

人間の姿勢制御戦略に基づく人型ロボットの全身制御

飯塚 諒（東京都市大学），稲村 知章（東京都市大学），濱野 峻秀（東京都市大学），
中村 拓真（東京都市大学），金宮 好和（東京都市大学）

Whole-Body Control of a Humanoid Robot Based on the Ankle and Hip Postural Balance Synergies Used by Humans

Ryo IIZUKA (TCU), Chiaki INAMURA (TCU), Takahide HAMANO (TCU),
Takuma NAKAMURA (TCU), Yoshikazu KANAMIYA (TCU)

Abstract: Two whole-body controllers for implementing the ankle and hip synergies, well known from studies on human balance control, are proposed. One of the controllers is a position controller, the other one is a dynamic torque controller. It is shown how to implement the two controllers for balance control against a continuous disturbance. The controllers make use of gain scheduling for smooth transitions between the two synergies. The performance of the controllers is examined via experiments with a miniature humanoid robot HOAP-2 and dynamics simulation.

1. 緒言

人型ロボットのバランス制御において，人間が行っているバランス維持動作を人型ロボットに適用させることは有効であるといえる．ここで矢状面における人間の姿勢制御戦略には足関節戦略（ankle strategy），股関節戦略（hip strategy），ステッピング戦略（stepping strategy）の三種類が存在し，外乱の大きさに伴ってそれぞれの戦略が遷移していくと考えられている [1]．我々は足関節戦略と股関節戦略に着目し，これら二つの姿勢制御戦略を人型ロボットに適用してバランス制御を行った [2]．しかしこの研究では，2 自由度の簡易モデルを用いていたためモデル化誤差が発生し，三次元の外乱などに対応できないといった問題があった．また，運動学のみに着目したバランス制御を行っていたため，接触レンチなどの動力学的干渉を考慮していなかった．

そこで本稿では，人型ロボットの全身モデルを用いて足関節戦略および股関節戦略に基づいたバランス制御を行うことを目的とする．そしてこれを実現する二つのコントローラを提案する．一つ目は関節角度を指令値として与える位置制御コントローラであり，ゲインスケジューリング [3] を行うことで姿勢制御戦略を実現する．二つ目は関節トルクを指令値として与えるトルク制御コントローラであり，接触レンチなどの動力学的干渉を考慮して関節トルク指令値を算出する．トルク制御コントローラでは Divergent Component of Motion (DCM) [4] を用いた空間運動量の制御を行っており，接触レンチの分配に関して DCM 一般化逆行列 [5] を用いることで，繰り返し計算を行わずに人型ロボットを制御している．

この提案した二つのコントローラの効果を確認するため，まず位置制御コントローラを用いて富士通社製の小型人型

ロボット HOAP-2 [6] での実機実験を行った．その後，トルク制御コントローラに切り替えて動力学シミュレーションにより動作の確認を行った．

2. 背景

2.1 人型ロボットの運動方程式と運動学

人型ロボットの重心およびベースリンクの姿勢を制御するため，以下の運動方程式を用いる．

$$\begin{bmatrix} \mathbb{M}_C & \mathbf{H}_{CM} \\ \mathbf{H}_{CM}^T & \mathbf{M}_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_M \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{c} \\ \mathbf{c}_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{g}_C \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_c \\ \mathcal{J}_c^T \end{bmatrix} \bar{\mathcal{F}}^c \quad (1)$$

