

卒業論文

CPGによる蛇型ロボットの  
自律分散制御システム

平成 16 年度

茨城大学 工学部 システム工学科

指導教官 馬 書根

学籍番号 01T6082A

氏 名 佐藤 智紀



# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	背景	2
1.2	従来研究	2
1.3	本研究の目的	4
第 2 章	自律分散制御システムの構築	5
2.1	はじめに	6
2.2	システムの構成	6
2.3	NODE モジュール	8
2.3.1	CPG 計算部	8
2.3.2	赤外線通信部	12
2.3.3	モータドライバ部	13
2.3.4	ユニット間通信	14
2.4	HEAD モジュール	14
2.4.1	処理部	14
2.4.2	ユニット間通信	14
2.4.3	サーバーロボット間通信	14
2.5	サーバ	15
2.5.1	インターフェース	15
2.5.2	サーバーロボット間通信	16
2.6	まとめ	16
第 3 章	実験	17
3.1	はじめに	18
3.2	単一関節ユニットの駆動実験	18
3.3	2次元1自由度蛇型ロボットによる蛇行実験	21

---

3.4	3次元2自由度蛇型ロボットによる蛇行実験 . . . . .	23
3.5	考察 . . . . .	25
第4章	結論と今後の課題 . . . . .	27
4.1	まとめ . . . . .	28
4.2	今後の課題 . . . . .	28
謝辞		29
参考文献		31

# 目次

1.1	自然界の蛇 . . . . .	3
1.2	階段を上る蛇 . . . . .	3
1.3	鉄犬 (電通大・木村研究室) . . . . .	4
2.1	システムの構成図 . . . . .	6
2.2	3次元2自由度蛇型ロボット . . . . .	7
2.3	関節ユニット . . . . .	8
2.4	NODE モジュール . . . . .	9
2.5	CPG 計算部の回路図 . . . . .	9
2.6	Matsuoka モデル . . . . .	10
2.7	CPG ネットワーク . . . . .	10
2.8	CPG 計算部の状態遷移図 . . . . .	11
2.9	赤外線通信部の回路図 . . . . .	12
2.10	モータドライバの回路図 . . . . .	13
2.11	サーバソフトのインターフェース . . . . .	15
3.1	CPG 出力 . . . . .	19
3.2	CPG の内部状態 . . . . .	19
3.3	単一関節ユニット駆動実験 . . . . .	20
3.4	3関節分の CPG 出力 . . . . .	21
3.5	2次元1自由度蛇型ロボットによる蛇行実験 . . . . .	22
3.6	実験に用いた3次元2自由度蛇型ロボット . . . . .	23
3.7	3次元2自由度蛇型ロボットによる蛇行実験 . . . . .	24



# 表目次

2.1	主要パーツの仕様 . . . . .	7
2.2	TA8429H の仕様 . . . . .	14
2.3	コマンドリスト . . . . .	15
3.1	使用した CPG パラメータ . . . . .	18

# 第 1 章

## 序論

## 1.1 背景

蛇は紐状の単純な形態でありながら細長く柔軟な屈曲可能な体幹形状を生かすことにより、様々な環境に適応して移動することができる。特徴的なものとして以下のような運動能力を有している。

- 凹凸の激しい不規則な荒地や、体の大きさに対して狭く曲がりくねった進路を推進することができる。
- 細長い体幹を硬直化し、力学的に安定な姿勢を保持することによって、クレバスや枝から枝への谷渡り動作を行うことができる。
- 水中と陸上の両方を移動することが可能である。

このような蛇の運動特徴を生かした蛇型ロボットは車輪型ロボットや脚型ロボットでは移動が困難な地形において移動可能である。生物の蛇と同様に、入り組んだ環境で移動できることが可能であると考えられるため特に災害地などの極限環境下における探査や救助といった活動が期待されている。様々な蛇型ロボットが研究されてきたが、その制御方策は既知環境下におけるモデル化が前提であった。しかし実際の極限環境下でロボットが活動するためには未知環境に対する動的な環境適応能力が必要となる。

一方、実世界で自律的な適応を見せる生物の運動は脊椎などの中枢に存在する「パターン発生器 (Central Pattern Generator:CPG)」と末梢からの感覚などによって発生する「反射」の組み合わせにより生成されること、及び脊椎動物の CPG や反射の機構は主に脊髄に存在し、これが脳幹・小脳・大脳などの上位中枢からの調節を受けていることは神経生理学者などの実験結果から事実として広く受け入れられている。

## 1.2 従来研究

前節で述べた神経生理学で得られた知見に基づき、様々なロボットに CPG を用いて自律的・創発的な歩行を実現しようとする試みが広く行われてきた。例として、福岡ら [1] が CPG を 4 脚ロボット (**Fig.1.3**) の歩行リズム生成に用い、ロール運動の引き込みによって不整地歩行を実現している。

Grillner[2] は CPG 神経ネットワークを用いてヤツメウナギの遊泳が可能であることをシミュレーションによって示した。



Fig.1.1 自然界の蛇



Fig.1.2 階段を上る蛇

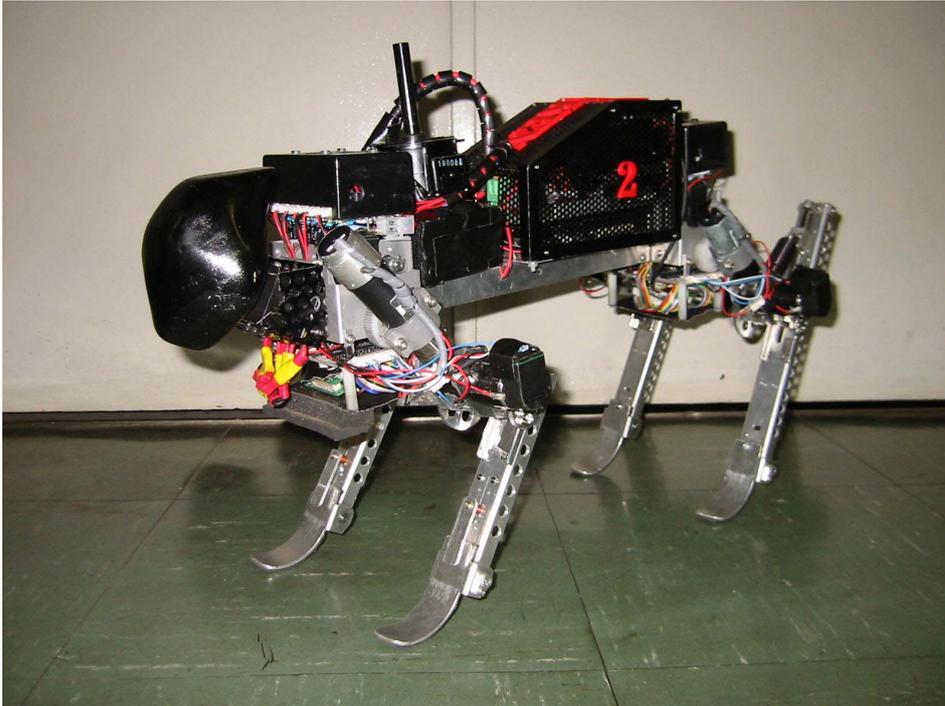


Fig.1.3 鉄犬 (電通大・木村研究室)

### 1.3 本研究の目的

本研究の目的は、動的に環境適応可能な蛇型ロボットを目指すための制御方策として生物が行っている自律分散制御を CPG ネットワークを用いて構築することである。本研究では実際の蛇型ロボットに自律分散制御システムを実装し、蛇型ロボットの制御を行う。本論文では CPG を用いた自律分散制御システムの構成を示し具体的なシステム各部の構造等を述べる。また、実機実験により構築した自律分散制御システムの有効性を検証する。

