

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

玄 相 昊^{*1*2}

A Passivity-Based Optimal Contact Force Control for Humanoid Robots with Redundant Joints and Multiple Contact Points

Sang-Ho Hyon^{*1*2}

This paper proposes a practical contact force control framework for force-controllable legged robots with redundant joints, which is applicable to automatic/semi-automatic control for mobile robots, construction robots, bipedal humanoid robots, and assistive devices. The proposed method requires: (1) no contact forces measurements; (2) no inverse kinematics; (3) nor inverse dynamics in achieving the desired contact forces. Combined with a passivity-based redundancy resolution technique, a contact force closure is optimally solved and transformed directly into joint torques in real-time. Experimental results on a full-sized biped humanoid robot show that the proposed method can simultaneously control the multiple contact forces without generating internal forces, and can naturally interact with unknown external forces.

Key Words: Contact Force Control, Torque Control, Passivity, Redundant Robots, Legged Robots, Humanoid Robots, Assistive Devices

1. は じ め に

力制御は因果律から言って位置・速度制御の下位に当たり、人間や環境と親和性ある物理的インタラクションを実現する上で鍵となる技術である。特に少子高齢化に伴い、近年パワーアシストロボットをはじめとする福祉機器の開発や熟練工の作業ロボットへの技能伝授が急がれる中、力制御の重要性はますます増加している。ここでの制御問題は、

A: 興味のある対象物に対する相互作用力を適切に制御すること
B: 任意の部位に作用する力（指令、教示、外乱）に対してしなやかに追従すること

といえる。上記 A についてはエンドエフェクタに力センサを配置し、その力フィードバックループを位置サーボ系の外側に置く手法によっても実現でき（インピーダンス制御）[1]~[3]、位置サーボ型のヒューマノイドロボットの歩行制御にも適用されているが（例えば文献[4]~[6]）、その場合上記 B に対してはほとんど無力となる。これに対し、関節トルクを直接操作することで接触力を制御する手法[2][3]が冗長マニピュレータにおいても活発になされてきたが（例えば文献[7]~[10]）、ベースが地

面に固定されていない脚式の冗長ロボットへの拡張は最近の研究[11]を除いてほとんどなされておらず、実機を用いた検証実験に至ってはまったくなされていない。

また、ヒューマノイドロボットなどの脚式移動ロボットは通常複数の接触点で環境と接し、環境に作用した接触力の反作用がロボットの大局的な運動を決定する。そのため、上記 A、Bに加えて、

C: 「複数」の接触点に作用する接触力を同時に制御することが必要である。例えばアクティブサスペンションを有する不整地走行車両や脚を持つ建築ロボット等においても環境に作用させる複数の接触力を適切に制御することがタスクの達成において非常に重要な技術となる。複数の接触点を考慮した接触力制御は主にハンドグラスピングの分野で議論されてきたが[12]、受動性[13]に基づく冗長問題の解法[14]を含め、脚ロボットへの展開はほとんどなされていないのが現状である。

これに対して我々は、冗長自由度を有する脚式ロボットないしは運動補助装具等において、受動性に基づいて上記 A~C の三つの制御問題を同時かつ実用的に達成する方法を提案している[15]。ここでいう実用性とは、複雑な計算を必要としない実時間性と、同定の困難なモデルやノイズを多く含む状態量（速度の二次項など）に敏感ではないロバスト性を指す。その意味で提案手法は（推定困難な）すべての非線形項を制御入力でキャンセルしようと試みるアプローチ[11]とは大きく異なる。

本論文では文献[15]で大まかに示した枠組みのうち、特に受

原稿受付 2007 年 11 月 13 日

^{*1}(独) 科学技術振興機構 ICORP 計算脳プロジェクト

^{*2}(株) ATR 脳情報研究所

^{*1}JST, ICORP, Computational Brain Project

^{*2}ATR Computational Neuroscience Laboratories

■ 本論文は有用性で評価されました。

動性に基づく冗長問題解法と最適接触力配分に基づく接触力制御について詳しく述べる。第2章がこれに相当する。次に、第3章では、文献[15]でシミュレーションでのみ行った理論検証を、関節トルク制御が可能な実際の脚式移動ロボットを用いて再検証する。具体的には等身大の2足歩行型ヒューマノイドロボットを用いて行ったバランス制御実験[†]の結果について述べる。第4章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. 実時間接触力制御の枠組み

ヒューマノイドロボットなどベースが固定されていない脚式移動ロボットは環境との接触力を通じて自身の立位維持や移動タスクを実現する。本章はこの問題を解くための新しい接触力制御の枠組みについて述べる。提案手法は環境と複数の接触点で相互作用し、冗長自由度を有する様々なタイプの多脚移動ロボットや運動補助ロボットに適用可能であるが、本論文では2足歩行型ヒューマノイドロボットを例にとって説明する。まず、2.1節ではロボットのフルダイナミクスを記述し、逆運動学や複雑な動力学計算を経ずにして、実時間で望ましい床作用力（本文参照）を関節トルクに変換する方法を述べる。要は重力補償と受動性に基づく冗長問題解法である。次に、2.3節ではどのように目標床作用力を複数の接触点に分配するかという問題を考え、最適荷重配分の解法を与える。そして2.4節で制御則をまとめ、本手法を適用する際の重要な注意点をいくつか述べる。

2.1 受動性に基づく接触力制御のアイデアと重力補償

Fig. 1に示すような多自由度ヒューマノイドロボットを考える。関節数を n とする（すべて駆動関節）。 $r_C = [x_C, y_C, z_C]^T \in \mathcal{R}^3$ をワールド座標系 Σ_W における重心位置、 $q \in \mathcal{R}^n$ を関節角、 $\phi \in \mathcal{R}^3$ をベース姿勢角とする。説明を簡単にするため、足が地面と面接触していて、ロボットの床反力中心点（CoP）が支持領域内にあると仮定する^{††}。面接触によってベース姿勢角 ϕ と関節角 q には

$$\dot{\phi} = A(\phi, q)\dot{q} \quad (1)$$

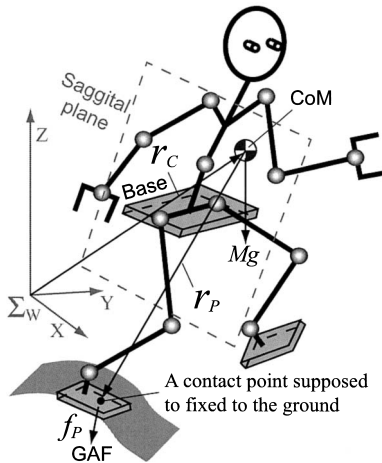


Fig. 1 Definition of coordinate system. The Ground Applied Force (GAF) is defined as the collective force that the robot applies to the ground. This is the negative of the ground reaction force

なる関係式が成り立っている。この仮定のもとで一般化座標を $\dot{q}_C = [r_C, q]^T \in \mathcal{R}^{3+n}$ とおく。

次に、Fig. 1 に示す支持領域内の任意の接触点 r_P に注目し、条件

$$r_C + r_P = 0 \quad (2)$$

を満たす拘束条件つき運動方程式を考える。本式が恒等的に成り立つためには、式 (1) と合わせて

$$\dot{r}_C + J_P(\phi, q)\dot{q} = \underbrace{\begin{bmatrix} id_3 & J_P(\phi, q) \end{bmatrix}}_{\hat{E}(\phi, q)} \dot{\dot{q}}_C = 0 \quad (3)$$

