解 説

スーパーメカノシステムの研究：東工大 COE プロジェクト

Study of Super Mechano-Systems: Center of Excellence Project in TITech

広瀬 茂男^{*1} 古田 勝久^{*2} 美多 勉^{*1}^{*1}東京工業大学大学院理工学研究科 ^{*2}東京電機大学情報システム工学科Shigeo Hirose^{*1}, Katsuhisa Furuta^{*2} and Tsutomu Mita^{*1} ^{*1}Tokyo Institute of Technology ^{*2}Tokyo Denki University

1. ま え が き

本解説は、文部省科学研究費「中核的研究拠点形成プログラム—COE (Center of Excellence) 研究—」として採用された「スーパーメカノシステム—制御と機構の融合による新機能創出—」の研究内容を紹介するものである。本プロジェクトは平成9年度に始まっており、研究期間は5年間であるため現在4年目のまとめの段階に入っている。関与する研究者は、東京工業大学で制御系を専攻する美多、原辰次教授、小林彬教授、三平満司助教授、松尾芳樹助教授、山北昌毅助教授、そして機械系を専攻する広瀬、小野京右教授、伊能教夫教授、松永三郎助教授、大熊政明助教授、山浦弘助教授、松野文俊助教授、小俣透助教授、米田完助教授、そして東京電機大の古田である。研究代表者は平成9年度から平成11年度まで古田が務め、平成12年度に東京電機大に移籍後広瀬が引き継いでいる。

2. スーパーメカノシステム (SMS) とは何か

ロボットの概念は、人間をモデルとした汎用マシンとして誕生した。しかし、これまで実用化されたロボットは、その機能性を大きく制限することによって初めて実用性を確保してきており、いまだ専用機の枠を抜け出していない。本来あるべきロボットは、単一の条件下で高い性能を発揮するだけではなく、時々刻々と変化する作業環境において、自分自身の内部構造を自律的適応的に再構成し、常時最高の特性を発揮できる変幻自在な機能性が必要となる。例えば人間は、図1のように球を高速に投げるときには、速度を加算しやすい直列系に身体を構成して指先の速度を最大化し、重いものを持ち上げるときは身体を並列系に構成して力を集積し強力な支持力を生成する。このような自在な適応性を自律的に生成する機械システム、つまり「目的

図1 人間が行う作業適応型の動作
(我々は速度を出すときには直列構造、力を出すときには並列構造を自動的に選択する)

と環境に合わせて、高い性能を実現するように自己組織的に機能と形態を変えることのできる機械システム」を我々は「スーパーメカノシステム (Super Mechano-System: SMS)」と定義し、本プロジェクトではこの SMS を実現するための学問体系を、具体的な試作事例を積み上げる実証的な方法論によって構築しようとしている。

さて、このようなスーパーメカノシステム (SMS) の実現のためには、高い効率を生み出す先進機械技術と、最先端の制御理論に裏打ちされた高度制御技術の有機的な融合が不可欠である。しかし、これまでの制御理論が扱ってきた工学現象は、実際の事象の一部の抽象化しやすい現象に関するものだけであり、機械システムに関する多くの実際の制御問題は未だ手つかずに残されていた。そのため機械技術と制御技術の融合を計るため、本研究プロジェクトでは機械工学および制御工学の研究者が協力して SMS に関する共通問題に取り組む体制を確立した [1]。

これまでの SMS 研究では、以下のように「サイバーメカニズムの開発」、そしてサイバーメカニズム開発の基礎としての「ネオファンクションの創出」、「動的機能設計理論の体系化」を分野ごとに研究してきたが、現在それらを具体的な5種類のロボットシステム実現に結集させようと準備中である。

原稿受付 2000年7月12日

キーワード: Super Mechano-System, COE, Running/Jumping Robot, Snake Robot, Demining Robot, Super Mechano-Colony

^{*1}〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

^{*2}〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂

^{*1}Meguro-ku, Tokyo

^{*2}Hiki-gun, Saitama

図2 SMSのモデルとなる動物たち

3. サイバーメカニズム

図2のように生物界に観察される脚推進ロボット、ヘビロボット、群ロボットをSMSの3形態と考え、それぞれの基礎研究を、可変拘束、超冗長、自律集散という観点から行っている。現在まで得られた成果を紹介する。

