ヒューマノイドのバランス制御における Hip Strategy と Ankle Strategy の最適レギュレータによる統合

玄 相 昊*

Integration of Hip Strategy and Ankle Strategy by Optimal Regulator on Humanoid Balance Control

Sang-Ho Hyon*

This paper proposes an integration of two balancing controllers; so called, Hip Strategy and Ankle Strategy for humanoid model. The former achieves the balance equilibrium utilizing the reaction moment from the high-speed upper body motion. The latter also achieves the balancing, but does so in the way that won't interrupt the hip strategy. The controller integration is done by computing the optimal inputs; the horizontal ground reaction force and ankle torque, by linear quadratic regulator, then transformed to the joint torques. We also utilize a special structure of the system having the relative degree of three, first found by Stojic, to stabilize the upright posture. Simulation results shows that the humanoid model robustly achieves dynamic upright balance from the initial posture far from static equilibria, while simultaneously avoiding the negative vertical ground reaction force that often happens with Hip Strategy alone.

Key Words: Posture Control, Under-actuated, Angular Momentum, LQR, Push-recovery

1. はじめに

姿勢制御は直立2足歩行を行うヒトにとって基本的な運動能力の一つである。姿勢の制御なしでは日常の作業はいうに及ばず、歩くことさえできない。研究は神経生理学者や臨床医学者を中心に活発に行われており、様々な仮説と生理学的実験による検証がなされてきた。姿勢制御は比較的高次の神経中枢が司ると言われている[1]。例えば生理学の分野では、外乱に対する反射が Ankle Strategy あるいは Hip Strategy であるとか、姿勢制御が脊髄以下の低レベルで反射的になされているのか、あるいは高次中枢からの直接的な運動指令からなされているのかといった議論がある[2][3]。

筆者らはロボット工学あるいは制御工学に根ざした数理モデルに基づいて、ヒトの姿勢制御の目的的なメカニズムを探り、最終的にはそれをアルゴリズムとしてヒューマノイドロボットに実装したいと考えている。文献[4]では両制御の簡単な統合方法を提案し、SARCOS社のトルク制御型ヒューマノイドロボットにおける動的なバランス制御に成功している。そこで利用した制御の一つは静力学関係に基づく簡単な動的全身バランス制御であり、広範囲に利用できる(第3章参照)。もう一つは足平がない劣駆動の場合にも利用できる、入出力線形化[5]による動的バランス制御である(第4章参照)。前者はモデリング・

計算コストは安い、安定領域が限られる。これに対して後者は、腕や胴体を大きく回転させることで強い外乱からの回復が図れる半面、正確なモデルと計算(特に速度依存項)が必要になる。また、大きな反動力は接触の制約(鉛直床反力が正であることなど)を容易に破ってしまう。

両制御の統合をロボットを用いて議論した過去の文献として、Stephensらの研究[6]が挙げられる。これはロボット全体を倒立振子に線形近似し、それを足首トルクでPD制御したうえで(AnkleStrategy)、逆動力学を用いた水平重心レギュレータを足したものである。筆者らの方法[4]はこれとは逆で、劣駆動バランス制御(逆動力学を用いなければ達成できない)を腰関節のトルクだけに担当させて(Hip Strategy)、足首を含む全身の重心レギュレータのトルクを足し合わせている。いずれの方法も足平が浮かないよう、足首トルクの制約はかけている。独立に設計された二つの制御が競合しない限り、バランスは達成されるものと思われるが、その議論はなされていない(本論文の付録参照)。

一方、Hip Strategyに関連して、上半身の回転を利用したバランス制御については、特にPrattらはフライホイール付きの倒立振子モデル(Linear Inverted Pendulum Plus Flywheel Model; LIPFM)を用いた分かりやすい議論を行っている[7]。ここではフライホイールのトルク上限を考慮したバンバン制御が示されている。また、Whitmanらや植村らは重心高さが一定、下半身の慣性が無視できると仮定した場合に角運動量が単純化することを利用して、胴体姿勢の上限値に基づいたバランス制御則や吸引領域の議論を行っている[8][9]。

