卒業論文

ロール回転型2自由度関節による 3次元蛇型ロボットの開発

平成 15 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 00T6045L 氏 名 田邉裕基

目次

第1章	序論	1
1.1	蛇の生態	2
1.2	蛇型ロボットの特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
1.3	従来の3次元蛇型ロボット.........................	7
1.4	本研究の目的	9
1.5	本論文の構成	9
第2章	2自由度関節ユニットの機構	11
2.1	はじめに..............................	12
2.2	関節ユニットの構造と機構.......................	12
2.3	関節ユニットの特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	16
2.4	蛇型ロボットとしての特徴.......................	17
2.5	本章のまとめ	19
第3章	2 自由度関節ユニットの制御	21
3.1	はじめに...............................	22
3.2	関節出力角度の導出・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	22
3.3	位置制御系	22
3.4	サーボ制御の追従性	23
3.5	体形形状曲線	23
3.6	本章のまとめ、・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
第4章	実機実験	25
4.1	はじめに..............................	26
4.2	蛇行による推進	26
4.3	ロール自由度の利用	27
4.4	実験結果の考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
4.5	本章のまとめ	33
第5章	結論	35
5.1	本論文のまとめ..............................	36
5.2	今後の課題	36

	٠
1	1
1	1

謝辞	37
参考文献	39
付録A 2自由度関節ユニットの製図	41
付録 B 受動車輪の詳細図	45

図目次

1.1	蛇の環境適応能力.............................	2
1.2	蛇の移動形態	3
1.3	環境に適応する蛇型ロボット.......................	5
1.4	蛇型ロボットの移動形態	6
1.5	従来の3次元蛇型ロボット........................	8
2.1	2 自由度関節ユニット	12
2.2	関節ユニットの内部構造.......................	13
2.3	関節ユニットの機構	14
2.4	差動機構部のキューブ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	15
2.5	関節ユニットの外装	16
2.6	複雑な体幹形状を採る3次元蛇型ロボット・・・・・・・・・・・	18
3.1	サーボ制御系	23
3.2	追従性 (第4関節)	23
3.3	体形形状曲線	24
4.1	本研究の3次元蛇型ロボット	26
4.2	蛇行移動 (前進)	28
4.3	蛇行移動(後退)	29
4.4	体幹の持ち上げ..............................	30
4.5	ピッチ方向の動作............................	31
A.1	2 自由度関節ユニットの組立図1	42
A.2	2 自由度関節 ユニットの 組立図 2	43
B .1	受動車輪	46

表目次

2.1	主な部品の詳細	14
2.2	関節ユニットの仕様・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
2.3	従来の蛇型ロボットの関節ユニットの仕様	17
4.1	実機実験パラメータ	27

v

第1章 序論

本章では、研究の前段階として蛇の移動形態や蛇型ロボットの特徴並びに従来の蛇型ロボットの問題点を示し、さらに本研究の目的について述べる.

1.1 蛇の生態

蛇は紐状の単純な形態でありながら,体幹形状を複雑に変化させることにより, 以下に示すように様々な環境に適応することができる.

- 体幹をくねらせることにより,凹凸の激しい荒れ地でも推進することができる (Fig.1.1(a)).
- 自重を体幹全体に分散させることで、砂地や沼地などの軟弱な地盤上でも推進できる (Fig.1.1(b)).
- 細長い体幹を硬直化して,力学的に安定な姿勢を保持することによって,枝から枝へ乗り移るといった動作が可能である(Fig.1.1(c)).
- 体幹を巻きつけることで、物を把持するマニピュレータとしての機能も有する(Fig.1.1(d)).

上記のような蛇の特性を移動ロボットに適用することで,歩行型や車輪駆動型で は移動が困難である環境での推進も可能である.





(a)

(b)



(c)

(d)

Fig. 1.1: 蛇の環境適応能力

蛇は環境に応じた様々な移動形態を持つが,代表的なものとしては以下に示す4 種類の方法が考えられている[1].

- 蛇行移動… 多くの蛇に見られる典型的な移動形態であり、体幹を連続的に 湾曲させることで推進する (Fig.1.2(a)).
- 直線式移動... ミミズの様に移動する方法で,移動メカニズムとしては極めて
 単純であるが,進行方向に対する摩擦力が大きいため効率が悪い(Fig.1.2(b)).
- アコーディオン式移動… 静止摩擦係数が動摩擦係数よりも大きいことを利用して移動するため、滑べりやすい環境において移動しやすいという利点を持つが、推進効率は低い(Fig.1.2(c)).
- サイドワインダ式移動... 滑走中に体幹の一部を浮き上げ,あたかもスパイ ラルコイルが転がるように推進を行う (Fig.1.2(d)).





