

# 記 録

文書番号	S C J 第 24 期 020605-24560300-072
委員会等名	日本学術会議 機械工学委員会 ロボット学分科会
標題	第 2 4 期機械工学委員会ロボット学分科会記録 -シンポジウム記録-
作成日	令和 2 年 ( 2 0 2 0 年 ) 6 月 5 日

この記録は、日本学術会議機械工学委員会ロボット学分科会の公開シンポジウムの概要を  
取りまとめ公表するものである。

※ 本資料は、日本学術会議会則第二条に定める意志の表出ではない。掲載されたデータ  
等には、確認を要するものが含まれる可能性がある。

## 日本学術会議機械工学委員会ロボット学分科会

委員長	川村 貞夫	(連携会員)	立命館大学理工学部教授
副委員長	金子 真	(第三部会員)	名城大学理工学研究科教授
幹 事	荒木 稚子	(連携会員)	埼玉大学大学院理工学研究科准教授
	浅間 一	(第三部会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	大西 公平	(第三部会員)	慶應義塾大学グローバルリサーチインスティテュート 特任教授
	萩田 紀博	(第三部会員)	大阪芸術大学アートサイエンス学科学科長・教授
	新井 民夫	(連携会員)	技術研究組合国際廃炉研究開発機構副理事長
	川口 孝泰	(連携会員)	東京情報大学看護学部教授
	國吉 康夫	(連携会員)	東京大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻教授
	西田 豊明	(連携会員)	京都大学大学院情報学研究科教授
	福田 敏男	(連携会員)	名城大学理工学部メカトロニクス工学科教授
	増澤 徹	(連携会員)	茨城大学大学院理工学研究科長・教授・工学部長
	光石 衛	(連携会員)	東京大学大学執行役副学長・大学院工学系研究科教授
	萩原 一郎	(連携会員)	明治大学研究・知財戦略機構特任教授、東京工業大学 名誉教授

## 要 旨

ロボットは、センサ、コンピュータ、アクチュエータ、エネルギー源、ソフトウェアなどの要素技術の統合体である。高性能ロボットを実現するためには、個々の要素技術のレベルアップだけでなく、組み込み法、インターフェースにまで踏み込んだ System Integration: SI (システムインテグレーション) に関する知識が必要不可欠である。一方で SI の基礎になる部分の設計は、いまだに研究者、技術者の経験と勘にたよるところが大きい。SI の科学 (サイエンス) の構築が期待されているものの明解な回答を得るには至っていない。そこで、ロボット学分科会では、システムインテグレーションの技術と科学の議論を深めるため、有識者の講演を中心として平成 30 年 12 月 13 日に「ロボットのシステムインテグレーションの科学を目指して」と題する公開シンポジウムを開催した。本記録は、この公開シンポジウムで発表された有識者の講演要旨をまとめるとともに、システムインテグレーション科学的側面についてまとめたものである。

## 目 次

1. 背景.....	1
2. 公開シンポジウム.....	2
3. 討議内容整理.....	4
(1) ロボットを含むより広い対象についての SI .....	4
(2) ロボットの限定問題についての SI .....	4
(3) AI によるロボットの SI.....	4
(4) 産業実用の SI .....	5
4. まとめ.....	6

## 1. 背景

ロボットは、センサ、コンピュータ、アクチュエータ、エネルギー源、ソフトウェアなどの要素技術の統合体である。近年、ロボットの各要素の性能は、ICT, MEMS, 材料開発など様々な分野の技術を駆使して飛躍的に向上している。その結果、従来よりもロボットをシステムとして実現することが現実的となっている。このような状況において、ロボットに社会から寄せられる期待は大きくなっている。特に、先進諸国では、少子高齢化、労働力不足、災害対応、医療福祉、深海宇宙開発などの課題解決のためにロボットの活用が急がれている。

このような多様で高度な作業をロボットで実現するためには、個々のロボット要素技術のレベルアップだけでなく、適切な要素の選定、要素間の接続法、組み込み法、ヒューマンインターフェースにまで踏み込んだ System Integration: SI (システムインテグレーション) に関する知識が必要不可欠である。既存のセンサ、アクチュエータ、コンピュータなどの要素を寄せ集めて、システムを構成することは可能である。しかし、そのような安易な SI によるロボットの実現では、ロボットの性能は社会からの期待に遥に及ばず、実際には利用されない場合がほとんどである。

