

M-17

## 筋骨格ヒューマノイドロボットの歩容パターンを生成する人工脊髄 IC Artificial Spinal Cord IC for Generating Gait Patterns in Musculoskeletal Humanoid Robots

○國分優剛<sup>1</sup>, 中村龍吉<sup>2</sup>, 平澤賛久<sup>2</sup>, 齊藤健<sup>3</sup>, 内木場文男<sup>3</sup>, 金子美泉<sup>3</sup>  
\*Yugo Kokubun<sup>1</sup>, Ryukichi Nakamura<sup>2</sup>, Tasuku Hirasawa<sup>2</sup>, Ken Saito<sup>3</sup>, Fumio Uchikoba<sup>3</sup>, Minami Kaneko<sup>3</sup>

Most humanoid robots mimic human motion by placing servo motors at their joints and controlling them through high-speed numerical computations performed by CPUs combined with software. In contrast, humans efficiently generate control signals for muscle contraction and relaxation via neural circuits in the brain and spinal cord. In our previous work, we developed an artificial spinal circuit that mimics brainstem–spinal projections using analog electronic circuits to generate gait patterns in musculoskeletal humanoid robots. In this paper, we integrated this artificial spinal circuit into an IC and confirmed its ability to output gait patterns.

### 1. 緒言

人間を模倣したヒューマノイドロボットは、人間と同一空間で作業できる可能性を有しており、災害現場や介護などでの活用が期待されている。しかしこれまでに開発された多くのヒューマノイドは、構造や制御方式が生体と大きく異なり、独自に発展を遂げている。従来のヒューマノイドロボットは、サーボモータによる関節駆動と高性能 CPU・ソフトウェアによる数値計算制御により歩行を実現している。しかし、多自由度化に伴う計算量の増大により、電力消費やバッテリー負荷の増加が課題となっている。一方、人間は筋収縮によって関節を駆動し、脳や脊髄の神経回路網を介して効率的に運動を制御している。基礎代謝量換算で約 100 W のエネルギーで活動していることから、人間の運動制御機構を工学的に模倣し、低消費エネルギーでの運動生成を実現する試みが報告されている。

人間の運動生成に関わる神経回路網を模倣した従来研究として、ソフトウェアによる人工ニューラルネットワーク (ANN) を用いたロボットが報告されている<sup>[1]</sup>。しかし、大規模実装には膨大な計算を要し、従来型ロボットと同様の課題が残る。これに対し、ANN をハードウェアで構成する手法が提案されている。アナログ電子回路により神経信号類似の複雑なパルス列を数値計算なしでリアルタイム処理できることが示されている<sup>[2]</sup>。我々はこれまで、アナログ電子回路を用いて人間の運動制御機構を模倣し、筋骨格ヒューマノイド下半身制御用の人工脊髄回路を提案し、シミュレーションにより歩行・走行時の神経信号生成を確認してきた<sup>[3]</sup>。しかし、ヒューマノイドへの搭載には IC 化による小型化が不可欠である。本稿では、両脚を対象とした人工脊髄 IC を開発し、歩行および走行パターンの生成を確認することを目的とした。

### 2. 人間の運動制御機構

運動の開始は上位中枢から脳幹に入力され、脊髄に局在する中枢パターン生成器 (CPG) へ伝達される。CPG はリズム生成部とパターン形成部の二層構造を持ち、自律的に歩行や走行などのリズム運動を生成するとされている<sup>[4]</sup>。生成された信号は運動ニューロンを介して複数の筋へ分配され、感覚入力によって修正・調整される。歩容生成については、歩行・走行が 5 つの基本信号の組合せで説明されるモデルが提案されている。Figure 1 に人間の歩行、走行パターンを示す。