1.2 蛇型ロボットの特徴

様々な環境に適応することができる移動ロボットを考えた場合,小型・軽量であ り、状況に応じてその形状を変化させることができるロボットが有効となる。

蛇型ロボットは多数のユニットを直鎖状に連結していくことで構築されるため, 一般の移動ロボットと比較して進行方向に対する断面積が小さくて済む.これによ り狭い隙間への進入が可能である.また全体として多くの自由度を有するため,様々 な体幹形状を採用することができる.

以上より,蛇型ロボットは蛇同様に高い環境適応能力を有しており,実環境において極めて有効な移動ロボットであるといえる.

また, 蛇型ロボットは環境適応能力以外にも, 以下に示すような利点を持つ.

- 一部のユニットが故障・破損した場合でも、他のユニットがその部分を補う ことによりロボット全体としての機能が完全に停止する危険性が低い.
- 分離や再結合が容易であるため、1体の蛇型ロボットを2,3体に分割し協調作業を行うことも可能である.
- 移動体としてだけでなく、体幹を巻きつけることにより物を把持するといったマニピュレータとしても機能する.

このような特徴を有する蛇型ロボットは,以下に示すような従来の産業用ロボットでは作業が困難である極限環境での活躍が期待されている[2].

- 大震災発生時の被災地における生存者の探査(Fig.1.3(a))
- 草木の密集地帯における地雷の撤去作業(Fig.1.3(b))
- 細長い配管内における点検作業

このように、複雑に入り組んでいる上に危険性を有するような環境であっても、 蛇型ロボットはその冗長な自由度を有効に活用して環境に適応することで推進が 可能となる。

また,蛇型ロボットが採ることのできる移動形態には蛇行型をはじめ,リング型, 尺取虫型,弓型などの様々な形態が提案されている (Fig.1.4).

1.2. 蛇型ロボットの特徴



(a) 被災地での移動



(b) 草木の密集地帯での移動

Fig. 1.3: 環境に適応する蛇型ロボット



(a) 蛇行型

(b) リング型





(c) 尺取虫型

(d) 弓型

Fig. 1.4: 蛇型ロボットの移動形態

1.3 従来の3次元蛇型ロボット

蛇型ロボットは,能動的な1つ以上の自由度を有する関節ユニットを直鎖状に連結していくことにより構成される.蛇型ロボットの中には,各関節ユニットが有する自由度が1つのみで,さらにその自由度が全て同一軸回りのものであることにより,2次元的な運動のみを行うものも存在する.しかし多くの蛇型ロボットは,全体として2軸回り以上の回転を行うことのできる3次元蛇型ロボットである.以下に従来開発された3次元蛇型ロボットを示す.

ACM-R2:体幹を持ち上げる際の出力トルクを上げるために,ワイヤとハーモニッ クギアの組み合わせにより,軽量で大きな減速比を得ている.同時に差動機構を用 いることによりモータパワーを有効に活用している.これによりヨー,ピッチ軸回 りの2自由度を有する(Fig.1.5(a))[3].

ACM-R3: 各関節には1自由度ずつしか有していないが, それらのユニットに 90°のオフセットを持たせて連結することで, 全体として3次元運動を実現できる (Fig.1.5(b))[4][5].

ACM IV: 傾斜した回転軸回りに旋回する "斜旋回機構"と, 同軸回りに旋回する "同軸旋回軸"とを交互に連結することによりヨー, ピッチ軸回りに動作することが できる. この機構により, 屈曲軸の機構設計がコンパクトにでき, 全体として軽量で かつ剛性が高い (Fig.1.5(c))[6].

GMD-Snake: 伝達機構にワイヤを用いることにより, 蛇行移動や, 障害物を乗り 越えるといった 3 次元的な運動が可能である (Fig.1.5(d))[7][8].

おろち: ユニバーサルジョイント内部を斜板駆動機構で駆動するアクティブユニ バーサルジョイントと呼ばれる関節機構を採用している.両軸を互いに捻ることに より2自由度を得る方法である(Fig.1.5(e))[9][10].