一般に、産業界の製品製造には、SI 技術が製品の性能に大きく影響し、分野ごとに優れた SI 技術の蓄積が存在する。しかし、SI の基礎となる設計は、いまだに研究者、技術者の経験と勘に頼るところが大きい。産業界での製品製造などの目的からも SI の科学 (サイエンス) の構築が期待されているものの明解な回答を得るには至っていない。ロボットは、多くの要素の統合体であり、利用目的も多様である。このようなロボットにおいて、SI の科学を議論することは、今後の SI の科学と技術の発展に有用と思われる。

そこで、ロボット学分科会では、システムインテグレーションの技術と科学の議論を深めるため、有識者の講演を中心として平成 30 年 12 月 13 日に「ロボットのシステムインテグレーションの科学を目指して」と題する公開シンポジウムを開催した。本記録は、この公開シンポジウムで発表された有識者の講演要旨をまとめるとともに、システムインテグレーションの科学的側面についてまとめたものである。

## 2. 公開シンポジウム

上述のように、SI が今後の技術と科学に重要であり、ロボット学は SI の技術と科学を  
探求すべき分野である。特に、ロボットの SI 科学は、十分に検討されていない。そこで、  
24 期ロボット学分科会では以下のような公開シンポジウムを開催した。

「ロボットのシステムインテグレーション科学を目指して」

主 催：日本学術会議第三部機械工学委員会 ロボット学分科会

共 催：一般社団法人 計測自動制御学会

後 援：一般社団法人日本ロボット学会、一般社団法人日本ロボット工業会、  
ロボット革命イニシアティブ協議会

日 時：平成 30 年 12 月 13 日（木） 13：30～17：00

場 所：大阪工業大学梅田キャンパス セミナ 204 室

（第 19 回 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会場にて開催）

### 開催趣旨

ロボットは、多くの要素の集合体としての巨大なシステムと想定できる。今後、IoT 時代  
を迎えて、より多くの情報をロボットに取り込む必要が高まっている。このような状況に  
おいて、センサ、アクチュエータ、コンピュータなどの要素をどのように選定し、どのよ  
うにシステムとして構築するかの技術と科学が重要となる。このためには、従来から議論  
されてきた設計科学、System of Systems、モデルベース/データベース、要素還元的手法、  
AI などさまざまな視点があるものの、ロボットのインテグレーションとしての考察が十分  
ではない。そこで、本シンポジウムでは、現状の整理と今後の可能性を検討したい。

### 次 第：

司 会 金子 真（日本学術会議会員、大阪大学大学院工学研究科教授）

13：30～13：50 川村貞夫（日本学術会議連携会員 立命館大学理工学部 教授）

「本シンポジウムの趣旨とロボティクスのシステムインテグレーション科学の可能性」

13：50～14：10 原 辰次（日本学術会議連携会員、中央大学・研究開発機構 教授）

「System of Systems：「わ」の実現に向けた制御の視点」

14：10～14：30 金子 真（日本学術会議会員、大阪大学大学院工学研究科教授）

「システムインテグレーション設計における盲点」

14：30～14：50 國吉康夫（日本学術会議連携会員、東京大学研究科教授）

「現代 AI の問題点とその解決：実世界に開かれた人間中心システムへ」

14：50～15：10 松原崇充（奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 准教授）

「End-to-end 強化学習とシステムインテグレーション」

15：10～15：20 休憩

15：20～15：40 大西公平（日本学術会議会員、慶應義塾大学 GR I 特任教授）

「力制御のシステムインテグレーション」

15：40～16：00 本田幸夫（大阪工業大学ロボティクス&デザイン工学部教授）

「福祉ロボットのデザインとシステムインテグレーション」

16：00～16：20 青山和浩（東京大学大学院工学系研究科教授）

「システムの俯瞰技術としての構造化分析」

16：20 総合討論

（司会）川村貞夫（日本学術会議連携会員、立命館大学理工学部教授）

17：00 閉会



### 3. 討議内容整理

#### (1) ロボットを含むより広い対象についての SI

ロボットを含むより広い対象の SI を科学的に取り組むアプローチは重要である。特に、自然と人の調和した社会の実現に向け、自然環境と人間社会の適切な相互作用を有するシステム理論とシステム化技術が強く求められている。原は、この問題に対してグローバル制御を提案している。グローバル制御では、大規模・複雑系の制御をローカルなアクション（計測・予測・制御）で、制御対象のグローバルな機能を実現する。このために、階層ごとに異なる時空間スケール、大域的・局所的評価指標、局所的な最適化、システム全体で評価などを検討する必要があると指摘する。