## 第2章

# 自律分散制御システムの構築

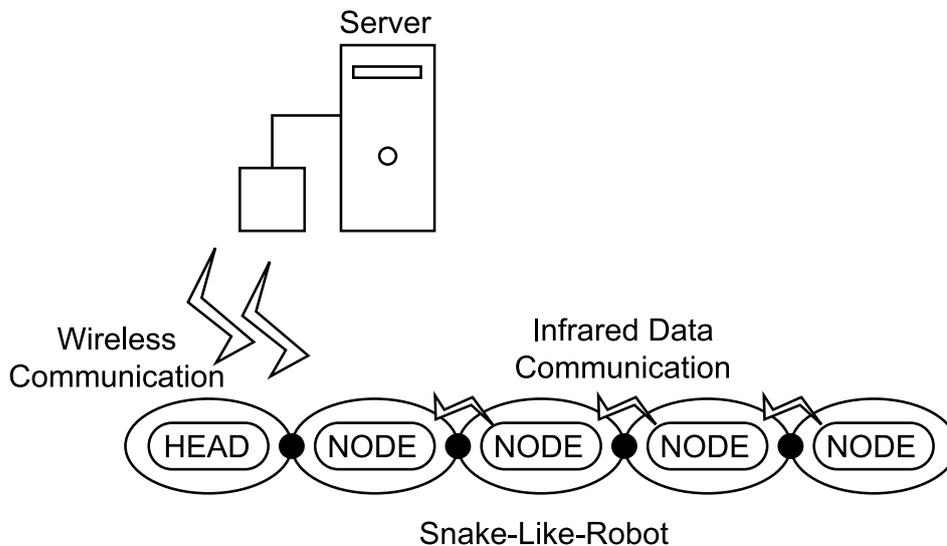
## 2.1 はじめに

本章では構築した蛇型ロボットのための自律分散制御システムの構成及び各部の詳細について述べる。

## 2.2 システムの構成

本研究で開発する自律分散制御システムの全体図を **Fig.2.1** に示す。制御対象となる蛇型ロボットはロール及びヨー軸周りに自由度を持つ3次元蛇型ロボットである。その蛇型ロボットの内部に HEAD モジュールと NODE モジュールと呼ぶ回路を実装する。NODE モジュールは蛇型ロボットの各関節ごとに搭載し、モジュール内に実装された CPG による自律分散制御を行う。又、NODE モジュールは相互に赤外線通信にて接続され CPG 間の結合を実現している。HEAD モジュールは蛇型ロボット全体を統括するためにロボットの頭部に搭載する。HEAD モジュールはサーバとなる外部のコンピュータと無線通信にて接続されサーバからのコマンドを受ける。それらコマンドに応じた信号を各 NODE モジュールに送信し蛇型ロボットの全体の制御を行う。HEAD モジュール、NODE モジュールの2種の回路により蛇型ロボットの制御系は構成される。

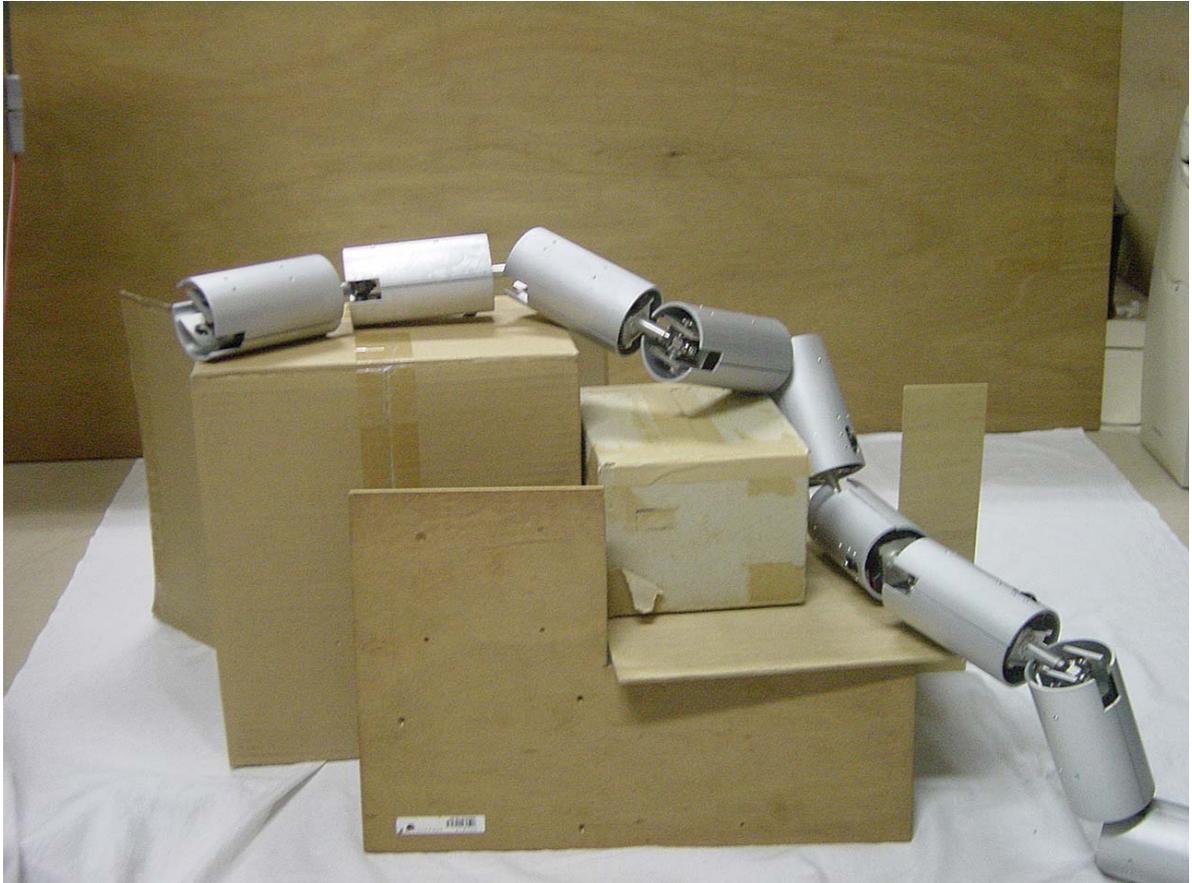
以降の小節にて各部の詳細について説明する。



**Fig.2.1** システムの構成図

本研究において制御対象とする蛇型ロボットは **Fig.2.2** に示すロール・ヨー軸周りに自由度を持つ3次元2自由度蛇型ロボットである。各関節ユニットには **Fig.2.3** に示す

ような2つのモータと差動機構が組み込まれておりこれによりロール軸，ヨー軸の自由度を持たせている．各関節ユニット内の主要部品の仕様を **Table 2.1** に示す．本研究ではヨー軸周りの自由度を用いて蛇行させることを目的とする．



**Fig.2.2** 3次元2自由度蛇型ロボット

**Table 2.1** 主要パーツの仕様

Part	Model number	Specific
Motor	maxon RE13	Rated-Torque : 1.38[mNm]
Gearbox	maxon GP13K	Reduction Gear Ratio : 1119:1
Encoder	Magnetic encoder	Resolution : 16
Battery	AIR CRAFT ET-P0250-3S	Li-Poly,11.1[V],250[mAh]