これらの低次元モデルではなく、一般的なヒューマノイドモデルにおいて重心周りの角運動量を制御量として扱った研究は

原稿受付 2019年2月18日

*立命館大学

*Department of Science and Engineering, Ritsumeikan University

■ 本論文は有用性(要素分野)で評価されました。

■ J-STAGEでは本論文の電子付録として動画が閲覧できます。

■ 本論文は第24回ロボティクスシンポジアの同時投稿オプションで投稿されました。

いくつかあげられる [10] [11], 重心周りの角運動量を床反力中心点操作のための追加入力として利用するアイデアも提案されている [12]. 最近では, 計算機パワーを活かして, CG アニメーション分野で多用されている最適化計算法を用いて, いくつかの制御量とその制約条件を与えて, ロボットの全身モデルから関節指令値を一度に求める方法も多く見られるようになった. モデルが正しければシミュレーションから実機にそのまま適用できる点は良いが, 各パラメータの設定において直感的あるいは力学的な見通しを立てるうえでも, 低次元モデルを用いた解析は有効である.

本論文では, Ankle Strategy と Hip Strategy の各効果を明確に示す形で新たな最適統合方法を提案する. 具体的には, 重心と角運動量を状態変数としたダイナミクスの線形構造を利用し, その最適レギュレータ (線形 2 次レギュレータ; LQR) によって目標床反力と足首トルクを求め, それを腰関節トルクに変換する. さらに本稿では, 角運動量の積分を状態変数に含めた, 任意平衡姿勢への安定化の方法も示す. 厳密モデルによる結果であり, 平衡点まわりの線形近似や, 特定の変数を一定とみなす等の近似は用いていない. 以下, モデルと制御方法について説明し, シミュレーションを通じて効果を議論する.

2. ヒューマノイドの簡易モデル

足平を持ち, 胴体と脚部から構成される Fig. 1 のような平面モデルを考える. 同図 (a) は 2 関節モデル (大腿と下腿が一体化), (b) は 3 関節モデル (膝関節あり) である. 後者は膝関節を固定すれば 2 関節モデルに縮退するので, 本稿では以下, 2 関節モデルを主に扱う (3 関節モデルへの適用は最後に示す). これらは足が地面に恒久的に結合されているモデルで, 足平の実体はないが, 鉛直床反力が負になったり, 床反力中心点 (Center of Pressure; CoP) が支持領域の淵に位置したりしない限り, 足平は浮き上がらない. また, 踵が浮いてつま先立ちになったとしても, 制御方法は変更しないものとする. その場合の挙動への影響については, 足平を有するモデルや実際のヒューマノイドロボットを用いた検証が必要であるが, 文献 [4] においては一例が示されている. また, 足平接地からつま先に移行し, つま先を支点としたバランス制御 (つま先トルク零) の結果も同文献に示されているので参照されたい. 足平接地とつま先接地の遷移まで含む動作の制御については, 別報で議論したい.

以下の数値シミュレーションでは足平を含めて身長 1.5 [m] の

Fig. 1 Simplified humanoid model
(a) Two-joint model, (b) Three-joint model

体重 60 [kg] のロボットを想定している. 第 1 リンクである脚部の質量は $m_1 = 20$ [kg], 長さは $L_1 = 0.8$ [m], 第 2 リンクである胴体部の質量は $m_2 = 40$ [g], 長さは $L_2 = 0.6$ [m] である. 各リンクの重心はリンクの中心に位置し ($a_j = L_j/2$ ($j = 1, 2$)), その慣性モーメントは均質な棒のそれ $m_j L_j^2/12$ ($j = 1, 2$) で与えている. 足平の長さは足首から前に 0.12 [m], 後方に 0.06 [m] である.

ロボットの関節角 q_1, q_2 と関節トルク τ_1, τ_2 を図のように定義し, 一般化座標を $q = [q_1, q_2]^T \in \mathbb{R}^2$, 一般化入力を $\tau = [\tau_1, \tau_2]^T \in \mathbb{R}^2$ とおくと, 次のような運動方程式が得られる.

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{12} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_1(q, \dot{q}) \\ H_2(q, \dot{q}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで慣性行列の各要素は

$$M_{11} = \alpha_1 + \beta_1 \cos q_2 \quad (2)$$

$$M_{12} = \alpha_2 + \beta_2 \cos q_2 \quad (3)$$

$$M_{22} = \alpha_2 \quad (4)$$

であり, コリオリ, 遠心, 重力項は

$$H_1 = -\beta_1 \dot{q}_1 \dot{q}_2 \sin q_2 + \beta_2 \dot{q}_2^2 - k_1 \sin q_1 - k_2 \sin(q_1 + q_2) \quad (5)$$

$$H_2 = \frac{1}{2} \beta_1 \sin q_2 \dot{q}_1^2 - k_2 \sin(q_1 + q_2) \quad (6)$$

である ($\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, k_1, k_2$ は定数).

