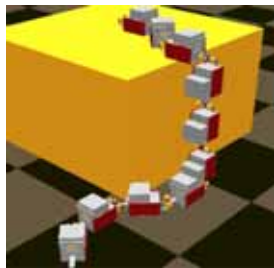


### 3.5.7 3自由度関節を有する蛇型ロボットの開発

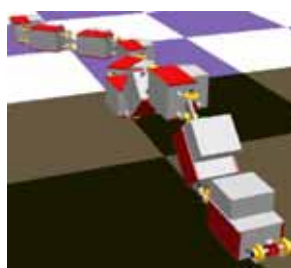
茨城大学 馬書根  
井上康介

#### (1) 目的

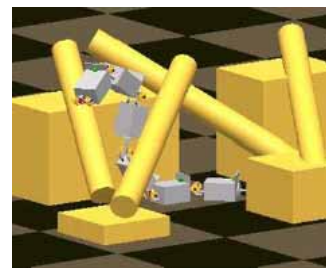
蛇は紐状の単純な形態でありながら体幹をくねらすことにより様々な環境において推進が行なえる。またその冗長性を生かすことによって形態を変化させ、複雑な環境に適応することができる。本研究では蛇の能力をロボットへ適用し、環境適応性の高い3次元蛇型ロボットを開発することを目指す。本研究の目的としては、1) 3自由度の動作が可能な関節を設計し、これを用いた3次元的動作の可能な蛇型移動ロボット(図1)を試作すること;及び、2) 瓦礫等の存在する未整備環境において3次元蛇型ロボットを動作させるための、環境に適応可能な運動機能を付与することである。



(a) 段差の乗り越え



(b) 接地面の変更



(c) 複雑環境への進入

図1 3次元蛇型ロボット

蛇型移動ロボットは震災等における瓦礫の散在する環境下での生存者の探索・救援などの作業が行なえるために、その性能として複雑な形態を採ることのできる広い可動限界角と生物の蛇の動きに固執されない、図2に示すより効率的な推進形態を採ることが要求される。これを実現するため、本研究では各関節に $\pm 90$ 度以上の可動限界角を持つ3次元蛇型ロボットを開発する。

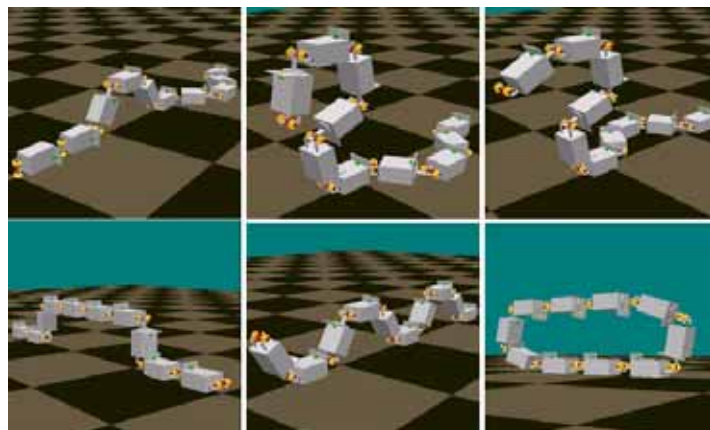


図2 3次元蛇型ロボットの動作例

## (2) 年次実施計画

本研究では、まずロール・ピッチ・ヨー3自由度を持つ関節ユニットを設計・試作し、その性能を評価する。次にこれを10個製作し、10節30自由度の3次元蛇型ロボットを開発する。3次元蛇型ロボットの機械モデルが出来た後、環境適応エッジの設計、環境検出センサの搭載、制御の自律化などを行なう。

平成14年度 3自由度関節の設計・試作、及びその制御システムの構築を行なう。

3自由度を持つ関節の機構において、差動駆動機構を用いてピッチとヨーの2自由度を、内歯車で残りのロール自由度を実現する。関節の制御系において、モータ駆動ドライバを関節の中に内蔵し、RT-Linuxを用いて関節の駆動制御系を構成する。3自由度を持つ関節を試作し、その制御システムをも構築した後に、関節の性能評価を行なう。その結果を関節の改良にフィードバックし、実用的なロール・ピッチ・ヨーの3自由度を持つ関節ユニットを実現する。