が成り立つ必要がある。ここで、 id_N は次元 N の単位行列である。 $J_P(\phi, q) \in \mathcal{R}^{3 \times n}$ は r_P の駆動関節角度に関する微分、つまり $J_P(\phi, q) = \frac{\partial r_P}{\partial q}$ で、本論文では「接触ヤコビアン」と呼ぶ。これは文献[16]で示された「重心ヤコビアン」の符号を逆にしたものである（付録 A 参照）。式 (3) をさらに時間微分して

$$\hat{E}\ddot{\dot{q}}_C + \gamma = 0 \quad (4)$$

を得る。ここで、 $\gamma(\phi, q, \dot{q}) = \dot{J}_P\dot{q}$ である。

ロボットが環境に対して作用する力の合力を床作用力（GAF: Ground Applied Force）と呼び、 $f_P = [f_{xP}, f_{yP}, f_{zP}]^T$ で表す。このとき、運動方程式は

$$\underbrace{\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I(\phi, q) \end{bmatrix}}_{\hat{I}} \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{r}_C \\ \ddot{q} \end{bmatrix}}_{\ddot{\dot{q}}_C} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ C(\phi, q, \dot{q})\dot{q} \end{bmatrix}}_{\hat{C}} + \underbrace{\begin{bmatrix} -Mg \\ 0 \end{bmatrix}}_{\hat{G}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix}}_u - \underbrace{\begin{bmatrix} id_3 \\ J_P(\phi, q)^T \end{bmatrix}}_{\hat{E}^T} f_P \quad (5)$$

のように表される。ここで $M = \text{diag}(m, m, m) \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ における m は総質量、 $I(\phi, q) \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は関節の運動に関する慣性行列、 $C(\phi, q, \dot{q})\dot{q} \in \mathcal{R}^n$ は遠心力とコリオリ力の項、 $g = [0, 0, -9.81]^T$ は重力加速度ベクトル、 $\tau \in \mathcal{R}^n$ は関節トルクである。本式の導出の詳細については文献[17][18]などを参照されたい。

なお、運動方程式には本式の他に (1) を満たすための拘束モーメントの釣合式も加わるが本論文では使用しない。ベース姿勢は動力学モデルを使って直接制御する代わりに、複数の並進接触力を用いて間接的に制御できるからである（2.4章（N4）参照）。このとき、各足平に実際に発生する拘束モーメントは作用する関節トルクと動力学モデルから計算できる。

さて、制御目的は f_P をある望ましい目標値 $\bar{f}_P$ に追従させ

[†]本論文では立位安定化制御をバランス制御、そのための制御器をバランスと呼ぶ。

^{††}このように仮定しても CoP が支持領域内に存在するような接触状態では何ら不都合はない。

ることである。式 (4) と式 (5) から f_P は

$$f_P = (\hat{E}\hat{I}^{-1}\hat{E}^T)^{-1} \{ \gamma + \hat{E}\hat{I}^{-1}(u - \hat{C} - \hat{G}) \} \quad (6)$$

のように計算できる。したがって、式 (6) を解けば (厳密な非線形補償)、ある望ましい床作用力 $\bar{f}_P$ (ただし、 $\bar{f}_{zP} > 0$) に応じた目標トルク τ を得ることができる。このようにして求めた目標トルクはロボットのモデルが正確で、かつ接触状態が維持されている限り、 $f_P = \bar{f}_P$ を達成する。しかし、ヒューマノイドロボットのような大自由度を有する系で厳密な非線形補償を行うのは、計算コスト、モデリング誤差、計測誤差の三つの観点から現実的ではないと考えられる。

そこで実用的なダイナミックレンジで望ましい接触力を制御する簡便な枠組みとして、受動性に基づく解法を提案する。まず、運動が準静的であると仮定しよう。この場合 $\dot{q} \approx 0$, $\gamma \approx 0$, $C \approx 0$ である。そこで、新しい入力を $f_u = [f_{ux}, f_{uy}, f_{uz}]^T \in \mathcal{R}^3$ とおき、関節トルクを

$$\tau = J_P^T(f_v + Mg), \quad (7)$$

$$f_v = f_u + (J_P I^{-1} J_P^T)^{-1} M^{-1} f_u \quad (8)$$

で与えると閉ループ系が

$$f_P \approx f_u + Mg \quad (9)$$

を満たすことが直接計算によって確かめることができる (付録 B 参照)。これが重力補償による接触力制御にはかならない。どのような f_u を設定するかについては、3 章および付録 D でその一例を示す。

実際には式 (7) の近似としてより簡単な

$$\tau = J_P^T(f_u + Mg) \quad (10)$$

を用いることもできる。これはロボットが特異姿勢に近づくに従って J_P^T が退化することに関連する。このとき、式 (10) だけ (つまり式 (8) の第一項だけ) では、非零の f_u に対しても関節トルクが零に近づいてしまっても必要な f_u を発生できない。式 (8) 右辺第二項はこれを補う役割を持っており、 J_P^T が退化するに従って $(J_P I^{-1} J_P^T)^{-1}$ も特異に近づくことで両者がバランスするため、上記静力学的状況を仮定する限りは、必要な f_u を厳密に発生できる。ただ、実際問題として、 f_u を付録 D のようなフィードバック制御として与えることを考えると、式 (10) を用いることで特異姿勢付近に必要なトルクが出力されなかったとしても、結果として増大する追従誤差に伴って自動的に f_u も増大してくれる。むしろ式 (10) を用いることで式 (8) の逆行列演算や、慣性行列 I の同定すら不要となるため、本論文では積極的に本式を用いている。なお、 $f_u = 0$ の場合は明らかに両者は一致する。

2.2 ダンピングインジェクションによる接触力の収束

前節の式 (7) または式 (10) のような準静力学的なコントローラを用いた場合、 γ や $\hat{C}$ が小さくない場合に内部運動が動的効果として現れてしまう [12]。そこで、内部運動を抑制するために、 γ および C を補償する項 $\zeta(q, \dot{q})$ を導入しようというのはごく自然な発想である。実際に以下、本節では式 (7) の内

部運動補償版：

$$\tau = J_P^T(f_v + Mg) + \zeta(q, \dot{q}) \quad (11)$$

によって床作用力の漸近収束

$$f_P \rightarrow f_u + Mg, \quad t \rightarrow \infty \quad (12)$$

が得られることを示す。

まず、式 (12) を式 (6) に代入すると、

$$\begin{aligned} f_P &= Mg \\ &+ (M^{-1} + J_P I^{-1} J_P^T)^{-1} \{ \gamma + J_P I^{-1}(\zeta - C\dot{q}) + J_P^T f_v \} \\ &= Mg + f_u \\ &+ (M^{-1} + J_P I^{-1} J_P^T)^{-1} \{ \gamma + J_P I^{-1}(\zeta - C\dot{q}) \} \end{aligned} \quad (13)$$

を得る (ここで式 (8) を使った)。もし $\zeta = C\dot{q} - Y^T(Y Y^T)^{-1}\gamma$ (ここで、 $Y = J_P I^{-1}$) のように ζ を設計すれば (厳密な非線形補償)、 $f_P = Mg + f_u$ を得る。しかし、このような強引な非線形補償はそもそも本論文の趣旨と反するし、シミュレーションならともかく、実際の場面であまり機能するとは思えない。

したがって問題は、いかにして簡単な ζ を用いて実用的な接触力制御性能を得るか、ということである。そこで最も直感的で簡単な補償項として、関節ごとのダンピング

$$\zeta = -D\dot{q} \quad (14)$$

を導入する (ここで $D > 0$ はダンピング係数)。ダンピングによる冗長問題解法は文献 [14] [19] に詳しい。

このとき、式 (13) は

$$\begin{aligned} f_P &= Mg + f_u \\ &+ (M^{-1} + J_P I^{-1} J_P^T)^{-1} \{ \dot{J}_P \dot{q} - J_P I^{-1}(D + C)\dot{q} \} \end{aligned} \quad (15)$$