重心位置を $r_C = [x_C, z_C]^T \in \mathbb{R}^2$ と置くと,

$$m \ddot{x}_C = F_x \quad (7)$$

$$m \ddot{z}_C = F_z + mg \quad (8)$$

が成り立つ. ここで m はロボットの総重量, g は重力加速度, F_x, F_z はそれぞれ X 方向と Z 方向の床反力 (Ground Reaction Force; GRF) である.

3. 基本となる全身バランス制御

目標とする CoP から重心までのヤコビ行列を $J_P = [J_x \ J_z]^T \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ と置く (このヤコビ行列は重心ヤコビアンとよばれる [13]). 任意に与えた目標床反力 $\bar{F} = [\bar{F}_x, \bar{F}_z]^T \in \mathbb{R}^2$ に対して, 関節トルクを

$$\tau = J_P^T \bar{F} - D \dot{q} \quad (9)$$

で与えると, CoP が支持領域 (Support Region; SR と略) 内部にある場合に限って, 足平を浮かせずに

$$F \rightarrow \bar{F} \quad (t \rightarrow \infty) \quad (10)$$

を達成することができる. ここで $D \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ は適当な減衰係数である.

したがって, 例えば目標重心位置 $\bar{x}_C$ に対する重力補償付き PD 制御則

$$\bar{F}_x = -K_{xp}(x_C - \bar{x}_C) - K_{xd}\dot{x}_C \quad (11)$$

$$\bar{F}_z = -K_{zp}(z_C - \bar{z}_C) - K_{zd}\dot{z}_C - mg \quad (12)$$

(ここで K_{xp} 等は PD ゲイン) によってロボットのバランス制御を達成することができる。筆者らの過去の文献 [4] ではこの方法を Static Balancer とよんでいるが、これは床反力と関節トルクの静力学的な関係を基本構造とすることに由来する。適用する運動は動的なものである。また、全身のトルクを指令するので、これは Ankle Strategy でもない。

この制御則は足首トルク τ_1 が制御入力として使える場合に限って有効であるが、足平が浮かないように足首トルクを制約する必要がある。具体的には、ゼロモーメントポイント (Zero Moment Point; ZMP) はその定義から、

$$x_{ZMP} = x_C - \frac{z_C F_x + \dot{P}_C}{F_z} \quad (13)$$

(ここで P_C は重心周りの角運動量) と計算でき [14]、同様に CoP は

$$x_{CoP} = -\frac{\tau_1}{F_z} \quad (14)$$

と計算できるので、目標 CoP や ZMP が SR を出るかどう事前に監視し、SR から出る場合には SR 内の最近傍点に再設定し、式 (13) や式 (14) を逆に解いて、目標床反力 $\bar{F}_x$ 、 $\bar{F}_z$ や足首トルク τ_1 を制約すればよい。

重心投影点の目標位置を足平中心 ($\bar{x}_C = 0.03$ [m]) とし、初期姿勢を $q_1 = 5$ [deg], $q_2 = 0$ [deg], 初期速度を零と置いた場合の、重心レギュレータの初期値応答シミュレーション結果を Fig. 2 に示す。上から関節姿勢、関節トルク、重心水平位置、角運動量 (ここで P_0 は第 4.2 節で示す支点周りの角運動量)、床反力の時間変化を示している。ここで式 (11) の X 方向の PD ゲインは $K_{xp} = K_{xd} = 10,000$ とした。Z 方向については重力補償のみとした。姿勢をほとんど変化させず、後方にスウェイする挙動である。式 (13) から計算した実 ZMP は足平から出ていないことも分かる。この方法をトルク制御型の三次

Fig. 2 A conservative balancing control (Static Balancer). Actually, the humanoid model can control the CoM acceleration as long as CoP lies within the support region (indicated as dotted lines)

元ヒューマノイドロボットに適用する方法と実機実験については文献 [15] を参照されたい。

この方法は SR の制約はあるが、実装は極めてシンプルである。付録で示すような切替則や滑らかな遷移則をヒューリスティックに導入することにより、劣駆動バランスと併用させる方法も考えられる。