3.1 可変拘束系

SMSが置かれた外界からの拘束、およびSMS内部で満たされなくてはならない拘束を切り替えながら新たな機能を創出する制御方策が可変拘束系であり、制御系からと機械系[2]から検討を進めている。ここでは特に歩行移動を中心に研究を進めており、歩行速度を上げるため、歩行、走行、ジャンプ動作をしなやかに切り替えながら移動する多足走行ロボットの制御、歩行と作業の切り替え、脚推進と車輪推進の切り替えなどを検討し、それらの融合理論を構築しようとしている。

具体的な研究テーマは以下のとおりである。

- (1) 消費エネルギーを最小化にする歩行パターンを生成するための受動歩行の実現
- (2) 歩行、走行運動パターンを拘束条件として実現する可変拘束制御
- (3) ジャンプとジャンプ移動機能の実現
- (4) 自律的に起き上がり、歩行姿勢を展開する機構の制御方策
- (5) 恐竜型動歩行と尾を含む3点支持立位姿勢での安定化マニピュレーション
- (6) 車輪-脚ハイブリッド走行ロボット

3.2 超冗長系

多くの自由度を持たせることにより、さまざまな環境下において適応的に形態や制御系を変化させるSMSの機構と制御法を検討しようとするものである。これまでヘビなどの冗長形状が生成する「うねり運動」の一般的なモデル表現を開発し、そこから制御理論・機構設計理論の枠組みを構築しつつある。具体的な研究テーマは以下の通りである。

- (1) 車輪拘束を利用したヘビロボットの機構設計と運動制御
- (2) 方向性摩擦を利用したヘビロボットの機構設計と運動制御
- (3) ヘビシステムの最適モジュールを与える空間周期変システム理論

- (4) ヘビのような空間分布定数系の離散化からの理論的アプローチ
- (5) 自重補償機能を有する多関節アーム型監視ロボットの機構と制御

3.3 自律集散

群をなすロボットシステムは、柔軟かつ高能率のSMSの原理として期待できる。筆者らは、形態とともに計測・制御の集中・分散度を状況に応じて自律的に変えられる群ロボットシステムを「スーパーメカノコロニー (Super Mechano-Colony: SMC)」と呼んでいる。そして、大型の高機能であって機動性が低い「母船」と、小型で機能が限定されているが機動性の高い多数の「子機」からなる「親子型の群ロボットシステム」を対象に研究を行っている。具体的な研究テーマは以下の通りである。

- (1) 分散型PVFC (Passive Velocity Field Control) による移動ロボット群の協調制御
- (2) 群れによる物体の協調運搬手法 Active Casterの理論と搬送実験システム
- (3) 群ロボットの相互通信によって構成される共有座標系の自己組織化手法: COMPASS
- (4) 群ロボットのための自己組織型動的作業環境認識システム
- (5) SMCのための共通実験プラットフォーム (アームつき移動モジュール) の機構と制御
- (6) 宇宙空間作業型群ロボット衛星による高機能分散型ミッション
- (7) 1輪惑星ローバーの機構と運動制御

4. ネオファンクション

SMSの開発に必要な新しい機能を発揮する機構要素の創出を目的に、新型機構と新制御理論について研究している。十分準備が進んだものから順にサイバーメカニズムの研究に移行させてきている。現在は、劣駆動制御、自励駆動系、可変構造系が検討されている。

4.1 劣駆動系 (ノンホロノミックシステム制御)

自動車はスピードとハンドルの二つの制御入力で車の位置と姿勢の三つを制御する。これは車輪の横滑りしない速度拘束はうまく利用すれば一つの制御入力のごとく扱えるためである。このような制御変数が少ない制御対象としてはヘビロボット、魚型ロボットがあり、また運動量一定則に従う宇宙ロボット、浮遊状態にあるジャンピンロボットや体操ロボット、さらには転がり拘束に従う手のひらボール系などがある。ここではそれらの「技能」に関するシステムの制御理論の開発を行い、その有効性を実験的に検証している。

具体的な研究テーマは以下の通りである。

- (1) 宇宙空間で浮遊移動するロボットの姿勢制御

- (2) 平板型手のひらを有するロボットによる球の操り制御
- (3) うねり推進機構とイルカロボットの運動制御

4.2 自励駆動系

SMS は単に高機能であるだけでなく、環境変化に対してロバストでエネルギー効率の高い特性を必要とする。ここでは、共振現象やリミットサイクルのようにパラメータ変化に強くしかも物理的に高効率な動きをする現象について考察し、それを応用した自励駆動法を提案している。