と書ける。床作用力の収束性を調べるために閉ループ系を解析する。制御則 (11) と (14) を運動方程式 (5) に代入すると、重心以外のダイナミクスを表す下半分の式は

$$I\ddot{q} + C\dot{q} = J_P^T(f_v + Mg) - D\dot{q} - J_P^T f_P \quad (16)$$

となる。これに式 (15) を代入すると

$$\begin{aligned} I\ddot{q} &+ \underbrace{\left[C + J_P^T(M^{-1} + J_P I^{-1} J_P^T)^{-1}(\dot{J}_P - J_P I^{-1} C) \right]}_{A \in \mathcal{R}^{n \times n}} \dot{q} \\ &+ \underbrace{\left[id_n - J_P^T(M^{-1} + J_P I^{-1} J_P^T)^{-1} J_P I^{-1} \right]}_{B \in \mathcal{R}^{n \times n}} D\dot{q} \\ &= \underbrace{J_P^T(J_P I^{-1} J_P^T)^{-1} M^{-1} f_u}_{H \in \mathcal{R}^{n \times 3}} \end{aligned} \quad (17)$$

となる。これが f_u を勝手に与えたときの内部運動のダイナミクスである。

したがって、 $f_u = 0$ 、つまり重力補償のみの場合は

$$I\ddot{q} + (A + BD)\dot{q} = 0 \quad (18)$$

となる。ここで、行列 B は正定である。なぜなら、

$$Q = J_P^T (J_P I^{-1} J_P^T)^{-1} J_P \quad (19)$$

とおくと、 $Q \leq I$ となり、 $M > 0$ を考慮すれば $J_P^T (M^{-1} + J_P I^{-1} J_P^T)^{-1} J_P < I$ 、したがって $B > 0$ である。したがって、 D を十分大きくとれば $\dot{q} \rightarrow 0$ が得られる。つまり、この場合、式 (15) の第三項の中括弧 $\{ \}$ の中が零に収束することにより、 $f_P \rightarrow Mg$ が得られる。同じことが重心のレギュレータ問題で成り立つ。なぜなら、 f_u は重心を制御する制御入力であり、位置あるいは速度の目標を達成したあとは零になっているからである。つまり、重心速度の零ダイナミクスを考えると、式 (18) より f_P は Mg に収束する。

一方、トラッキング問題などのように、常に $f_u \neq 0$ の場合はやや事情が複雑になる。例えば、ダンピング係数 D が十分大きくても、 f_u が非零の一定値をとる場合、 $\dot{q}$ はドリフトしてしまう。しかし、通常のトラッキング問題を考えると、 f_u が非零の一定値を取り続けることはありえない。P-T-P 制御の場合は初期値と最終値は零であり、周期運動のトラッキングの場合も平均値零を中心に変動する。したがって、 D をうまく設計することによって、特異姿勢に陥らない限り、関節変位の初期姿勢からのドリフトをある有界な範囲に留めることができることが直感的に理解できる。床作用力誤差の最大ノルムの大きさはタスク依存（重心の目標軌道やフィードバックゲインなど）で決まり、結果として重心の誤差が決まる。これを所望の許容範囲に収めるべく、ダンピング係数やフィードバックゲインなどをあらかじめ最適に計画するか、あるいは試行錯誤の学習によって補正入力を獲得するか等の選択肢があり得るが、これ以上の議論は本論文では行わない。

2.3 複数の接触点に対する最適接触力配分

前節まではロボットが地面と面接触することを仮定して、単一の接触点拘束を考慮した接触力制御を導出したが、本節ではロボットが複数の接触点において環境と接触しようとする状況を考える。ここでは全部で α 個の接触点に興味があるとする。Fig. 2 に示すように、想定する接触点位置を $r_s = [r_{s1}^T, r_{s2}^T, \dots, r_{s\alpha}^T]^T \in \mathcal{R}^{3\alpha}$ 、対応する接触力を $f_s = [f_{s1}^T, f_{s2}^T, \dots, f_{s\alpha}^T]^T \in \mathcal{R}^{3\alpha}$ で表す（ハンドによる接触も含めた一般的な場合については文献 [15] を参照）。接触点 r_{sj} はユーザーが（勝手に接触するものと）想定して設定する点に注意されたい。これらは「重心から見たロボットボディへの」位置ベクトルであって地面へのベクトルではない。また、CoP を r_P で示す。ただし、接触点は同一平面内にあるとは限らないので、この場合の CoP は式 (21) の意味で定義する。

以上の定義の下で、接触力を決定する問題を考える。ある望ましい床作用力 $\bar{f}_P$ は各接触点に作用する目標接触力 $\bar{f}_s$ の合力であり、作用力から接触力を決定する問題は不良設定である。つまり、接触点が複数ある場合には、単に幾何学的拘束 (3) を書き下しただけでは関節トルクを一意に定めることができない [12]。そのため何らかの評価基準に基づいて最適解を決定する必要がある。本稿で提案する手法は、各接触力を CoP と接触点の位置関係に基づいて、各接触力のノルムが最小となるよう最適配分するものである。

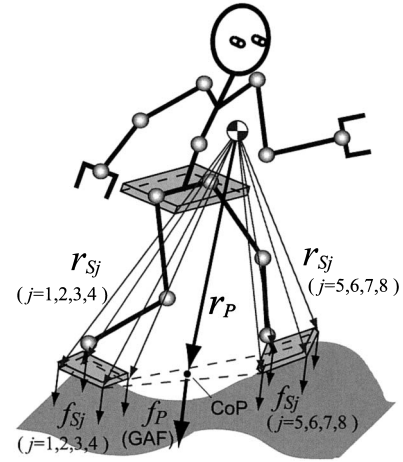


Fig. 2 Definition of the contact positions and forces. Each contact point r_{sj} ($j = 1, 2, \dots$) is preset to the robot body, not to the ground. The associated contact force is represented by f_{sj} . The sum of the contact forces f_{sj} equals to GAF f_P

床作用力と CoP との関係式は $\bar{f}_{zs_j}$ を鉛直接触力として次のようになる。

$$f_P = \sum_{j=1}^{\alpha} f_{sj}, \quad (20)$$

$$x_P = \frac{\sum_{j=1}^{\alpha} x_{sj} f_{zs_j}}{\sum_{j=1}^{\alpha} f_{zs_j}}, \quad y_P = \frac{\sum_{j=1}^{\alpha} y_{sj} f_{zs_j}}{\sum_{j=1}^{\alpha} f_{zs_j}} \quad (21)$$

さらにまとめると次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ 1 \end{bmatrix} f_{zP} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{s1} & x_{s2} & \dots & x_{s\alpha} \\ y_{s1} & y_{s2} & \dots & y_{s\alpha} \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}}_{A_z \in \mathcal{R}^{3 \times \alpha}} \begin{bmatrix} f_{zs1} \\ f_{zs2} \\ \dots \\ f_{zs\alpha} \end{bmatrix}$$

したがって、ある望ましい鉛直床作用力 $\bar{f}_{zP}$ と望ましい CoP $\bar{r}_P$ が与えられれば、次のようなノルム最適な接触力分配則によって各鉛直接触力を一意に決定することができる。

$$\begin{bmatrix} \bar{f}_{zs1} \\ \bar{f}_{zs2} \\ \dots \\ \bar{f}_{zs\alpha} \end{bmatrix} = A_z^{\#} \bar{f}_{zP} \begin{bmatrix} \bar{x}_P \\ \bar{y}_P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

ここで $A_z^{\#} = A_z^T (A_z A_z^T)^{-1}$ である。接触力ベクトルの次元は 3 より常に大きいので、本分配則は冗長問題におけるノルム最小化解となっており、CoP が r_s の支持領域に含まれる当然の状況であれば（そのように目標 CoP を設定する）、作用力の方向と各接触力の方向が一致するため、ロボットが床を引っ張ることができないという unilateral な拘束を満たす上に、不必要な内力を発生しない。なぜなら内力が存在すればそれはノルム最適解ではないからである。このように本接触力分配則は明快な工学的意味を持っている。