$\mathbf{v}_M = [\dot{\mathbf{r}}_C^T \ \omega_B^T]^T \in \mathbb{R}^6$ は重心速度とベースリンクの角速度を合わせた空間速度で $\mathbf{r}_C \in \mathbb{R}^3$ は重心の位置， $\omega_B \in \mathbb{R}^3$ はベースリンクの角速度を表す． $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^n$ は関節角度， n は関節自由度を表す． $\mathbb{M}_C = \text{diag}[\mathbf{M}\mathbf{E}_3 \ \mathbf{I}_C] \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は重心回りの系全体の慣性行列であり M はロボットの質量， $\mathbf{E}_{(o)}$ は単位行列である． $\mathbf{I}_C \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は人型ロボットの全関節を固定した剛体（Composite Rigid Body: CRB）[7] としての重心回りの慣性テンソルを表す． $\mathbf{H}_{CM} = [\mathbf{0}^T \ \mathbf{H}_C^T]^T \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ で $\mathbf{H}_C \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ ， $\mathbf{M}_\theta \in \mathbb{R}^{n \times n}$ は慣性行列であり， $\mathbf{c} = [\mathbf{0}^T \ \mathbf{c}_m^T]^T \in \mathbb{R}^6$ ， $\mathbf{c}_m = \dot{\mathbf{I}}_C \omega_B + \dot{\mathbf{H}}_C \boldsymbol{\theta}$ ， $\mathbf{c}_\theta \in \mathbb{R}^n$ は非線形項である． $\mathbf{g}_C = [-M\mathbf{g}^T \ \mathbf{0}^T]^T \in \mathbb{R}^6$ ， $\mathbf{g} = [0 \ 0 -g]^T$ は重力加速度， $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ は関節トルクを表す． $\mathbf{C}_c \in \mathbb{R}^{6 \times c}$ は先端部のレンチを重心にかかるレンチへ変換する行列を表す． $\mathcal{J}_c \in \mathbb{R}^{c \times n}$ は重心から先端部の拘束方向へのヤコビ行列で c は先端部の拘束方向の数を示す． $\bar{\mathcal{F}}^c \in \mathbb{R}^c$ は先端部の拘束方向にかかる力とモーメントを表す．本稿では，式 (1) 上段を空間ダイナミクスと呼ぶことにする．

ここで先端部が環境と接触し拘束されている場合、以下の順運動学関係が成り立つ [8] .

$$C_c^T \mathcal{V}_M + \mathcal{J}_c \dot{\theta} = \bar{\mathcal{V}}^c \quad (2)$$

$\bar{\mathcal{V}}^c \in \mathbb{R}^c$ は先端部の拘束方向の空間速度である．式 (2) を微分すると以下の式を得る．

$$C_c^T \dot{\mathcal{V}}_M + \mathcal{J}_c \ddot{\theta} + \dot{C}_c^T \mathcal{V}_M + \dot{\mathcal{J}}_c \dot{\theta} = \dot{\bar{\mathcal{V}}}^c \quad (3)$$

式 (3) は一般化速度を用いて以下のようにも表現できる．

$$\mathcal{J}_c \ddot{\mathbf{q}}_M + \dot{\mathcal{J}}_c \dot{\mathbf{q}}_M = \dot{\bar{\mathcal{V}}}^c \quad (4)$$

$\mathcal{J}_c = [C_c^T \ \mathcal{J}_c] \in \mathbb{R}^{c \times (6+n)}$ であり, $\dot{\mathbf{q}}_M = [\dot{\mathbf{r}}_C^T \ \omega_B^T \ \dot{\theta}^T]^T \in \mathbb{R}^{6+n}$ は本稿における一般化速度として定義する．

2.2 人型ロボットの空間運動量変化率

空間ダイナミクスから以下の関係が表せる．

$$\dot{\mathcal{L}}_C + \mathcal{G}_C = C_c \bar{\mathcal{F}}^c \quad (5)$$

$\mathcal{L}_C = [\mathbf{p}^T \ \mathbf{l}_C^T]^T \in \mathbb{R}^6$ は空間運動量, $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ は並進運動量, $\mathbf{l}_C \in \mathbb{R}^3$ は重心回りの角運動量を表す．ここで人型ロボットの空間運動量変化率は以下のように表せる．

$$\dot{\mathcal{L}}_C = \mathcal{A}_M \ddot{\mathbf{q}}_M + \dot{\mathcal{A}}_M \dot{\mathbf{q}}_M \quad (6)$$

式中, $\mathcal{A}_M = [\mathbb{M}_C \ \mathbf{H}_{CM}] \in \mathbb{R}^{6 \times (6+n)}$ である． $\dot{\mathbf{p}}$ と $\dot{\mathbf{l}}_C$ は空間ダイナミクスより以下のように表せる．

$$\dot{\mathbf{p}} = M \ddot{\mathbf{r}}_C \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{l}}_C = \mathbf{I}_C \dot{\omega}_B + \mathbf{H}_C \ddot{\theta} + \dot{\mathbf{I}}_C \omega_B + \dot{\mathbf{H}}_C \dot{\theta} \quad (8)$$

ここで CRB の角運動量変化率を $\dot{\mathbf{l}}_C$ として表すと, 式 (8) から以下で表される．

$$\dot{\mathbf{l}}_C = \mathbf{I}_C \dot{\omega}_B + \dot{\mathbf{I}}_C \omega_B \quad (9)$$