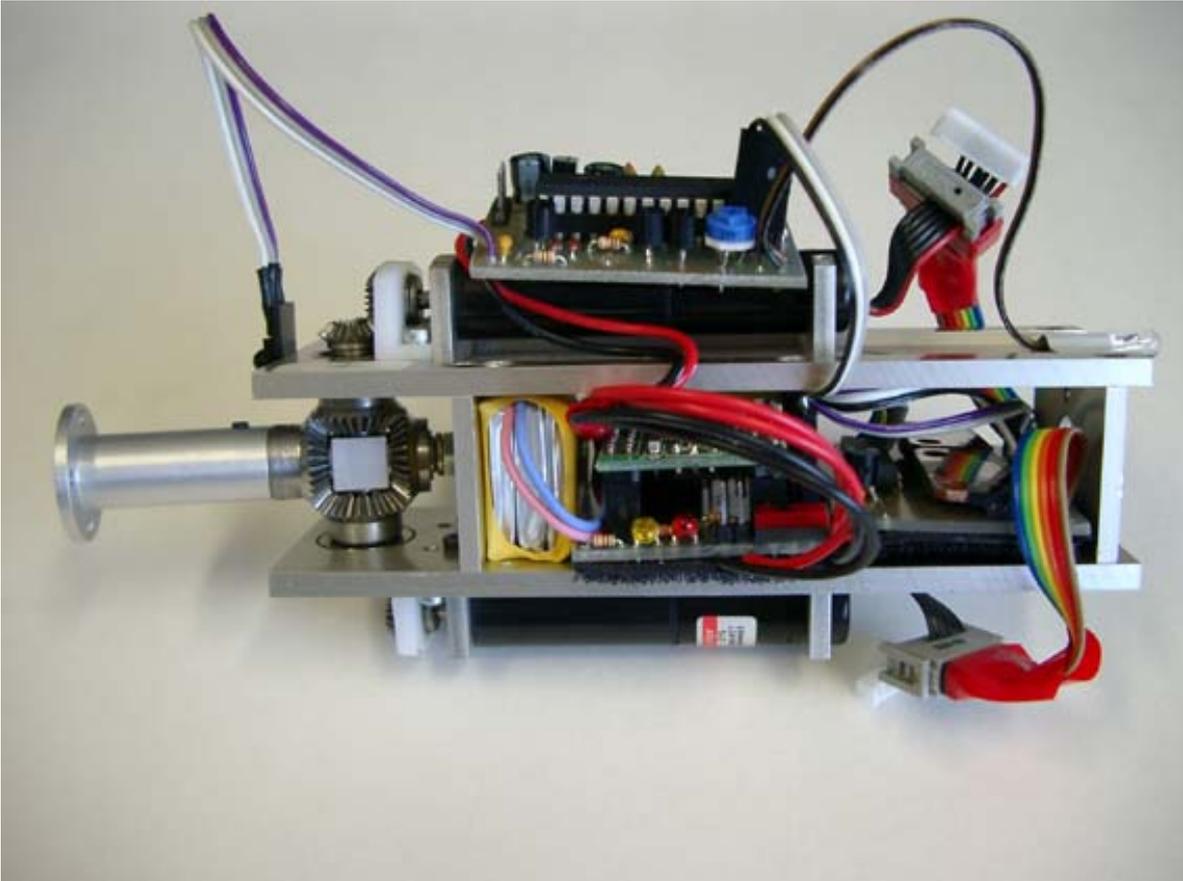


Fig.2.3 関節ユニット

## 2.3 NODE モジュール

NODE モジュールは蛇型ロボットの各関節に搭載された回路である。NODE モジュールは内部で CPG 計算部, 赤外線通信部, モータドライバの 3 種から構成される。(Fig.2.4) 以降, 各部の詳細を説明する。

### 2.3.1 CPG 計算部

CPG 計算部ではルネサステクノロジ社の H8/3694F マイコン [5] を使い, CPG 計算を行う。Fig.2.5 に開発した回路の回路図を示す。

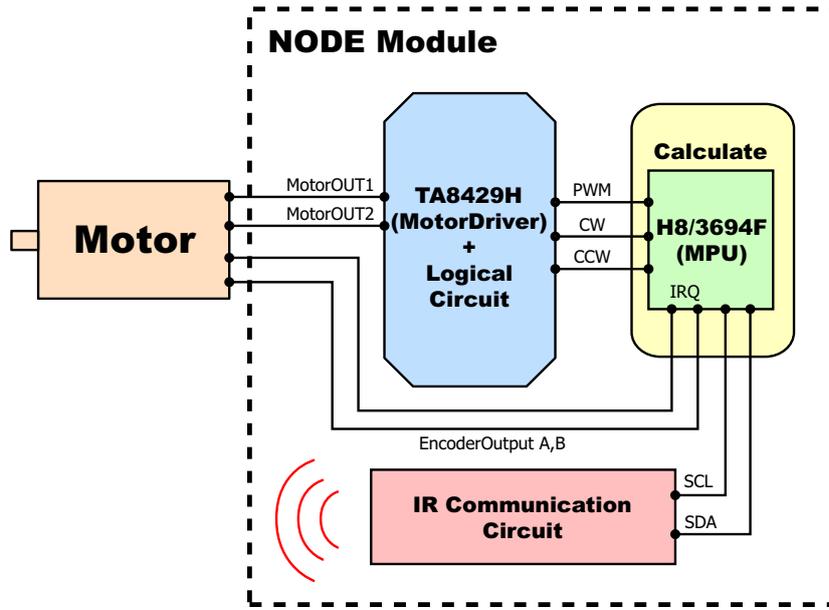


Fig.2.4 NODE モジュール

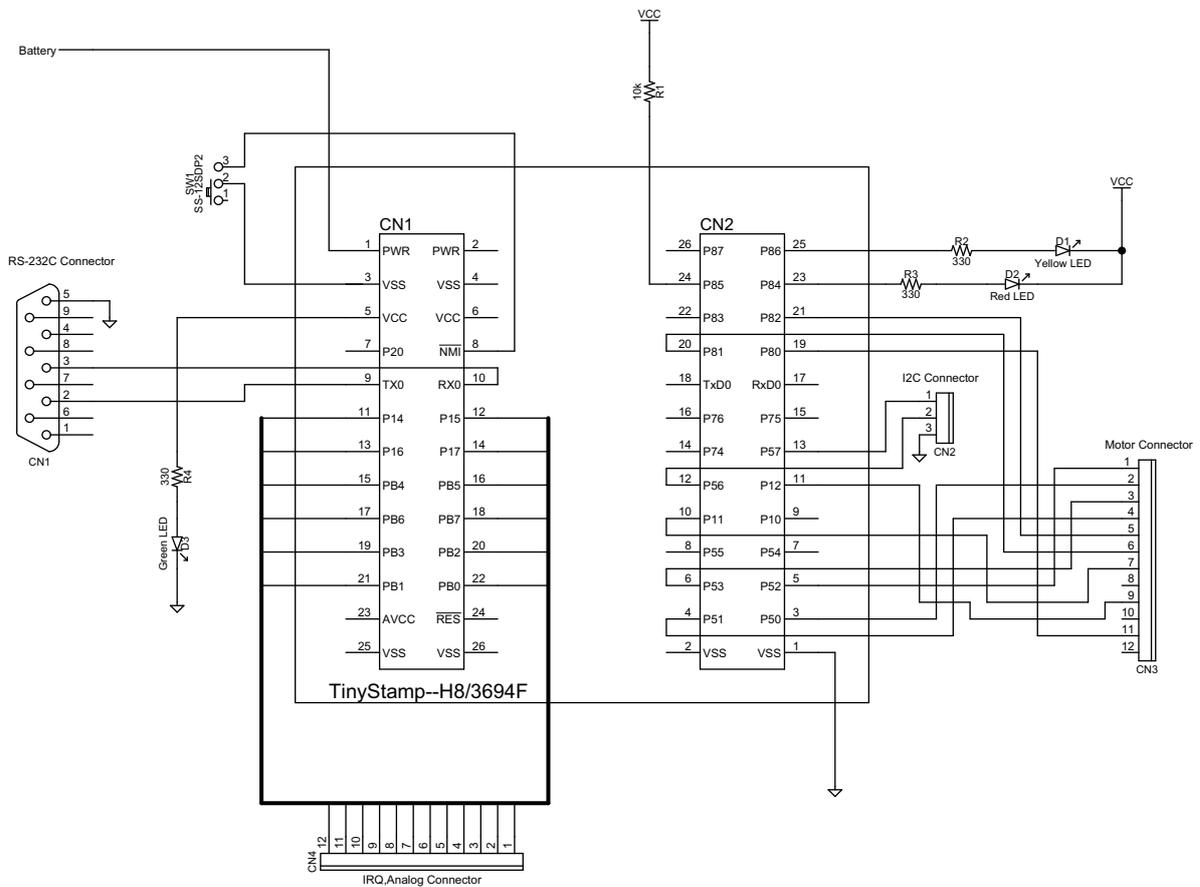
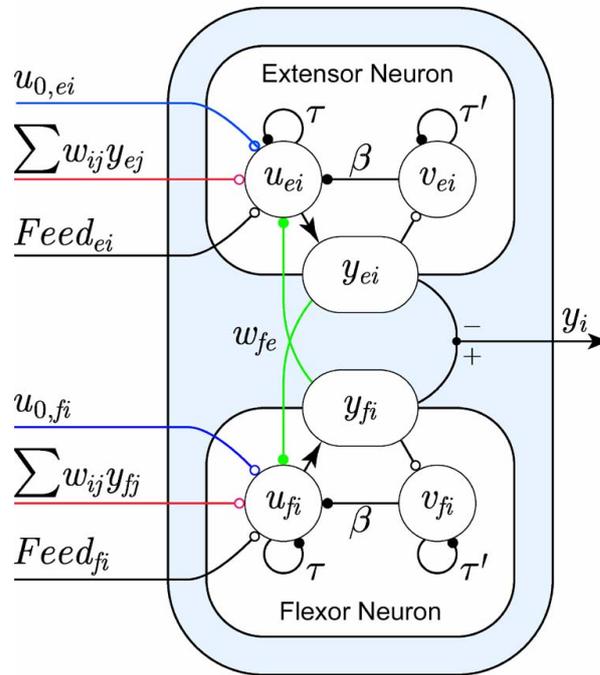
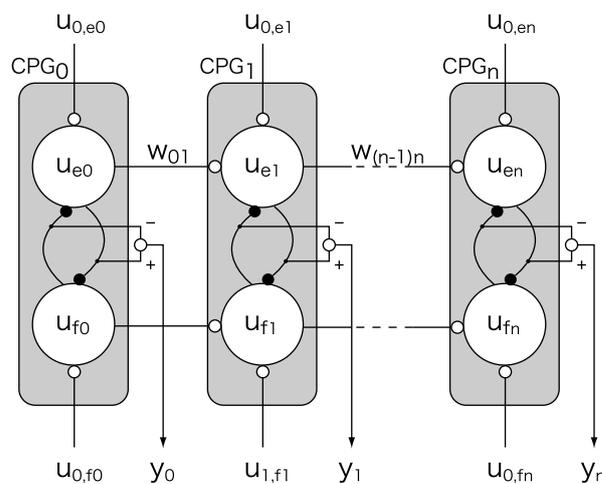