平成15年度 3自由度関節を10個試作し、3次元蛇型ロボットを開発する。

前年度に試作される3自由度関節の問題点を解決するための機構の改良を行ない、さらに3自由度関節のユニットを10個製作し3次元蛇型ロボットを構成する。蛇型ロボットの各関節外周には各環境に適応移動できる車輪やエッジなどを取り付けておく。なお、RT-Linuxをベースとした蛇型ロボットの制御システムを構築する。OpenGLを用いて人に優しいユーザインタフェースをも構築する予定である。これにより開発する3次元蛇型ロボットの基本動作実験を可能にする。

(平成16年度) ロボットの機動性を向上させるためにその外周に取り付ける能動車輪や能動クローラなどを開発する。なお、神奈川県川崎市に設置されるレスキューロボット等のテストフィールドでの実機実験を行ない、評価を行なう。

ロボットの外周に取り付ける能動車輪や能動クローラなどを考案し、ロボットの能動関節と能動車輪や能動クローラなどとの協調駆動でロボットの機動性を向上させる。開発される蛇型ロボットを、神奈川県川崎市に設置されるレスキューロボット等のテストフィールドで実機実験を行ない、応用できる可能性について検証を行なう予定である。実際のテストフィールドで得られる知見をロボットモデルにフィードバックし、機構の改良や、新たな制御アルゴリズムの開発などを行なう。特に蛇型ロボットが震災などの瓦礫の環境を走破できるための環境適応エッジの設計、能動車輪と能動クローラなどの改良や、環境適応アルゴリズムの開発などを行なう。

(平成17年度) 遠隔操作を可能にする蛇型ロボットの制御システムを構築し、環境検出センサの開発や環境適応移動アルゴリズムの開発を行なう。

開発する蛇型ロボットを実用化するために遠隔操作を可能にする蛇型ロボットの制御システムを構築する。蛇型ロボットと主計算機を無線通信で繋ぎ、環境状態を主計算機にフィードバックし主計算機で運動計画を行なう。主計算機で行なったロボット動作計画をロボット側に送り、環境適応走行ができるようにする。なお、環境検出センサ(カセンサ、カメラ等)を開発し、それをロボットに搭載する。これにより、環境適応移動アルゴリズムを開発し、蛇型移動ロボットの環境適応走行を実現する。

(平成18年度) 神奈川県川崎市に設置されるレスキューロボット等のテストフィールドでの実用実験を行ない、評価を行なう。

開発される蛇型ロボットを震災などの瓦礫の環境で動作させ、蛇型ロボットの探索・救援活動への適用可能性について検証する。なお、動作能力の評価も同時に行ない機構及び制御システムを改良し、実用可能な探査・救援ロボットを実現する。

### (3) 前年度までの成果要約

平成 14 年度において、 $\pm 90$  度以上の可動限界角を持つピッチとヨーの動作の他に  $\pm 180$  度の可動限界角を有するロールの動作をも行なうことが可能な 3 自由度関節ユニットを開発した。開発した 3 自由度関節ユニットは以下のような特徴を持つ。

- ・ ロール・ピッチ・ヨーの 3 軸が 1 点で直交交差しているため、特異姿勢が存在しない。
- ・ 差動機構の採用により干涉駆動を実現し、搭載モータのパワーを有効に活用している。
- ・ ロール軸とピッチ軸の可動限界角が  $\pm 90$  度を有することでロボットが複雑な体勢を採ることができる。
- ・ ロール軸の回転が行なえることで、蛇では不可能な推進方法も可能となる。

製作した関節ユニットの動作実験、及び 4 つの関節ユニットを連結し、4 リンクによる蛇行移動実験と直線式移動実験を行なった。

実験の結果より、3 自由度を持つ関節ユニットが広い可動限界を有し、さらにロール軸周りの回転を加えたことでより柔軟性の高い 3 次元蛇型ロボットを実現できることを明らかにした。しかし、試作した関節ユニットには十分な運動性能があるものの、その重量とスケールの大きさ、ロール軸の剛性、バッテリーや制御ボードなどを搭載するスペースの無さなどという問題があることが判明した。

### (4) 平成 15 年度の目的

蛇型移動ロボットは震災等における瓦礫の散在する環境下での生存者の探索・救援などの作業が行なえるために、その性能として複雑な形態を採ることのできる広い可動限界角と生物の蛇の動きに固執されない、より効率的な推進形態を採る柔軟性だけでなく、実用化に耐えられるロボットの剛性とその機動性も要求される。本年度では前年度に試作された関節ユニットと同じように各関節に  $\pm 90$  度以上の可動限界角を持ちながら、重量とスケールの大きさやロール軸の剛性などの問題点を克服する 3 次元蛇型ロボットを開発する。