4. 劣駆動バランス制御: Hip Strategy

足平の面積が極端に小さい場合、もしくは足首トルクが利用できない場合は足首で踏ん張ることができない。その場合は上体の反動力を使って重心を引き戻すことが有効と考えられる。その制御則をここでは「劣駆動バランス」とよぶ。つま先でバランスする制御もこれに含まれる。上体は主に腰関節によって駆動されるため、これは Hip Strategy とよばれている。一方、支点が非駆動の 2 重倒立振子モデルは Acrobot とよばれ [16]、90 年代に精力的に研究されてきた [17] [19]~[22]。

4.1 重心並進位置のレギュレータ

まず、足首トルク τ_1 を任意の値 $\bar{\tau}_1$ ($\bar{\tau}_1 = 0$ も含む) にセットすると、加速度は式 (1) の第 1 行との整合をとるため、

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \end{bmatrix} \ddot{q} = \bar{\tau}_1 - H_1 \quad (15)$$

を満たす必要がある。本式を満たす角加速度を式 (1) の第 2 式に代入することによって、腰トルク τ_2 が求まる。しかし上式を満たす角加速度は唯一には定まらない。そこで、角加速度の候補として、バランスを達成するための角加速度を考える。

重心の安定化 $x_C \rightarrow 0, \dot{x}_C \rightarrow 0$ を達成するために式 (11) と同じ PD 制御を施す。すると、閉ループ系は

$$m\ddot{x}_C = \bar{F}_x = -K_{xd}\dot{x}_C - K_{xp}x_C \quad (16)$$

を満たす。このとき角加速度は、重心の 2 階時間微分が

$$\ddot{x}_C = J_x \ddot{q} + \dot{J}_x \dot{q} \quad (17)$$

であるので、

$$\begin{aligned} J_x \ddot{q} &= \ddot{x}_C - \dot{J}_x \dot{q} \\ &= \frac{\bar{F}_x}{m} - \dot{J}_x \dot{q} =: \xi \end{aligned} \quad (18)$$

を満たす必要がある。

以上、式 (15) と式 (18) を合わせて、目標加速度は

$$\ddot{q} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ & J_x \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{\tau}_1 - H_1 \\ \xi \end{bmatrix} \quad (19)$$

と唯一に定まる (右辺の逆行列が存在する範囲で)。そして、最終的に求める腰関節トルクは式 (1) の第 2 式から、

$$\tau_2 = \begin{bmatrix} M_{12} & M_{22} \end{bmatrix} \ddot{q} + H_2 \quad (20)$$

となる。なお、同じ $\ddot{q}$ を式 (1) の第 1 式に代入すると $\tau_1 = \bar{\tau}_1$ となることも確認できる。なお、3 関節モデルでは、例えば z_C についても同様に目標ダイナミクスを仮定して逆動力学を解けば、トルクは一意に計算できる。制御量の数が入力の数よりも少ない場合は、最小二乗規範など各種の冗長性解法によって目標加速度を求めることもできる (文献 [11] 参照)。以上の逆動力学演算は次節以降も利用する。

第 3 章と同じ条件でシミュレーションを行った結果を Fig. 3

Fig. 3 Simulation result of the under-actuated balancing controller (Hip Strategy). The ankle torque is zero. Although the CoM states are converging to zero, the angular momentum are not. As a result, the robot is continuously rotating. The stick diagram shows the animation with the interval of 0.1 [s]

に示す。重心はレギュレートされているが、関節の運動は止まらずに回転を続けている。グラフには式 (13) から計算した ZMP も示してある。これは SR から大きく外に出ているが、足首トルクは零なので、式 (14) から計算した CoP は零である。しかし、鉛直床反力 F_z が負になっており、地上に固定されていないヒューマノイドモデルではこの結果は許容できない。負になる原因はバランスのためのフィードバックゲインが高すぎるため、上体の下方へのスイングによる反動で下体が上方に引き上げられるからである。しかし、ゲインを小さくすると、発散したり重心の振動が生じたりするので、許容できる初期外乱には限界がある。広い可動範囲が許容されるが腕を備えたモデルであれば、反動力を相殺することはたやすい。

