

即応的離散・連続制御の併用による二脚ロボットのロバスト誘導システム

山本孝信 (阪大), 杉原知道 (阪大)

Robust Navigation System of a Biped Robot On the Combination of Responsive Discrete-Continuous Control

Takanobu Yamamoto(Osaka University), and Tomomichi Sugihara(Osaka University)

Abstract : A navigation system for biped robots is proposed, where a responsive discrete stepping control and a continuous COM control are combined. The former guarantees leg-crossing-free and deadlock-free locomotion, while the latter is trajectory-free and thus is flexible to disturbances. They run at the rate of miliseconds, so that it is robust against sudden reorientations and perturbations.

1. はじめに

脚ロボットには、複雑環境で様々な状況変化や外乱に耐えながら移動する能力が求められている。前者は両足の干渉やデッドロックを起こさず速やかに次の踏み出し位置を決定する必要がある。後者は狭い軸足の裏で地面から受ける反力を巧みに操り重心を推進しながら、反対脚を着地した直後速やかに安定性を回復しなければならない。

Nishiwaki ら [1] はセンサで取得した実際のロボットの状態を反映しながら、Kajita ら [2] の方法によって重心-ZMP 軌道を 20ms 周期でオンライン計画し、ある程度の外乱を吸収する方法を提案した。これによりロボットに様々な不整地を踏破させることに成功している。また Herdt ら [3] は、モデル予測制御を用いて踏み出し位置と重心-ZMP 軌道を同時にオンライン計画する方法を開発し、操縦デバイスを用いてロボットの目標進行方向をリアルタイムに変更しても誘導可能であることを示した。しかしこれらの方法では軌道計画に要する計算時間がボトルネックとなり、即応性をそれほど向上できていない。

本稿では、軽量の踏み出し位置決定器 (離散制御器)[4] と ZMP 操作による重心制御器 (連続制御器)[5] を併用した新たな二脚ロボット誘導システムを提案する。前者は、目標到達地をどのように与えてもロバストにそこに到る (干渉やデッドロックを生じない) 踏み出し位置を即座に決定する。また後者では、詳細な目標軌道を計画し追従させるのではなく、踏み出し足着地時の立位安定性 [6] を満たすことのみを規範としてリアルタイムに ZMP の操作量を決定する。動作に課せられる条件を可能な限り削減し、外乱へのロバスト性を高めている。それぞれに高い即応性を有する上記の二者を数 ms 周期で同時に実行することで、任意のタイミングで目標到達地を変更した際に動作継続できること、およびその限界を、シミュレーションにて示す。

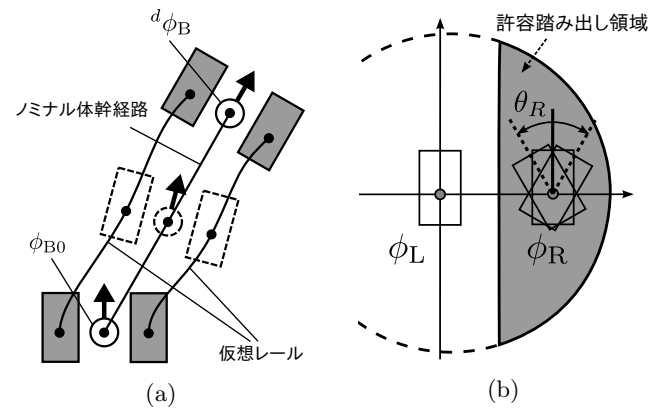


Fig. 1: Kobayashi ら [4] の提案した踏み出し位置決定器 : (a) ノミナル体幹経路に沿った正準配置の軌跡 (仮想レール), (b) 許容踏み出し領域

2. 仮想レールに基づくロバスト踏み出し位置決定器

本節では、Kobayashi ら [4] の提案した踏み出し位置決定器について説明する。これは、目標到達地と現在の支持状態から最適な一歩を決定する離散制御器として機能する。

簡単のため、水平面上の移動のみを考える。なお、本方法の 3 次元空間への拡張は既に Shimizu ら [7] によりなされている。任意の身体部位配位 ϕ を次のように定義する。

$$\phi = \{x, y, \theta\} \quad (1)$$

ただし、 (x, y) は身体部位の水平面内座標、 θ は方位角である。体幹および左右足の配位をそれぞれ $\phi_B = \{x_B, y_B, \theta_B\}$, $\phi_L = \{x_L, y_L, \theta_L\}$, $\phi_R = \{x_R, y_R, \theta_R\}$ とおこう。体幹の目標到達配位 ${}^d\phi_B$ が与えられたときに、一歩後の両足配位 ϕ_L^* , ϕ_R^* を決定することがここでの目的である。

