

エネルギーの蓄積・開放による力学的技量の実現

Skill of Compliance via Control of Charging/Discharging of Kinetic Energy

伴 茂樹 岡田 昌史 中村 仁彦 (東京大学)

Shigeki BAN, Masafumi OKADA and Yoshihiko NAKAMURA

Univ. of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, JAPAN

Abstract: Use of compliance in muscle is the inherent skill of a human. By using the potential energy charged in the compliant members, we skillfully equalize the characteristics of muscles and body, and obtain higher mobility, dexterity and safety. Integration of the skill of compliance will provide robots with those abilities. The main research issue of the skill of compliance is synchronization of dynamics of a robot and its motion. In this paper, we propose the control algorithm for skill of compliance by the model-based control and the neural oscillator. In the simulation of hopping robot, we show the effectiveness of the skill of compliance through the continuous hopping.

Key Words: Skill of compliance, Passive compliance, Humanoid robot, Motion planning

1 はじめに

人間は、力学特性を活かした動作によって、機動性、器用さ、安全性を獲得している [1]。身体の特性を活かし、環境や目的に適した行動を実現する能力を、ここでは力学的技量 [2] と呼ぶ。ロボットの力学的技量の実現は、ロボットの運動特性を向上させ、目標軌道による運動だけでは不可能であった動作を実現する可能性を秘めている。このような技量を実現するためには、アクチュエータとロボットの力学特性の協調が重要である。

本研究は、柔軟性をもつロボットの力学的挙動と運動パターンの同期に着目し、力学的技量の実現法を検討する。三質量ホッピングロボットの跳躍動作のシミュレーションに基づいて、力学的エネルギーを効率よく遷移させる跳躍動作パターンの獲得と制御則の設計を行う。

2 跳躍動作の解析

2.1 ホッピングロボット

これまで様々なホッピングロボットの研究が行われている [3]、本研究では、Fig.1 左に示すようにバネ下質量をもつロボットが床の上で跳躍を続ける動作を考える。3つの質点が鉛直に並び、下から順に質点1, 2, 3とし、質量を m_1, m_2, m_3 、位置を x_1, x_2, x_3 とおく。それぞれの原点を床、床からバネの自然長 L_1 上方、さらに L_2 上方にとる。質点1と2はバネ(バネ定数 K)で、質点2と3は鉛直方向に動くアクチュエータで結合され、その駆動力を f とする。すべての粘性は考えない。床と質点1は完全弾性衝突し、質点同士は衝突しないとす。この力学系の運動方程式は次式で表される。

$$m_1 \ddot{x}_1 = m_1 g - K(x_1 - x_2) + N \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = m_2 g + K(x_1 - x_2) + f \quad (2)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 = m_3 g - f \quad (3)$$

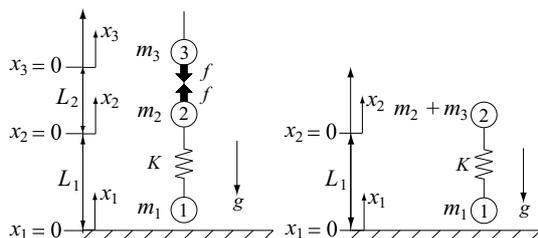


Fig. 1: Hopping robots with passive compliance

ここで、 g は重力加速度、 N は床反力である。このホッピングロボットが、力学的エネルギーがほぼ一定で、位置エネルギーの占める割合が跳躍の頂点で大きい動作(高い跳躍)を連続的に行うことを目標とする。

2.2 跳躍動作の解析

簡単のために質点2と3が一体となった Fig.1 右の力学系で跳躍動作を解析する。この力学系の運動は、次のようにまとめられる。

- 質点1, 質点2(Fig.1 右)の重心は放物運動する。跳躍中と呼ぶ。
- 直前まで跳躍しており $x_1 = 0$ となった瞬間を着地と呼ぶ。質点1は床と完全弾性衝突する。
- 質点1はバネによって下に押さえられ、床との衝突を繰り返す。質点2はバネによって上向きの力を受け上向きに運動の方向を変える。着地中と呼ぶ。
- バネの長さが自然長に近づき、質点1が、質点2とともに上向きに運動し始める。離陸と呼ぶ。