#### (2) ロボットの限定問題についての SI

地球環境などの大規模なシステムではなく、ロボットの限定された問題に対する SI の技術と科学については、比較的方针が立てやすい。川村は、ロボットのビジュアルフィードバック制御をカメラとロボットを要素分割せずにシステム全体で安定性を考察して、キャリブレーション不要の方法を報告した。ロボットのフィードバック制御に限定はしているが、要素最適化ではなくシステム全体を最適化する設計法の有効性を数学的に証明し、システム科学としての可能性を述べている。大西は、位置制御と力制御の別々の方法の矛盾の解決に加速度基盤の制御法を提案した。そして、柔らかい運動と硬い運動の組み合わせが可能とし、繊細なリアルハプティック技術を紹介している。金子は、細胞マニピュレーションシステム設計において、たとえ一次元マニピュレーション問題に限定したとしてもセンチメートルサイズで上手くいった設計コンセプトをそのままマイクロメートルサイズに適用しても必ずしも上手くいかず、「SI 設計におけるスケール依存型設計指針の存在」について具体例を挙げて紹介している。この例は科学的考察から誘導されたというよりも偶然発見され技術という色彩が強い。

#### (3) AI によるロボットの SI

ニューラルネットを基盤とする AI は、飛躍的性能向上が注目され、画像処理から運動制御まで利用されている。松原は、近年報告されている End to end な強化学習を紹介した。感覚から運動までの End to end をすべて深層強化学習によって達成する方法である。この方法では、従来のセンサやアクチュエータ特性を解析した後の SI 法に比して、各要素の誤差が伝搬しない、設計者の負担が低減されるなどの長所がある。しかし、学習コストが膨大となる短所をどのように克服するかが課題となっている。國吉は、現状の AI の問題として、敵対的画像の存在、報酬設計問題、データバイアスなどを挙げた。このような問題の解決策として、開かれた動的実世界知能が必要とし、身体性と創発、発達、人間性の基本原理が重要とした。

#### (4) 産業実用の SI

産業界では、SI 技術によって現実に製品が製造されてきた。高度な技術を駆使して多くの要素を有する大規模・複雑なシステムも製品として生み出される。また、利用方法や利用者の嗜好などもシステム全体として考慮する必要も高まっている。本田は、福祉ロボットを例題に、福祉ロボット実現には、ロボットがどのように利用されるか (How) ではなく、どのような社会を作るか (What) とした SI が重要とした。また、そのためには既存の各要素 (部分) の性能評価が下がってもシステム全体として性能を高める破壊的創造が必要とした。青山は、大規模・複雑な工業製品の設計に、構造化分析が重要であるとした。システムアーキテクチャでは、製造、製品、サービスの各層に分けられ、構造解析には、Interpretive Structural Modeling 法、Design Structure Matrix、Domain Mapping Matrix 法などを利用する。その中で①構成要素の抽出、②要素間の関係付け (一対比較)、③構造モデルの作成、④モデルの解釈と検討を行い、背反の特定、記述、解決を通じて、システム設計につなげるなどが重要とした。

#### 4. まとめ

本シンポジウムでは、ロボットの SI の科学を目指すとしながらも、現状のロボット分野に限定せず、システム理論、産業利用などの分野からの SI の科学の議論を行った。

分析的科学は、自然科学の基盤を成している。既に存在する自然物を分析し、説明する。多くの場合、対象自然物は要素に分解され、各要素が何であるかを理解して説明する。各要素が理解できれば、各要素を統合したシステムも理解できると考える。しかし、システムが大規模で複雑になると、このような要素還元のプロセスによる SI は妥当な方法とならない場合が多い。まず、要素間の繋がりが重要な場合には要素の分解方法が重要となり、システムとして重要な特徴を要素分解時に失う可能性がある。また、各要素を正しく理解、同定したつもりでも、各要素に僅かな誤差が存在すると、要素数が多いシステムでは、大きな誤差を生み出す。このような問題を解決するためにも SI の科学が有用となろう。

SI の科学を構築することは、容易ではないものの、本シンポジウムでの議論の中には、SI の科学に導く多くのヒントが含まれていた。従来よりも大規模なシステムの捉え方、System of Systems、End to End 深層学習など、今後の研究成果が期待される。