CPG による 6 脚ロボットのホッピング運動

Hopping motion of a 6-legged robot using CPG

○ 学 池田 将晃 正 渡辺 桂吾 (岡山大) 正 泉 清高 (佐賀大)

Masaaki Ikeda, Keigo Watanabe, Okayama University

Kiyotaka Izumi, Saga University

Legged robots have some advantageous features of the movement in rough terrain. One of advantages is the obstacle avoidance with three-dimensional motions. However, the avoiding area is limited to the movable place depended on leg mechanisms of a robot. In this paper, we introduce a jumping mechanism to each leg, because the jumping motion improves the movable area. The central pattern generator (CPG) is discussed in order to realize a hopping motion. The generated hopping motion is performed using the dynamics simulator OpenHRP3.

Key Words : Hexapod Robot, Central pattern generator network Jumping robot, OpenHRP3

1. はじめに

不整地で作業をするロボットに関する研究開発が展開されている。不整地の移動には、三次元的な障害物回避が可能な脚式の移動ロボットが有効である [1]。実用上の難点は、脚式ロボットが三次元的に回避可能な障害物の大きさは脚の可動範囲に依存することである。踏破性あるいは障害物回避能力を拡大させる方法として、ジャンプ動作の導入が考えられる [2]。さらに、ホッピング運動をさせると、移動速度向上も期待できる。

また、歩行などの生物の周期的な動作を制御するための神経回路として中枢パターン発生器 (Central Pattern Generator; CPG) がある。この神経回路内のニューロン間の順応メカニズムをモデル化したものを神経振動子という。ニューロン間の結合や内部パラメータにより神経振動子からは複雑な周期信号が得られる。脚式ロボットの歩容制御に CPG を適用したものが、神経振動子の周期信号を用いて、6 脚ロボットの歩容が実現されている [3]。

本稿では、ジャンプ運動実現のために、6 脚ロボットの各脚先にジャンプ機構を設け、6 脚生物の歩容に見られるネットワークと同様の CPG のネットワークを用いる方法を提案する。CPG から得られる信号が周期信号であることから、鉛直方向のホッピング運動を試みる。OpenHRP3 を用いた動力学シミュレーションにより提案手法の有効性を検討する。

2. 6 脚ロボット

脚式ロボットの脚数は 6 とし、各脚の自由度は 4 とする。ただし、この内ジャンプ動作のための自由度を 1 とし、各脚先に配置する。つまり、6 脚ロボット全体の自由度は 24 である。図 1 に 6 脚ロボットの基本姿勢時の概観を示す。ロボットの重心は胴体部中心にあるものとし、ロボットの移動座標系の原点もまたロボットの胴体中心とする。ロボットの総重量は 12.6 [kg] である。

6 脚ロボットの各脚先に設けたジャンプ機構は、スライダにより地面を蹴り出しジャンプ動作を実現する。図 2 に第 i 脚の脚先に配置したジャンプ機構を示す。ここで脚先の中心から鉛直上方向を H_i 正方向とし、ジャンプ機構のスライダは H_i 軸に沿った方

向にのみ変位する。第 i 脚ジャンプ機構の変位を h_i とする。

3. 運動生成

3.1 CPG

振動子は松岡振動子 [4] を構成するニューロン

$$T_r \frac{du_i}{dt} + u_i = - \sum_{j=1}^n a_{ij} y_j + s_i - b f_i \quad (1)$$

$$T_a \frac{df_i}{dt} + f_i = y_i$$

を用いる。ただし $y_i = g(u_i)$, $g(u_i) = \max(0, u_i)$ である。式 (1) において、 t は時間を表し、 i, j はニューロン番号、 y_i はニューロンの出力、 T_r は立ち上がり時定数、 T_a は適応時定数、 s_i は駆動入力、 b は一定入力時の発火率を決めるパラメータである。 a_{ij} は第 j ニューロンから第 i ニューロンへの結合係数を表している。各ニューロンの内部状態は u_i と f_i で表され、それぞれニューロンの膜電位と疲労状態である。

振動子として式 (1) を用いた CPG を図 3 のように構成する。この構成は 6 脚生物である昆虫の歩容に見られる構成であり、逆位相の 2 組の位相が出力される具体的な組み合わせとしては、ニューロン番号 1-4-5 と 2-3-6 の組みで同位相の出力波形が見られる。図 3 において、 N_i は単一ニューロンを表し、このときの添え字 i はニューロン番号を表す。ニューロン番号は 6 脚ロボットの脚番号と一致する。各ニューロンからの出力 y_i は第 i 脚の脚