また, CRB の空間運動量変化率は以下としても表せる．

$$\dot{\mathcal{L}}_C = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}} \\ \dot{\mathbf{l}}_C \end{bmatrix} = \mathbb{M}_C \dot{\mathcal{V}}_M + \dot{\mathbb{M}}_C \mathcal{V}_M \quad (10)$$

3. 姿勢制御戦略によるバランス制御

本稿では足関節戦略と股関節戦略を組み合わせる人型ロボットに適用させ, 外乱に対してのバランス制御を実現させる．まず足関節戦略とは小さい外乱に対して, 足関節を用い, 身体を一つの剛体として動かすことでバランスを維持する戦略である [1] . これは, 人型ロボットの重心をコン

プライアンスに動かすことで実現される．その際, 人型ロボット全身を剛体とみなすため, ベースリンクの姿勢は固定させる．一方で, 股関節戦略とは大きな外乱に対して股関節の回転を生じさせ, 重心を支持領域内に保ってバランスを維持する戦略である [1] . これは足関節戦略とは異なり, 外乱が加わっても重心を初期位置に保たせ続けることで実現される．その際のベースリンクの姿勢は外乱によってコンプライアンスに変化するように設定する．

まず外乱が加わってから足関節戦略によりバランスを維持する．しかし足関節戦略中は重心を動かしながらバランスを維持するため, 圧力中心 (Center of Pressure : CoP) が支持領域の端に到達して転倒してしまう可能性がある．そこで CoP が端に到達する手前で股関節戦略に切り替えることで支持領域の中心へ滑らかに重心位置を戻す．これにより転倒を防いで, より長い時間で外乱に耐えることが可能となる．また, CoP が支持領域の端に到達した時点で脚部が回転してしまうため, 姿勢制御戦略を切り替える CoP の境界は支持領域の端よりも内側に設ける．

4. 位置制御による全身制御

HOAP-2 は角度制御のロボットであるため, 位置制御コントローラを用いて実験を行う．位置制御コントローラでは, 式 (3) から求めた関節角加速度を二回積分することで関節角度指令値を算出する．ここで関節角加速度指令値は式 (3) より以下で表される．

$$\ddot{\theta}^{ref} = \mathcal{J}_c^+ \left((\dot{\bar{\mathcal{V}}}^c)^{ref} - C_c^T \dot{\mathcal{V}}_M^{ref} - \dot{C}_c^T \mathcal{V}_M \right) + N(\mathcal{J}_c) \ddot{\theta}_D \quad (11)$$

$N(\circ)$ は零空間射影行列であり, $\ddot{\theta}_D$ は以下で表す．

$$\ddot{\theta}_D = -K_{djs} \dot{\theta} + K_{pjs} (\theta^{init} - \theta) \quad (12)$$

$\theta^{init} \in \mathbb{R}^n$ は初期の関節角度, $K_{(\circ)}$ はフィードバックゲインである．この項で初期位置へフィードバックをかけることにより冗長部の運動を抑制する．また, 脚部の拘束条件を考慮して, $(\dot{\bar{\mathcal{V}}}^c)^{ref} = \mathbf{0}$ となるように制御した．

ここで角度制御である HOAP-2 は, 外乱が加わっても指令値以外の角度には関節が動かない．よってこのコントローラでは外乱の値をセンサで取得し, 重心およびベースリンクに対する制御指令値に取得した値を含めることでコンプライアンスな制御を行う．ここで, 外乱を考慮すると式 (5) は以下で表すことができる．

$$\dot{\mathcal{L}}_C + \mathcal{G}_C = \mathcal{F}_C^{ext} + C_c \bar{\mathcal{F}}^c \quad (13)$$

$\mathcal{F}_C^{ext} \in \mathbb{R}^6$ は重心にかかる外乱である．動作速度が遅いため, $\mathcal{G}_C \approx C_c \bar{\mathcal{F}}^c$ とみなすと, 式 (10) と式 (13) から CRB

の空間加速度指令値は以下となる．

$$\dot{\mathbf{y}}_M^{ref} = \mathbb{M}_C^{-1} \mathcal{F}_C^{ext} + \begin{bmatrix} K_{v_C} e_{v_C} \\ K_{\omega_B} e_{\omega_B} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{p_C} e_{p_C} \\ K_{o_B} e_{o_B} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$e_{v_C}, e_{p_C}, e_{\omega_B}, e_{o_B} \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ重心の速度，位置，ベースリンクの角速度，姿勢の誤差である．式 (14) 右辺第一項では，センサから得た値により重心を動かすフィードフォワードの項であり，第二項，第三項は目標値に追従させるフィードバックの項である．重心位置，速度およびベースリンクの姿勢，角速度の目標値は初期値とした．