Fig.2.5 CPG 計算部の回路図

本研究で用いた CPG モデルは **Fig.2.6** に示す Matsuoka[3] が提案し多賀 [4] により 2 足歩行に適用されたものである. 1 つの CPG は相互抑制された 2 つのニューロン (伸筋ニューロン, 屈筋ニューロン) によって構成され, それらを **Fig.2.7** の様に直列接続している. そのダイナミクスは式 (2.1) に示す非線形連立 1 次微分方程式によって表される.



**Fig.2.6** Matsuoka モデル



**Fig.2.7** CPG ネットワーク

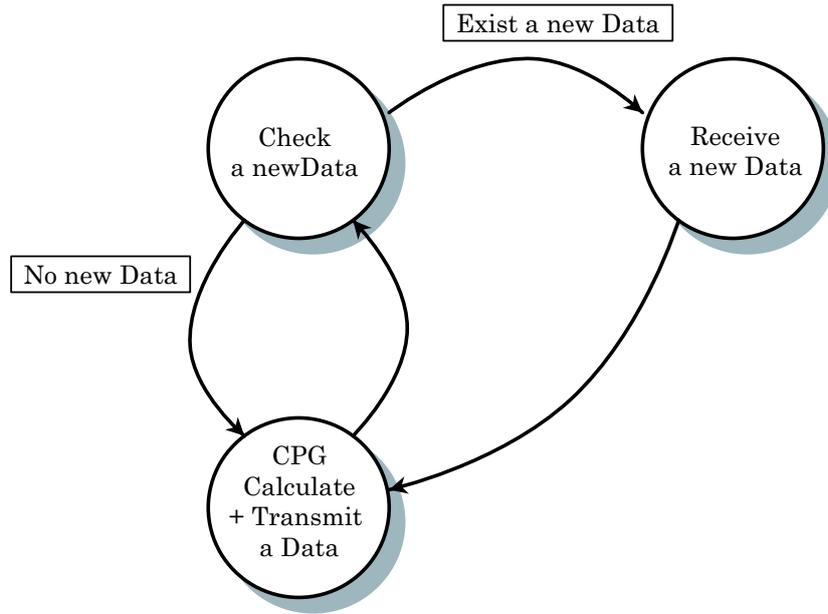


Fig.2.8 CPG 計算部の状態遷移図

単位 CPG の数学モデル:

$$\begin{aligned}
 \tau \dot{u}_{\{e,f\}i} &= -u_{\{e,f\}i} + w_{\{f,e,ef\}} y_{\{f,e\}i} - \beta v_{\{e,f\}i} \\
 &+ u_0 + Feed_{\{e,f\}i} + \sum_{j=1}^n w_{ij} y_{\{f,e\}j} \\
 y_{\{e,f\}i} &= \max(u_{\{e,f\}i}, 0) \\
 \tau' \dot{v}_{\{e,f\}i} &= -v_{\{e,f\}i} + y_{\{e,f\}i}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

ここで添字  $e$  は伸筋ニューロン,  $f$  は屈筋ニューロン,  $i$  は  $i$  番目の CPG を表し,  $u_{\{e,f\}}, v_{\{e,f\}}$  はニューロンの内部状態,  $y_{\{e,f\}}$  はニューロンの出力,  $Feed_{\{e,f\}}$  はセンサ入力に関する項である. また  $u_0$  は上位からの持続性入力,  $\beta$  はニューロン間の疲労係数,  $w_{ij}$  は関節  $j$  の CPG のニューロン出力  $y_{\{e,f\}}$  が関節  $i$  の CPG のニューロンに出力される時の結合係数を表す. CPG の出力  $y_i$  は  $y_i = -y_{ei} + y_{fi}$  である. 蛇型ロボットには各関節ごとにこの CPG を 1 つ備える. なお本研究ではセンサ入力に関しては扱わない.

通信により前段関節ユニットの NODE モジュールから  $u_{\{e,f\}}$  の値を受け取り, 逐次 CPG 計算を行い蛇型ロボットの関節を駆動するための角度信号となる運動パターンの生成を行う. その処理に関する状態遷移図を **Fig.2.8** に示す. CPG 計算によって生成した運動パターンを関節角度信号として関節角度を制御する.



- 赤外線通信回路内に PIC16F876 マイコン [6] を組み込むことでモジュール化し通信方式の変更に柔軟に対応できるようにした。
- 赤外線 LED のドライブにはトランジスタのダーリントン接続 [7] を使用した。

### 2.3.3 モータドライバ部

Fig.2.10 に開発したモータドライバ回路の回路図を示す。

制御対象となる蛇型ロボットには 2 つのモータが搭載されている。このモータを駆動させるためのモータドライバ回路を開発した。メインとなるアンプ部には東芝製 TA8429H を使用した。主な仕様を Table 2.2 に示す。これはロボットの関節を駆動させるための十分なスペックを有している。また H8/3694F マイコンからの PWM 信号と正転 (ClockWise : CW) 及び逆転信号 (CounterClockWise : CCW) を、この TA8429H に入力すべき信号に変換する必要があるため論理回路を実装した [8]。PWM 信号と正転及び逆転信号との論理積をとることにより、モータ端子に印可する電圧の向き及び電圧を制御する。