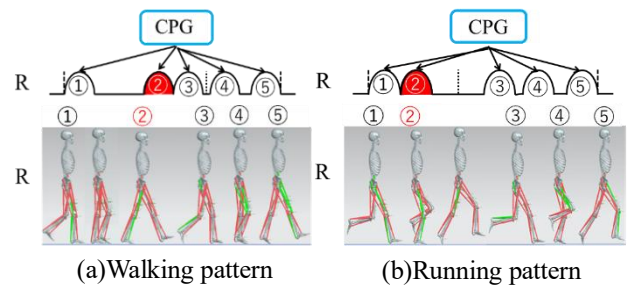


Figure 1. Human Gait Patterns (Right Leg)

### 3. 人工脊髄 IC の基本回路と構成

神経細胞の機能を 4 種類のアナログ電子回路で模倣した (Figure 2)。細胞体モデルは周期的なパルスを出力し、パルス蓄積モデルはシナプスまでの遅延を電圧に変換して表現する。シナプスモデル (興奮性・抑制性) は伝達を模倣し、細胞体モデルの発火を促進または抑制する。Figure 3 に人工脊髄 IC の構成を示す。本 IC は、(1)上位中枢部、(2)脳幹部、(3)感覚情報部、(4)-(a)リズム生成部、(4)-(b)パターン調整部で構成される。リズム生成部では 6 つの細胞体モデルを順次発火させ、両脚で半周期ずれる歩容リズムを生成する。パターン調整部では 2 つの細胞体モデルにより、上位中枢入力で歩容を切り替える機構を再現した。