3次元蛇型ロボット (本研究室): 各関節ユニットにヨー, ピッチ, ロールの3自由 度を有している. また, 差動機構を採用することでヨー, ピッチ軸回りに大きなトル クを発生することができる (Fig.1.5(f)) [11].

しかし,従来開発された3次元蛇型ロボットの多くは,各関節の可動限界角が小 さいために,蛇同様の複雑な体幹形状が採れないという問題がある.また Fig.1.5(f) は可動性は高いが,搭載するモータやドライバの個数が多く,重量,スケール,コス トの増大といった問題がある.そこで,重量,スケール,コストを抑制しつつも運動 性能は極力下げないような3次元蛇型ロボットの開発が重要となる.





(a)

(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 1.5: 従来の3次元蛇型ロボット

1.4 本研究の目的

従来開発された3次元蛇型ロボットの多くは、各関節の可動限界角が±60°前後 と小さいために、生物の蛇同様の複雑な体幹形状が採れないという問題がある.ま た Fig.1.5(f)は可動性は高いが、搭載するモータやドライバの個数が多く、重量、ス ケール、コストの増大といった問題がある.そこで、重量、スケール、コストを抑制し つつも運動性能は Fig.1.5(f)と比較して極力下げないようにし、さらに各関節が大 きな可動限界角を有するような3次元蛇型ロボットの開発が重要となる.

現在までに、ロールの自由度が蛇型ロボットにおいてどの程度有効であるかの検 証はほとんどなされていない.しかし、ロール回転によりヨーとピッチの自由度が 両方とも実現できる上、機構的にはロール軸回りの可動角制限が無い.従って、本研 究では可動限界角を大きくし、ロール軸とそれに直交する軸の自由度を有する3次 元蛇型ロボットの開発を行い、その有効性を検証することを目的とする.

1.5 本論文の構成

以降の本論文の構成は以下のようになる.

第2章では、本研究で開発した2自由度関節ユニットの機構と構造について示した上で、それらを連結して実現する3次元蛇型ロボットに特徴について示す.

第3章では、本研究で開発した2自由度関節ユニットの制御方法について示す.また、その制御の追従性や蛇行移動時の蛇型ロボットの体形形状曲線について示す.

第4章では、本研究で開発した2自由度関節ユニットを9つ連結することで構築 した3次元蛇型ロボットの有効性を検証するために行った実機実験について説明 し、その結果と考察を述べる.

第5章では、本論文のまとめと今後の課題について述べる.

第2章 2自由度関節ユニットの機構

本章では,開発した2自由度関節ユニットの機構並びに構造についての解説を行い, その関節ユニットを連結して実現する3次元蛇型ロボットの特徴を述べる. 2.1 はじめに

本章では、まず開発した2自由度関節ユニットの機械的構造やその機構について 述べた後、その特徴と仕様を示す、また、それらを連結して実現する3次元蛇型ロ ボット全体としての特徴について示す.

2.2 関節ユニットの構造と機構

まず,本研究で開発する3次元蛇型ロボットの構成単位である2自由度関節ユニットを Fig.2.1 に示す. さらに,この関節ユニットの内部の構造を模式的に表した図を Fig.2.2 に示す.



Fig. 2.1:2自由度関節ユニット

この関節ユニットのフレームの部材には軽量で安価なアルミを使用している.また,上下には超小型のDCモータとドライバを2つずつ搭載し,伝達部品には小モジュールの小型マイタギアを使用している.さらに位置検出には,磁気式エンコーダをモータの後部に直接取り付けて使用している.



番号	部品名	番号	部品名
1,2	マイタギア(小,大)	6	磁気式エンコーダ
3	キューブ	\bigcirc	ドライバ
4	ギアヘッド	8	金属カラー
5	DCモータ	9	バッテリ

Fig. 2.2: 関節ユニットの内部構造

この関節ユニットで使用されている主な部品の詳細を Table 2.1 に示す.

番号	製造元	品名	備考
4	maxon	GP13K	減速比 1119:1
5	maxon	RE13	定格トルク 1.38mNm
6	maxon	磁気式エンコーダ	分解能 (カウント/回転)16
\bigcirc	ライテックス	JW-0144-2	定格出力 72W
9	AIR CRAFT	ET-P0250-3S	Li-Poly, 11.1V/250mAh

Table 2.1: 主な部品の詳細

基準姿勢において,ヨーとロールの2自由度を有する関節ユニットの機構図を以下の Fig.2.3 に示す.