一方、各接触点には作用させる水平目標接触力 $\bar{f}_{xS}$, $\bar{f}_{yS}$ は

$$\begin{bmatrix} x_P \\ 1 \end{bmatrix} f_{xP} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{S1} & x_{S2} & \cdots & x_{S\alpha} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}}_{A_x \in \mathcal{R}^{2 \times \alpha}} \begin{bmatrix} f_{xS1} \\ f_{xS2} \\ \cdots \\ f_{xS\alpha} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} y_P \\ 1 \end{bmatrix} f_{yP} = \underbrace{\begin{bmatrix} y_{S1} & y_{S2} & \cdots & y_{S\alpha} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}}_{A_y \in \mathcal{R}^{2 \times \alpha}} \begin{bmatrix} f_{yS1} \\ f_{yS2} \\ \cdots \\ f_{yS\alpha} \end{bmatrix}$$

を満たすように選ぶ。ここで $\bar{f}_{xP}$, $\bar{f}_{yP}$ は水平方向の目標作用力である。本式の数学的な意味は、「目標とする CoP は本来垂直接触力の分布中心であるが、これが水平接触力の分布中心も兼ねる」ということである。最小ノルム解は

$$\begin{bmatrix} \bar{f}_{xS1} \\ \bar{f}_{xS2} \\ \cdots \\ \bar{f}_{xS\alpha} \end{bmatrix} = A_x^\# \begin{bmatrix} \bar{x}_P \\ 1 \end{bmatrix} \bar{f}_{xP}, \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{f}_{yS1} \\ \bar{f}_{yS2} \\ \cdots \\ \bar{f}_{yS\alpha} \end{bmatrix} = A_y^\# \begin{bmatrix} \bar{y}_P \\ 1 \end{bmatrix} \bar{f}_{yP}, \quad (24)$$

ただし、 $A_x^\# = A_x^T(A_x A_x^T)^{-1}$, $A_y^\# = A_y^T(A_y A_y^T)^{-1}$, で与えられる。このような配分則を用いる理由は、摩擦力の観点から各鉛直接触力と整合のとれる水平接触力の分布を得るためである。我々は路面の実際の摩擦係数は知らなくても、摩擦力がおよそ鉛直床反力に比例することは事前知識として知っている。つまり、鉛直床反力が大きい接触点はそれ相応の水平床反力に耐えることができるため、上記のような配分則を採用した。このとき、非零の水平床作用力 $f_{xP} \neq 0$ に対しては、算出される各水平目標接触力間に差が生じるが、これは内力ではない。

なお、自明な拡張として、重み行列 W を用いることで接触力の分布を陽に考慮することも可能である（重み付き擬逆行列 $A^\# = W^{-1}A^T(AW^{-1}A^T)^{-1}$ を用いる）。これは特定の脚の関節トルクを軽減したい場合などに有効である。あるいは、ある特定の接触点については接触力を明示的に指定したうえで、残りの未知接触力については上述の方法で決定するという選択肢もあり得る。

2.4 制御則のまとめ

このようにして決定された接触力は最終的に重心から複数の接触点までのヤコビアン $J_S(\phi, q) = \frac{\partial r_S}{\partial q} \in \mathcal{R}^{3\alpha \times n}$ を用いて

$$\tau = J_S^T \bar{f}_S + \zeta \quad (25)$$

により関節トルクに「一意」に変換される。本論文では J_S を「多接触ヤコビアン」(multi-contact Jacobian) と呼ぶ。なお、零化空間を利用した解

$$\tau = J_S^T \bar{f}_S + (I - J_S^T J_S^{\dagger}) \zeta \quad (26)$$

を用いれば、タスクの零化空間でのみ内部運動を抑制することができる（計算コストが余計にかかるが）。なお、多接触ヤコビアン J_S の計算方法は J_P のそれに順ずる。以上、 $\bar{f}_P = f_v + Mg$ の設定のもと、式 (22)~(24) および式 (25) ないしは式 (26) から関節トルクを算出することが提案手法の骨格である。

基本的な制御ルーチンをまとめると次のようになる：

- P1 多接触ヤコビアンを含むすべての必要な順運動学計算を行う。
- P2 ユーザー設定力 f_u と目標 CoP r_P をタスク目標に応じて設定する。
- P3 目標 GAF $\bar{f}_P$ を $\bar{f}_P = f_u + Mg$ で与える（重力補償）。
- P4 アクティブな接触点 rs_j ($j \in \{1, 2, \dots, \alpha\}$) とアクティブな関節 q_i ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$) を定め、不要な行と列を接触ヤコビアン J_S から消す。
- P5 アクティブな接触点に配分する接触力 $\bar{f}_S$ を式 (22)~(24) で決定する。
- P6 式 (25) を使って目標接触力 $\bar{f}_S$ をアクティブな関節へのトルク指令 τ に変換する。
- P7 非アクティブな関節に対して適切な処理を行う（局所位置サーボで固定するなど）。

本手法はこのように非常にシンプルであるが、理解する上でいくつか注意を要する：

- (N1) 提案手法は接触力の計測を必要としないが、接触点をあらかじめ指定しておく必要がある。したがって指定した点を実際に環境と接触するかの如何に関わらず接触力（荷重）を最適に配分する。これは一種のフィードフォワード的な制御と考えられる。特に鉛直方向には基本的に抗重力成分を作用させることから、ロボットはある種の自然な不整地適応性を有する。これについては付録 C でさらに説明する。
- (N2) 片足支持など一部接触点に接触力を明示的に配分しない場合でも、各リンクの自重は補償されており、しかもダンピングインжекションにより内部運動は抑制されているため、遊脚や腕がドリフトすることはない。
- (N3) 式 (25) は説明のために導入した式 (11) と比べ、接触力を陽に考慮する目的で運動をよりタイトに拘束している点に注意されたい。理論的には、式 (25) は $J_P^{\dagger}$ の零化空間を使っている。
- (N4) これまでモーメントについてはあえて議論しなかったが、足平には 3 点以上の接触点を定義するので、並進接触力を組み合わせて足平にモーメントを発生することができる。モーメントを含めた 6 軸の床作用力を考慮して同様の枠組みを書き下すことも可能であるが、並進接触力だけで記述したほうがはるかにシンプルで直感的に理解しやすい。必要な場合は目標とする偶力を接触力のペアで作ってそれを単純に重ね合わせればよい。具体例として、文献 [15] に 2 足歩行等で生じる Yaw 軸モーメントを補償する方法について記述しているので参照されたい。
- (N5) 式 (7) において $f_v = 0$, すなわち $f_u = 0$, の場合は重力補償となり、閉ループ系は任意の外力に対して受動的となる。つまり、外力を測定することなくロボットは

外力に追従して動く。これは安全かつ直感的な物理的インタラクションに必要な不可欠な技術である。

- (N6) 提案手法は冗長ロボットを想定しており、関節の数と比較してタスク空間上の制御量の数が十分少なくない状況で適用すると、すべてのタスクの達成は期待できない。そのような状況ではタスクに優先度を設けることが考えられる。優先度を指定して階層的に複数のタスクを達成する方法はすでに冗長マニピュレータの分野で数多く提案されており（例えば文献[1][8][20]など）、ヒューマノイドロボットにも適用されつつある[11]。例えば式(26)の右辺第二項において関節空間で記述されたサブタスクを追加することができる。
- (N7) 直前の注意点は接触点が多くなれば破綻するということを意味していない。なぜなら、提案する最適接触力配分は接触力に弱い拘束を課しているからである。拘束の具体的な物理的意味は、「内力を発生しない」というものである。これは床の上に静止している剛体に仮想的な接触点を定義したときに、それらの接触点に作用している実際の接触力と同様に配分するもので（剛体内で内力は発生しない）、制御に必要な関節の自由度は非常に縮退しているのである。
- (N8) 提案手法の最終的なパフォーマンス（あくまでも接触力制御としての）は用いるハードウェアのトルク制御性に依存する。