まず、現在の体幹配位 ϕ_{B0} と ${}^d\phi_B$ を滑らかに接続するノミナル経路を決定する。障害物が存在しない開けた環境

であれば，例えば次の線形補間によって決定すれば良い．

$$\phi_B(s) = s^d \phi_B + (1-s)\phi_{B0} \quad (0 \leq s \leq 1) \quad (2)$$

ただし， s は媒介変数である．これに対し図 1(a) のように，左右それぞれの足が沿うべき経路 (仮想レール) $\phi_L(s)$ ， $\phi_R(s)$ を次式で定義する．

$$\begin{bmatrix} x_L(s) \\ y_L(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_B(s) \\ y_B(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_B(s) & -\sin \theta_B(s) \\ \sin \theta_B(s) & \cos \theta_B(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{LC} \\ y_{LC} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\theta_L(s) = \theta_B(s) + \theta_{LC} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_R(s) \\ y_R(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_B(s) \\ y_B(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_B(s) & -\sin \theta_B(s) \\ \sin \theta_B(s) & \cos \theta_B(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{RC} \\ y_{RC} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\theta_R(s) = \theta_B(s) + \theta_{RC} \quad (6)$$

ただし， $\phi_{LC} = \{x_{LC}, y_{LC}, \theta_{LC}\}$ ， $\phi_{RC} = \{x_{RC}, y_{RC}, \theta_{RC}\}$ は直立時の左右足それぞれの正準配位であり，典型的には $\phi_{LC} = \{0, w, 0\}$ ， $\phi_{RC} = \{0, -w, 0\}$ とすれば良い．ただし $2w$ は直立時の左右足開き幅である．

各々の足を軸足とした際の反対足の許容踏み出し領域を，図 1(b) のように設定する．この決め方には，例えば Perrin ら [8] の方法がある．踏み出し足を常に許容踏み出し領域上にとれば，両足干渉やデッドロックが生じないことが保証される．二つの許容踏み出し領域と仮想レールの共通部分の上で，媒介変数の値が最大となる点を次の踏み出し位置，その点を与える足を踏み出し足，反対足を軸足とする．従来方法と異なり，左右足を交互に踏み出すという制約をおかないので， ${}^d\phi_B$ をいかように与えても破綻しない口バスタな支持状態遷移が達成される．

3. 着地時の立位安定性を保証する運足誘導型二脚制御

本節では，杉原 [5] の提案した運足誘導型二脚制御を改良した方法を説明する．これは，目標踏み出し位置および踏み出し時間が与えられた下で，摂動を吸収しながらそこに到るための ZMP 操作量をリアルタイムに決定する連続制御器として機能する．

ロボットを重心-ZMP モデル [9] で近似すると，運動方程式は次式となる．

$$\ddot{x} = \zeta^2(x - x_Z) \quad (7)$$

$$\ddot{y} = \zeta^2(y - y_Z) \quad (8)$$

$$\zeta \equiv \sqrt{\frac{g}{z - z_Z}} \quad (9)$$

ただし， (x, y, z) は重心位置， (x_Z, y_Z, z_Z) は ZMP 位置， g は重力加速度である． z_Z はノミナル地面高さで適当に与え

る． x_Z, y_Z を操作することで x, y を制御可能である．式 (7),(8) は対称であるので，以降は式 (7) のみ考える．たとえば右足を軸足とし左足を前方へと踏み出す際には，重心が軸足を越えられるよう加速しながら ZMP を軸足に遷移させなければならない．踏み出しの間に重心が不安定化することは，むしろ必要条件である．そこで，ZMP を軸足近傍に移動させ，軸足裏に入った時点で反対足を離床させ，反対足を目標踏み出し位置へと運び，着地の瞬間に立位安定性が回復されるというプロセスを達成するよう ZMP を操作する制御器を設計する．これは次の最小化問題を解くことに帰着される．

$$x_Z = \arg \min_{x_Z} \frac{1}{2} \int_t^{t+T} (x_Z - x_P)^2 dt$$

$$\text{subject to } x(t+T) + \frac{\dot{x}(t+T)}{\zeta} = {}^d x_S \quad (10)$$

ただし， T は踏み出し時間， ${}^d x_S$ は目標踏み出し位置， x_P は軸足の位置 (時刻 $t \sim t+T$ で不変とする) である．これを解けば次式を得る．

$$x_Z = x_P - \frac{2e^{\zeta T}}{1 - e^{2\zeta T}} (e^{\zeta T} x_{CP} - {}^d x_{SP}) \quad (11)$$