本稿では，[2] と同様にゲインスケジューリングを行うことで足関節戦略および股関節戦略を実現する．冒頭でも述べた通り，足関節戦略時では，ベースリンクの姿勢を固定させた状態で重心をコンプライアンスに動作させる．これは式 (14) における各フィードバックゲインの値を調整することで実現でき， K_{p_C} および K_{v_C} を小さくすることで重心にかかるフィードバックも弱くなり，重心が外乱に沿って移動させることができる．また K_{o_B} および K_{ω_B} を高くすることで初期姿勢に強くフィードバックされ，外乱が加わってもベースリンクの姿勢は初期値に固定される．一方で股関節戦略時には足関節戦略とは反対に， K_{o_B} および K_{ω_B} を小さくすることでベースリンクの姿勢を変化させ， K_{p_C} および K_{v_C} を大きくすることで初期位置へのフィードバックを強くかけて重心を支持領域中心に戻す．このようにゲインスケジューリングを行うことで足関節戦略および股関節戦略を実現した．ここで各フィードバックゲインは多項式補間により滑らかに変化させた．

5. 実機実験

5.1 実験条件

位置制御コントローラを用いて，HOAP-2 による足関節戦略および股関節戦略の動作の確認実験を行った．HOAP-2 の各脚は水平な床に 6 軸拘束している ($c = 12$)．外乱は HOAP-2 の左肩部分を手で押し続けて継続的に加えた．そして足関節戦略および股関節戦略でバランスを維持した後，手を離して外乱を抜いた．その際のゲインスケジューリングによる各フィードバックゲインの変化を Table 1 に示す．各フィードバックゲインの初期値は $K_{v_C} = 100$ ， $K_{p_C} = 300$ ， $K_{\omega_B} = 100$ ， $K_{o_B} = 300$ ， $K_{p_{js}} = 500$ ， $K_{d_{js}} = 300$ とし 1.0 s 間かけてフィードバックゲインを変化させた．Table 1 の右矢印は多項式補間によって滑らかにフィードバックゲインが変化していることを表している．本稿では，HOAP-2 腰部に取り付けた 6 軸力覚センサで外乱を測定し，その値を重心にかかるレンチへ変換して制御指令値として使用した．この 6 軸力覚センサにはニツタ

株式会社の Intelligent Force Sensor-50M31A [9] を使用した．また，姿勢制御戦略を切り替える CoP の境界値は支持領域の端から 10 mm 手前の位置に設定した．

5.2 実験結果

実機実験の結果を Fig. 1 に，実験の動作の流れを Fig. 2 に示す．ここで，Fig. 1 の上段はベースリンクに加わるレンチを示し，下段の左側のグラフはベースリンクの姿勢，下段右側のグラフは x 軸方向の重心および CoP の位置を示す．結果より外乱が加わり始めた 4.0 s から足関節戦略を行い，ベースリンクの姿勢を固定し重心をコンプライアンスに動作させてバランスを維持していることが分かる．また，CoP が境界に達した 5.9 s から股関節戦略に遷移し，ベースリンクの姿勢を変化させ，重心位置を初期位置に戻し転倒を回避している．そして，外乱が抜けた 10.8 s からベースリンクのフィードバックゲインを高めることで初期姿勢に戻していることが分かる．ここでゲインスケジューリングにより滑らかにゲインを変化させたことで，各戦略への遷移は滑らかに行われていることが分かる．以上より足関節戦略および股関節戦略を用いることで継続的に加わる外乱に対してバランスを維持させることができた．

6. トルク制御による全身制御

続いて，トルク制御により人型ロボット全身を制御する．トルク制御コントローラでは，DCM を用いて空間運動量を制御し，足関節戦略および股関節戦略によるバランス制御を実現する．人型ロボットを線形倒立振子とみなし，運動中の重心高さは初期の高さから変化しないとした場合の DCM の位置と速度は以下で表す．

$$\mathbf{r}_X = \mathbf{r}_C + T_X \dot{\mathbf{r}}_C \quad (15)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_X = \frac{1}{T_X} (\mathbf{r}_X - \mathbf{r}_{vrp}) \quad (16)$$