1: 日大理工・院(前)・精機 2: 日大理工・学部・精機 3: 日大理工・教員・精機

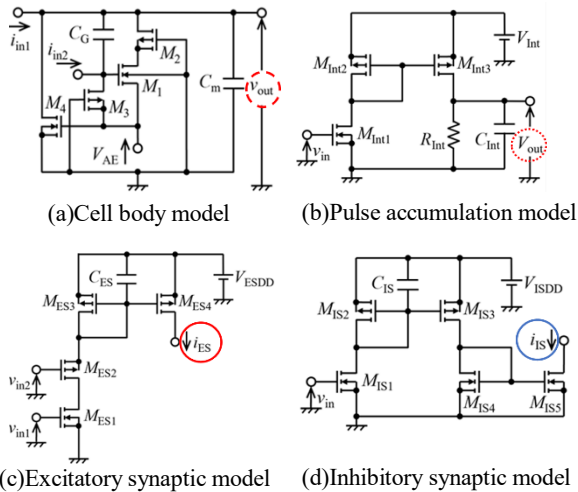


Figure 2. Basic Circuit Model

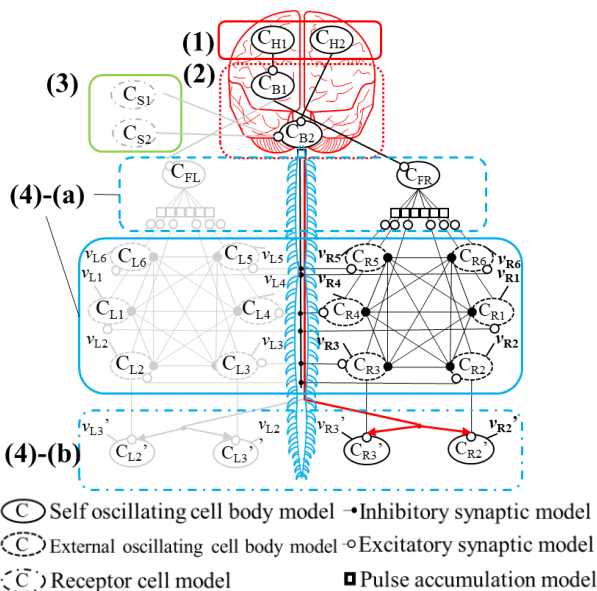


Figure 3. Artificial Spinal Cord IC Configuration

4. 実測結果と考察

Figure 3 の脳部(1)-(3), 脊髄部(4)-(a), (b)を 2.4 mm 角 IC に集積し, コンデンサ, 抵抗を外付け回路で構成した. 本研究では右脚を評価対象とし, (1), (2), (4)-(a), (b)を動作させ, 電源・外付け回路を接続してオシロスコープで出力を観測した. Figure 4 に出力結果を示す. 脊髄単体動作では  $C_{R1} \sim C_{R6}$  の出力 ( $v_{R1} \sim v_{R6}$ ) が 1.54 V で逆相同期波形を示し, 正常動作を確認した.  $C_{H1}$  入力時には第 2 信号が遅延して歩行パターンが生成され,  $v_{R1}, v_{R4} \sim v_{R6}$  が 1.34 V,  $v_{R3'}$  が 1.6 V を示した.  $C_{H1} + C_{H2}$  入力時には第 2 信号が早期に出力され走行パターンが生成され,  $v_{R1}, v_{R4} \sim v_{R6}$  が 1.52 V,  $v_{R2'}$  が 1.78 V を示した.

脊髄部単体動作に比べ, 歩行・走行パターンにおけるリズム生成部の出力電圧は低下した. これは脳部との接続における外部配線抵抗の影響により, 外部発振型細胞体モデル ( $C_{R1} \sim C_{R6}$ ) で構成されたリズム生成部

が低電圧入力で動作したためと考えられる. 一方, 自励振型細胞体モデル ( $C_{R2'}, C_{R3'}$ ) で構成されたパターン調整部は電源電圧で動作する回路のため影響を受けず, 結果として両者に出力差が生じた. 本 IC の出力は筋収縮タイミングを示す信号である. 各信号は駆動時にオペアンプで個別に増幅するため, この出力差は補正可能であり, 実用上の制御に支障はないと判断される.

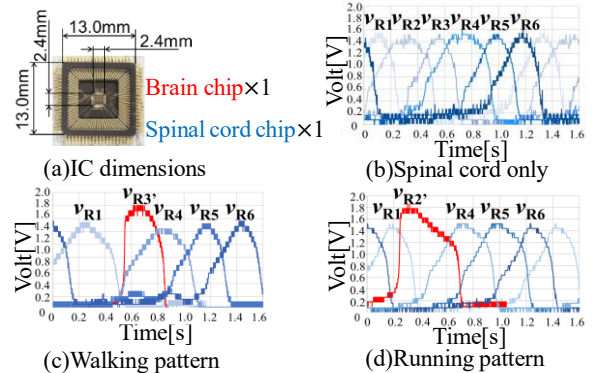


Figure 4. Measurement results (Right Leg)

5. 結言

本稿では, 筋骨格ヒューマノイドロボットの歩容パターンを生成する人工脊髄 IC の動作評価を目的とした. その結果, 上位中枢からの入力数に応じて, 歩行, 走行の歩容パターンが生成されることを示した.

6. 謝辞

本研究は東京大学 dlab (旧 VDEC) 活動を通して, 日本シノプシス合同会社, 日本ケイデンス・デザインシステム社, (株) JS ファンダリ, 凸版印刷 (株) の協力で行われたものである. また本研究は JSPS 科研費 JP22K04016, 日本大学特別研究, 令和 2 年度日本大学学術研究助成金 総合研究, NUROS の支援を得た.

7. 参考文献

[1] J. Nassour, et al “Multi-layered multi-pattern CPG for adaptive locomotion of human-oid robots”, Biological Cybernetics, vol. 108, pp. 291-303,  
 [2] 関根 好文, 他 “エンハンスメント型 MOSFET による  $\Delta$  形ニューロンモデル”, 電子情報通信学会論文誌 C, vol. J84-C, no. 10, pp. 988-994, 2001.  
 [3] T. Goto, et al “Development of a hardware CPG model for controlling both legs of a musculoskeletal humanoid robot with gait and gait cycle change by higher center and sensory information”, Artificial Life and Robotics, vol. 29, pp.218-229, 2024.  
 [4] 高草木 薫 “大脳皮質・脳幹-脊髄による姿勢と歩行の制御機構”, 脊髄外科, vol. 27, no. 3, pp. 208-215, 2010.