Fig. 2.3: 関節ユニットの機構

各ユニットに搭載された φ13の小型 DC モータの動力が,まず高減速比を有する ギアヘッドを介して伝達部のマイタギアに伝えられ,次にモータ軸と直交している 縦軸を通して差動機構を構成する4つのマイタギアへ伝達されている.

本ユニットで使用しているマイタギアはいずれもモジュール 0.5, ハブ外径 10mm 前後の超小型のもので,これによって軽量化と同時に伝達部,差動機構部の省スペー ス化を実現している.

差動機構とは干渉駆動の一種であり、複数のアクチュエータを相互に干渉させて 駆動することにより、アクチュエータの稼働率と出力を大きくする機構である.本 ユニットでは,ヨー軸回りとロール軸回りのそれぞれに対して上下2つのモータが 干渉して駆動することで高出力化を実現している.

しかし、このようにマイタギアを組み合わせて構成される差動機構部はその機構 上、軸が片持ちになってしまうために強度が低いという欠点がある。これを克服す るため、本ユニットでは差動機構の中にキューブを挟んでいる。このキューブには Fig.2.4 に示すように超小型ベアリングが取り付けてあり、ここに縦軸の先端部分と 横軸が通ることにより差動機構部は擬似的に両持ちとなる。これにより、本ユニッ トの差動機構部の剛性は高くなっている。



Fig. 2.4: 差動機構部のキューブ

また,ジョイント部には金属カラーを加工したものを使用している.この部品は 円筒形状をしているため,極めて応力に強い.そのため,荷重が集中する部分である にも関らず,フレームと同様に軽量で安価なアルミを採用することができている. この金属カラーの長さを適度に設定することにより,ヨー軸回りに±90°の可動限 界角を得ている.

本研究で開発した関節ユニットには,Fig.2.5 に示すように外装を取り付けること ができる. これは,円筒を縦に割って2分割したものを上下から取り付ける形式に なっており,厚みは3mmと薄く,材質はやはりアルミである. この外装は,内部の 関節ユニット本体からは完全に独立しているため,取り付けも取り外しも容易にで きる.

また,蛇型ロボットが蛇行移動を行う際には,満たさなければならない条件がある.それは以下に示す2つである[1].

- 体幹の接線方向への摩擦力が小さい(滑りやすい).
- 体幹の法線方向への摩擦力が大きい(滑りにくい).



Fig. 2.5: 関節ユニットの外装

これらの条件を満足するためには,関節ユニットが地面と接地する箇所に車輪またはエッジの類があればよい.そこで,本ユニットの下側の外装には受動車輪が付加されている.この受動車輪によって,蛇型ロボットが蛇行移動を行う際の必要条件を満足することができる.

2.3 関節ユニットの特徴

開発した2自由度関節ユニットは以下に示すような特徴を持つ.

- モータやドライバなどの構成部品に超小型のものを使用し、またフレーム、ジョイント、外装などの部材にアルミを採用したため非常に小型かつ軽量である.
- 差動機構を採用しているため、ヨーとロールを個別に駆動する場合に比べて 出力が大きく、またアクチュエータの稼働率が高い.
- ジョイント部の金属カラーの長さを適度に設定したため、ヨー軸回りに大きな可動限界角を有する.
- ロール軸回りは機構的には可動角に制限が無く,無限回転することができる.

2.4. 蛇型ロボットとしての特徴

 ポテンショメータと比較して精度の高いエンコーダの採用により、高精度の 位置検出が可能である.

また、この関節ユニットの具体的な仕様を Table 2.2 に示す.

寸法 [mm]
重量 [kg]
トルク (Yaw, Roll)[Nm]
回転速度 (Yaw, Roll)[rpm]
14.75, 14.75
可動限界角 (Yaw, Roll)[deg]
±90, ±∞

Table 2.2: 関節ユニットの仕様

Table 2.3: 従来の蛇型ロボットの関節ユニットの仕様

	ACM-R3	おろち	3次元蛇型ロボット(本研究室)
寸法 [mm]	110.0×110.0×110.0	$185.0 \times 42.0 \times 42.0$	$220.0 \times 95.0 \times 110.0$
重量 [kg]	0.6	0.6	1.9
可動限界角 [deg]	± 62.5 (Yaw,Pitch)	± 60.0 (Yaw,Pitch)	± 90.0 (Yaw,Pitch)
			± 180.0 (Roll)

本研究の蛇型ロボットの関節ユニットが他の蛇型ロボットのものと比べて軽量 であること、またヨーに ±90.0、ロールには無制限という可動限界角を有すること からも、本ユニットの機構の優位性が分かる (Table 2.3).