4.2 角運動量の安定化：内部運動の抑制

運動方程式 (1) の第 1 行

$$M_{11}\ddot{q}_1 + M_{12}\ddot{q}_2 + H_1 = \tau_1 \quad (21)$$

は支点周りの角運動量 P_0

$$P_0 = M_{11}\dot{q}_1 + M_{12}\dot{q}_2 \quad (22)$$

の時間変化を示すダイナミクス

$$\dot{P}_0 = \tau_1 + x_C mg \quad (23)$$

と等価である。支点周りの角運動量は重心周りの角運動量 P_C と次の関係を持つ。

$$P_0 = P_C + r_C \times m\dot{r}_C = P_C + m(z_C\dot{x}_C - x_C\dot{z}_C) \quad (24)$$

この式から、重心の水平位置が漸近安定、つまり、 $(x_C, \dot{x}_C) \rightarrow 0$ であっても、 $P_C \neq 0$ のときは $P_0 \neq 0$ であることが分かる。第 4.1 節のシミュレーション結果がそれを示している。これは「内部運動」とよばれる冗長機械系特有の運動である。

したがって、 P_C を零に収束させればよいのであるが、腰トルクはすでに水平位置制御に使われている。そこで、式 (23) の関係式を利用して、前節の PD 制御の代わりに、次の PID 制御を導入すれば P_0 を零に収束させることができる [4]。

$$\begin{aligned} \bar{F}_x = & -K_{xd}\dot{x}_C - K_{xp}x_C \\ & -K_{xi} \int (\tau_1 + mgx_C) dt \end{aligned} \quad (25)$$

ここで K_{xi} は積分ゲインである。本式の PID ゲインを線形最適二次レギュレータ (LQR) によって求めればよい。腰トルクは式 (18)~(20) から求まる。このシミュレーション結果は省略する。4 リンクモデルのつま先立ちバランスのシミュレーション例も含め、文献 [4] を参照されたい。ここでは、角運動量 P_0 そのものをモデル式 (22) から計算することなく、足首トルクと重心位置の数値積分を利用している点に注意されたい。

5. 提案手法：Hip Strategy と Ankle Strategy の LQR による統合

劣駆動バランスでは、腰トルクだけを使って安定化が達成されるが、実際のヒューマノイドロボットには足首が利用できる。それをどのように統合するのが本論文の主題である。足平の大きさは限られているため、特に重要な関心事は、どれだけの大きさのトルクが必要なのかである。本章では LQR を用いた統合方法を示す。

5.1 提案手法 1

以下、式 (14) に基づく制約条件つきで足首トルクを導入する。また、足首トルクが利用できれば、第 3 章で示したように、重心の目標位置を足平の任意の位置 $\bar{x}_C$ (例えば中心) に収束させることができるので、同時にその問題を考える。これは Ankle Strategy に相当すると考えられる。

式 (23) によれば、足首トルクによっても角運動量を制御できる。足首トルク制御によって支点周りの角運動量を直接制御した最初の例は佐野ら [23] である。前章の結果を踏まえると、重心、重心速度、角運動量の三つの状態のうち、角運動量だけは二つの入力によって制御できるという構造を持っている。

状態を $x = [P_0 \ x_C - \bar{x}_C \ \dot{x}_C]^T \in \mathbb{R}^3$ 、入力を $u = [u_1, \ u_2]^T = [\tau_1 + mg\bar{x}_C, \ \bar{F}_x]^T \in \mathbb{R}^2$ と置くと、式 (7) と式 (23) から、次のような 2 入力系を得る。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x &= Ax + Bu \\ &= \begin{bmatrix} 0 & mg & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} \end{bmatrix} u \end{aligned} \quad (26)$$

そこで、状態と入力に関する二次評価関数を設定して LQR 問題を解く。そして、得られた解のうち、 u_1 から $\tau_1 = u_1 - mg\bar{x}_C$

Fig. 4 Simulation result of the proposed balancing method 1. Even if the system is smoothly stabilized, the joint posture does not convergent to the upright equilibrium

を計算し、それを式 (20) に代入すれば τ_2 が求まる。また、CoP が SR から出ないよう、式 (14) を用いてトルクを制約する。

ただし、本式の F_x には達成しようとする目標値 $\bar{F}_x$ を代入すればよいが、 F_z については制御していないので、それが実際にどのような値になるのかは制御前では不明である。そこで F_z に下限を設定し、凸最適化問題として定式化することが考えられる [8]。本論文では、より簡便な方法として、 $F_z = mg$ を代入するものとする。この選び方には任意性があるが（より保守的に選ぶことも可能である）、実際にこの値に収束することは保証されない。そこで、遅れを許容して、1 制御ループ前の実際の F_z をセンサで測定して利用する方法も考えられる。なお、 $\tau_1 = 0$ 、 $\bar{x}_C = 0$ とおけば、この制御則は前章の式 (25) で $\tau_1 = 0$ と置いたものと等価である。