3. 実験による検証

3.1 ヒューマノイドロボットと実験の概要

本章では Fig. 3 に示した等身大ヒューマノイドロボットを用いた実験結果を示す。本ロボットは米 SARCOS 社が製造したもので[21][22]、全身運動制御に関わる主要な関節として、腕と脚にそれぞれ 7 自由度、胴体と首部にそれぞれ 3 自由度で合計 34 自由度を有する冗長ロボットである。加えて各ハンドの 6 自由度とステレオカメラの 4 自由度含めると全部で 50 自由度を持つ。全高 1.58 [m]、腰高 0.82 [m]、総重量 93.7 [kg] である。ロボットは関節角度センサ、姿勢センサ、床反力センサを搭載しており、主要な関節はリンク機構を介して油圧シリンダで制御されている（供給圧は最高 21 [MPa]）。本ロボットには

関節角度制御は実装されているが、トルク制御は実装されていない。しかし、アクチュエータやリンクには力センサが取り付けられているため、ソフトウェア上で関節トルクに変換し、そのフィードバック信号を用いてアクチュエータを駆動することで所望の関節トルクを実現している。そのためのトルク制御ソフトウェアを筆者らが開発した。ネットワーク型コントローラや画像処理や学習器のための PC クラスタ、その他技術に関しては文献[22]を参照されたい。なお、タスクレベルでの制御は 1 [kHz]（ただし本論文の実験に限っては、500 [Hz]）の周期で実時間処理されている。これは 2.4 節でまとめた制御ルーチンを実行するのに十分すぎる制御周期である。

提案手法のパフォーマンスを見るために、バランス制御実験を行った。ここでの目的は、単純に床面への重心投影点が支持領域の中心に収束するかというバランス制御性能だけを見るのではなく、脚式ロボットにおいてあらゆるタスク制御の基本となる接触力制御のパフォーマンスを見ることである。その一つは、設定した接触点における実際の接触力が目標接触力に追従するかという接触力追従性である。

実験においては、Fig. 2 のように、各足平の頂点に 4 点ずつ、合計で $\alpha = 8$ の接触点が定義されている。ロボットは各足平に 6 軸力センサを搭載するが、Fig. 2 のように設定した足平各 4 点の接触点には接触センサを配置していないので、追従性の評価には各足における目標接触力の合力を用いる。また、目標 CoP と実際の CoP の比較も行う。もう一つの評価は、任意の部位に加わる未知外力に対して全身を使ってしなやかに対応できるかどうかである。ここではバランス制御を行っているので、重心をなるべく目標位置に制御しつつも、外力に対して即応的に追従することが望ましい。

バランス制御の詳細は付録 D を参照されたい。簡単に述べると、式 (8) または式 (10) における f_u を重心水平位置・速度に関する簡単なフィードバック形式で与える。ただし、ここでは複雑な非線形補償計算を避ける目的で、重心周りの角運動量の時間変化が小さい範囲でバランス制御を行う。また、前節で述べた CoP に基づく接触力配分を適用するために、目標 CoP が支持領域に必ず含まれるように目標床作用力を制約する（我々はこれを CoP-Constrained Balancer と呼んでいる）。

3.2 実験結果

バランス制御の実験結果を示す。Fig. 4 と Fig. 5 はそれぞれ、腰部と背中に横方向の外力を加えたときのビデオスナップショットである。いずれも外力にしなやかに追従しつつバランスを保っている様子が示されている。本実験における制御パラメータは各関節に付加するダンピング D と、バランスの PD フィードバックゲインだけである。ダンピングについては、シミュレーションにおいては質量分布にほぼ比例したダンピング係数を設定しているが[15]、実験では基本的にはダンピングを付加していない。その理由は内部運動を生じさせない程度の適度な粘性を局所的な力制御系に持たせることができるからである。ただ、胴体部は関節の粘性と比較して非常に慣性が大きいため、適当なダンピング (10 [Nms/rad]) を課している。バランスの PD ゲインについては、何度か実験をしながら試行錯誤的に求めた結果、それぞれ $K_{PC} = 50$, $K_{DC} = 3$ [Ns/m] を用

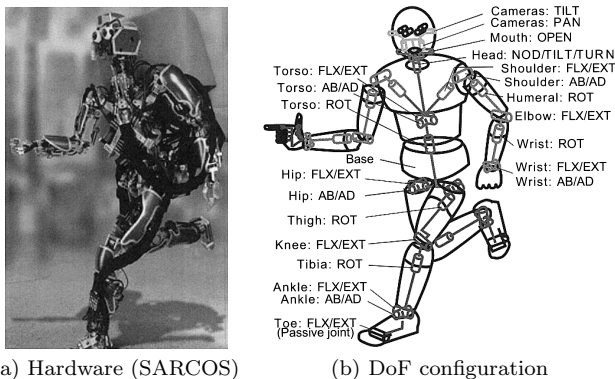


Fig. 3 A torque-controllable biped humanoid robot produced by SARCOS

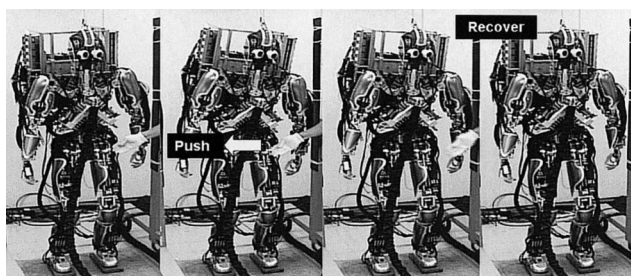


Fig. 4 Compensatory motion for a leftward push to the hip. The time stamp of the push is around 18.5 s in Fig. 6

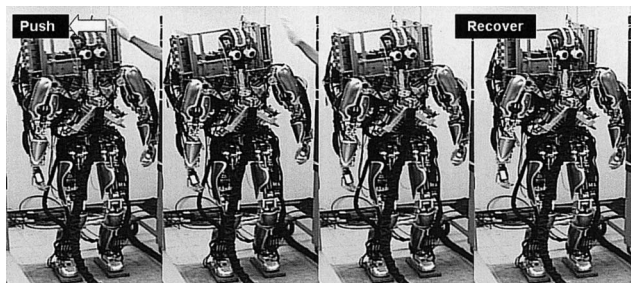


Fig. 5 Compensatory motion for a leftward push to the torso. The time stamp of the push is around 36 s in Fig. 6

いている。

上記スナップショットにちょうど対応する実験データを Fig. 6 に示す。本実験では外力は主に Y 方向に作用させているので、 Y 方向の運動に関して主要な変数のみを示している。最上段のグラフには実 CoP, 目標 CoP, 重心がプロットされている。重心の目標値は零である。また、外力が加えられたタイミングも示してある。重心が零からわずかにずれるとバランスによって目標 CoP と目標床作用力が変動し、それに応じて全身の関節トルクが発生する。結果的にその関節トルクが実際の床作用力となって実 CoP が変位する。2 段目のグラフには Base のロール角（ジャイロで計測）と Torso の屈曲・伸展角が示されており、3 段目には股関節の外転・内転角が示されている。いずれも外力と同期して変位していることが分かる。最終段のグラフは左右の床反力センサの鉛直並進成分と、その目標値を同時に示したものである。ここで目標値は各足平ごとに目標接触力の合計を符号反転したものを表示している。いずれもほぼ正確に追従していることが分かる。