2.4 蛇型ロボットとしての特徴

本研究ではこの関節ユニットを9つ連結することによって,3次元蛇型ロボット を実現する (Fig.2.6). この蛇型ロボット全体としての特徴を以下に示す.

- 各関節ユニットが有するロールの自由度を利用することで、ヨーとピッチの 運動を両方とも実現できる.
- 各関節ユニットが大きな可動限界角を有しているため, Fig.2.6 に示すような 複雑な体幹形状の採用ができる.
- 体幹が円筒形状をしているため、接地状態からのロール回転でも抵抗は極めて小さく、スムーズに回転できる.



Fig. 2.6: 複雑な体幹形状を採る3次元蛇型ロボット

2.5 本章のまとめ

本章では、開発した2自由度関節ユニットの機械的構造やその機構について説明 し、その関節ユニットが基本フレームをはじめ各部にアルミを使用していることや、 超小型・軽量の部品を採用していることなどから、非常に小型かつ軽量に仕上がっ ていることを示した.さらに、エンコーダを使用することで精度の高い位置検出が 可能であることや、差動機構を採用することによって、スケールの割りに大きな出力 とアクチュエータの高い稼働率を得ていることを示した.その上で、それらを連結 することによって実現する3次元蛇型ロボット全体としての特徴について示した.

本章では,開発した2自由度関節ユニットの制御方法について示す.また,その制御の追従性や蛇行移動時の蛇型ロボットの体形形状曲線について示す.

3.1 はじめに

本章では、まず開発した2自由度関節ユニットが差動機構を採用していてかつ位 置検出に使用しているエンコーダが出力軸ではなくモータ軸に直接取り付けられ ているため、差動機構を介しての出力角度を求めるために必要な計算式について示 す。次に、各モータに対して適用されている制御系について説明した後、その制御 の追従性を示す。そして蛇型ロボットが蛇行移動を行う際の体形形状曲線につい ての説明を行う。

3.2 関節出力角度の導出

各関節の差動機構を介しての出力角度は式(3.1),(3.2)より導出する.

$$\phi_{yi} = \frac{1}{2}(\phi_{ui} - \phi_{di}) \tag{3.1}$$

$$\phi_{ri} = \frac{1}{2}(\phi_{ui} + \phi_{di}) \tag{3.2}$$

ここで、 ϕ_{ui} 、 ϕ_{di} はモータの回転角度入力を示し、 ϕ_{yi} 、 ϕ_{ri} はヨー、ロール軸回りの出力 角度を示す、また、i(i = 1, 2, ..., n - 1)は関節番号、nはリンク数である、ただし、"モー タ"とはギアヘッドとDCモータを一体と考えたものである、すなわち、 ϕ_{ui} 、 ϕ_{di} はギアヘッドを介しての回転角度である、

3.3 位置制御系

本ユニットで使用するドライバの入出力形式は電圧値である.よって,ドライ バからモータへ出力される電圧の大小に応じてモータの速度が増減する.以下 で,本ユニットに搭載されているモータの制御方法を説明する.

目標位置 θ_d にモータの実際の位置 θ を追従させるためには, 位置偏差 $\Delta \theta$ に応じてモータの目標速度 ω_d を調整すればよい [12]. よってその制御則は式 (3.3) に示すような比例制御となる.

$$\omega_d = K_p \Delta \theta = K_p (\theta_d - \theta) \tag{3.3}$$

ここで, K_p は位置ゲイン, $\theta \in \{\phi_{ui}, \phi_{di} | i = 1, 2, ..., n-1\}, n$ はリンク数である.

続いて、その目標速度 ω_d にモータの実際の速度 ω を追従させるためには、今度は速度偏差 $\Delta\omega$ に応じて指令値を調整すればよいことになる、よってその制御則は(3.4)に示すような比例制御となる.

$$\omega = \dot{\theta}$$

$$V_d = K_v \Delta \omega = K_v (\omega_d - \omega)$$
(3.4)

ここで, K_v は速度ゲイン, V_d はドライバへの指令電圧値である.

