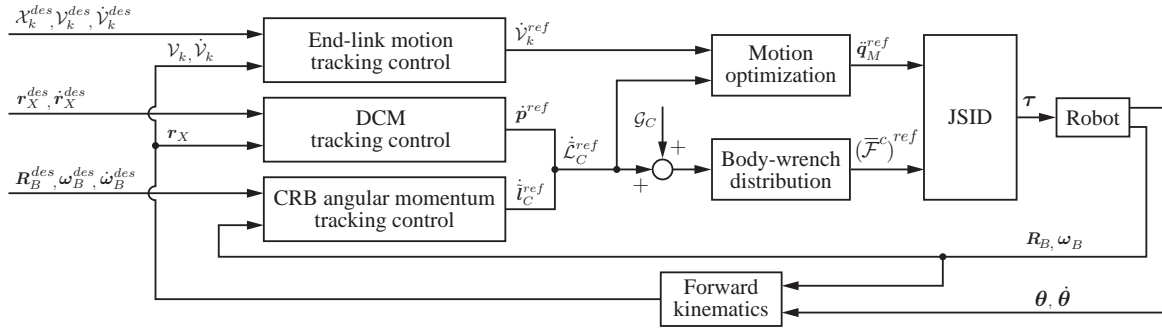


図 2 本稿のシステムのブロック線図．各コントロールレイヤについては End-link motion tracking control は式 (21)，DCM tracking control は式 (12)，CRB angular momentum tracking control は式 (13)，Motion optimization は式 (17)，Body-wrench distribution は式 (16)，JSID は joint space inverse dynamics であり，式 (22) に示す．

量については条件を課さない．これにより，重心回りの角運動量はベースリンクの姿勢制御によって，重心回りの角運動量を安定させる．以上より，重心回りの角運動量変化率指令値は以下とする．

$$\dot{l}_C^{ref} = I_C \dot{\omega}_B^{ref} + \dot{I}_C \omega_B \quad (13)$$

また，ベースリンクの角加速度指令値は以下で与える．

$$\dot{\omega}_B^{ref} = \dot{\omega}_B^{des} + K_{\omega_B} \omega_B^{err} + K_{O_B} e_{O_B} \quad (14)$$

式中， $e_{O_{(o)}} \in \mathbb{R}^3$ は姿勢の誤差を表す．

3.3 アーム先端レンチ分配

接触レンチと重心にかかるレンチの関係は，式 (1) の上段および中段の方程式から算出される．したがって，式 (2)(6) より，以下が成り立つ．

$$\left(\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{l}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Mg \\ 0 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} C_{cf} \\ C_{cm} \end{bmatrix} \bar{\mathcal{F}}^c = \mathcal{C}_c \bar{\mathcal{F}}^c \quad (15)$$

よって式 (10)(13) より，接触レンチ指令値は VRP 擬似逆行列によって以下で求められる．

$$(\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} = \mathcal{C}_c^{-W_{vrp}} \left(\begin{bmatrix} \dot{p}^{ref} \\ \dot{l}_C^{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Mg \\ 0 \end{bmatrix} \right) + N(\mathcal{C}_c) \bar{\mathcal{F}}_a^c \quad (16)$$

式中， W_{vrp} は VRP 擬似逆行列の重みを表す．また，第二項は \mathcal{C}_c の内力を表し，摩擦に対する滑りの制御などに用いることができる．ただし，本稿では扱わないものとし， $\bar{\mathcal{F}}_a^c = 0$ とする．

3.4 運動制御

アーム先端位置制御のため，式 (9) の条件により， \ddot{q}_M を算出する．また，バランス制御による運動量変化率を満たすため，式 (8) の条件を追加する．以上より，優先度付き逆運動学によって，一般化加速度指令値 \ddot{q}_M^{ref} を求める．本稿では，バランス制御を第一タスクとしたアーム先端運動制御をするため，一般化加速度指令値を以下として与える．

$$\ddot{q}_M^{ref} = \ddot{q}_1^{ref} + \ddot{q}_2^{ref} + \ddot{q}_3^{ref} \quad (17)$$

また，各タスクは以下とする．

$$\ddot{q}_1^{ref} = \begin{bmatrix} \mathcal{A}_M \\ \hat{J}_c \end{bmatrix}^+ \left(\begin{bmatrix} \dot{\mathcal{L}}_C^{ref} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{A}}_M \\ \hat{J}_c \end{bmatrix} \dot{q}_M \right) \quad (18)$$

$$\ddot{q}_2^{ref} = \bar{J}_m^+ ((\dot{\mathcal{V}}^m)^{ref} - \hat{J}_m \ddot{q}_M^{ref} - \dot{\hat{J}}_m \dot{q}_M) \quad (19)$$

$$\ddot{q}_3^{ref} = N \left(\begin{bmatrix} \mathcal{A}_M \\ \hat{J}_c \end{bmatrix} \right) N(\bar{J}_m) \ddot{q}_{DH} \quad (20)$$