本ロボットは冗長自由度を持っているが、どの関節が冗長なのかはロボットの姿勢とタスク（目標作用力）に応じて、式 (25) から決定される。逆説的に言えば、指令トルクの小さい関節がその時点で冗長な関節である。例えば腕の自由度は 3.1 節で述べた CoP 拘束下でのバランス制御においてはフィードバック項にほとんど寄与がないので、指令トルクはほとんど重力補償トルクと同程度となっている（零ではない）。そのため、Fig. 7 に示すように腕はバランス制御中でも外力に対してほとんど抵抗なく追従することができる。CoP 拘束をはずしたより高度なバランス制御では角運動量を稼ぐために腕の運動が必要となるであろう。

鉛直方向の作用力は抗重力成分のみであるため ($f_{zu} = 0$),

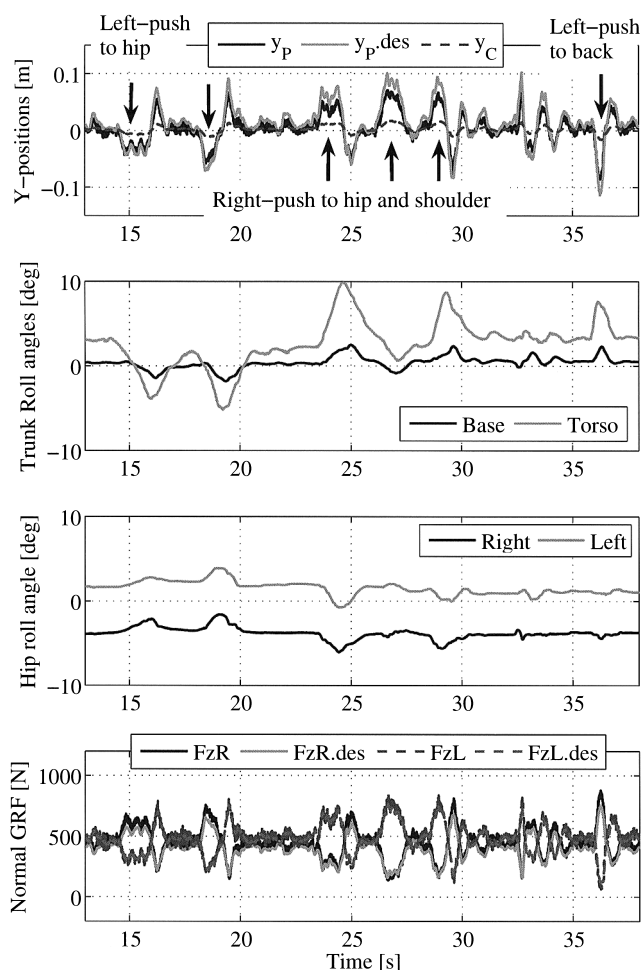


Fig. 6 Experimental data corresponding to Fig. 4 and Fig. 5. The arrows indicate the timings of the pushes. (Top) y_P and $y_{P.des}$ indicate the actual and desired CoP, respectively, which are synchronizing to CoM, y_C . (Bottom) FzR and FzL mean the normal ground reaction forces measured at the right foot and left foot, respectively, whose desired values are $FzR.des$ and $FzL.des$, resp

ロボットはバランス中でも外力によって自由に上下動を行うことができる。ただし、初期姿勢である直立姿勢においては、目標床作用力の値に関わらず、上下運動に関係する接触やコピアン J_S の全要素がほぼ零（完全に零でないのは直立姿勢で関節角にオフセットがあることによる）となるため、算出される関節トルクも零に近い。このため、Fig. 8 に示したように、直立姿勢で膝部に外力を作用させても、即座に外力に追従する。膝が動いた結果として、もし重心が目標位置からずれたならば、必要に応じて滑らかに補償トルクが発生するが、そうでなければ膝はそのまま外力に抵抗することなく追従することになる。膝が外部から動かされることにより、ロボット全体が上下運動している様子も分かる。これもバランスの効果である。先に示した Fig. 4 や Fig. 5 においてもまったく同じ原理で協働が行われている。このような自然な外力追従と協働は冗長ロボットの力制御固有の能力である。

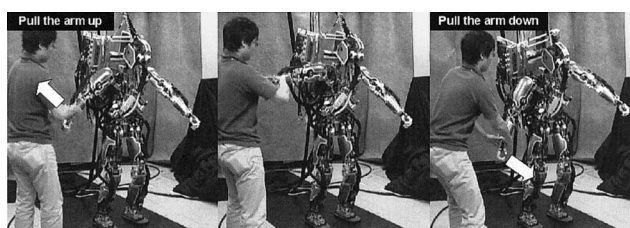


Fig. 7 Compliant upper-body movement against external forces while balancing

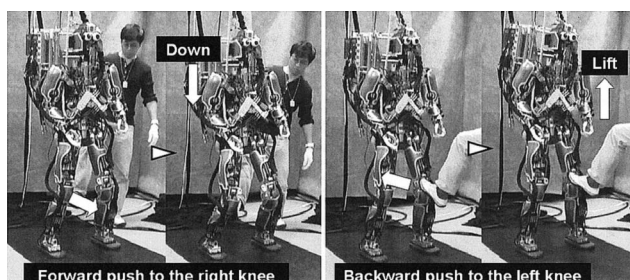


Fig. 8 Compliant knee movement against external forces while balancing

4. まとめと今後の課題

本稿では実用性を重視し、冗長関節を有する脚式移動ロボットの最も基本的な接触力制御の枠組みを提案した。バランスや歩行程度のタスクであれば十分なダイナミックレンジで接触力を望ましい値に制御できることはすでに文献[15]においてシミュレーションを通じて確認できていたが、本論文では重量が100[kg]に近い等身大のヒューマノイドロボットを用いて検証実験を行った。その結果、提案手法が関節トルクが必要とするダイナミックレンジで直接操作できることを前提として、(1)シンプルかつ実時間で動作可能で、(2)接触力情報を必ずしも必要とせず、(3)冗長問題を最適に解きながら、本論文の冒頭で挙げた制御問題A～Cを同時に達成できることが実証された。

提案手法は良好なトルク制御性が前提となっているが、本論文で用いたロボットのように力センサフィードバックによって各関節トルク制御を実装する場合、センシングコストも含めて従来の位置サーボ型の接触力制御とトータルで比較したとき、単に床反力だけを制御したいケースに限っては、コスト面で劣る場合もあり得る。それでも、全身のトルク制御を実装することで、特定の接触点に加わる接触力をいちいち計測することなしに制御できるだけでなく、その他不特定部位に加わる未知外力や不整地への自然な適応が可能となることのメリットは、高いセンシングコストを払っても余りあると考える。人間の関節のような拮抗駆動メカニズムやアクチュエータのフィードフォワードによるトルク制御技術がより発達すれば提案手法の有効性はより顕著になるであろう。

謝辞 本研究で用いたロボットは独立行政法人情報通信研究機構(NICT)が開発し、トルク制御系の実装および本論文の理論検証のために使用させていただいた。Gordon Cheng博士にはオンボードコントローラの実時間通信プログラムを提供

