

K-22

ハードウェアニューラルネットワークにより制御される人型筋骨格ロボットの人工筋肉の検討  
 Study of artificial muscles for human musculoskeletal robots controlled by hardware neural networks

○石橋元邦<sup>1</sup>, 武田健嗣<sup>2</sup>, 石濱拓実<sup>1</sup>, 後藤達巳<sup>3</sup>, 山崎健太郎<sup>3</sup>, 粟飯原萌<sup>3</sup>, 金子美泉<sup>4</sup>, 内木場文男<sup>4</sup>  
 \*Motokuni Ishibashi<sup>1</sup>, Kenji Takeda<sup>2</sup>, Takumi Ishihama<sup>1</sup>, Tatsumi Goto<sup>3</sup>, Kentaro Yamazaki<sup>3</sup>, Megumi Aibara<sup>4</sup>,  
 Minami Kaneko<sup>4</sup>, Fumio Uchikoba<sup>4</sup>,

Abstract: Conventional robots generate motion by processing various information, such as motor angles, with CPU calculations, but the load is heavy. On the other hand, living organisms form movement patterns in the central pattern generator in the spinal cord and move by contracting muscles. Muscle synergy reduces the number of sequential commands and achieves energy-efficient locomotion. In this paper, we examine the characteristics of artificial muscles of a human musculoskeletal robot controlled by a hardware neural network.

1. 初めに

人型 2 足歩行ロボットはあらゆる環境下で柔軟かつ即座に対応することが期待される。しかし現在の CPU とソフトウェアプログラムによる制御ではプログラムに入力されていない動作は行えず、未知の環境に対応できない。かといって実行する動作を増やすと、モータの角度計算も含めて CPU の演算量が膨大になり、負荷および消費電力が大きくなってしまう。

一方、生物は脳や神経系で情報を処理している。運動制御に関しては脊髄に局在する中枢パターン生成器 (CPG) によって脳からの指令なしで周期的な運動パターンを生成している。そして運動に必要な筋肉を協調する筋シナジーにより、歩行の運動パターンは 5 つの時空間パターンで形成される<sup>[1]</sup>。これにより運動の度に逐一指令を指令を出す必要がないため省エネルギーな運動が達成される。また、生成された運動パターンにより筋肉が駆動する。筋肉は筋原繊維の集合体でこれらが収縮することで筋肉が駆動するので動作がシンプルかつ出力も大きい。このように電気信号の伝達だけで省エネルギーな運動を生成する点が生物は優れている。そのため、生物のニューラルネットワーク (NNs) と筋肉を工学的に模倣しロボットに適用することで、省エネルギーな制御及び運動を実現できると考える。

NNs の模倣はソフトウェアによる手法が主流だが電子回路を用いたハードウェアによる手法も存在する。その 1 つにパルス形ハードウェアニューラルネットワーク (P-HNNs) が挙げられる。これは生体と同じ特徴をもつため、生理学的知見を模倣した運動生成が可能になる。また、回路定数を組み込むため簡便性には欠けるが、リアルタイム処理と IC 化が可能である。このことから複数の筋肉の同時制御に適すると考えられる。

筋肉の模倣に関しては、生物の筋肉のような直動式アクチュエータにおいて、主流は作動流体を用いた空気圧式と油圧式であるが<sup>[2]</sup>、形状記憶合金 (SMA) による方法もある。この方法では加熱により収縮し、機構が単純である。また通電により加熱できるので電子回路からのパルス信号で制御できる。そのため、本ロボットの人工筋肉には SMA は適していると考えられる。

本論文では P-HNNs により制御する人型筋骨格ロボットを駆動させる人工筋肉を開発するために必要な SMA の本数と電流値を算出した。

2. 筋シナジーに基づく CPG モデル

Figure1 に筋シナジーに基づいた CPG による運動パターンの生成モデルを示す。Figure1(a) が歩行時の運動パターン、Figure1(b) が走行時の運動パターンである。歩行時と走行時とでは 2 つ目の波形に顕著な違いが見られる。そのため、Figure2 に示す 6 個の逆相同期波形を出力可能なハードウェア CPG モデルの基本回路を提案した。そしてシナプス回路を接続し、OutputB と C をそれぞれ OFF にすることで出力波形を 5 つにした。このモデルはそれぞれの細胞体モデルが抑制性シナプスモデルで相互接続されており、出力する順番はトリガーパルスにより任意に決定される。