式中， $\bar{J}_m \in \mathbb{R}^{n \times (6+n)}$ であり， \hat{J}_m の第一タスクの制約を表す行列の零空間に射影された行列である．また，各アーム先端加速度指令値は以下とする．

$$\dot{v}_k^{ref} = \begin{bmatrix} \dot{v}_k^{ref} \\ \dot{w}_k^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}_k^{des} + K_{v_k} v_k^{err} + K_{r_k} r_k^{err} \\ \dot{w}_k^{des} + K_{w_k} w_k^{err} + K_{O_k} e_{O_k} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式 (21) より，拘束条件にしたがって，非拘束方向のみを抜き出したアーム先端加速度を $(\dot{\mathcal{V}}^m)^{ref}$ とする．また， $\ddot{q}_{DH} = [0^T - D_{js} \dot{\theta}^T]^T$ であり，腕部の運動の減衰のための関節加速度とする． D_{js} は減衰係数である．

3.5 逆動力学に基づく関節トルク制御

これまでに計算された一般化加速度指令値 \ddot{q}_M^{ref} およびアーム先端レンチ指令値 $(\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref}$ から式 (1) の下段より，関節トルクは以下となる．

$$\tau = M_\theta \ddot{q}_M^{ref} + c_\theta + g_\theta + \mathcal{J}_c^T (\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} \quad (22)$$

式中， $\hat{J}_c^T \bar{\mathcal{F}}^c$ 内に含まれる関節空間における重力項 g_θ を分解し，接触レンチ制御と非干渉化した．

4. シミュレーション

提案したコントローラの確認のため，Choreonoid[10] を用いてシミュレーションを行った．制御対象は HOAP-2[11] を用いる．その際用いたブロック線図を図 2 に示す．また，高さの変わらない平地を歩行するタスクと，階段の昇降タスクの二つを行った．ベースリンクの姿勢は常に初期姿勢にフィードバックし，遊脚は五次補間による軌道生成で制御した．また，腕部の拘束条件は，運動制御における第一タスクの運動量制御と関節速度ダンパによる項のみである．フィードバックゲインは両シミュレーションで統一し，表 1 に示す値を用いた．

表1 フィードバックゲイン

$K_X : 300$	$K_{OB} : 300$	$K_{\omega_B} : 50$	$D_{js} : 100$
$K_{rk} : 3000$	$K_{vk} : 500$	$K_{Ok} : 3000$	$D_{\omega k} : 500$