$\mathbf{r}_X \in \mathbb{R}^3$ は DCM の位置， $T_X = \sqrt{\bar{z}_{vrp}/g}$ であり， \bar{z}_{vrp} は初期の重心の高さに設定した． $\mathbf{r}_{vrp} \in \mathbb{R}^3$ は Virtual Repellent Point (VRP) で，式 (16) より以下で表せる．

$$\mathbf{r}_{vrp} = \mathbf{r}_X - T_X \dot{\mathbf{r}}_X \quad (17)$$

ここで人型ロボットの重心の運動は VRP を入力とすることで与えられ，VRP の制御指令値は以下となる．

$$\mathbf{r}_{vrp}^{ref} = \mathbf{r}_X - T_X \dot{\mathbf{r}}_X^{ref} \quad (18)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_X^{ref} = \dot{\mathbf{r}}_X^{des} + K_X \mathbf{e}_X \quad (19)$$

$\mathbf{e}_X \in \mathbb{R}^3$ は DCM の位置の誤差を表す．

Table 1: Gain scheduling in the experiment

Phase	Initial	Ankle I	Ankle II	Hip I	Hip II	Recovery	Final
Time [s]	0 ~ 4.0	4.0 ~ 5.0	5.0 ~ 5.9	5.9 ~ 6.9	6.9 ~ 10.8	10.8 ~ 11.8	11.8 ~ 15.0
K_{v_C}	100	100 $\xrightarrow{\text{spline}}$ 5	5	5 $\xrightarrow{\text{spline}}$ 100	100		
K_{p_C}	300	300 $\xrightarrow{\text{spline}}$ 20	20	20 $\xrightarrow{\text{spline}}$ 300	300		
K_{ω_B}	100			100 $\xrightarrow{\text{spline}}$ 5	5	5 $\xrightarrow{\text{spline}}$ 100	100
K_{o_B}	300			300 $\xrightarrow{\text{spline}}$ 17	17	17 $\xrightarrow{\text{spline}}$ 300	300

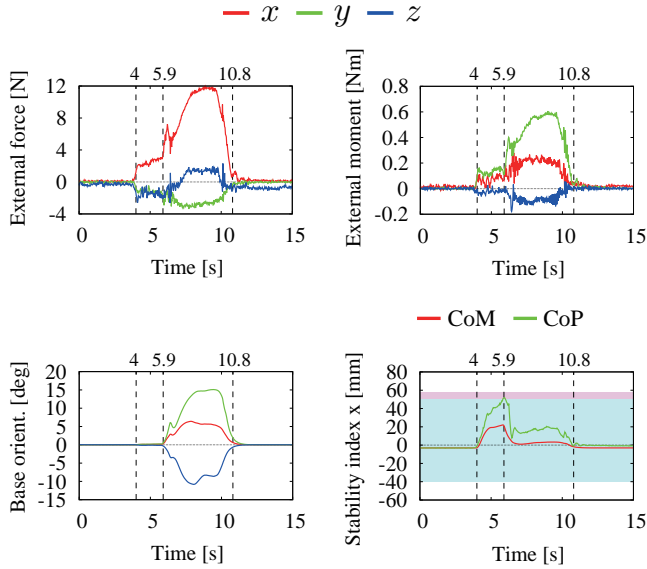


Fig. 1: Experiment results of ankle and hip strategy. The dashed line signify the sections of ankle and hip strategy. The blue/pink areas signify the base of support and border to switch strategies.

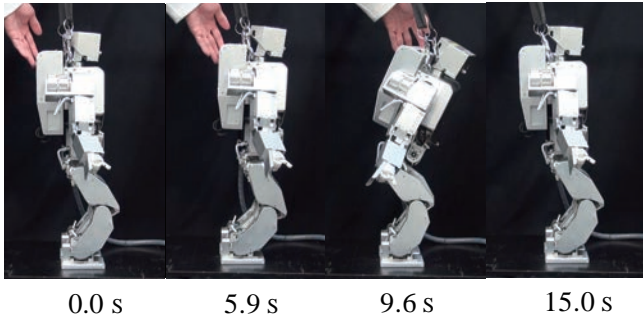


Fig. 2: Snapshots of the experiment.