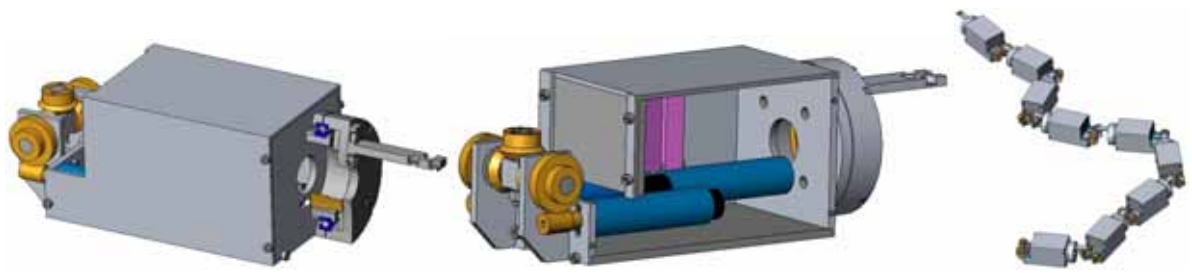
### (5) 平成 15 年度の成果

#### (a) 試作した 3 自由度関節ユニットの改良

今年度は前年度に試作された関節ユニットの問題点を克服するために、以下に示す二つの改良を行なっている。

##### その 1： 既開発した 3 自由度関節をベースとする改良

重量とスケールの大きさについては、小型モータとドライバを使用し、全体的に関節を小さくすることで、関節の軽量化を図る。ロール軸の剛性については、内歯車機構を使用し、大径の軸受けを両側から挟むことにより剛性を高め、長時間の動作でもガタが生じにくい設計になっている。なお、エンコーダ付きモータを使用することで、ロール軸が無制限回転できる。図 3 にその概念図を、ロボットの機械モデルを図 4 に示す。



寸法	210×70×70 [mm]
重量	0.8 [kg] (推定)
トルク	4.5 [Nm] (Yaw, Pitch), 1.48 [Nm] (Roll)
回転速度	10.9 [rpm] (Yaw, Pitch), 16.7 [rpm] (Roll)
限度角度	± 90 [deg] (Yaw, Pitch), ± [deg] (Roll)

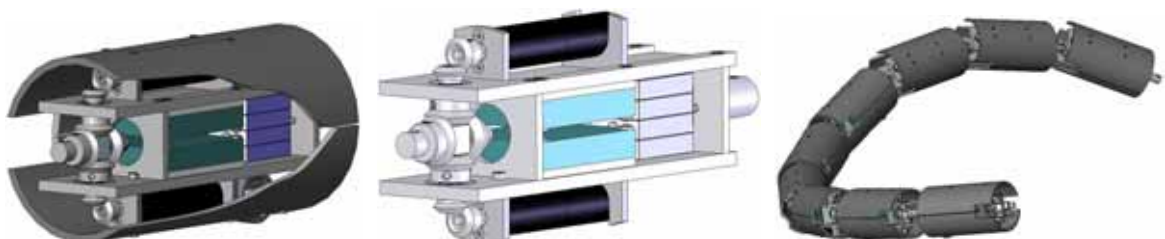
図3 改良した3自由度関節ユニットの機構



図4 改良した3自由度関節による蛇型ロボットの機械モデル

その2： 自由度を減らしたユニットの開発

自由度を減らしても3自由度を有する関節の性能を極力減らさないために、ロール軸を含む2自由度関節にする。ロールの自由度が含まれることで、ヨー軸とピッチ軸の回転を両方実現することができる。ロール回転型2自由度関節にすることで、重量とスケールの問題を解決し、しかも関節の性能の大幅な低下を回避する。この設計でのロール軸は無限回転できる。その概念図を図5，ロール回転型2自由度関節ユニットによるロボットの機械モデルを図6に示す。



寸法	157 × 70 × 73 [mm]
重量	0.5 [kg] (推定)
トルク	1.39 [Nm] (Yaw or Pitch), 1.39 [Nm] (Roll)
回転速度	14.75 [rpm] (Yaw or Pitch), 14.75 [rpm]
限度角度	(Roll)
	± 90 [deg] (Yaw or Pitch), ± [deg] (Roll)

図5 ロール回転型2自由度関節ユニットの機構



図6 ロール回転型2自由度関節による蛇型ロボットの機械モデル

(b) 関節制御ユニットの試作

研究代表者は中国科学院沈陽自動化研究所との共同研究で、関節制御用ボードの開発を行なっている。図7に示すポテンショメータなどのアナログ入力のものが出て、現在エンコーダなどのデジタル入力の制御ボードを設計している。