このとき、高い跳躍が連続するか否かは、ロボットの力学特性と力学的エネルギー量に強く依存する。また、離陸時にバネが自然長に近いとき、高く跳躍することが観察された。これは跳躍中の力学的エネルギーを跳躍に費やされるエネルギーとバネ振動のエネルギーに分割することができ、離陸時に歪みが小さいとき前者が大きくなるためである。

3 同期による連続跳躍動作の実現

3.1 力学系の解析に基づく強制引き込み制御

Fig.1 左の三質量ホッピングロボットにおいて、ロボットの力学特性や力学的エネルギー量に関わらず連続跳躍動作を実現するための制御則を設計する。質点2と3の相対位置を大きく変化させないために、アクチュエータを次式のコントローラによって制御する。

$$f = K_p(x_2 - x_3) + K_d(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) \quad (4)$$

ここで、 K_p, K_d は定数である。次に、着地期間(c)の間、コントローラを以下のように切り替え、

$$f = K_p\{a(x_2 - x_{2l}) - (x_3 - x_{2l})\} + K_d(a\dot{x}_2 - \dot{x}_3) \quad (5)$$

離陸の瞬間にバネが自然長になるように同期をとる。ここで、 x_{2l} は着地の瞬間の x_2 の値であり、 $x_2 = x_{2l}$ が

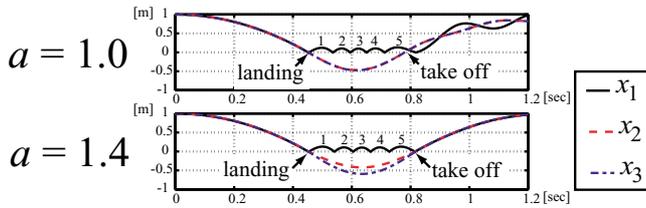


Fig. 2: Change of motion via controller

つ $\dot{x}_2 \geq 0$ となったとき式 (4) にコントローラを戻す. a が設計パラメータであり, a を適当な値とすることで連続跳躍動作を実現する.

Fig.2に a による着地中の動作の変化を示す. $a = 1$ (上図) では, 離陸の瞬間に x_1 と x_2 が大きくずれており, バネが自然長でなく, 高く跳躍しない. これに対し, $a = 1.4$ (下図) では, 離陸の瞬間に $x_1 \simeq x_2$, $\dot{x}_1 \simeq \dot{x}_2$ より, バネが自然長となり高い跳躍が実現される. これは (c) の動作中に式 (5) のコントローラが, 質点3を動かすことで質点2と質点3の重心の動作パターンが変化し, 離陸時の同期をとっていることによるものである. 着地の瞬間の力学系の状態から, 床と質点1の衝突回数, 着地期間を推定することによって a の値を決定し, 離陸時の同期を実現した. ここで推定, a の決定はパラメータ同定によって実現した.

Fig.3に同期制御を導入する前の運動 (左図) と導入後の運動 (右図) のシミュレーション結果を示す. 上段は質点の動作のグラフ, 下段は力学的エネルギーと位置エネルギーのグラフである. 同期制御導入前は, 6回の跳躍のあと高く跳躍できないが, 同期制御によってエネルギーを効率よく遷移させた連続跳躍動作を実現した.

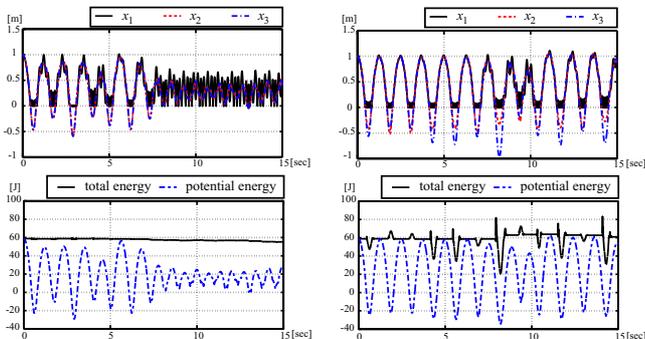


Fig. 3: Hopping motion and kinetic energy

3.2 神経振動子による相互引き込み制御

神経振動子は, 順応神経素子を相互抑制的に対にした基本構造を持つ. 松岡 [4] の順応神経素子は次式のような1階微分方程式で表される.