Fig. 4 にシミュレーション結果を示す。ここで、LQR の状態に対する重みは $Q = \text{diag}([10, 100, 100])$ 、入力重みは $R = \text{diag}([1, 1])$ に設定してある。グラフの最下段のグラフを見ると F_z は最初の 1 秒間、想定した値 mg から変動しているが、第 4.1 節の劣駆動バランスの場合と比べて顕著な改善がみられる。しかし、上体が真下を向いた平衡点 ($x_C = 0$, $q_2 = \pi$) に収束してしまっている。

5.2 提案手法 2：重心角の同時制御

足首も活用しつつ、同時に直立姿勢安定化を達成する方法を述べる。式 (22) から、次の物理量を定義する。

Fig. 5 The “CoM angle” for two-link humanoid model Fig. 1 (a)

$$\dot{\sigma} := \frac{P_0}{M_{11}} = \dot{q}_1 + \frac{M_{12}}{M_{11}} \dot{q}_2 \quad (27)$$

これは完全微分形式になっており、その積分は

$$\sigma = q_1 + w(q_2) - \sigma_r \quad (28a)$$

$$w(q_2) = \frac{2(\beta_1 \alpha_2 - \beta_2 \alpha_1)}{\beta_1 \sqrt{\beta_1^2 - \alpha_1^2}} \arctan \left(\frac{\beta_1 - \alpha_1}{\sqrt{\beta_1^2 - \alpha_1^2}} \tan \frac{q_2}{2} \right) + \frac{\beta_2}{\beta_1} q_2 \quad (28b)$$

のように解析的に求められる。ここで $w(q_2)$ は、**Fig. 5** に示すように、リンクが真直ぐ伸びた姿勢 $q_2 = 0$ に限って 0 である。また、式 (28a) における σ_r は積分定数で、直立姿勢 $q_1 = q_2 = 0$ で $\sigma = 0$ としたい場合は $\sigma_r = 0$ と置けばよい。 σ と同時に水平重心位置 x_C も同時に 0 となると、 $q_1 = 0$ も必ず満たされる。したがって、角運動量と重心角の安定化は直立姿勢への安定化を達成する。また、前節で導入した重心目標値 $\bar{x}_C$ での静止を目的とするならば、対応する平衡点を $q_1 = q_{1e}$ とし、積分定数を $\sigma_r = q_{1e}$ と置けばよい。

この積分を用いたバランス制御は Stojic ら [20] によってはじめて示された。南ら [19] は制御入力を関節速度 $\dot{q}_2$ とみなして、同様の制御方法を提案しているが、物理量 M_{11} が重心周りの慣性モーメントであるため、これに対応する σ は「重心角」とよばれた。過去の文献 [21] では、重心角が解析解に計算できることを利用して空中姿勢制御の可到達領域や最短時間制御が解かれた。

さて、重心角を加えた拡大状態変数を $x = [\sigma, P_0, x_C - \bar{x}_C, \dot{x}_C]^T \in \mathbb{R}^4$ と定義すると、式 (7), (23), (27) から、状態方程式は

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} x &= Ax + Bu \\ &= \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & mg & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m} \end{bmatrix} u \end{aligned} \quad (29)$$

となるため、前節と同様に状態と入力の重みを設定して LQR を解くことができる。ただし、 M_{11} （慣性行列の一部、したがって行列 A も）は定数ではないが有限なので、本論文では単に保守的な値（本稿では $q_2 = \pi$ ）に選んでいる。

以上述べたコントローラの構造を **Fig. 6** に示す。中央の破線の左側がコントローラで、LQR と逆動力学演算から構成されている。制御入力は次の手順で求める。

(P1) 線形プラント式 (29) から LQR の最適フィードバックゲインを求める（オフライン処理）。

Fig. 8 Application of the proposed balancing controller to a three-link humanoid model (Fig. 1 (b)). The knee joint is fixed to the initial angle. The horizontal CoM is stabilized to the center of SR, and the hip angle is converging to the specified value (initial posture)

Fig. 9 The stick animation of the simulated humanoid model under the proposed balancing controller