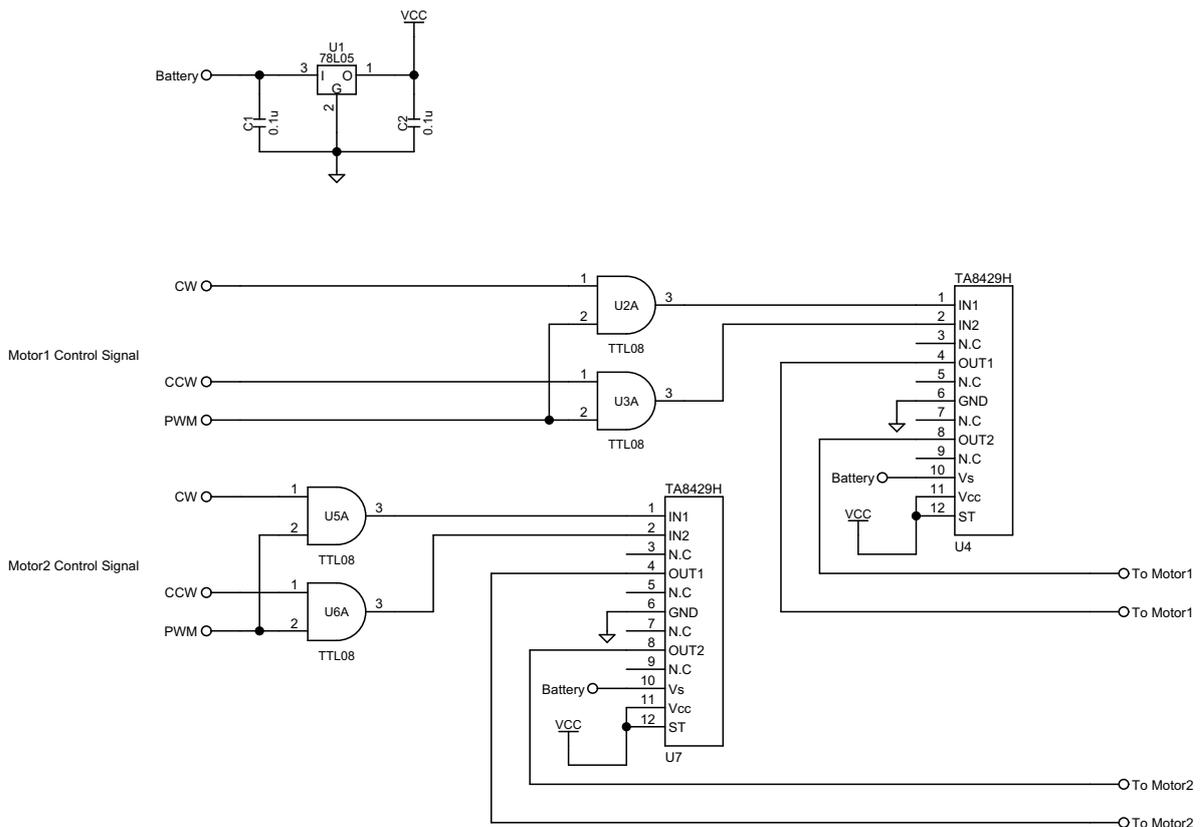


Fig.2.10 モータドライバの回路図

Table 2.2 TA8429H の仕様

Power-Supply voltage of Motor	0~27[V]
Output current(AVE)	3.0[A]
Output current(PEAK)	4.5[A]

### 2.3.4 ユニット間通信

CPG 計算部において求められた  $u_{\{e,f\}}$  を赤外線通信部を通して次関節ユニットに送信する。

## 2.4 HEAD モジュール

HEAD モジュールは H8/3694F による処理部, ユニット間の通信を行う赤外線通信部, サーバとの通信を行う無線通信モジュール部から構成される。各部の詳細について以降の小節にて述べる。

### 2.4.1 処理部

サーバからのコマンドを受け取り, 関節ユニットに搭載した NODE モジュールに与えるパラメータに変換する処理を行う。また H8/3694F には CPG0 が実装されており, この CPG により生成された  $u_{\{e,f\}}$  を次関節ユニットへ伝搬する。

### 2.4.2 ユニット間通信

前述の NODE モジュール内の赤外線通信回路を用いる。処理部において送信するデータを求め, 赤外線通信回路を通じて次関節ユニットへ送信する。

### 2.4.3 サーバ-ロボット間通信

ロボット全体をコントロールするためのコマンドをロボットに送信するために無線通信を行う。現在実装しているコマンドの一覧は **Table 2.3** に示す。'G' を送信するとロボット全体が動き出し, 'Q' を送信するとロボットが停止する。

Table 2.3 コマンドリスト

Command	Role
'G'	Move the Snake-Like-Robot.
'Q'	Stop the Snake-Like-Robot.

## 2.5 サーバ

蛇型ロボットの外部にサーバを設置する。サーバ上では蛇型ロボットをコントロールするためのソフトウェアを動作させる。以降、サーバ上のソフトウェアについて述べる。

### 2.5.1 インターフェース

**Fig.2.11** にサーバソフトウェアの GUI インターフェースを示す。操作できるパラメータは持続性入力の  $u_{0,\{e,f\}}$  である。この値のバランスを操作することにより蛇型ロボットの進行方向を制御する。現在、持続性入力の値を送信するためのコマンドの実装を行っていないためロボットの進行方向の制御は不可能である。



Fig.2.11 サーバソフトのインターフェース

## 2.5.2 サーバ-ロボット間通信

2.4.3 に示したコマンドによりロボットの動作の制御を行う。サーバ側からコマンドを送信する。

## 2.6 まとめ

本章では構築した蛇型ロボットのための自律分散制御システムの構成及び各部の詳細について述べた。ここで述べたシステムを用いて蛇型ロボットの自律分散制御を行う。

## 第3章

# 実験

### 3.1 はじめに

本章では前章で示した自律分散制御システムをロボットに実装し、実機実験を行った。まず単一関節ユニットを駆動し、蛇型ロボットの蛇行リズム生成ができているかの確認を行った。次に3リンクからなる3次元蛇型ロボットに本研究で開発した自律分散制御システムを実装し、蛇行実験を行った。

### 3.2 単一関節ユニットの駆動実験

3次元蛇型ロボットの関節ユニット1つを用いてCPG出力を使った関節の駆動実験を行った。この実験の際に使用したCPGパラメータは金ら[9]が用いた**Table 3.1**に示す値を使用した。

**Table 3.1** 使用したCPGパラメータ

<i>Parameters</i>	<i>Value</i>
持続性入力 $u_{0,\{e,f\}i}$	3.55, 3.0
ニューロン時定数 $\tau$	0.2
ニューロン時定数 $\tau'$	1.0
ニューロン疲労係数 $\beta$	5.0
ニューロン間の結合係数 $\omega_{fe}(= \omega_{ef})$	-1.2
CPG間の結合係数 $\omega_0$	0.2

回路を動作させると関節は定常時ではほぼ  $-\frac{\pi}{4}[rad] \sim \frac{\pi}{4}[rad]$  の間で動作した。この実験の際に測定したCPG出力  $y$  を **Fig.3.1**, CPGの内部状態  $u_e, u_f$  を **Fig.3.2** に示す。**Fig.3.3** には実験時の関節の様子を示す。

