事例紹介

構造物を構築するセルロボット

Cellular Robots Forming a Mechanical Structure

伊能 教夫* *東京工業大学

Norio Inou* *Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

筆者らは、同一の構造と機能をもつロボットが協調的に動作することによって、目的にあった構造物を構築する群ロボットについて考察している。群ロボットの研究は、近年活発に研究されており、複数台のロボットが結合して協調的な動作を行うハードウェアに関する研究も多数報告されている [1]~[6]。

筆者らの研究では、骨のリモデリングに学んだセル・オートマトンモデルを用いて力学環境に適応する構造物を考察した経緯 [7] から、群ロボットの構造的側面に注目している。すなわち図1に示すように個々のロボット（以降、単体のロボットをセルロボットと呼ぶことにする）が結合することによって一つの構造物を形作り、外力に応じて構造が可変な群ロボットである。

ところで骨のリモデリングは、骨組織の各部が力学状態を検出し、それに応じて骨密度を調整することで骨体全体の構造が改変する現象であり、局所的なフィードバック機構の集積で全体的に調和のとれた挙動を実現している。このような現象は、力学特性を伴う自律分散システムと見ることができ、工学的観点からも興味深い課題を含んでいる。筆者らは、生体で見られるリモデリングの機能を機械工学的に実現するための仕組みを考えることで、システムとしての特徴を理解することができ、新しい機械システムを生み出すヒントになると考えている。

以上のような背景で構造物を構築するセルロボットについて計算機シミュレーションによる考察を行ってきたが、この時点ではハードウェアについては未検討であった [8] [9]。最近になって、セルロボットの具体的な運動機構の試作する機会を得たので、本稿ではこれについて紹介したい。一つは、剛性を高めることを目的として設計したスライド移動型セルロボットであり、もう一つは空気圧で駆動する回転運動型セルロボットである。

図1 構造物を構築するセルロボット

図2 スライド移動型セルロボットの移動方式

2. スライド移動型セルロボット [10]

群ロボットは、微少な位置や角度のずれが集積して構造変形に悪影響を及ぼすので、セルロボットの運動機構はできるだけ単純な構造が望ましい。特に重力環境下で構造物を変化させるには、荷重に対して変形しにくい運動機構が必要である。そこで、セルロボットの構造をできるだけ単純化し、剛性の高い運動機構を考えた。提案するセルロボットは、図2に示すように隣接のセルロボットと面状に接触しスライド移動しながら構造を変化させる。

セルロボットの運動部は、図3(a)に示すように一方のセルロボットの溝に沿ってホイールが溝の中を走行する仕組みになっている。セルロボットの内部には図3(b)のように2組のドライブシャフトが組み込まれており、直交した2方向にスライド運動する。試作したセルロボットは立方体状で一辺約80 [mm]、重さは約500 [g]である。

セルロボットが力学環境に応じて構造体を変化するためには、自身に生じる応力を検知する機能が必要である。そこで、セルロボットの構造体に歪ゲージを貼付して、応力検知実験を行った。この実験では、結合したセルロボットに荷重を加えて歪ゲージから得られる電圧を測定した。図4は負荷と除荷を繰り返した結果である。若干のヒステリシ

原稿受付 2003年8月6日

キーワード: Cellular Robot, Pneumatic Robot, Structural Formation, Adaptive Structure, Remodeling

*〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

*Meguro-ku, Tokyo

図3 セルロボットの構造

図4 応力検出実験

図5 動作実験の構造変化

スが存在するものの、最大負荷時はほぼ等しい値を示しており、セルロボットに生じる過負荷情報は得られることが分かる。

上述したセルロボットを7台製作して動作実験を行った。図5は、セルロボットの構造変化の様子 (No. 1~9) を示している。No. 6では、セルロボットの右端に荷重を加えている。濃い灰色で示したセルロボットで高い応力が発生

(a)

(b)

(c)

図6 動作実験

するので、この部分を補強するように別のセルロボットが移動し、最終的にNo. 9の構造体になるというシーケンスである。

この構造変化の動作実験では、パソコンのI/Oポートを介して各セルロボットの運動制御を行った。力センサもA/D変換で取り込み、閾値以上の過負荷を検出してNo. 6の状況でパソコンから構造改変の指令を出した。図6(a)~(c)は図5 No. 2, 6, 8にそれぞれ対応している。今後セルロボット本体に制御系を格納して自律分散的な運動制御をハードウェアでも実現したいと考えている。

3. 回転運動型セルロボット [11]

スライド移動型セルロボットでは、耐荷重を増すために剛性を大きくする運動機構を考えた。これとはコンセプトの異なるセルロボットについても検討しているので、紹介したい。これは、空気圧を利用して構造体を構築するセルロボットである。