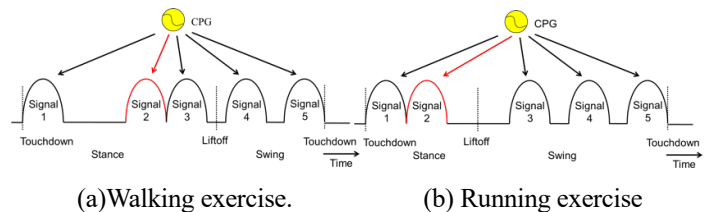


Figure1. A model for generating movement patterns by CPG based on muscle synergy

1 : 日大理工・院 (前)・精機 2 : 日大理工・院 (後)・精機 3 日大理工・学部・精機 4 日大理工・教員・精機

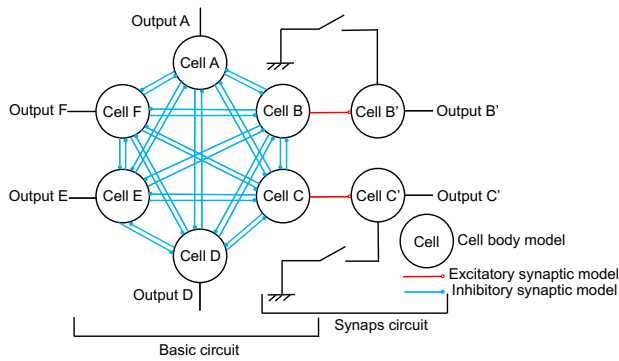


Figure 2. CPG model for bipedal walking control

### 3. 人型筋骨格ロボットの構成

Figure3 に人工筋肉を搭載する人型筋骨格ロボットモデルを示す。全長は約 800mm で HAT (頭, 胴体), 骨盤, 大腿, 下腿, 足で構成される。筋肉は歩行運動に最低限必要な実効筋 9 種を使用しているが, 一部細分化し, 腸腰筋(IL), 大殿筋(GM), 大腿直筋(RF), 中間広筋(VI), 外側広筋(VL), 内側広筋(VM), 大腿二頭筋長頭(BFL), 大腿二頭筋短頭(BFS), 前脛骨筋(TA), 腓腹筋外側頭(LG), 腓腹筋内側頭(MG), ヒラメ筋(SOL)の 12 種とした。また, 筋肉内部にリニアアクチュエータを配置している。Table1 にモデルを関節角度駆動により歩行運動させ, 計測した筋肉の伸びを示す。

### 4. 人工筋肉の特性

人工筋肉の構造は実際の筋肉のように筋原繊維の集合体とするために, SMA をチューブ型のエラストマーに通して筋原繊維 1 本とした。電流による SMA の加熱により筋肉の収縮, エラストマーにより筋肉の弾性要素の再現を試みる。そのために, 各人工筋肉に必要な筋原繊維の本数と電流値を求める必要がある。

まず, 各人工筋肉において所望の発生力を算出した。その値を Table 2 に示す。算出にあたっては Table1 中の重量と長さをもとに, 各関節回りのモーメントのつり合いから求めた。次に電流値ごとの筋原繊維 1 本あたりの発生力を求め, それを Table1 中の発生力に示す。算出にあたり, まず SMA にエラストマーの弾性要素を考慮した応力-ひずみ線図を電流値ごとに求めた。そして Table1 中の変位, 自然長を用いてひずみを求めた。これらをもとに各電流値での応力を求めることで筋原繊維 1 本あたりの発生力を算出した。電流は使用した SMA の標準駆動電流が 200mA~300mA のため, 200mA から 20mA 刻みで通電した。Figure 4 は各電流値での応力-ひずみ線図である。この図から電流が 200mA, 280mA, 300mA の時に発生力が大きいことがわかる。