6.1 足関節戦略時の DCM 制御

トルク制御においては、関節トルクを指令値として人型ロボットに入力するため、発生した外乱の分だけ各関節角度の誤差が発生する。つまり、式 (14) のように制御式中で外乱を考慮しなくても誤差として重心は移動する。よって足関節戦略中における DCM の速度指令値は

$\mathbf{r}_X^{des}(t) = \mathbf{r}_C(t)$ と置くことで以下のように与える。

$$\dot{\mathbf{r}}_X^{ref}(t) = (1 - T_X K_X) \dot{\mathbf{r}}_C(t) \quad (20)$$

式 (20) のように DCM を制御することで重心のフィードバックゲインを変更することなく、重心のアドミタンス制御を行うことが可能となる。

6.2 股関節戦略時の DCM 制御

股関節戦略に切り替わった瞬間の時刻を T_{hip} とすると、 $t = T_{hip}$ での DCM の位置 $\mathbf{r}_X(T_{hip})$ から重心の初期位置 $\mathbf{r}_C(0)$ までを多項式補間で滑らかに軌道を生成し、重心を初期位置に戻すことで股関節戦略を実現させる。この多項式補間で生成した DCM の軌道を \mathbf{r}_X^s とすると、股関節戦略間での DCM の制御指令値は以下のように与える。

$$\mathbf{r}_X^{des}(t) = \mathbf{r}_C(t) + \left(1 - e^{-\frac{(t-T_{hip})}{T_X}}\right) (\mathbf{r}_X^s(t) - \mathbf{r}_C(t)) \quad (21)$$

6.3 CRB の空間運動量制御

式 (7) から表される並進運動量変化率は VRP を用いて表すと以下ようになる。

$$\dot{\mathbf{p}} = \frac{M}{T_X^2} (\mathbf{r}_C - \mathbf{r}_{vrp}) \quad (22)$$

式 (9) と式 (22) より CRB における空間運動量変化率の制御指令値は以下となる。

$$\dot{\mathcal{L}}_C^{ref} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}^{ref} \\ \dot{\mathbf{l}}_C^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{M}{T_X^2} (\mathbf{r}_C - \mathbf{r}_{vrp}^{ref}) \\ \mathbf{I}_C \dot{\boldsymbol{\omega}}_B^{ref} + \dot{\mathbf{I}}_C \boldsymbol{\omega}_B \end{bmatrix} \quad (23)$$

6.4 運動制御

各タスクの優先度に基づいた階層型制御により人型ロボット全身の運動を制御する。ここで、一般化加速度指令値は以下のように表せる。

$$\ddot{\mathbf{q}}_M^{ref} = \ddot{\mathbf{q}}_1^{ref} + \ddot{\mathbf{q}}_2^{ref} \quad (24)$$

また式 (4) より，各タスクは以下とする．

$$\ddot{q}_1^{ref} = \bar{\mathcal{A}}^+ \left(\bar{\mathcal{L}}^{ref} - \dot{\bar{\mathcal{A}}} \dot{q}_M \right) \quad (25)$$

$$\ddot{q}_2^{ref} = N(\bar{\mathcal{A}}) \ddot{q}_D \quad (26)$$

式中， $\bar{\mathcal{A}} = [\mathcal{A}_M^T \ J_c^T]^T$ ， $\bar{\mathcal{L}}^{ref} = [(\dot{p}^{ref})^T \ (\dot{l}_c^{ref})^T \ 0^T]^T$ である．本稿では，非拘束方向への先端部の運動は行わないものとするため，一般化加速度指令値は第一タスクである空間運動量変化率に基づくバランス制御を行う項 \ddot{q}_1^{ref} と第二タスクである冗長部の運動の抑制を行う項 \ddot{q}_2^{ref} から構成される．ここで第二タスクは第一タスクの零空間射影行列を用いることで非干渉化している．また $\ddot{q}_D = [0^T \ \ddot{\theta}_D^T]^T$ と置くことで冗長部の運動を抑制する．

6.5 接触レンチおよび関節トルク制御

空間ダイナミクスおよび式 (23) より接触レンチ指令値は DCM 一般化逆行列を用いて以下で求められる．

$$(\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} = C_c^{-W_X} (\dot{\bar{\mathcal{L}}}_c^{ref} + \mathcal{G}_C) + N(C_c) \bar{\mathcal{F}}_a^c \quad (27)$$

$C_c^{-W_X} = W_X^{-1} C_c^T (C_c W_X^{-1} C_c^T)^{-1}$ であり， $W_X \in \mathbb{R}^{c \times c}$ は DCM 一般化逆行列の重み行列を表す．第二項は C_c に対する内力を表し，本稿では $\bar{\mathcal{F}}_a^c = 0$ とする．