$$x_{CP} \equiv x + \frac{\dot{x}}{\zeta} - x_P \quad (12)$$

$${}^d x_{SP} \equiv {}^d x_S - x_P \quad (13)$$

踏み出し足の制御については様々な方法が考えられるが，ここでは簡単な加速度最小規範に従い，時間 T 経過後に足先を目標踏み出し位置 ${}^d x_S$ へと滑らかに到達させる．足先の運動は，次の簡略化された運動方程式に従うものとする．

$$\dot{x}_S = a_{Sx} \quad (14)$$

ただし， a_{Sx} は踏み出し足の x 軸方向加速度である．次の最小化問題を解くことで，制御入力 a_{Sx} を決定する．

$$a_{Sx} = \arg \min_{a_{Sx}} \frac{1}{2} \int_{t+T_L}^{t+T} a_{Sx}^2 dt$$

$$\text{subject to } x_S(T) = {}^d x_S, \quad \dot{x}_S(T) = 0 \quad (15)$$

実際にこれを解くと，次式を得る．

$$a_{Sx} = \frac{6}{T} \left(\frac{{}^d x_S - x_S}{T} - \frac{2\dot{x}_S}{3} \right) \quad (16)$$

4. 離散・連続制御の併用による二脚ロボット誘導システム

上述の離散制御器，連続制御器を併用することで，図 2 のブロック線図に示す二脚ロボット誘導システムを構成する．式 (11) で決まる ZMP から目標重心位置 x^* が，式 (16) から目標踏み出し足位置 x_S^* がそれぞれ決まる．これ

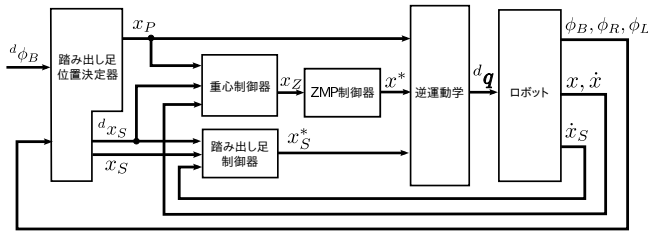


Fig. 2: 二脚ロボット誘導システムのブロック線図

に軸足位置 x_P を合わせて逆運動学を解くことにより，全関節の目標変位が求まる．モータをサーボ制御することによりロボットの全身運動が生成される．

離散制御器および連続制御器は極めて軽量である（マイクログラフで計算が完了する）ので，ボトルネックは逆運動学ソルバのみである．筆者ら [10] の実装ではこれを含めて 1 サイクルが 1ms で完了するため，即応的なシステムとなっている．

5. シミュレーションによる試験

前節のシステムを実装し，順動力学シミュレーションにて動作を確認した．ロボットのモデルには mighty[11] を用いた．制御器の各パラメータは $w = 0.06\text{m}$ ， $T = 0.8\text{s}$ とした．障害物の無い水平な地面を仮定し，初期配位を $\phi_{B0} = \{0, 0, 0\}$ とし，次のように目標体幹配位を与えた．ただし，位置の単位は m，角度の単位は deg である．

$$\begin{aligned} 0 \sim 2.5\text{s} &: \{0.2, -0.2, -22.5\} \\ 2.5 \sim 6.5\text{s} &: \{0.4, 0.1, 22.5\} \\ 6.5\text{s} \sim &: \{0.7, -0.1, -22.5\} \end{aligned}$$

生成された動作のスナップショットを図 3 に，このときの x - y 平面上の重心，ZMP，運足の軌跡を図 4 にそれぞれ示す．変化する目標到達配位に従って，歩行を継続できていることが分かる．運動中の振動により目標踏み出し位置が微小変化しているが，動作継続に影響は無かった．

次に，初期の目標到達配位を $\{0.25, 0, 0\}$ とし，動作開始後 2.0s(3 歩目途中) に $\{0.25, -0.25, -90\}$ に変更したときの結果 (x - y 平面上軌跡) を図 5 に示す．3 歩目を踏み出す途中で進行方向を修正し，目標地点に到達できた．

さらに，上記と同じ初期条件で，動作開始後 2.2s(3 歩目途中) に目標到達配位を $\{0.25, -0.25, -90\}$ に変更した．結果 (x - y 平面上軌跡) を図 6 に示す．この例では，重心の加速が間に合わず転倒した．ZMP に課せられる制約から，着地までの残り時間に対する目標踏み出し位置の変更量には限界がある．Herdt ら [3] の方法ならばこれを考慮可能であるが，計算の重さが問題となる．許容踏み出し領域を残り時間に応じて動的に変更する等の工夫が必要と考える．