このように,エンコーダが検出した位置θを微分して角速度ωを求め,そのωに よる速度フィードバックを含む位置制御系を構築している.この制御系のブロック 線図を Fig.3.1 に示す.



Fig. 3.1: サーボ制御系

3.4 サーボ制御の追従性

Fig.3.1 に示すサーボ制御の追従性を Fig.3.2 に示す. ここでは第4 関節における ヨー,ロールそれぞれの回転方向に対して 45[deg]のステップ信号を入力し,それに 対する応答を調べた. この結果から,追従性は十分良いことが分かる.



Fig. 3.2: 追従性(第4関節)

3.5 体形形状曲線

蛇が蛇行移動時に描く曲線のことを体形形状曲線と呼ぶ.本研究ではこの体形形状曲線として,広瀬らによって命名・定式化されたサーペノイド曲線[1]を用いることにする.この曲線は,Fig.3.3に示すように「曲率が曲線に沿って正弦波状に変化する曲線」と定義され,蛇の蛇行移動時の体形を最も良く近似するものであり,観測実験により明らかにされている.サーペノイド曲線の曲率 $\kappa(s_p)$, 各関節へ与える

角度 ϕ_{vi} をそれぞれ式 (3.5),(3.6) に示す.

$$\kappa(s_{p}) = -\frac{2K_{n}\pi\alpha_{0}}{L}\sin(\frac{2K_{n}\pi}{L}s_{p}) + K_{1}$$

$$\phi_{yi}(s) \approx \int_{s+s_{p_{i-1}}+\frac{1}{2}l}^{s+s_{p_{i-1}}+\frac{1}{2}l}\kappa(u)du$$

$$\approx \int_{s+(i-1)l+\frac{1}{2}l}^{s+il+\frac{1}{2}l}\kappa(u)du$$

$$\phi_{yi}(s) = -2\alpha_{0}\sin(\frac{K_{n}\pi}{n})\sin(\frac{2K_{n}\pi}{L}s + \frac{2K_{n}\pi}{n}i) + K_{1}l$$
(3.5)
(3.5)
(3.5)
(3.5)

ここで, K_n はS-形状の数, α_0 は初期くねり角,Lは体幹全長, s_p は体形曲線の曲線長,sは体形曲線に沿う蛇型ロボット末端の移動距離, K_1 はバイアス曲率,lは各リンク長, $n(=\frac{L}{T})$ はリンク数,i(i = 1, 2, ..., n - 1)は関節番号である.



Fig. 3.3: 体形形状曲線

3.6 本章のまとめ

本章では,開発した2自由度関節ユニットの差動機構を介しての最終的な出力角 度を求めるための計算式について示し,さらにモータに対して適用されている制御 則とそれによって実現されている速度フィードバックをを含む位置制御系につい て説明した.また,その制御系の指令に対する追従性を示し,応答性が良いことを確 認した.最後に蛇型ロボットが蛇行移動を行うために必要である体形形状曲線とし て,本研究ではサーペノイド曲線を選択したこととその定義について説明した.

第4章 実機実験

本章では,開発した2自由度関節ユニットを連結して構築した3次元蛇型ロボットの有効性を検証するために行った実機実験の内容を示し,その結果と考察を述べる.

4.1 はじめに

本章では、開発した2自由度関節ユニットを連結することで構築した3次元蛇型 ロボットを用いた実機実験について説明を行う.実験内容は、蛇行による推進とロー ルの自由度を利用した動作で、それにより本研究の3次元蛇型ロボットの機構並び に制御手法の有効性を検証する.

4.2 蛇行による推進

本研究で開発した2自由度関節ユニットを9つ連結することによって構築した3 次元蛇型ロボットを Fig.4.1 に示す.



Fig. 4.1: 本研究の3次元蛇型ロボット

この3次元蛇型ロボットへのヨー軸回りの入力として式(3.6)を使用することで, 蛇行による推進実験を行った. 本実験ではまず,式(3.6)の体形曲線に沿う蛇型ロボット末端の移動距離 sを一 定間隔で連続的に減少させていった.これはすなわち,入力として与えるサーペノ イド曲線の位相を負の方向ヘシフトさせることで,これにより Fig.4.2 に示すよう に蛇行によって蛇型ロボットが前進する.ここで,本研究の蛇型ロボットの制御で は,入力を与える順序が進行方向(尾 頭)ではなく,反対方向(頭 尾)であるため このように移動距離 sを減少させることで前進することになる.