具体的な研究テーマは以下の通りである。

- (1) 多自由度自励駆動現象の最小エネルギー制御
- (2) 自励駆動型の 2 足歩行ロボットの機構と制御

4.3 可変構造系の制御

複数のロボットが作業する場合、あるロボットが故障しても与えられた作業に対して全体の機能が維持できる必要がある。このためには故障に対して自律的に対処できる機能性を制御系が有する必要がある。ここでは、このような制御理論構築のため不安定な倒立振り子をマニピュレータからマニピュレータに受け渡すときの可変構造型の制御系を検討している。

5. 動的機能設計理論の体系化

SMS の構築に向け、制御と機構を軸とした要素技術の最適統合による動的機能実現を行うため、動的機能設計理論の体系化を行っている。この研究は、モデリングと制御の統合、制御と機構の統合、学習的構造最適化の 3 分野から実施している。

5.1 モデリングと制御の統合

制御システムを設計する上でシステムの運動をモデル化することが不可欠であるが、適切なモデルは要求される制御機能によって異なる。そのため、達成すべき機能を直接表現するモデル化手法を提案し、実験データからモデル化および制御系設計を系統的に実施できるシステムの理論を構築中である。

5.2 制御と機構の統合：同時最適化アプローチ

SMS の歩行、ジャンプなどの動機能を達成するために最適な機構の設計法を制御性能の観点から考察し、機構設計と制御設計とを融合した新しい設計理論を構築している。具体的には、フレキシブル構造の高速位置決めと振動抑制を同時に達成する機構と制御系の設計法などを検討している。

5.3 制御と機構の統合：分離原理アプローチ

機械システムの構造設計においては、制御をかけると目的の特性が改善されるように、すなわち、制御効果が向上するように機構設計することが必要である。ここでは、制御しやすい構造を有する機構の物理的な性質を明確化し、機構設計の指標を与えると同時に、機構設計を念頭においた制御理論の開発を行っている。

5.4 学習的構造最適化

要求される機能を達成するため、最適機構を学習的に生成できる学習的構造を有する構造設計理論を検討している。具体的には、制約条件下での成長変形型最適設計手法、形状自己組織化を行う生物型形状形成過程の研究などが行われている。

6. 統合化 SMS の開発と SMS 学の体系化

SMS に関する基礎的検討を元にアクロバットロボット、走行・ジャンプを行う脚移動ロボット、三次元運動を行うヘビロボット、地雷撤去などを行う作業型歩行ロボットを最終的に開発することを目指している。

6.1 アクロバットロボット

鉄棒に飛びつき、大車輪を行い、勢いよく空中に飛び出し空中で姿勢制御を行った後安定に着地するアクロバット運動を行うヒューマノイドロボットを開発し、SMS に関与して開発してきた運動制御手法を結集して実際の運動制御実験を行う予定である。

6.2 走行・ジャンプを行う脚移動ロボット

ハイウエーのように人工的に整地された環境だけでなく、凹凸の激しい荒地においても自在に高速な移動を行う歩行型、あるいはジャンプ推進型の脚移動ロボットを実際に試作する。このモデルとしては、哺乳類動物のような 4 足タイプと、特に図 3 のような恐竜型の歩行形態の実現を試みる予定である。恐竜型走行ロボットは、首から頭部と尾部を前後に伸ばした形態であるため、胴体の垂直軸周りのヨー軸慣性モーメントが大きく、動的な安定性を保持しやすいという制御の特性を有する形態であり、人間型のように垂直に体を立てる形態よりはるかに動的安定性を生成しやすい。そして、静止時には尾も使用した三脚立位姿勢をとることなどができる特性を発揮するものと考えられる。

6.3 三次元運動を行うヘビロボット

超冗長サイバーメカニズムの研究を集大成し、環境に応じて多くの機能性を発揮する図 4 のような三次元運動ヘビロボットを開発する予定である。そして、通常のはふく推進だけでなく、頭部が尾部をかむことでループを形成し回転推進を行ったり、スパイラル状の形態や U 字型の形態を

図 3 走行／跳躍移動を行う恐竜型ロボット
(首と尾で安定化した高速移動を行うと同時に、静止時には尾で安定姿勢をつくり作業を行う移動作業ロボット)

図4 三次元運動を行うヘビ型ロボット
(環境に適応した柔軟な運動性能を発揮するシステムであり、災害時に瓦礫内での探査活動などを行うことを一つの目標としている)

図5 人道的対人地雷撤去作業を行う作業型歩行ロボット
(足先の効果器を交換することで、地雷撤去に必要な数々の作業を遂行するシステム)