Fig. 1 6-legged robot

Fig. 2 Tip of leg

先の目標値とし、便宜上、 y_i を h_{oi} とおく。

3.2 PD 制御による駆動入力

第 i 脚の脚先のジャンプ機構の駆動力は

$$u_i = P(h_{oi} - h_i) + D\left(v_{oi} - \frac{dh_i}{dt}\right) \quad (2)$$

の PD 制御によって決定する。ここで、 u_i は第 i 脚スライド機構への出力であり、 h_i は第 i 脚のスライド量、 h_{oi} 、 v_{oi} はその目標スライド量および目標速度であり、 P は比例ゲイン、 D は微分ゲインである。

また、ロボットはジャンプ中の空中姿勢も含め図 1 の基本姿勢を維持するよう関節角度の目標値を設定し、ジャンプ機構以外の関節への駆動トルクも同様に PD 制御により決定する。ジャンプ時に発生する速度を各軸方向に持ったジャンプとなり、鉛直方向以外の運動が生じないように CPG 中の各ニューロンから得られた目標値は、ロボット重心位置における x 、 y 、 z 軸方向の速度変化 a_x 、 a_y 、 a_z がそれぞれ $|a_x| < 0.01$ [m/s²]、 $|a_y| < 0.01$ [m/s²]、 $9.71 < a_z < 9.91$ [m/s²] の場合にのみスライド機構への駆動力を発生させ、ジャンプ動作を実現する。これらの条件を満足しない場合には、スライダを脚先に維持するため $h_{oi} = 0$ とする。

4. 動力学シミュレーション

OpenHRP3 を用いて動力学シミュレーションを行う。設定パラメータを、 $T_r = 0.3$ 、 $s_i = 0.25$ 、 $b = 10.5$ 、 $T_a = 0.2$ とした。各ニューロンの内部状態初期値は、ニューロン膜電位を $u_1 = u_4 = u_5 = 0$ 、 $u_2 = u_3 = u_6 = 0.05$ とし、疲労状態を $f_1 = f_4 = f_5 = 0$ 、 $f_2 = f_3 = f_6 = 0.05$ とした。ニューロン間の結合係数は $a_{12} = a_{13} = 2.5$ 、 $a_{21} = a_{24} = 2.5$ 、 $a_{31} = a_{34} = a_{35} = 2.5$ 、 $a_{42} = a_{43} = a_{46} = 2.5$ 、 $a_{53} = a_{56} = 2.5$ 、 $a_{64} = a_{65} = 2.5$ とした。さらにホッピング運動で飛び出す時刻に使用する比例ゲインおよび微分ゲインは脚先のジャンプ機構を含めた全ての関節において、 $P = 4500$ 、 $D = 1$ とした。ホッピング運動で飛び出す時刻以外の時刻に使用する比例ゲインおよび微分ゲインは脚とも胴体側の関節より、1 つ目は $P = 5$ 、 $D = 1$ 、2 つ目は $P = 5$ 、 $D = 0.28$ 、3 つ目は $P = 3$ 、 $D = 1$ 、ジャンプ機構は $P = 1$ 、 $D = 1$ とした。

シミュレーションの結果を図 4、図 5 に示す。図 4 は各ニューロンの出力を示す。図 4 から、出力された信号はニューロン番号 1-4-5 と 2-3-6 の組み合わせで位相が同じであることがわかり、用いたネットワークにより昆虫の歩容が実現できることが確認で

Fig. 3 Network of CPG

きる。図 5 はロボットの重心高さであり、この結果からロボットのホッピング運動が実現されていることが分かる。さらに、図 5 からジャンプの高さは十分に脚先がロボットの高さを越える高さであることが分かる。このことから、提案法により本研究の目的が達成されたと言える。

5. おわりに

本稿では、不整地での移動に有効な脚式ロボットの中でも歩行時の静的な安定性が確保される 6 脚ロボットを用い、踏破性を向上させるため、ホッピング機構を導入した。ロボットの動作としてホッピング運動を行うための CPG の適用法を提案した。OpenHRP3 を用いた動力学シミュレーションを行い、提案手法の有効性を示した。

文 献

- [1] Beckey, A. G., "Autonomous Robots: From Biological Inspiration and Control," The MIT Press, 2005.
- [2] 田中崇裕, 広瀬茂男, "脚車輪ジャンプロボット AirHopper の開発～第 2 報: 車輪推進型跳躍動作の実現～", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006, ロボティクス・メカトロニクス講演会集 2006, pp. 1A1-D28, 2006.
- [3] 稲垣伸吉, 湯浅秀男, 鈴木健了, 新井民夫, "波動 CPG モデルを用いた多脚ロボットの歩容生成と移動速度制御", 日本ロボット学会誌, vol. 22, no. 2, pp. 230-238, 2004.
- [4] Matsuoka, K., "Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators," *Biological Cybernetics*, vol. 56, pp. 345-353, 1987.

Fig. 4 Outputs of the each neuron

Fig. 5 Jumped height of 6-legged robot