関節トルクは式 (1) 下段より算出される．これまで計算された一般化加速度指令値 \ddot{q}_M^{ref} および先端部レンチ指令値 $(\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref}$ より関節トルクは以下となる．

$$\tau = \mathcal{A}_\theta \ddot{q}_M^{ref} + c_\theta + g_\theta - \mathcal{J}_{cB}^T (\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} \quad (28)$$

$\mathcal{A}_\theta = [H_{CM}^T \ M_\theta] \in \mathbb{R}^{6 \times (6+n)}$ である．ここで，式中に以下の関係が成り立つ．

$$\mathcal{J}_c^T (\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} = -g_\theta + \mathcal{J}_{cB}^T (\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} \quad (29)$$

$\mathcal{J}_{cB} \in \mathbb{R}^{c \times n}$ はベースリンクから先端部の拘束方向へのヤ

コビ行列， $g_\theta \in \mathbb{R}^n$ は関節空間における重力項である．式 (29) で重力項 g_θ を分解することで接触レンチ制御と非干渉化することが可能となる．

7. シミュレーション

7.1 シミュレーション条件

トルク制御コントローラを用いて，足関節戦略および股関節戦略による人型ロボットのバランス制御をシミュレーションにて確認した．シミュレーションソフトには Choreonoid [10] を使用し，制御対象のモデルには HOAP-2 のパラメータに基づいた Fig. 3 に示す各脚部 6 自由度，各腕部 4 自由度のスケルトンモデルを使用した．初期姿勢は Fig. 3 とし，水平な床に各脚を 6 軸拘束している ($c = 12$)．外乱は 2.0 s から 1.0 s 間で 0 N から 5 N まで滑らかに加えていき，3.0 s から 8.0 s 間で 5 N とえ続け，11.0 s から 1.0 s 間で 5 N から 0 N になるように滑らかに力を抜いていった．ここで外乱はベースリンクに対して y 軸方向に 50 mm， z 軸方向に 140 mm の位置に x 軸方向にのみ与えた．シミュレーションでのフィードバックゲインの変化を Table 2 に示す．Table 2 の右矢印は多項式補間によって滑らかにフィードバックゲインが変化していることを表し，本稿では 1.0 s 間かけてフィードバックゲインを変化させた．ここで，初期の各フィードバックゲインは $K_X = 100$ ， $K_{\omega_B} = 100$ ， $K_{o_B} = 300$ ， $K_{p_{js}} = 500$ ， $K_{d_{js}} = 300$ とした．また，戦略を遷移させる CoP の境界値は実機実験と同様に支持領域端から内側に 10 mm の位置に設定し，その境界を CoP が超えてから足関節戦略から股関節戦略に切り替えた．

7.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を Fig. 4 に，シミュレーションの流れを Fig. 5 に示す．結果より，2.0 s に外乱が加わり始めてから足関節戦略でバランスを維持していることが分かる．その際，ベースリンクの姿勢は変化させず固定している．その後，CoP が設定した境界に到達した 6.1 s から股関節戦略に遷移し，ベースリンクの姿勢を変化させ重心を初期位置に戻していることが分かる．ここで実機実験の結果と同様に，足関節戦略から股関節戦略への切り替えは滑らかに行われており，外乱によって移動した重心を初期位置に戻すことで CoP も支持領域の内側に戻り，継続的な外乱に対してバランスを維持できていることが分かる．また外乱が抜けた 12.0 s からベースリンクの姿勢のフィードバックゲインを再度高めることで初期姿勢へと滑らかに戻っていることが確認できる．

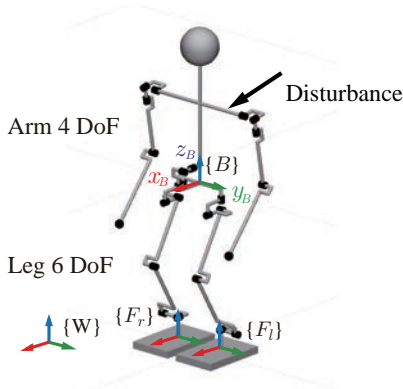


Fig. 3: The skeleton model used in the simulation. This configuration is used as the initial configuration. The disturbance is applied as shown.