していただいた。中野直氏にはロボットのメンテナンスにご協力いただいた。本論文の査読者からは論文を改訂する上で大変貴重なご意見をいただいた。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 吉川恒夫：ロボット制御基礎論。コロナ社、1988。
- [2] 小菅一弘：“力制御法の分類と制御システムの設計法”，日本ロボット学会誌，vol.9，no.6，pp.751–758，1991。
- [3] 小林尚登 他：ロボット制御の実例。計測自動制御学会、1997。
- [4] A. Takanishi, T. Takeya, H. Karaki and I. Kato: “A control method for dynamic biped walking under unknown external force,” Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.795–801, 1990.
- [5] Y. Fujimoto and A. Kawamura: “Simulation of an autonomous biped walking robot including environmental force interaction,” IEEE Robotics and Automation Magazine, vol.5, no.2, pp.33–42, 1998.
- [6] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: “The development of the Honda humanoid robot,” Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.321–328, 1998.
- [7] J. Hollerbach and K. Suh: “Redundancy resolution of manipulators through torque optimization,” IEEE Journal of Robotics and Automation, vol.3, no.4, pp.308–316, 1987.
- [8] O. Khatib: “A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation,” IEEE Journal of Robotics and Automation, vol.3, no.1, pp.43–53, 1987.
- [9] 横井一仁，前川仁，谷江和雄：“冗長ロボットアームのためのコンプライアンス制御の一手法”，日本ロボット学会誌，vol.11，no.1，pp.121–130，1993。
- [10] A. Albu-Schaffer, C. Ott and G. Hirzinger: “A Unified Passivity-based Control Framework for Position, Torque and Impedance Control of Flexible Joint Robots,” The International Journal of Robotics Research, vol.26, no.1, pp.23–39, 2007.
- [11] L. Sentis and O. Khatib: “Synthesis of whole-body behaviors through hierarchical control of behavioral primitives,” International Journal of Humanoid Robotics, vol.2, no.4, pp.505–518, 2005.
- [12] R.M. Murray, Z. Li and S.S. Sastry, A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. CRC Press, 1994.
- [13] S. Arimoto: Control Theory of Non-Linear Mechanical Systems: A Passivity-Based and Circuit-Theoretic Approach. Oxford Univ Press, 1996.
- [14] S. Arimoto, H. Hashiguchi and R. Ozawa: “A simple control method coping with a kinematically ill-posed inverse problem of redundant robots: Analysis in case of a handwriting robot,” Asian Journal of Control, vol.7, no.2, pp.112–123, 2005.
- [15] S. Hyon and G. Cheng: “Passivity-based full-body force control for humanoids and application to dynamic balancing and locomotion,” Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.4915–4922, 2006.
- [16] 杉原知道，中村仁彦：“非駆動自由度の陰表現を含んだ重心やコピ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。
- [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] 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.
- [19] S. Arimoto, M. Sekimoto, H. Hashiguchi and R. Ozawa: “Natural resolution of ill-posedness of inverse kinematics for redundant robots: a challenge to bernstein’s degrees-of-freedom problem,” Advanced Robotics, vol.19, no.4, pp.401–434, 2005.

- [20] 花房秀郎, 吉川恒夫, 中村仁彦: “関節形ロボットアームの冗長性の解析とその優先順位を有する作業への応用”, 計測自動制御学会論文集, vol.19, no.5, pp.421–426, 1983.
- [21] M. Kawato: ““Understanding the Brain by Creating the Brain” towards manipulative neuroscience,” Philosophical Transactions of the Royal Society, vol.363, no.1500, pp.2201–2214, 2008.
- [22] G. Cheng, S. Hyon, J. Morimoto, A. Ude, J.G. Hale, G. Colvin, W. Scroggin and S.C. Jacobsen: “CB: A humanoid research platform for exploring neuroscience,” Advanced Robotics, vol.21, no.10, pp.1097–1114, 2007.
- [23] 梶田秀司 (編): ヒューマノイドロボット, オーム社, 2005.
- [24] 水戸部和久, 矢島克知, 那須康雄: “ゼロモーメント点の操作による歩行ロボットの制御”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.3, pp.359–365, 2000.

付録 A. 接触ヤコビアン

接触ヤコビアン J_P にベース姿勢角 ϕ が含まれる事情は式 (1) から明らかであるが, 詳細は文献 [16] を参照されたい. なお, 文献 [16] では重心速度が式 (30): $\dot{p}_G = \left\{ \frac{\partial p_G}{\partial q_0} Q + \frac{\partial p_G}{\partial \theta} \right\} \dot{\theta} + \frac{\partial p_G}{\partial q_0} v_0$ で表され, この中で $J_G := \left\{ \frac{\partial p_G}{\partial q_0} Q + \frac{\partial p_G}{\partial \theta} \right\}$ を「重心ヤコビアン」と呼んでいる. これに従えば, 本論文の接触ヤコビアンは, 文献 [16] において面接触を仮定した場合の $-J_G$ に相当する. r_P は質量情報を含むのでヤコビアンも質量配分を含む. これはたいていのロボティクスの教科書 (文献 [1] 等) に記載されているように, 回転行列を用いて幾何学的 (解析的ではなく) に導出することができる.

付録 B. 静力学的接触力制御則の導出

2.1 節において, $\gamma \approx 0$, $\hat{C} \approx 0$ のときに式 (7) と式 (8) から式 (9) が得られることを示す.

まず, 式 (6) に $\gamma \approx 0$, $\hat{C} \approx 0$ を代入し,

$$f_P \approx (\hat{E}\hat{I}^{-1}\hat{E}^T)^{-1} \{ \hat{E}\hat{I}^{-1}(u - \hat{G}) \} \quad (\text{B.1})$$

を得る. これに式 (7):

$$\tau = J_P^T(f_v + Mg)$$

を代入し, 右辺を展開すると

$$\begin{aligned} \hat{E}\hat{I}^{-1}\hat{E}^T &= \begin{bmatrix} id & J_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} id \\ J_P^T \end{bmatrix} \\ &= M^{-1} + J_P I^{-1} J_P^T \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

および

$$\begin{aligned} \hat{E}\hat{I}^{-1}(u - \hat{G}) &= \hat{E}\hat{I}^{-1} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ J_P^T(Mg + f_v) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Mg \\ 0 \end{bmatrix} \right) \\ &= \hat{E}\hat{I}^{-1}\hat{E}^T Mg + \hat{E}\hat{I}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ J_P^T f_v \end{bmatrix} \\ &= \hat{E}\hat{I}^{-1}\hat{E}^T Mg + (J_P I^{-1} J_P^T) f_v \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

を得る. 次に, 式 (B.2) と式 (B.3) から, 式 (B.1) は

$$\begin{aligned} f_P &\approx Mg \\ &+ \left(M^{-1} + J_P I^{-1} J_P^T \right)^{-1} \left(J_P I^{-1} J_P^T \right) f_v \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

となる. もし f_v を式 (8):

$$\begin{aligned} f_v &= (J_P I^{-1} J_P^T)^{-1} (M^{-1} + J_P I^{-1} J_P^T) f_u \\ &= f_u + (J_P I^{-1} J_P^T)^{-1} M^{-1} f_u \end{aligned}$$

で与えれば, 式 (9):

$$f_P \approx f_u + Mg$$

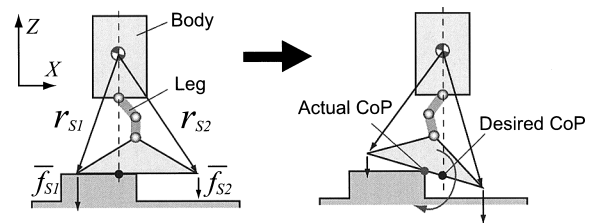
が得られる.

付録 C. 不整地適応性

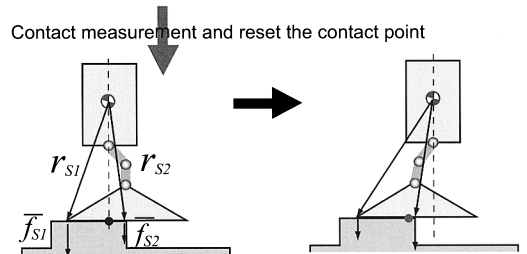
不整地適応という問題は本論文の主題ではないが, 提案手法が本来的に有している不整地適応性について, 2.4 節の最初の注意点 (N1) に関して捕捉する意味で以下簡単に述べる.