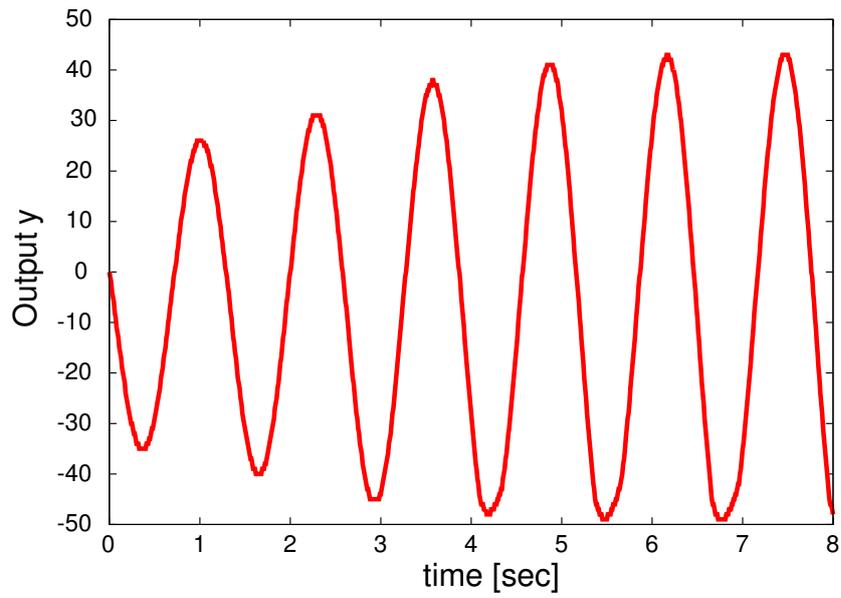


Fig.3.1 CPG 出力

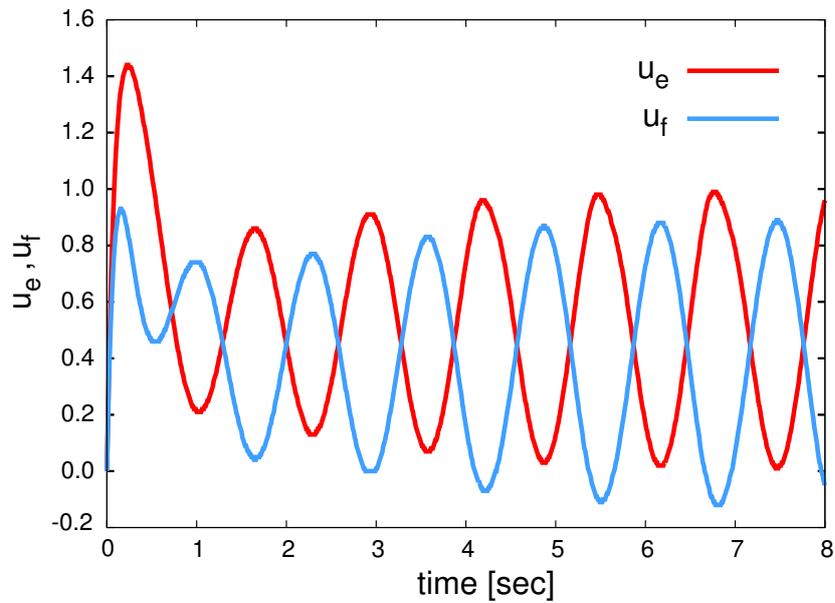


Fig.3.2 CPG の内部状態

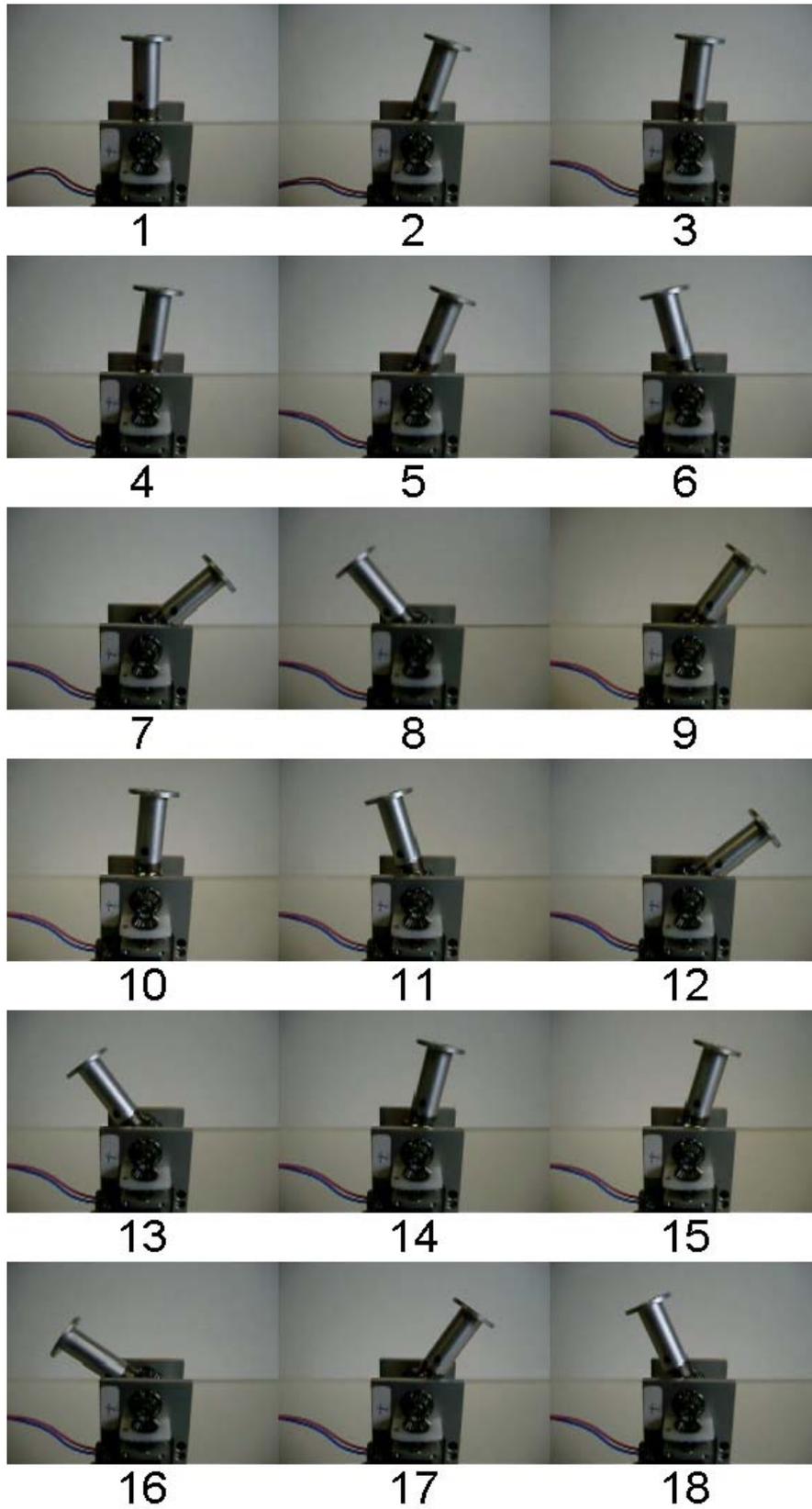
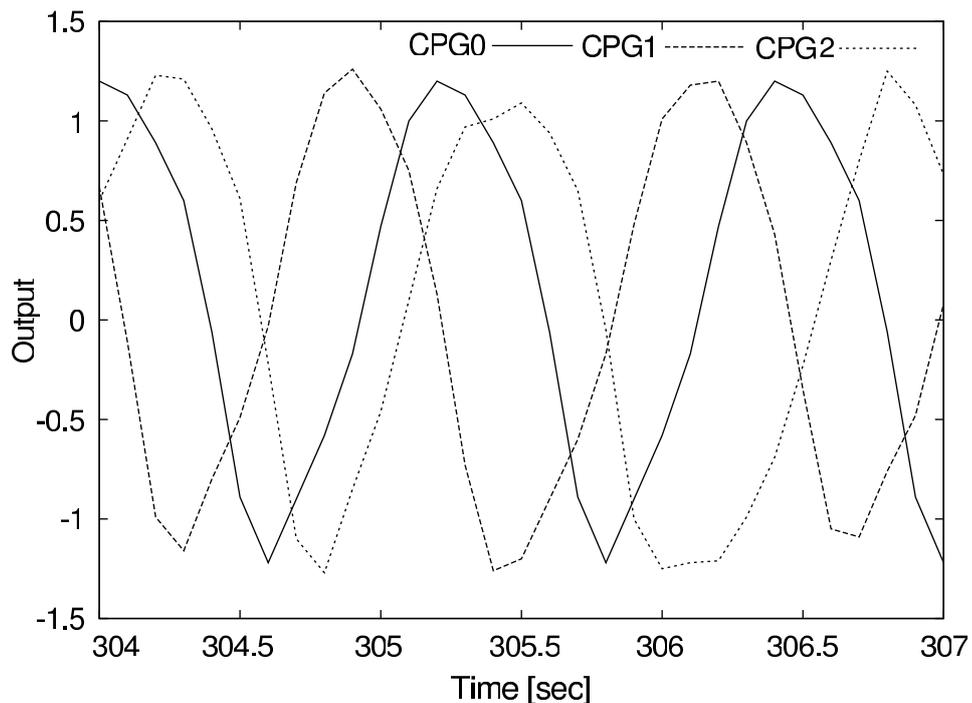


Fig.3.3 単一関節ユニット駆動実験

### 3.3 2次元1自由度蛇型ロボットによる蛇行実験

開発した NODE モジュールを 3 ユニット接続し, CPG による蛇型ロボットの蛇行リズムを 3 関節分生成する実験を行った. その際に用いた通信方式は信頼性を向上させるため有線による RS-232C 通信を使用した. 使用した CPG パラメータは **Table 3.1** に示す値である. 各 NODE モジュールから得られた 3 関節分の CPG 出力波形を **Fig.3.4** に示す. CPG 出力が定常時では周期が約 1.2[sec], 位相差が約 45[deg] となる. この CPG 出力を蛇型ロボットの各関節角度として入力すると蛇行体形を取り蛇行移動が可能である.



**Fig.3.4** 3 関節分の CPG 出力

蛇行移動が可能であることを確認するためにヨー軸周りに自由度を持つ, 2次元1自由度蛇型ロボットに得られた CPG 出力を関節角度信号として入力し蛇行実験を行った. この実験では蛇型ロボットには本研究で開発した自律分散制御システムは実装せず, 得られた CPG 出力を 2次元蛇型ロボットの制御 PC に入力して制御を行った. その結果, 2次元蛇型ロボットは蛇行移動をすることができた. そのときの様子をに示す.