$$\tau \dot{\xi}_i = -\xi_i - \beta v_i + \sum_{j=1}^n (\omega_{ij} y_j) + u_0 + s_i \quad (6)$$

$$\tau' \dot{v}_i = -v_i + y_i \quad (7)$$

$$y_i = \max(0, \xi_i) \quad (8)$$

ここで, $[\cdot]_i$ は i 番目の神経素子を表す. ξ_i, v_i は状態変数, u_0 は一定入力, s_i はセンサ入力, y_i は出力である. また, $\tau, \tau', \omega, \beta$ は定数である. 単位神経振動子は, 2つの神経素子の結合により形成され, 全定数で決まる

神経振動子の固有振動数とセンサ入力 s_i の振動数が充分近いとき, 状態変数 ξ_i は s_i と同期する性質を持つ.

三質点ホッピングロボットに単位神経振動子を適用する. ここでは, ロボットの力学的挙動と神経振動子が相互引き込みを起こし, 常に同じ状態で着地することにより一定リズムの跳躍動作を実現する. $s_1 = x_2$, $s_2 = x_1 - x_2$ とし, 各定数と u_0 はロボットの力学特性と力学的エネルギー量を考慮して人間が設定した. 質点3の目標値 x_{3r} とアクチュエータの駆動力 f を次式のように決定した.

$$x_{3r} = x_2 + \xi_2 \quad (9)$$

$$f = K_p(x_{3r} - x_3) + K_d(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) \quad (10)$$

神経振動子を用いた跳躍動作のシミュレーション結果を Fig.4に示す. 左上図は質点の動き, 右上図は神経振動子の状態の変化, 下図は力学系のエネルギーの変化を表す. 跳躍中に $s_1 = x_2, s_2 = x_1 - x_2$ が ξ_1, ξ_2 に作用し, それが質点3に伝わる. そしてロボットの力学的挙動, 動作パターン, 神経振動子が相互引き込みを起こす. その結果, 着地の瞬間 (4.4, 5.7[sec] 付近) で三質点の動きがほぼ一致し, 連続跳躍動作を実現した.

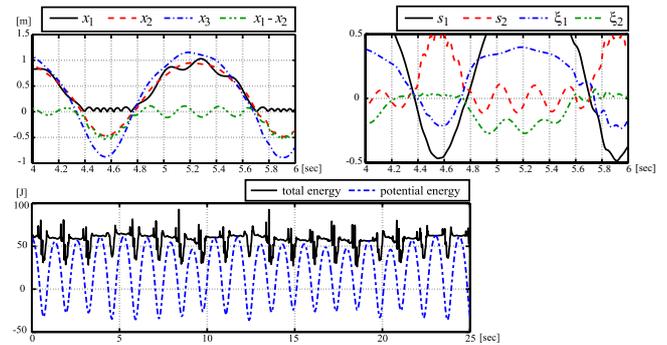


Fig. 4: Hopping motion via the neural oscillator

4 おわりに

本研究では, 以下の結果を得た.

- ロボットの力学的挙動と動作パターンの同期を, 力学的技量の設計法とすることを提案した.
- 力学系の解析に基づく強制引き込み制御と神経振動子を用いた相互引き込み制御によって, 三質点ホッピングロボットの力学的挙動に適合した運動パターンで連続跳躍動作を実現できることをシミュレーションで検証した.

なお, この研究は日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業 (JSPS-RFTF96P00801), 科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業 (CREST) の支援を受けた.

参考文献

- [1] 山崎, 長谷: 自由歩行における歩調・歩幅の生体力学的決定基準, バイオメカニズム 11, pp.179-190, 1992
- [2] 伴, 岡田, 中村: エネルギーの蓄積・開放を伴う力学的技量の実現, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1081-1082, 2001
- [3] 中野, 大久保: 跳躍ロボット全般について, 日本ロボット学会誌, Vol.11m No.3, pp.342-347, 1993
- [4] Kiyotoshi, Matsuoka: Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptation, Biological Cybernetics, Vol.52, pp.367-376, 1985