硬い平らな足平を持つロボットが不整地上に立つとき, 実際の各接触点での接触力 f_S が目標値 $\bar{f}_S$ に一致する保証はない. というのは, Fig. 2 に例示されているように, 「想定した」接触点但实际上には地面と接触しない場合があり得るからである. しかし, 実際問題として, 不整地の状況を正確に検出することは困難で, 検出できたとしてもそれに応じていちいち敏感に接触力を計算することが必ずしもよい方策とは筆者らは考えない. 以下本章では, 提案手法が環境の正確な計測や演算を行うことなく不整地に適応するための非常にシンプルな解を与えていることを簡単な例を通じて示す.

例えば Fig. 9 (a) 左図のように, 平面モデルに簡略化したロボットにおいて, 重力補償が行われていると仮定し, 足平 (剛体) の一部が硬い段の上に乗った場合を考えよう. ここでは接触点ベクトル r_{S1} , r_{S2} は足平の両端に固定されたままと



(a) Gravity compensation for pre-set contact points



(b) Gravity compensation for the re-set contact points

Fig. 9 Simple illustration of compliant ground adaptation

ているが、このうち実際に路面に接触しているのは r_{S1} の点のみとなっている。もし Fig. 9 (a) 右図のように重心が X 方向に動いたとしよう。このとき重心の投影点は段差から離れてしまうが、実際の CoP は段差の角から離れることはないで、CoP の不一致による回転モーメントで足平が回転する。そして今度は、 r_{S2} の端が地面に接地し、 r_{S1} は接触を失うことになるであろう。このような挙動はある種「自然な」倣い動作と言える。重力補償に加えてバランス制御を行う場合は、目標 CoP（重心投影点ではない）と実際の CoP に応じて路面への接触状況が変化する。

次に、足裏の接触センサを使って床反力分布を測定できると仮定する。このとき、Fig. 9 (a) 左図の状態でロボットは段差を感じ取り、例えば Fig. 9 (b) 左図のように r_{S2} を接触領域の端に設定しなおすことができる。この場合、設定した接触点における接触力をほぼ正確に制御することができ、これも一種の不整地適応であると言える。しかしこの場合、Fig. 9 (b) 右図のように重心の投影点が段差から離れた後も相変わらず目標 CoP が段差の上に留まりつづけるため、Fig. 9 (a) のような倣いは行われない。

上記 Fig. 9 (a), (b) のどちらがよいかについては、具体的なタスク目標を含めたさらなる研究が必要である。しかし、はっきりしているのは、Fig. 9 (a) はセンサレスであり、Fig. 9 (b) はセンサの実装・運用に加えて接触点決定ルールが必要になるという事実である。なお、Fig. 9 (a), (b) いずれの場合も、足平全体にかかる実際の並進力は各目標接触力の合力と釣り合っており（不整地適応後はモーメント零となるため）、 f_P のみならず、接触力の各足単位での合力も、その目標値に制御されることに注意する。本論文では不整地適応に関しては Fig. 9 (a) が基本的と考え、こちらを優先的に実現している。

付録 D. バランス制御の概要

3 章の実験で用いたバランス制御について本付録で簡単に述べる。バランス制御の目的は重心の漸近安定化である。重心の位置 r_C は Fig. 1 に示したように、本来絶対座標系で定義されているが、バランス制御の場合、絶対座標の原点を支持領域中心に設定している。その結果、足が滑るなどして支持状態が変化しても、変化する支持領域の中心が常に安定化目標となる。

ゼロモーメントポイント (ZMP [23]) を $r'_P = [x'_P, y'_P, z'_P]$ で表す。本論文では複雑な非線形補償演算を避けるということが基本方針としてあるため、重心周りの角運動量の時間変化が小さい範囲でのバランス制御を考える。そのため、次のような単純化された ZMP を用いる[†]。

$$\begin{aligned} x'_P &= \frac{z_P m \ddot{x}_C}{m(\ddot{z}_C + g)} = \frac{z_P f_{xP}}{f_{zP}}, \\ y'_P &= \frac{z_P m \ddot{y}_C}{m(\ddot{y}_C + g)} = \frac{z_P f_{yP}}{f_{zP}} \end{aligned} \quad (D.5)$$

そして、重力補償の式 (10) を組み合わせて、目標とする ZMP $\bar{r}_P$ を

$$\bar{x}'_P = \frac{z_P f_{ux}}{mg + f_{uz}}, \quad \bar{y}'_P = \frac{z_P f_{uy}}{mg + f_{uz}} \quad (D.6)$$

のように与える。なお、 $z_P = -z_C$ である。

次に、ユーザー設定力 f_u の内、水平成分を次のような簡単な PD 形式のフィードバック制御で与える。

$$f_{ux} = -K_{PC}x_C - K_{DC}\dot{x}_C \quad (D.7)$$

$$f_{uy} = -K_{PC}y_C - K_{DC}\dot{y}_C \quad (D.8)$$

$K_{PC}, K_{DC} > 0$ は PD ゲインである。一方、鉛直成分 f_{uz} は簡単のため零とおく。しかし、このように定めた f_u によって、目標 ZMP が支持領域から出ることもあり得る。接触力分配則である式 (22)~(24) が有効に働くためには、支持領域からはみ出た目標 ZMP を支持領域内に引き戻す必要がある。これは水平 GAF (f_{ux} および f_{uy}) または鉛直 GAF (f_{uz})、あるいは双方を修正することで達成できる。本論文では単に水平 GAF を調整している（式 (D.6) から計算できる）。そして、このように修正された目標 ZMP を目標 CoP と定める。すなわち、目標 CoP を

$$\bar{r}_P = \bar{r}'_P \quad (D.9)$$

とおく。最後に、修正された $\bar{f}_P$ と $\bar{r}_P$ を使って、最適目標接触力 $\bar{f}_S$ を式 (22)~(24) から求める。簡単な質点モデルを用いたバランス制御の解説が [24] にあるので、合わせて参照されたい。

もう少し説明を加えると、単なる重力補償の場合は $\bar{f}_{xP} = \bar{f}_{yP} = 0$ となる。もし重心の地面への投影点が支持領域内にある場合、 $\bar{x}_P = \bar{y}_P = 0$ となり、目標 CoP は重心の投影点と一致し、重心は等速直線運動を行う。もし投影点が支持領域内がない場合は重心は倒立振子のダイナミクスに従って加減速する。

2.1 節で述べたように、提案手法では内部運動を安定化するための補償を行っているため、重心周りの角運動量の変化も抑制される。したがって、このような状況では、上述のように重心周りの角運動量変化を微小として無視したシンプルなバランスを用いることは理にかなっている。

[†]厳密な ZMP の計算には角運動量の時間変化の項が加えられる [23]。



玄 相昊 (Sang-Ho Hyon)

1998 年 3 月早稲田大学大学院修士課程修了（機械工学）。2002 年 3 月東京工業大学大学院博士後期課程修了（制御工学）。同年 4 月東北大学大学院工学研究科助手、2005 年 1 月講師となる。2005 年 4 月から ATR 脳情報研究所研究員兼 JST 国際共同研究事業 ICORP 計算脳プロジェクト研究員となり、現在に至る。非線形力学系に基づく運動制御理論、ヒューマノイドロボット、運動補助ロボットの開発等に從事する。1997 年 ROBOMECH 賞、1999 年 ICRA Best Paper Award Finalist、2008 年日本ロボット学会研究奨励賞受賞。博士（工学）。日本神経科学会、IEEE の正会員。（日本ロボット学会正会員）