寸法	54 × 50 [mm]
CPU	富士通 MB90F549
ROM (Flash memory)	256Kbytes
RAM	6kbytes
入力 A/D	8 Channels
出力	PWM
制御方式	CAN

図7 関節制御用ボード

(c) 3次元蛇型ロボットの運動学・動力学モデルと計算機シミュレータ

3次元蛇型ロボットの環境適応移動アルゴリズムを導出するために、その運動学・動力学モデルを構築し、それに基づく計算機シミュレータを開発することが重要である。対象とする蛇型ロボットは  $n$  個のリンクを直接に繋いだもので、1関節に1回転自由度を有する。X,Y,Z のどれか1つの回転軸を持ったユニットを結合させることで、3次元蛇型ロボ

ットが実現される．またリンク長を適当にゼロとすることで1関節に多自由度を持たせることもできる．現在，蛇型ロボットの運動学モデルと動力学モデルを構築し，計算機シミュレータを作成している．さらに，平面における蛇行移動の解析，斜面上における蛇行移動の解析，神経振動子ネットワークによる蛇行移動の自律分散制御や，蛇行以外の運動形態の検討なども行なっている．

(d) RT-Linux をベースとした蛇型ロボットの制御システム

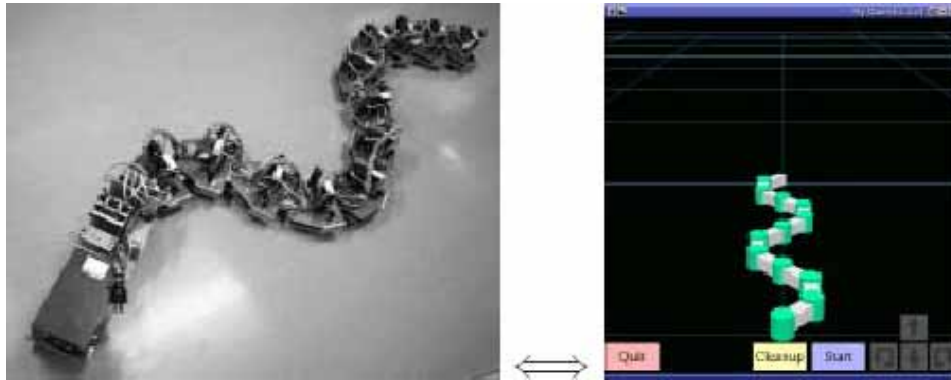


図 8 蛇型ロボットの制御システム

本制御システムは実時間性を保ちながら，OpenGL によるグラフィカル・ユーザインタフェースを実現することができる．現在，システムの完全性を高める改良を行なっている．

(6) 平成 15 年度の成果発表等

- [1] S. Ma, Y. Ohmameuda, K. Inoue, and B. Li: “Control of a 3-Dimensional Snake-like Robot”, in Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'03), 2003.9.14-19, pp.2067-2072
- [2] S. Ma, N. Tadokoro, B. Li, and K. Inoue: “Analysis of Creeping Locomotion of a Snake Robot on a Slope”, in Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'03), 2003.9.14-19, pp.2073-2078
- [3] S. Ma, N. Tadokoro, K. Inoue, and B. Li: “Influence of Inclining Angle of a Slope to Optimal Locomotion Curves of a Snake-like Robot”, in Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing (RISSP'03), 2003.10.8-13, pp.353-358
- [4] S. Ma: “Design and Control of a 3-Dimensional Snake-like Robot”, in Proc. 2003 Chinese Academy of Sciences Symposium on Robotics and Manufacturing Science (CASRSM'03), 2003.9.24-25 (招待)
- [5] L. Chen, Y. Wang, S. Ma, and B. Li: “Analysis of Traveling Wave Locomotion of Snake Robot”, in Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing (RISSP'03), 2003.10.8-13, pp.365-369
- [6] Y. Lu, S. Ma, B. Li, and L. Chen: “Ground Condition Sensing of a Snake-like Robot”, in Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing (RISSP'03),

2003.10.8-13, pp.1075-1080

- [7] 佐々木・馬・田所・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論文集, 2003.9.20-22, (CD-ROM), 1L12
- [8] 大豆生田・馬・田所・井上: “3 次元蛇型ロボットの動力学解析”, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会論文集, 2003.9.20-22, (CD-ROM), 1L13
- [9] 田所・馬・井上: “蛇型移動ロボットの斜面蛇行移動体形”, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会論文集, 2003.9.20-22, (CD-ROM), 1L15
- [10] 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, 2003.9.20-22, (CD-ROM), 3B23
- [11] 川瀬・馬・豊田・井上: “ワイヤ駆動機構を用いた力覚提示装置の開発”, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会論文集, 2003.9.20-22, (CD-ROM), 1C24