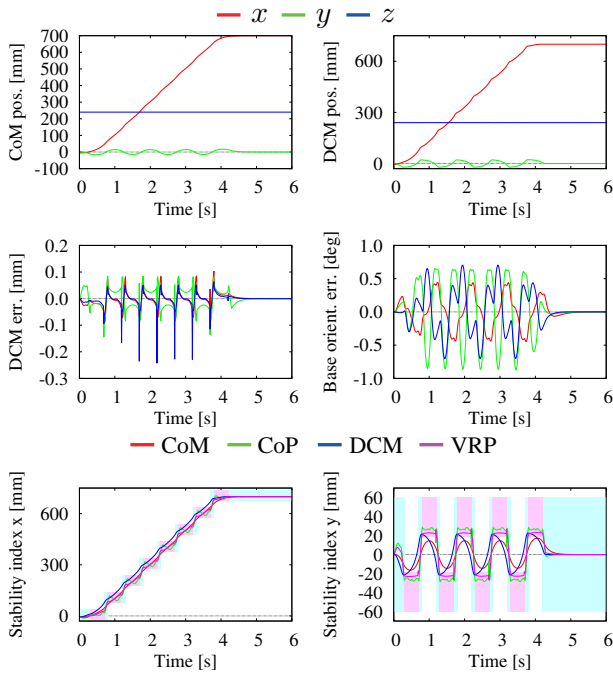


図3 平地上の歩行動作シミュレーション結果．水色およびピンクの領域はそれぞれ、両脚支持期間、片脚支持期間を表す．

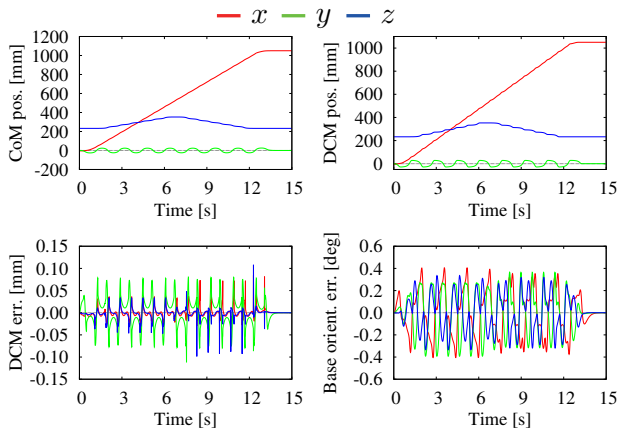


図4 階段昇降動作のシミュレーション結果．

4.1 動歩行シミュレーション

DCMの目標位置は(700, 0, 0) mm, 歩幅は100 mm, ステップ周期は0.5 s, 両脚支持期間は0.1 sとした．結果を図3に示す．図3より、重心およびDCM投影点が支持領域から出ていることから、転倒が再現できており、動歩行であることが確認できる．また、目標通りVRPが連続的に変化していることが確認できる．

4.2 階段昇降シミュレーション

DCMの目標位置は(1050, 0, 0) mm, 歩幅は70 mm, ステップ周期は0.8 s, 両脚支持期間は0.2 sとした．結果を図4に示す．図4より、DCMの高さが変化する場合でも安定した歩行動作が確認できる．

4.3 考察

片脚支持期間における遊脚の運動では、脚振り動作によって生じる重心回りの角運動量により、支持脚のモーメントが過大となる．そのため、可能な限り片脚支持期間を長く設定し、脚振り動作の時間を作る必要がある．これにより、支持脚が必要とするモーメントを小さくすることができる．また、腕部の運動制御は重心の運動量制御と関節ダンパのみであったが、制約条件を更に課すことで、タスクの追加が可能である．

5. 結言と今後の課題

本稿では、CRB角運動量およびVRP擬似逆行列を用いた制御により歩行タスクを実現した．本コントローラの利点は、非線形計算によるのみ構成される点であり、計算時間が短縮される．また、運動制御およびレンチ制御を零空間を用いて非干渉化しているため、優先度付のみで重みなどのパラメータ調整を必要としない．今後は、残りのアーム先端レンチの内力の考慮および腕部を用いたバランス制御が課題となる．また、脚先回転動作を考慮した接触レンチ分配および手先のタスクの追加が挙げられる．

参考文献

- [1] 梶田秀司, 金広文男: “分解運動量制御: 運動量と角運動量に基づくヒューマノイドロボットの全身運動生成”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.6, pp. 772–779, 2004.
- [2] D. E. Orin, A. Goswami and S.-H. Lee: “Centroidal dynamics of a humanoid robot”, *Autonomous Robots*, vol. 35, no. 2–3, pp. 161–176, 2013.
- [3] G. Wiedebach, S. Bertrand, et al.: “Walking on Partial Footholds Including Line Contacts with the Humanoid Robot Atlas”, in *16th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2016
- [4] T. Koolen, S. Bertrand, G. Thomas et al.: “Design of a momentum-based control framework and application to the humanoid robot Atlas”, *Int. J. of Humanoid Robotics*, vol. 13, 1650007, 2016.
- [5] M. Hosokawa, D. N. Nenchev, and T. Hamano: “The DCM generalized inverse: Efficient body-wrench distribution in multi-contact balance control” (to be published), *Advanced Robotics*, 2018.
- [6] S. H. Hyon, J. G. Hale, and G. Cheng: “Full-body compliant humanhumanoid interaction: balancing in the presence of unknown external forces”, *IEEE Transactions on Robotics*, 23(5):884–898, Oct 2007.
- [7] B. Henze, M. A. Roa, and C. Ott: “Passivity-based whole-body balancing for torque-controlled humanoid robots in multi-contact scenarios”, *The Int. J. of Robotics Res.*, 35(12):1522–1543, Oct 2016.
- [8] J. Engelsberger, T. Koolen et al.: “Trajectory generation for continuous leg forces during double support and heel-to-toe shift based on divergent component of motion”, *IEEE/RSJ Intell. Robots and Syst.*, 2014, pp. 4022–4029.
- [9] S. Kajita, M. Morisawa K. Miura et al.: “Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking”, in *Proc. of 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intell. Robots and Syst.*, Oct. 2010, pp. 4489–4496.
- [10] S. Nakaoka: “Choreonoid: Extensible virtual robot environment built on an integrated GUI framework”, In *IEEE/SICE Int. Symp. on Syst. Integration (SII)*, pages 79–85, dec2012.
- [11] 富士通: “小型ヒューマノイドロボット「HOAP-2」取扱説明書”, 富士通オートメーション株式会社, 07 版, 2004.