セルロボットの概念図を図7に示す。セルロボットに取り付けられた柔軟なベローズに圧縮空気を送ることによって回転運動を生じさせて移動する。セルロボット同士の結

図7 回転運動型セルロボット

図8 運動機構

図9 屈曲動作

合と分離は、筐体のジョイントで行う。図8はペローズの屈曲運動の機構を示している。ペローズには定荷重ばねが装着されており、ばねの長さを制御することで屈曲運動を行う。このばねの長さは、ジョイント部の開閉動作で制御している。図9(a)は、右側の定荷重ばねの伸びを拘束した場合の変形の様子を示している。この動作によって、図9(b)に示すようにロボット同士が完全に分離した状態でも回転力が発生し、2台のセルロボットで180度の屈曲動作が可能となる。

製作したセルロボットは立方体形状をしており、1辺が約20[cm]、重さ約4[kg]である。動作実験の様子を図10に示す。駆動源の圧縮空気は、小型コンプレッサより供給し、セルロボットへの空気の流れ・排出はパソコンで制御した。図10(a)は、水平面上に置かれたセルロボットの初期配置である。右側のロボットは平面に固定されており、左側のロボットが運動する。図10(b)は、動作開始時の様子を示している。図10(c)では、左側にあったロボットは180度回転し、伸展を終えたペローズは空気が排出されて収縮を

図10 動作実験

始めている。図10(d)は、180度回転が完了した状態である。この後、さらに180度の回転運動を行うため、回転軸でない方のジョイント部を解除する動作を行う。図10(e)は、次の回転運動が始まった状態を示している。最後の図10(f)では回転運動が完了し、ジョイント部が閉じた状態になる。

4. 結 言

本稿では、筆者らの研究室で開発している構造物を構築する群ロボットについて紹介させていただいた。スライド移動型セルロボットについては、剛性を高めるための引き換えとして運動機構に制約があるため、目的の構造になるための移動経路の決定法を考える必要がある。一方、回転運動型セルロボットは現時点では、構造的な配置が可変であることを示した段階であり、力学環境に応じた構造変化については今後の課題となっている。空気圧を利用した機構は、軽量化に適しており、展開可能な筐体構造にすることも可能である。スライド移動型セルロボットと比べると剛性は低いが、スケールアップによる重量増加が抑えられ、宇宙空間への適用が可能ではないかと考えている。

謝 辞 本研究は、文部科学省科学研究費「スーパーメカノシステム (No.09CE2004)」の援助によって遂行した。

参 考 文 献

- [1] T. Fukuda, S. Nagasawa, Y. Kawauchi and M. Buss: "Structure Decision Method for Self Organizing Robots Based on Cell Structures-CEBOT," Proceedings of the 1989 IEEE Interna-

- tional Conference on Robotics and Automation, pp.698-700, 1989.
- [2] G. Chirikjian and A. Pamecha: "Bounds for Self-Reconfiguration of Metamorphic Robots," Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1452-1457, 1996.
 - [3] S. Murata, H. Kurokawa and S. Kokaji: "Self-Assembling Machine," Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.441-448, 1994.
 - [4] E. Yoshida, S. Murata, S. Kamimura, K. Tomita, H. Kurokawa and S. Kokaji: "Motion Planning for Self-Assembly by a Modular Robot," 2001 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (CD-ROM), 2001.
 - [5] K. Hosokawa, T. Tsujimori, T. Fujii, H. Kaetsu, H. Asama, Y. Kuroda and I. Endo: "Self-Organizing Collective Robots with Morphogenesis in a Vertical Plane," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.2858-2863, 1998.
 - [6] M. Yim, D. Duff, K. Roufas and L. Kissner: "Plybot: demonstrations of modular reconfigurable robot," Video Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.
 - [7] N. Inou, T. Uesugi, K. Todoroki and S. Ujihashi: "Self-Organization of Topological Structures by a Cellular Automaton," Iutam Symposium on Synthesis in Bio Solid Mechanics, pp.21-32, 1999.
 - [8] N. Inou, S. Fukushima, N. Shimotai and S. Ujihashi: "Study of Group Robots Adaptively Forming a Mechanical Structure (Effect of Mechanical Properties of Cellular Robots on Structure Formation)," JSME International Journal, Series C, vol.43, no.1, pp.127-133, 2000.
 - [9] N. Inou, N. Shimotai, H. Ogawa and S. Ujihashi: "Study of Group Robots Adaptively Forming a Mechanical Structure (Information Processing Functions of the Cellular Robot Required for Transporting a Load to an Opposite Side)," JSME International Journal, Series C, vol.43, no.1, pp.134-140, 2000.
 - [10] N. Inou, K. Minami and M. Koseki: "Group Robots Forming a Mechanical Structure —Development of slide motion mechanism and estimation of energy consumption of the structural formation—," Proceedings 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRA2003, FP2-IV-1(CD-ROM), pp.874-879, 2003.
 - [11] N. Inou, H. Kobayashi and M. Koseki: "Development of Pneumatic Cellular Robots Forming a Mechanical Structure," The Seventh International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV'02), pp.63-68 (CD-ROM, Paper ID 1457), 2002.

伊能教夫 (Norio Inoue)

1953年5月14日生。1976年東京工業大学工学部機械物理工学科卒業，1978年同大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻修士課程修了。現在，同大学大学院機械制御システム専攻生体システム学分野教授。バイオメカニクス，ロボティクス（自律分散型機械システム）

の研究に従事。