Table 2: Gain scheduling in the simulation

Phase	Initial	Ankle	Hip I	Hip II	Recovery	Final
Time [s]	0.0 ~ 2.0	2.0 ~ 6.1	6.1 ~ 7.1	7.1 ~ 12.0	12.0 ~ 13.0	13.0 ~ 15.0
K_{oB}	300		300 $\xrightarrow{\text{spline}}$ 0		0 $\xrightarrow{\text{spline}}$ 300	300

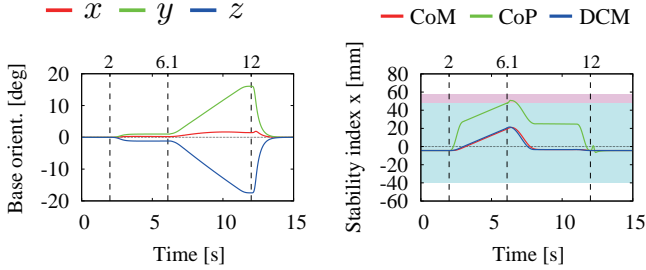


Fig. 4: Simulation results of ankle and hip strategy.

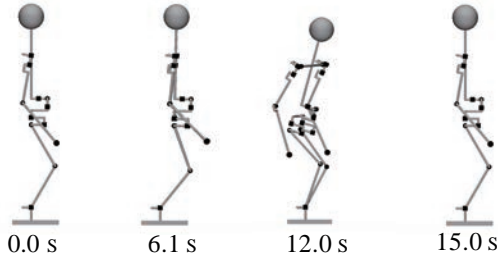


Fig. 5: Snapshots of the simulation.

8. 結言

本稿では、人型ロボットの全身モデルを用いた足関節戦略および股関節戦略に基づくバランス制御を実現するために、位置制御コントローラとトルク制御コントローラの二つを提案した。位置制御コントローラでは重心とベースリンクの各フィードバックゲインに対してゲインスケジューリングを行うことで足関節戦略および股関節戦略を行い、HOAP-2 による実機実験でこの動作を確認した。トルク制御コントローラでは DCM を用いた空間運動量の制御とベースリンクに対するゲインスケジューリングを行うことでバランス維持動作を行い、動力学シミュレーションによりその動作を確認した。その結果、両コントローラとも姿勢制御戦略を切り替えることで継続的な外乱に対してもバランスを維持することができた。

しかし、両コントローラの問題点として各戦略の切り替えを判断する CoP の境界値を経験的に設定していることが挙げられる。本制御ではゲインスケジューリングおよび式 (21) で滑らかに指令値を変化させているため、股関節戦略に切り替えた直後に CoP が境界を超えてしまう。この CoP の挙動は外乱の大きさによって変化し、本コントローラでは制御することができないため、適切な境界の設定方法は定まっていない。また、股関節戦略では転倒して

しまう大きな外乱が加わった場合はステッピング戦略を行う必要がある。以上より、今後の課題として戦略を切り替える CoP の境界値の設定方法の検討およびステッピング戦略の実装が挙げられる。

参考文献

- [1] 飯島賢一，関根正樹，田村俊世，“漸近する水平外乱刺激に対する姿勢応答”，生体医工学，第 47 巻第 1 号，pp.70–76，2009.
- [2] D. N. Nenchev, S. Ota, D. Sato. “Ankle and hip balance control strategies with transitions.” In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3446–3451, 2010.
- [3] 内田健康，“ゲインスケジューリング”，計測と制御，第 34 巻第 3 号，pp.182–187，1995.
- [4] J. Engelsberger, C. Ott, *et. al.* “Three-dimensional bipedal walking control using Divergent Component of Motion.” In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.2600–2607, 2013.
- [5] M. Hosokawa, D. N. Nenchev, T. Hamano. “The DCM generalized inverse: Efficient body-wrench distribution in multi-contact balance control.” *Advanced Robotics*, Vol. 32, pp.778–792, 2018.
- [6] 富士通：“小型ヒューマノイドロボット「HOAP-2」取り扱い説明書”，富士通オートメーション株式会社，07 版，2004.
- [7] M. W. Walker, D. E. Orin, “Efficient dynamic computer simulation of robotic mechanisms.” *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol 104, pp.205–211, 1982
- [8] D. N. Nenchev. “Differential Kinematics.” In Ambarish Goswami and Prahlad Vadakkepat, editors, *Humanoid Robotics: A Reference*, pp.1–47. Springer Netherlands, Dordrecht, 2018
- [9] ニッタ株式会社：“Intelligent Force Sensor 回路内蔵センサ本体取り扱い説明書”，ニッタ株式会社，2007.
- [10] S. Nakaoka. “Choreonoid: Extensible virtual robot environment built on an integrated GUI framework.” In *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp.79–85, 2012.