6. おわりに

筆者らが先に開発した離散制御器および連続制御器を併用し，目標到達地の変更や運動中の振動に対してロバストな二脚ロボット誘導システムを開発した．どちらも軽量な計算で実装されるので，即応的なシステムを構成することができる．シミュレーションにより，実際に目標到達地を急変更した際にも対応できること，ただし着地までの残り時間が過度に短い場合にはロボットが転倒に到る可能性があることが分かった．

本研究は，文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B)(課題番号:#15H02762) および文部科学省科学研究費補助金挑戦的萌芽研究 (課題番号:#26540135) の支援を受けた．

参考文献

- [1] K. Nishiwaki and S. Kagami. Online Walking Control System for Humanoids with Short Cycle Pattern Generation. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 28, No. 6, pp. 729–742, 2009.
- [2] S. Kajita et al. Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1620–1626, 2003.
- [3] A. Herdt et al. Online Walking Motion Generation with Automatic Footstep Placement. *Advanced Robotics*, Vol. 24, No. 5–6, pp. 719–737, 2010.
- [4] H. Kobayashi and T. Sugihara. Self-consistent Automatic Navigation of COM and Feet for Real-time Humanoid Robot Steering. In *Proceedings of 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3525–3530, 2009.
- [5] 杉原知道. 着地時の立位安定性を保証する二脚ロボットの運足誘導型制御. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 予稿集, 2A1-12b5, 2016.
- [6] Tomomichi Sugihara. Standing Stabilizability and Stepping Maneuver in Planar Bipedalism based on the Best COM-ZMP Regulator. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1966–1971, 2009.
- [7] Y. Shimizu and T. Sugihara. Efficient Path Planning of Humanoid Robots with Automatic Conformation of Body Representation to the Complexity of Environments. In *Proceedings of 2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 755–760, 2012.
- [8] N. Perrin et al. On the Problem of Online Footsteps Correction for Humanoid Robots. 第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3O1-04, 2009.
- [9] K. Mitobe, G. Capi, and Y. Nasu. Control of walking robots based on manipulation of the zero moment point. *Robotica*, Vol. 18, pp. 651–657, 2000.
- [10] Tomomichi Sugihara. Solvability-Unconcerned Inverse Kinematics by the Levenberg-Marquardt Method. *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 27, No. 5, pp. 984–991, 2011.
- [11] T. Sugihara, K. Yamamoto, and Y. Nakamura. Hardware design of high performance miniature anthropomorphic robots. *Robotics and Autonomous System*, Vol. 56, pp. 82–94, 2007.

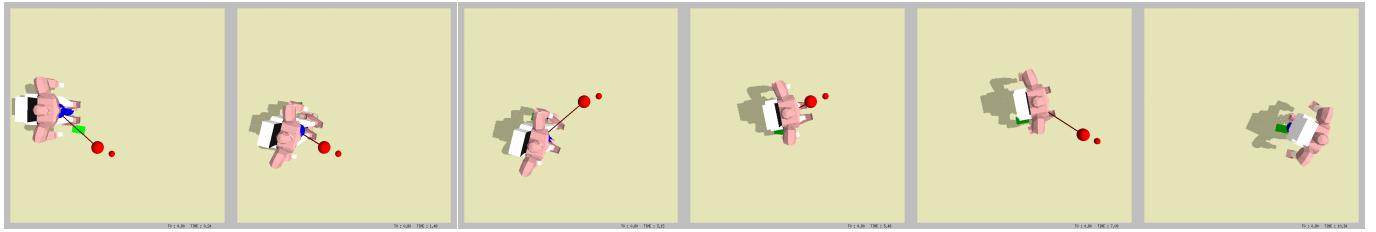
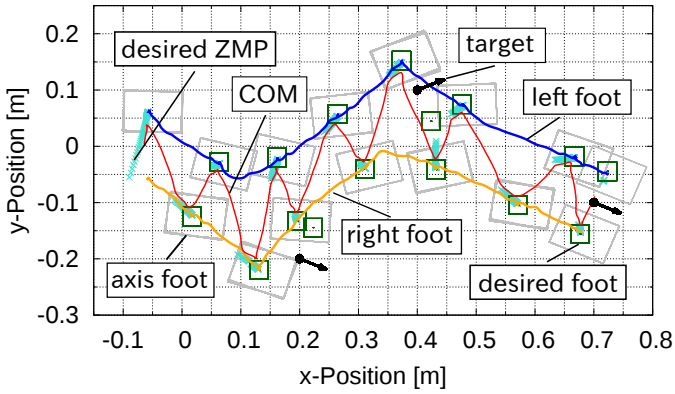
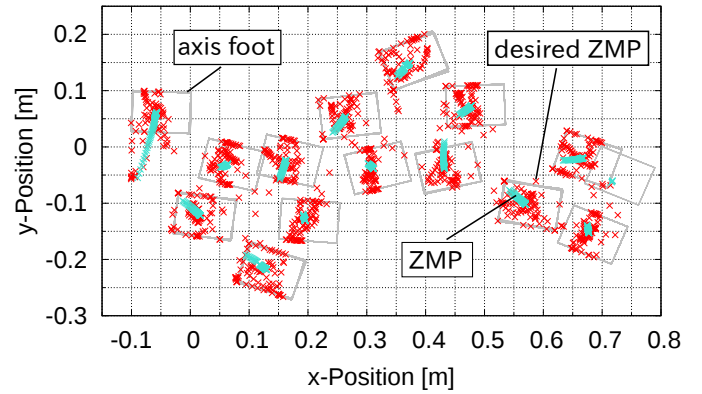