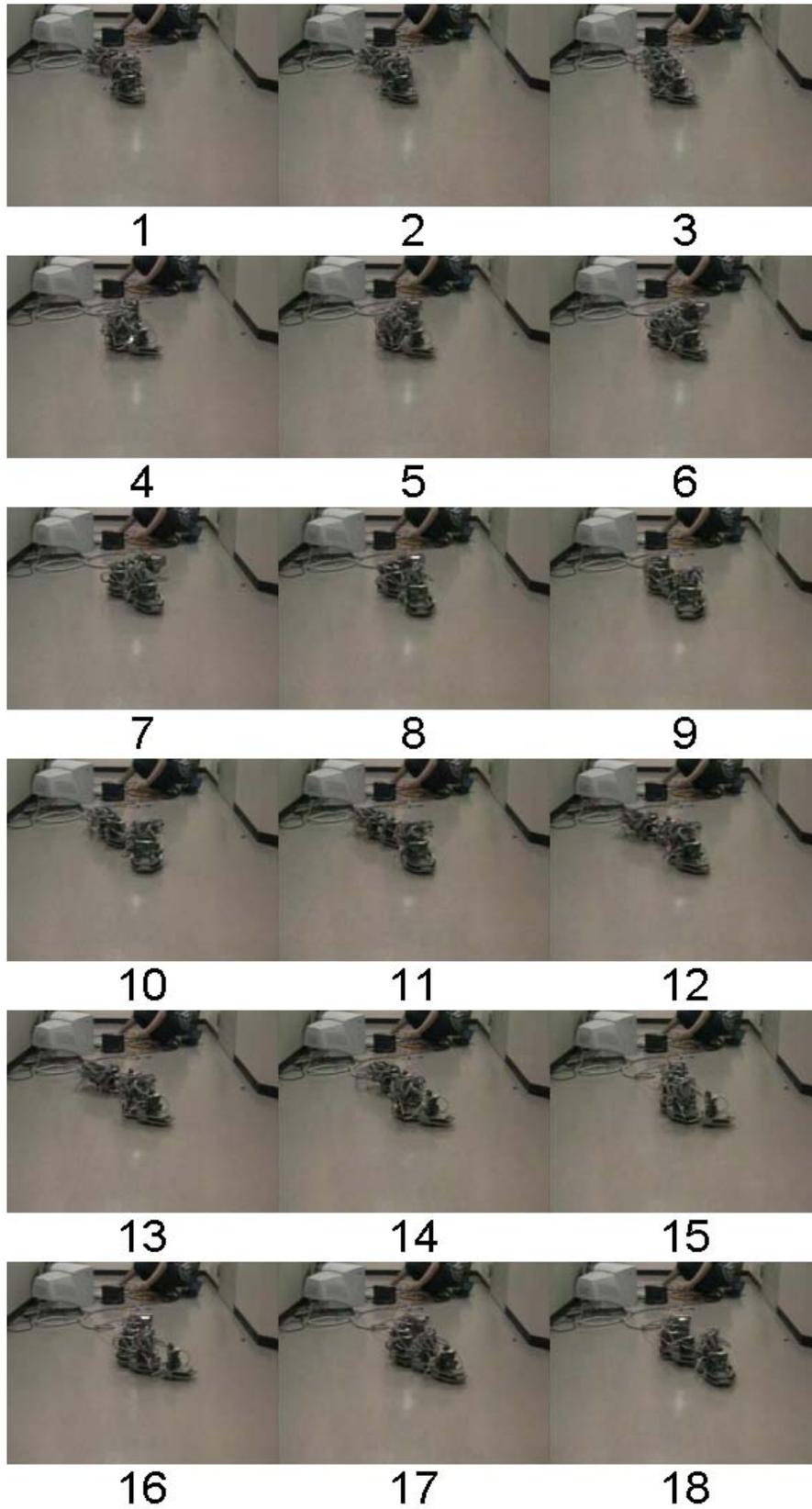


Fig.3.5 2次元1自由度蛇型ロボットによる蛇行実験

### 3.4 3次元2自由度蛇型ロボットによる蛇行実験

本研究で示した自律分散制御システムをロール・ヨー軸周りに自由度を持つ3次元蛇型ロボットに実装し、蛇行実験を行った。Fig.3.6で示すように3リンク、4関節ユニットの構成で蛇行実験を行う。

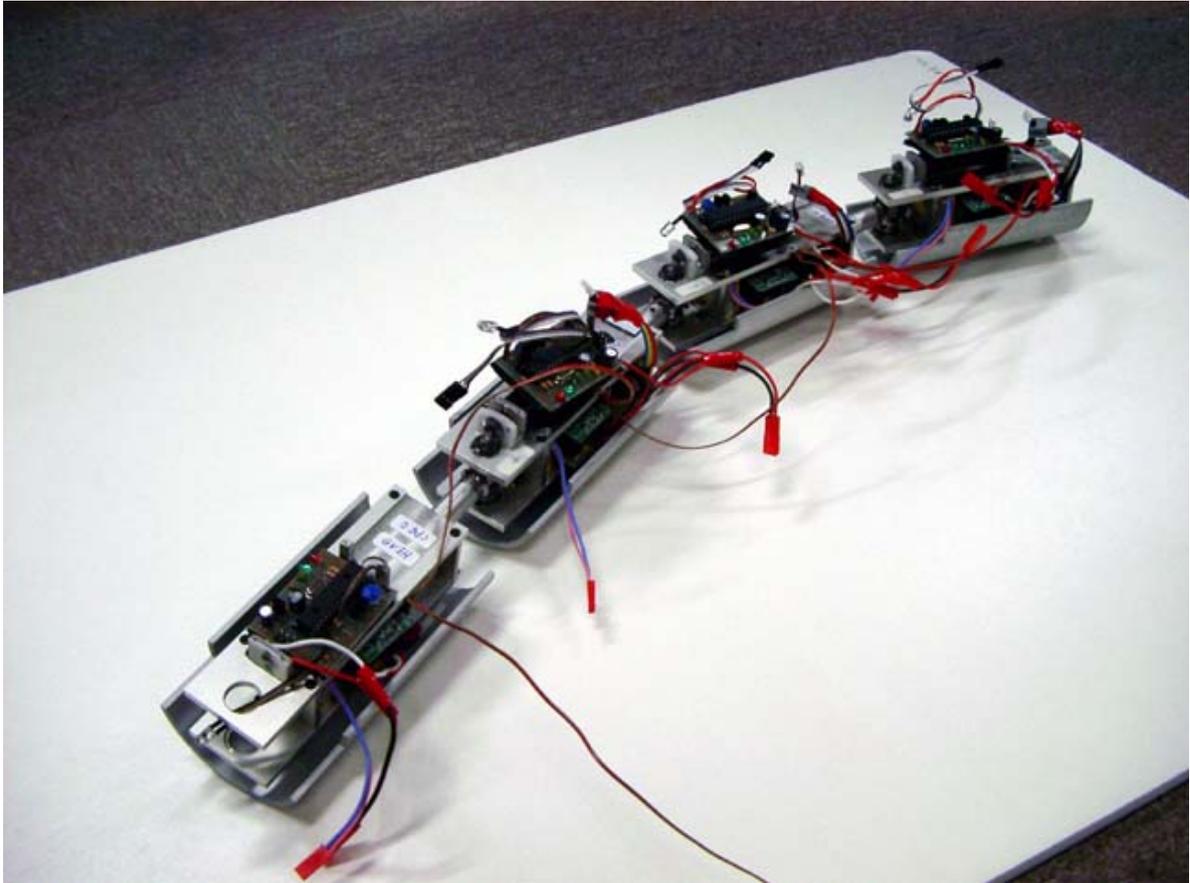


Fig.3.6 実験に用いた3次元2自由度蛇型ロボット

本システムにより生成された運動パターンをヨー軸周りの関節角度信号として使用する。使用したCPGパラメータはTable 3.1に示す値である。また信頼性を高めるために赤外線通信を用いずに、有線によるRS-232C通信を用いた。実験時の連続写真をFig.3.7に示す。立ち上がりから安定するまでに時間が8[sec]程度かかるが、定常時では蛇行をすることができた。実験により本システムを用いて蛇型ロボットが蛇行可能であることを確認することができた。