として回転運動で推進する実験を行い、災害時の瓦礫内探査作業などへの応用可能性も探る。

6.4 地雷撤去などを行う作業型歩行ロボット

可変拘束型の機構制御系と劣駆動型超冗長系の研究を集大成し、地雷撤去作業などを行う作業型歩行ロボットを開発する。地雷は世界中の紛争地域にこれまで1億個程度埋設され、現在も20分に一人の割合で死傷者を出しているが、この対人地雷を人道的な立場で撤去するロボットの開発は現在世界的な大問題となっている。対人地雷はさまざまな地形に埋設され厚い草木に覆われている。そのため地雷撤去には、草刈作業性、不整地移動性、不整地をまんべんなく探査できる作業性、そして地上の障害物や地雷そのものをハンドリングする作業性が必要とされる。そのため、図5のように足先の効果器を挿げ替えることで数々の作業性を発揮する歩行作業ロボットを開発する予定である。

6.5 自律集散型惑星探査ローバー

自律集散型サイバーメカニズムの研究を集大成し、アームを装備した1輪車型モジュラーローバーと、1輪車型モジュラーローバーを統括制御する母船ローバーからなる図6のような惑星探査ローバー「SMCローバー」を開発す

図6 自律集散(Super Mechano-Colony)型ロボット
(母船から情報とエネルギーを供給されるモジュラー化された1輪ローバー群から構成され、目的に応じて集中動作と分散化動作を実施する惑星探査を行うローバースystem)

る予定である。このSMCローバーを構成する1輪車型モジュラーローバーは、装備したアームで母船ローバーに連結し、その状態では母船ローバーの推進車両として機能する。そして、斥候作業や岩石サンプルの採取作業などが必要なときは、母船ローバーから分離して自律的に移動する、という機能性を有するものである。この1輪ローバーは図6のように、車輪推進モードとハンドリングモードが取れるようにする予定としている。

7. あとがき

以上、TITech COE/SMS プロジェクトの概要を紹介した。紙面の制約もあり開発している多くの試作機の写真掲載などは今回見送らざるを得なかった。実際の試作機は2001年度末にプロジェクトが終了するときまでには完成し公開できるはずである。是非御期待いただきたい。なおより詳細な情報は年1回実施している国際シンポジウムの予稿集[2]~[4]、あるいはテクニカルノートのWeb公開(<http://www-coe.ctrl.titech.ac.jp/english> または [japanese](http://www-coe.ctrl.titech.ac.jp/japanese))などを参照いただければ幸いである。

最後に、助成いただいている文部省に深く感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 古田, 美多: “COE 研究スーパーメカノシステム”, 計測と制御, vol.38, no.12, pp.781-787, 1999.
- [2] 広瀬: “「可変拘束機構」とその設計—特殊環境移動作業ロボットへの適用—”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.5, pp.615-619, 1999.
- [3] TITech COE/Super Mechano-Systems Workshop '98, 1998.
- [4] TITech COE/Super Mechano-Systems Workshop '99, 1999.
- [5] TITech COE/Super Mechano-Systems Workshop '00, 2000.

広瀬茂男 (Shigeo Hirose)

1947 年 12 月 6 日生。1976 年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了。工学博士。同年同大学機械物理工学科助手。1979 年同大学助教授。1992 年同大学教授。1993 年機械宇宙学科に学科名変更。現在に至る。ロボットの機構、センサ、制御の研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

美多 勉 (Tsutomu Mita)

1975 年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程（電気工学専攻）修了。同年千葉大学講師。1990 年同教授を経て 1995 年東京工業大学工学部制御システム工学科教授。制御理論、ロボット工学などの教育研究に従事。計測自動制御学会、IEEE などの正会員。

(日本ロボット学会正会員)

古田勝久 (Katsuhisa Furuta)

1940 年 1 月 3 日生。1967 年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。1967 年東京工業大学制御工学科助手。1970 年同助教授。1982 年同教授。2000 年東京電機大学情報システム工学科教授。現在に至る。計測自動制御学会と IEEE の Fellow。ヘルシンキ工科大学

名誉博士。計測自動制御学会会長、IEEE CSS 副会長、IFAC 理事、Automatica Editor を歴任。インテリジェントコントロール、ロボット制御、計算機制御、可変構造制御、応答ベースド制御、スーパーメカノシステム等の研究に従事。現在日本学術会議五部会員。

(日本ロボット学会正会員)