Fig. 3: 生成された動作のスナップショット (赤丸：目標到達配位, 緑四角：目標踏み出し位置, 赤線：現在の重心位置と目標到達位置を結ぶ線)



(a) 目標到達配位, 目標踏み出し位置, 目標 ZMP, 重心の軌跡, 運足の軌跡



(b) 目標 ZMP と実際の ZMP

Fig. 4: $x-y$ 平面上の重心, ZMP, 運足の軌跡

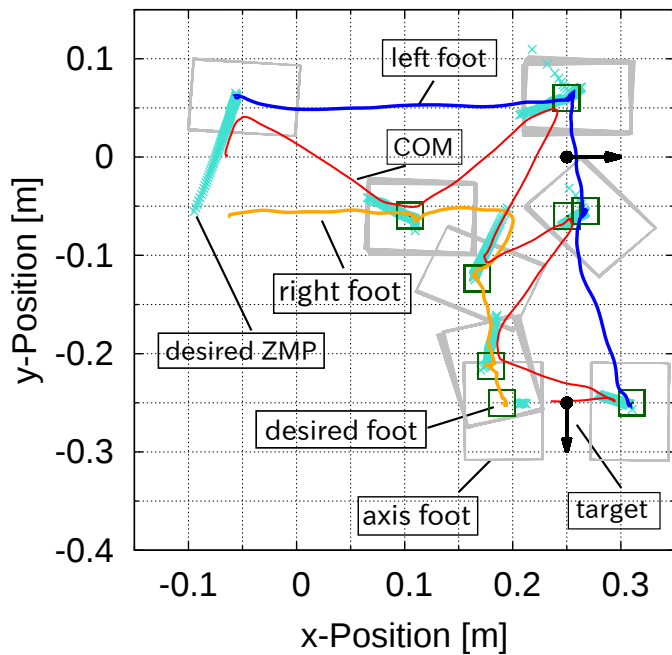


Fig. 5: 踏み出し成功例 (2.8s に目標到達配位を変更)

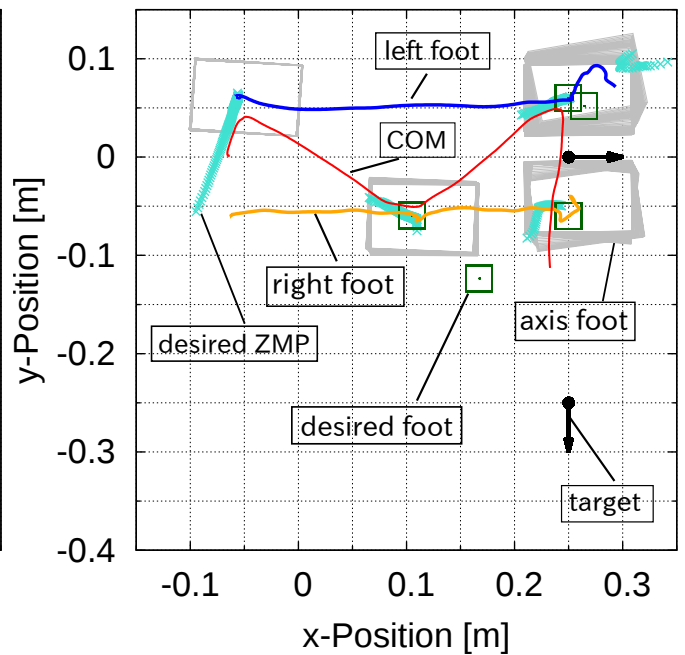


Fig. 6: 踏み出し失敗例 (3.0s に目標到達配位を変更)