ンも行った結果、安定化はなされたが、股関節角度が $\pi/2$ よりも大きく変位する際に動きが鈍り、収束の速度が遅れるという結果になった。ゲイン調整や可動範囲に注意すれば、実用的には有用であると考えられる。

なお、同じ3リンクモデルにおいて、第3章を使って x_C, z_C を同時に制御し、かつ第4章の方法で腰トルクを重畳したシミュレーション例を付録に掲載したので参照されたい。

6. おわりに

本論文はヒューマノイドモデルのバランス制御において、重心や角運動量を制御する従来の劣駆動バランス制御法に、足首トルクによる角運動量操作を統合する方法を提案した。シミュレーション結果により、腰と足首の関節を競合することなく動作させることで、素早く姿勢とバランスをリカバーすることが示された。足首トルクはヒューマノイドの支点周りの角運動量

を直接操作するために利用されるが [23], アクチュエータ出力限界よりもむしろ、狭い SR による強い制約を受ける。また、独立に設計して統合しただけでは互いに悪影響を及ぼすことがある。提案手法はそのような特徴を踏まえた解法である。

本稿では遊脚のない簡単な平面2リンク系で制御則を説明したが、[足首, 立脚, 上体, 遊脚] の四つの部分からなる低次元モデルへの運動学的写像が利用でき、角運動量とその積分が計算できる限り、多リンク系への拡張は原理的には可能である。

一般的な三次元ヒューマノイドモデルに対する、重心と角運動量を制御量とした全身運動制御アルゴリズムはいくつか開発され [10], トルク制御型のロボットにも適用されているが [11], 実際には可動域が問題となるため、関節の可動域や慣性モーメントの大小を考慮して、角運動量制御を操作する範囲を限定して運用するほうが実用的と思われる。本論文の結果は、平衡姿勢の目標値や足首トルクのフィードバックゲインの設定に関する指標を与え、重心の並進運動と全体の回転運動の過渡的な振る舞いを大まかに把握することに役立つと考える。そのうえで、非線形計画法を利用して各種ハード制約条件を満たすように解を追いついていくのが、全身運動制御の安全な運用方法であろう。

参考文献

- [1] L.R. Squire, D. Berg, F. Bloom, S.D. Lac, A. Ghosh and N.C. Spitzer, Eds.: Fundamental Neuroscience, Academic Press, 2008.
- [2] A. Winter, David: A.B.C. (Anatomy, Biomechanics and Control) of Balance During Standing and Walking. Waterloo Biomechanics, 1995.
- [3] R.J. Peterka: "Sensorimotor integration in human postural control," Journal of Neurophysiol, vol.88, no.3, pp.1097-1118, 2002.
- [4] S. Hyon, R. Osu and Y. Otaka: "Integration of multi-level postural balancing on humanoid robots," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1549-1556, 2009.
- [5] H.K. Khalil: "Nonlinear Systems," 2nd ed., Prentice Hall, 1996.
- [6] B. Stephens: "Integral control of humanoid balance," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4020-4027, 2007.
- [7] T. Koolen, T. de Boer, J. Rebula, A. Goswami and J. Pratt: "Capturability-based analysis and control of legged locomotion, Part 1: Theory and application to three simple gait models," Int. J. Rob. Res., vol.31, no.9, pp.1094-1113, 2012.
- [8] E. Whitman, B. Stephens and C. Atkeson: "Torso rotation for push recovery using a simple change of variables," IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.50-56, 2012.
- [9] 植村充典, 平井宏明, 宮崎文夫: "足首周りの角運動量に基づく脚ロボットの立位可安定性", 第33回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 2I2-02, 2015.
- [10] S. Kajita, et al.: "Resolved momentum control: humanoid motion planning based on the linear and angular momentum," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1644-1650, 2003.
- [11] S. Hyon, N. Yokoyama and T. Emura: "Back handspring of a multi-link gymnastic robot—reference model approach," Advanced Robotics, vol.20, no.1, pp.93-113, 2006.
- [12] S. Lee and A. Goswami: "A momentum-based balance controller for humanoid robots on non-level and non-stationary ground," Auton. Robots, vol.33, no.4, pp.399-414, 2012.
- [13] 杉原知道, 中村仁彦: "非駆動自由度の陰表現を含んだ重心ヤコビアンによる脚型ロボットの全身協調反力操作", 日本ロボット学会誌, vol.24, no.2, pp.222-231, 2006.
- [14] 梶田秀司 (編): ヒューマノイドロボット. オーム社, 2005.
- [15] 玄相吳: "複数の接地部分と冗長関節を有するヒューマノイドロボットの受動性に基づく最適接触力制御", 日本ロボット学会誌, vol.27,