この 3 つの電流値のときの各人工筋肉での必要な筋原繊維の本数を算出し, 最適なものを選択した。

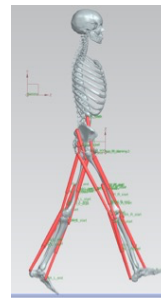


Figure 3. Human Musculoskeletal Robot Model

Table1. Various values of artificial muscle

Muscle	Weight (g)	Natural length (mm)	Displacement (mm)	Strain	Stress (MPa)	Force generated (N)	Number of myofibrils	Current value (mA)
IL	7	117.0581	3.708466	0.033	1.24	0.37	5	280
GM	4.8	82.3504	7.512862	0.101	1.34	0.56	6	300
RF	14.04	251.6573	9.656859	0.040	0.80	0.24	2	200
VI	11.61	195.0134	0.477838	0.002	0.62	0.19	2	200
VL	10.72	189.4976	0.580948	0.003	0.62	0.19	2	200
VM	10.08	202.1222	0.592307	0.003	0.62	0.19	2	200
BFL	11.36	206.1259	-11.595331	0.060	1.55	0.47	2	300
BFS	5.87	105.7057	-0.155381	0.001	1.02	0.31	3	280
TA	9.83	178.5549	0.718777	0.004	1.13	0.34	11	300
LG	11.36	205.0016	1.541753	0.008	1.15	0.35	3	300
MG	10.72	200.2027	-1.725633	0.009	1.16	0.35	3	300
SOL	9.19	174.1233	0.697855	0.004	0.63	0.19	6	200

Table 2. Force and joint torque generated by artificial muscles

	Torque[Nm]		Torque[Nm]		トルク[Nm]
Ankle joint	0.60	Knee joint	0.27	Hip joint	0.02
	Shrinkage force[N]		Shrinkage force[N]		Shrinkage force[N]
LG	1.04	RF	0.32	IL	1.80
MG	1.04	VI	0.32	GM	3.21
SOL	1.04	VL	0.32		
TA	3.49	VM	0.32		
		BFL	0.87		
		BFS	0.87		

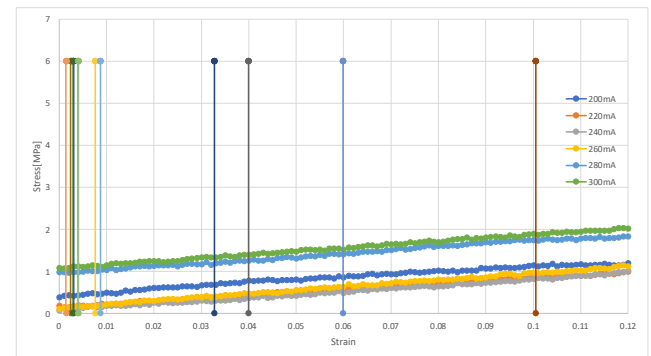


Figure 4. Stress-strain diagram at each current value

### 5. まとめ

本論文では P-HNNs により制御する人型筋骨格ロボットの人工筋肉の開発を行った。人工筋肉を制御する CPG モデルを提案した。人工筋肉を搭載する人型筋骨格ロボットのモデルを用いてシミュレーションを行い, 筋肉の伸びを計測した。そのデータと SMA 及びエラストマーの応力-ひずみ線図を用いて各人工筋肉に必要な筋原繊維の本数と電流値を算出した。

### 6. 参考文献

[1] Y. P. Ivanenko, R. E. Poppele, F. Lacquaniti : “Five basic muscle activation patterns account for muscle activity during human locomotion”, *jphysiol*, Vol.556, No.1, pp267-282, 2004

[2] 橋本健二 : 「人型ロボットのメカニクス」, 日本ロボット学会誌, Vol. 36, No. 2, pp. 134-139, 2018