次に,先程とは逆に s の値を一定間隔で連続的に増加させていった.これにより 先程とは位相がシフトする向きが逆になるので,結果として蛇型ロボットは蛇行に よって後退する.この様子を Fig.4.3 に示す.

本実験において使用したサーペノイド曲線のパラメータを Table 4.1 に示す.

S-形状の数:	K _n	1
初期くねり角:	$lpha_0$	45[deg]
体幹全長:	L	1.422[m]
バイアス曲率:	<i>K</i> ₁	0
リンク長:	l	0.158[m]
リンク数:	п	9

Table 4.1: 実機実験パラメータ

4.3 ロール自由度の利用

本研究の3次元蛇型ロボットは、体幹をくねらせている状態からロールの自由度 を利用することで、体幹を持ち上げるなどの3次元的な動作を行うことができる.

また既に述べたように、体幹が円筒形状をしているので一般に良く見受けられる 角型のユニットとは違い、地面と接地している状態からでもほとんど抵抗無くその ままロール回転ができる. Fig.4.4 に先頭の2 関節をロールの自由度で持ち上げてい る様子を示す.

さらに、この姿勢からだと持ち上げられている部分はロール回転によって自由度 が切り替わったためピッチ方向に動作することができる、その様子を Fig.4.5 に示す.



Fig. 4.2: 蛇行移動(前進)



Fig. 4.3: 蛇行移動(後退)



Fig. 4.4: 体幹の持ち上げ

4.3. ロール自由度の利用



Fig. 4.5: ピッチ方向の動作

4.4 実験結果の考察

実機実験で行った以下の2つについての考察を行う.

1.	蛇行移動による平面	上の推進
----	-----------	------

2. ロールの自由度を利用した3次元的な動作

【考察】

- 本実験においては、蛇行によって前後に推進すること自体は成功したしかし、 入力としては前後とも完全な"直進"であったにも関らず実際にはやや斜めに 移動していることが見て取れた、この原因としては以下の2つが考えられる.
 - 実環境において必ず生じる体幹の法線方向への滑りの影響を考慮した 制御になっていない。
 - 実時間制御になっていない.

これらの対策としては、滑りを考慮した動力学制御の導入やRT-Linux による 実時間制御の導入などが挙げられる.

- 本実験においては、蛇型ロボットの先頭の2関節をくねらせた状態から第3 関節をロール軸回りに約90°回転させることで2つの関節を持ち上げること ができた、しかし、角度を入力してから即座に持ち上げることはできず、まず 第3関節をロール回転させる第4関節が、持ち上げようとする方向とは逆方 向へ少し回転した、その動作が止まってから改めて第3関節をロール回転さ せて先頭の2関節を持ち上げるに至った、この原因としては以下のことが考 えられる、
 - 任意の姿勢から任意の動作を行う際のそれぞれの関節に対する必要ト ルクの大小関係を考慮していない。
 - ギアヘッドのバックラッシュが大きい。

これらの対策としては、任意の姿勢において体幹を持ち上げるなどの動作に対 する必要トルクを計算し、現在の状態から目的とする動作が可能かどうかの 判定を行うことのできる手法の導入やギアヘッドの交換あるいは大きなバッ クラッシュを考慮に入れた制御手法の導入などが挙げられる.

4.5 本章のまとめ

本章では,開発した2自由度関節ユニットを9つ連結することで構築した3次元 蛇型ロボットを用いての実機実験を行い,その様子と実験結果を示した.結果的に は,蛇行移動による前後方向への推進もロールの自由度を利用した動作も両方とも 実現は可能であったが,どちらも完璧なものではなく,それぞれに問題点があるこ とを示した.そしてその問題点の原因と対策についての考察を行った.

第5章 結論

本論文の内容を総括し、今後の展望や課題について述べる.

5.1 本論文のまとめ

本論文では、まず蛇型ロボット自体の特徴について説明した後、従来開発された 3次元蛇型ロボットの問題点を指摘し、それを解決できる機構としてロールを含む 2自由度関節機構を提案し、その開発を行った.