#### (7) 参考文献

- [1] S. Hirose and M. Sato: “Coupled Drive of the Multi-DOF Robot”, in Proc. 1989 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'89), pp.262/268, 1989.
- [2] K. Togawa and S. Hirose: “Design of Active Cord Mechanism ACM-R2 to Realize 3-D Motion”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.13, No.2, pp.176/182, 2001.
- [3] M. Mori and S. Hirose: “Development of Active Cord Mechanism ACM-R3 with Agile 3D mobility”, in Proc. 2001 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS2001), pp.1552/1557, 2001.
- [4] 亀川・Chatterjee・伊藤・松野: “多様な移動形態を持つ3次元超冗長移動ロボットの開発と制御”, 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2000.
- [5] 馬・佐々木・叶・井上: “干渉駆動による蛇型ロボットの3自由度関節の開発”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2002), pp.247/248, 2002.
- [6] S. Ma, H. Araya, and L. Li: “Development of a Creeping Locomotion Snake-Robot”, IASTED International Journal of Robotics and Automation, Vol.17, No.4, pp.146/153, 2002.
- [7] S. Ma: “Analysis of Creeping Locomotion of a Snake-like Robot”, Int. J. of Advanced Robotics, Vol.15, No.2, pp.205/224, 2001.
- [8] 馬, 増子: “ヘビの運動形態に関する研究— 第2報: 各種蛇行形状曲線におけるヘビの蛇行移動効率の比較—”, 日本機械学会論文集, Vol.64, No.617(C), pp.273/278, 1998.
- [9] 馬: “ヘビの運動形態に関する研究— 第1報: ヘビの直進蛇行移動体形曲線—”, 日本機械学会論文集, Vol.62, No.593(C), pp.230/236, 1996.
- [10] S. Ma, Y. Ohmameuda, K. Inoue, and B. Li: “Control of a 3-Dimensional Snake-like Robot”, in Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'03), 2003, pp.2067-2072
- [11] S. Ma: “Analysis of Creeping Locomotion of Snakes and Snake-like Robots”, in Proc. 2001 Int. Workshop on Bio-Robot and Teleoperation, pp.60/67, 2001.
- [12] C. Ye, S. Ma, and B. Li: “Coupled-Actuation Modular Universal Unit (MUU) of Snake-like Robot”, 中日国交正常化30周年学術シンポジウム— 21世紀科学技術及び中日学術交流, 中国北京, 7月27-31日, 2002.
- [13] J. Burdick, J. Radford, and G.S. Chirikjian: “A Side-winding Locomotion Gait for

- Hyper-Redundant Robots”, *Int. J. Advanced Robotics*, Vol.9, No.3, pp.195/216 1995.
- [14] G.S. Chirikjian and J.W. Burdick: “The Kinematics of Hyper-Redundant Robotic Locomotion”, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.11, No.6, pp.781/793, 1995.
- [15] R. Worst and R. Linnemann: “Construction and Operation of a Snake-like Robot”, in *Proc. IEEE International Joint Symposia on Intelligence and Systems*, pp.164/169, 1996.
- [16] S. Hirose: “Biologically Inspired Robot — Snake-like locomotors and manipulators”, Oxford University Press, 1993.
- [17] 大豆生田・馬・井上: “3次元蛇型ロボットの動力学解析”, *日本機械学会論文集*, 2004 (掲載予定)
- [18] S. Ma, N. Tadokoro, B. Li, and K. Inoue: “Analysis of Creeping Locomotion of a Snake Robot on a Slope”, in *Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'03)*, 2003, pp.2073/2078
- [19] S. Ma, N. Tadokoro, K. Inoue, and B. Li: “Influence of Inclining Angle of a Slope to Optimal Locomotion Curves of a Snake-like Robot”, in *Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing (RISSP'03)*, 2003.10.8-13, pp.353-358
- [20] C. Ye, S. Ma, Y. Wang, and B. Li: “Coupled-drive-based Joint Design of a Snake Robot and its Body-lifting Method”, in *Proc. 2003 IEEE Int. Conf. on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing (RISSP'03)*, 2003, pp.1086/1090
- [21] 佐々木・馬・田所・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論文集*, 2003.9.20-22, (CD-ROM), 1L12
- [22] 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*, 2003.9.20-22, (CD-ROM), 3B23