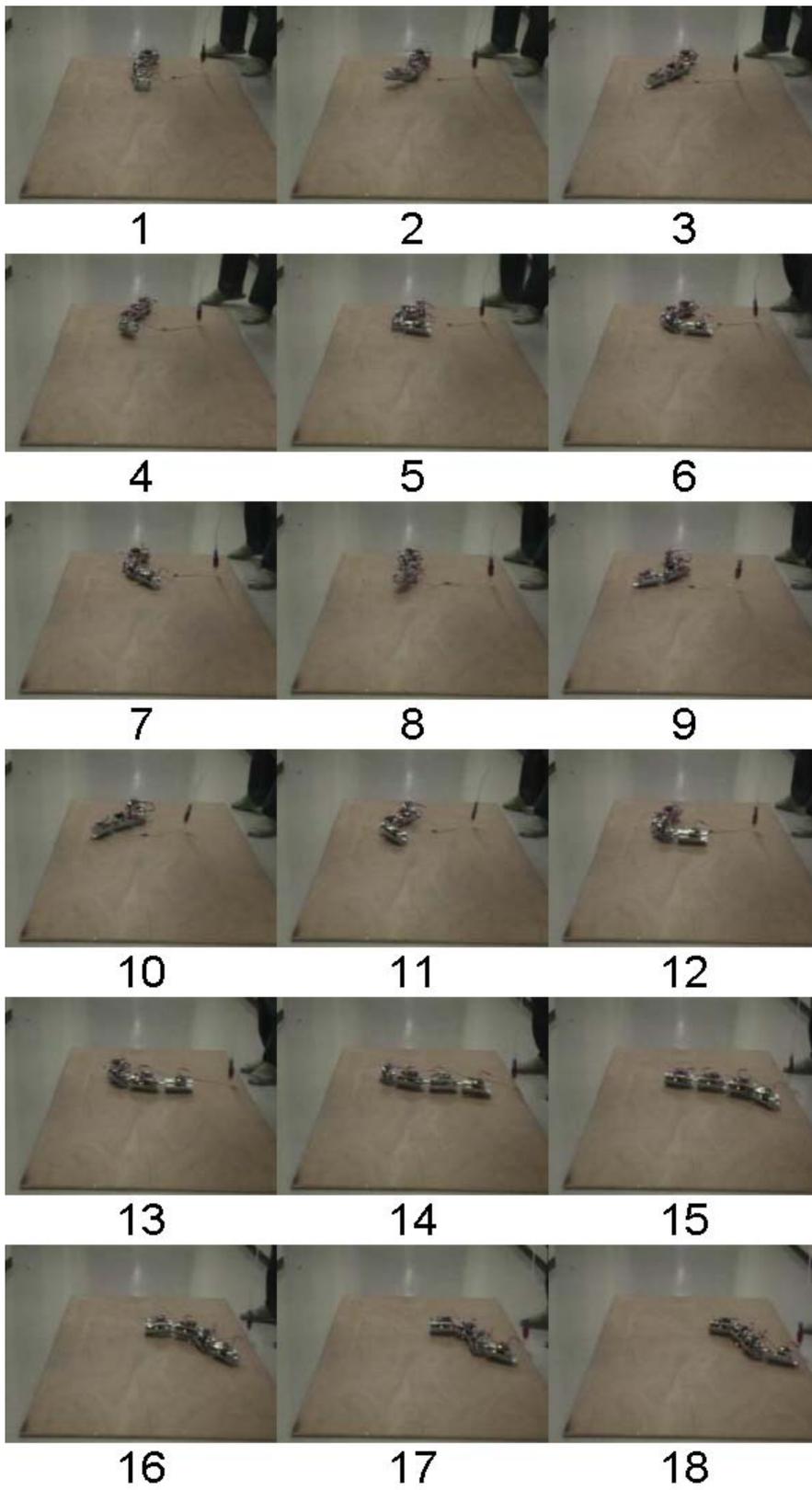


Fig.3.7 3次元2自由度蛇型ロボットによる蛇行実験

## 3.5 考察

前節で行った実験において、本研究にて開発した自律分散制御システムの有効性を検証した。その結果、蛇型ロボットの蛇行移動が可能であることを示した。だが問題点も浮き彫りとなった。それらを以下に挙げる。

1. 蛇行移動において運動パターンの立ち上がりに時間がかかる。
2. 蛇行移動中にヨー軸周りの可動限界角度を越えて関節が動作することがある。

1に関しては、これから蛇型ロボットを人間がコントロールする際に問題となる。これは CPG 出力波形を見ても言えることで、CPG 出力から起因する問題である。また関節角度を制御するサーボ系の遅れ時間及び時定数も影響している可能性がある。これを解決するためには CPG の観点で言えば現在の CPG ネットワーク構造は遠心性のみで構築されているが、求心性のネットワークを入れることによって立ち上がり時間の短縮が期待される。また関節角度制御に関しては現在 P 制御のみで行っているが PID 制御を導入し調整を行うことによって、改善できる。

2に関しては、実験中にヨー軸周りの可動限界角度を越えて動作することがありロボットの暴走に繋がるがあった。これは制御の問題であることに間違いない。原因として考えられることは関節角度の原点にずれが生じていることである。原点を検出するセンサを取り付けることが考えられるがセンサレスな制御系の構築を目指していたため現在は取り付けていない。センサがない場合、電源投入時の関節角度が原点として認識される。その位置がずれていると、関節角度制御の位置精度が著しく悪化する。このため最も良い解決法としては原点を認識するためのセンサを取り付けることであると考えられる。また、機構的に解決する方法としては可動限界角度付近にそれを認識するためのスイッチを安全装置として取り付けることである。これにより関節角度が可動限界角度に達したことを信号により NODE モジュール内の H8 マイコンに伝達して、関節角度が可動限界角度を越えないようにする処理を行う。この2つの改良を施せば解決できると思われる。



## 第4章

# 結論と今後の課題

## 4.1 まとめ

本論文では今現在求められている蛇型ロボットの動的環境適応性について述べ、それを実現するために生物が行っている自律分散制御を蛇型ロボットに適用すべく CPG を用いて蛇型ロボットの自律分散制御システムの構築及び開発を行った。そのシステム各部の詳細を述べ、そのシステムを3リンク4関節ユニットから成る3次元蛇型ロボットに実装し蛇行実験を行った。実験の結果から開発した蛇型ロボットの自律分散制御システムの有効性を示した。

## 4.2 今後の課題

実験により本論文で示した自律分散制御システムを用いることにより蛇型ロボットが蛇行移動することを示したが、不安定な部分も多く、蛇型ロボットを長時間連続的に駆動させるまでには至っていない。以下に今後の課題を挙げる。

1. 本論文では2次元平面での蛇行移動の実現を目的とすること及び通信の信頼性向上の理由から関節ユニット間通信では有線通信を使用した。  
今後、ロール軸周りの自由度を生かすためにも赤外線通信を使用した実験を行う必要がある。
2. 関節制御の方式を見直し、安全かつ高精度な制御系の構築をする。
3. サーボソフト及び通信プロトコルを拡充し蛇型ロボットを人間がコントロールできるようにする。

# 謝辞

本研究の遂行に当たり御指導下さった茨城大学工学部システム工学科馬 書根助教授に深く感謝の意を表します。また、研究において御意見、御協力下さいました同研究室、井上 康介助手、同学科、城 道介教授、石黒 美佐子教授、新村 信雄教授、新納 浩幸助教授、坪井 一洋助教授、近藤 久講師、岩崎 唯史助手、梅津 信幸助手に感謝の意を表します。

同研究室 CPG チームとしてゼミ等において熱心な討論をいただいた金 承華氏に深く感謝致します。

ゼミ等において熱心な討論をいただいた同研究室院生、Anshuka Srivastava 氏、張 磊氏、藍 光平氏、劉 順氏、柳田 聡司氏、田邊 裕基氏、森園 和也氏、並びに学部 4 年生の浅野 裕之氏、染谷 研二氏、綿引 栄作氏に深く感謝の意を表します。



## 参考文献

- [1] 福岡, 木村 : “CPG を用いた四足ロボット「鉄犬」による 3 次元不整地動歩行”, 第 7 回ロボティクス・シンポジア, pp.107-112, 2002.
- [2] S.Grillner : “The Motor Infrastructure : From Ion Channels to Neuronal Networks”, NATURE REVIEWS, VOLUME 4, 2003.
- [3] K.Matsuoka : “Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators,”  
Biological Cybernetics, Vol.56, pp.345-353, 1987.
- [4] 多賀 : “歩行の創発”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.5, pp.680-683, 1997.
- [5] <http://www.renesas.com/jpn/products/mpumcu/16bit/tiny/3694/>
- [6] <http://www.microchip.com/>
- [7] 鈴木 : “定本 トランジスタ回路の設計”, CQ 出版, pp.136-137, 2000
- [8] 藤井 : “なっとくするデジタル電子回路”, 講談社, pp.55-75, 2000
- [9] 金, 井上, 馬 : “CPG を用いた蛇型ロボットの自律分散制御”, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会論文集 (CD-ROM), 3B23, 2003.