そして、その関節ユニットが従来の3次元蛇型ロボットの関節ユニットと比較し て大きな可動限界角を有し、また差動機構を採用することでアクチュエータの稼働 率と出力を大きくし、さらにエンコーダの使用によりロールの無限回転と高精度の 位置検出を実現していることを示した上で、具体的な制御方法と制御系の追従性の 良さを示した.

また,実機実験を行うことで2自由度関節ユニットを連結して構築した3次元蛇型ロボットの有効性を検証した.

5.2 今後の課題

本研究で開発した3次元蛇型ロボットは機構的には有効性が高いが制御に関しては不十分であり,ロールの自由度も十分には利用されていない.

今後は,開発した3次元蛇型ロボットを用いてロールの自由度を利用した様々な 推進形態を実現し,その有効性の検証を行うことを目標とする.以下に今後の課題 を示す.

- 1. 現在の制御の問題点を改善する.
- 2. 実機の部分的な補強を行う.
- 3. 蛇型ロボットの無線化・自律化について検討する.
- 4. 本研究の蛇型ロボットをモデルとしたシミュレータを開発する.
- 5. ロールの自由度を利用した様々な推進形態をシミュレーション実験によって 検証する.
- 6.5.の推進形態を実機実験によって検証する.

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,米澤 保雄 助教授,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 助手に深く感謝の意を表します.最後にゼミ等において熱心な討論をいただいた同 研究室の Jean Bosco Mbede 氏, Anshuka Srivastava 氏,張 磊氏,野村 政英氏,田所 直 樹氏,本田 良徳氏,川瀬 雅之氏,付 清軍氏,佐々木 亮氏,金 承華氏,劉 順氏,柳田 聡 司氏,森園 和也氏,藍 光平氏に深く感謝の意を表します.

参考文献

- [1] 広瀬茂男,"生物機械工学",工業調査会,1987
- [2] http://www.ai-link.ne.jp/free/news/talknow/talk_page/2001_7.htm
- [3] K.Togawa, M.Mori, S.Hirose, "Stugy on Three-dimentional Active Cord Mechanism-Development of ACM-R2," IROS, pp.2242-2247,2000
- [4] M.Mori,S.Hirose, "Development of Active Cord Mechanism ACM-R3 with Agile 3D mobility," IROS,pp.1552-1557,2001
- [5] 森, 広瀬, "3 次元索状能動体 ACM-R3 を用いた推進実験", 日本機械学会ロボ ティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集,2002
- [6] 広瀬茂男,"ロボット工学", 裳華房,1987
- [7] http://www.ais.fraunhofer.de/BAR/snake.html
- [8] K.L.Paap, M.Dehlwisch, B.Klaassen, "GMD-Snake: A semi-Auto nomous Snakelike Robot," In: Distributed Autonomous Robotic Systems 2, Springer-Verlag, Tokyo, 1996
- [9] 高梨, 青木, 谷嶋, "完全モジュラー型関節の開発と超多自由度ロボット「おろち」への適用", 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.499-500, 1995
- [10] 高梨, 青木, 谷嶋, "超多自由度ロボット「おろち」の歩容制御", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'96 講演論文集 (Vol.A), pp79-80, 1996
- [11] 佐々木,馬,井上,"3 自由度関節を有する蛇型ロボットの開発",第 21 回日本ロ ボット学会学術講演会予稿集,2003
- [12] 松日楽, 大明, "ロボットシステム入門", オーム社, 1999

付録A 2自由度関節ユニットの製図

開発した2自由度関節ユニットの組立図を示す.

本研究で開発した2自由度関節ユニットの製図(組立図)を以下に示す. Fig.A.1 に平面図(上)と正面図(下)を示す.



Fig. A.1:2自由度関節ユニットの組立図1

Fig.A.2には不等角投影による補助図(上)と左側面図(左下),右側面図(右下)を示す.





Fig. A.2:2自由度関節ユニットの組立図2

付録B 受動車輪の詳細図

本ユニットで使用されている受動車輪の詳細を示す.

本研究の蛇型ロボットが蛇行移動を実現するために使用している受動車輪の 構造を Fig.B.1(a) に示す. また, その受動車輪が外装に取り付けられている様子を Fig.B.1(b) に示す.



(b) 外装に付加された受動車輪

Fig. B.1: 受動車輪