- no.2, pp.178–187, 2009.
- [16] M. Spong: “The swing up control problem for the acrobot,” IEEE Control System Magazine, vol.15, no.1, pp.49–55, 1995.
- [17] 美多勉: 非線形制御入門—劣駆動ロボットの技能制御論—, 昭晃堂, 2000.
- [18] 南澤 謹, Ioannis Pantelidis, 美多勉: “アクロバットロボット制御の正準系と振り上げ, 大車輪制御”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.163–164, 2000.
- [19] 南澤 謹, 美多勉, Ioannis Pantelidis, 山北昌毅: “アクロバットの振り上げ倒立制御と特異点問題”, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.1, pp.85–88, 2002.
- [20] R. Stojic and C. Chevallereau: “On the stability of biped with point foot-ground contact,” IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3340–3345, 2000.
- [21] T. Mita, S. Hyon and T. Nam: “Analytical time optimal control solution for a two link planar acrobot with initial angular momentum,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.17, no.3, pp.361–366, 2001.
- [22] M. Yamakita, T. Yonemura, Y. Michitsuji and Z. Luo: “Stabilization of acrobot in upright position on a horizontal bar,” in Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.3093–3098, 2002.
- [23] 佐野明人, 古荘純次: “角運動量制御による 2 足歩行ロボットの 3 次元動歩行”, 計測自動制御学会論文集, vol.26, no.4, pp.459–466, 1990.
- [24] S. Hyon, D. Suewaka, Y. Torii and N. Oku: “Design and experimental evaluation of a fast torque-controlled hydraulic humanoid robot,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, pp.623–634, 2017.
- [25] K. Hirayama, N. Hirose and S. Hyon: “Passivity-based compliant walking on torque-controlled hydraulic biped robot,” IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.552–557, 2018.

付録 A. 重ね合わせによる統合

筆者らは文献 [4] において, 第 4 章で述べた上体だけを利用した劣駆動のバランス制御 (Dynamic Balancer) に対して, 第 3 章で述べた全関節駆動のバランス制御 (Static Balancer) を単純に重ね合わせる方法を提案し, シミュレーションと実機の両方でその有効性を確認している. 文献 [4] には常時重ね合わせた場合の結果が示されているが, ここでは Hip Strategy が必要な状況, つまり, ZMP が SR から出ているときに限り重畳するようにした場合のシミュレーション結果を示す. シミュレーションモデルは Fig. 1 (b) を用いる.

代表的な結果を Fig. 10 に示す. ここでは重心の X 位置と Z 位置の両方が指定した値に収束している様子が分かる. 関節が三つあるので, それが可能である. 4 番めのグラフが Static Balancer (SB) の全身トルク指令値である. また, 5 番めのグラフに Dynamic Balancer (DB) の Hip トルク指令値と, それを重ね合わせる重み (パーセンテージ表示) を同時にプロットしてある. 時刻約 0.45 [s] からは SB に完全に切り替わっているが, DB トルクとで値を比較すると競合している様子が分かる. ただ, このモデルは関節数が十分であるため, 仮に競合

Fig. 10 Simulation result of a simple superposition of the balancing controllers on a three-link humanoid model (Fig. 1 (b)). The Dynamic Balancer (Hip torque) is superposed on the Static Balancer (whole-body joint torque) only when the ZMP is out of SR (0–0.45 [s]). The both X and Z positions of CoM are converging to the desired value

していてもほかの関節が誤差補償するので問題はなかった. 実床反力が目標床反力に従っていないのは, 単純な重ね合わせによるものと, 主に Static Balancer に必要な関節のダンピングによるものである.

玄 相 昊 (Sang-Ho Hyon)

1998 年早稲田大学大学院修士課程修了. 2002 年東京工業大学大学院博士後期課程修了. 東北大学大学院工学研究科助手, 講師を経て, 2005 年 ATR 脳情報研究所研究員. 2010 年 4 月立命館大学理工学部ロボティクス学科准教授, 現在に至る. 博士 (工学). 運動制御, ヒューマノイドロボット, 油圧ロボットの研究に従事. 日本フルードパワーシステム学会, IEEE などの会員. (日本ロボット学会正会員)