



サイバーフィジカルシステムの概要と動向

基
般

加藤 真平 (名古屋大学大学院情報科学研究科)

サイバーフィジカルシステムとは

サイバーフィジカルシステム (CPS) は、情報通信技術を用いて実世界の環境をセンシングする、あるいは実世界の現象に働きかける技術の総称を指す。狭義には、ネットワーク化された組込みシステムであったり、インテリジェントなセンサネットワークであったり、実世界を相手にするロボットであったり、さまざまな捉え方がされている。もともとの発端は、2000年代前半に、リアルタイムシステムとセンサネットワークの研究者らを中心にコンセプトが構築され、いくつかのワークショップやワーキンググループ活動を経て、2006年に米国 National Science Foundation (NSF) が CPS に関するワークショップを開催し、その存在が世の中に広まった。

▶黎明期の思想

CPS は分野横断型の複合研究領域である。図-1に示す CPS フラワーの概念¹⁾のように、CPS は共通の基礎研究と分野ごとの応用研究が融合して成り立っている。CPS の基礎研究には、リアルタイムシステムやセンサネットワークが含まれる。もともとこれら2つのコミュニティから発祥した研究領域であるという理由も大きい。コンピュータサイエンスの問題として CPS を捉えると、多くの問題がリアルタイムシステムとセンサネットワークに帰着できるからである。また、多くの応用システムが、実世界に対するセンシング、コンピューティング、アクチュエーションという古典的な制御システ

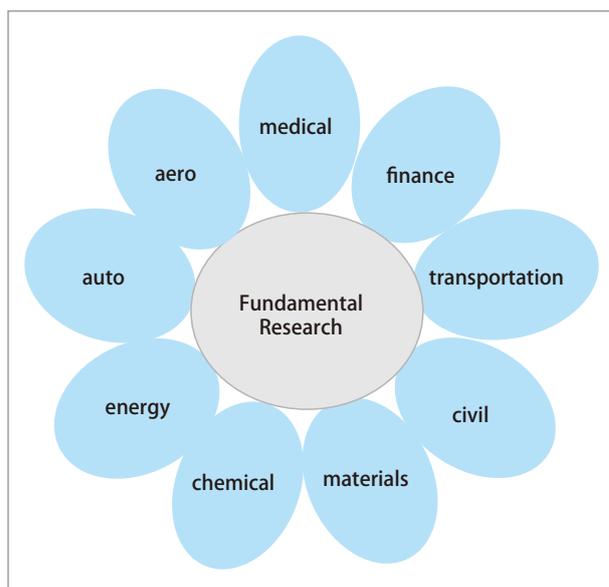


図-1 CPS フラワーの概念¹⁾

ムモデルを共有していることから、制御システムもしばしば共通の基礎研究領域として認知されている。そのほかの基礎研究領域としては、組込みシステムや検証技術がある。欧州では、CPS を “Networked Embedded Systems” と呼ぶこともあり、一般的には組込みシステムの発展形として理解されている。CPS の本質は、実世界 (人、社会、機械) と情報通信技術がきわめて密に協働するシステムであり、単に決められたタスクをこなす従来の組込みシステムとは一線を画す。分散系である情報通信技術と連続系である実世界を密につなぎ合わせる仕組みが CPS そのものであるといえる。

▶時代の流れ

近年では、クラウドコンピューティングやビッグデータという要素も必要になるケースが出ている。

CPSは無数の情報を含む実世界に対してコンピューティングを行うため、その計算量とデータ量が肥大になることは珍しくない。組込みシステムのサイズのコンピュータでは処理しきれないケースは多くあり、そういった場合にはクラウドコンピューティングを取り入れていく必要があるが、リアルタイム性が損なわれるというトレードオフも抱えている。一方、ビッグデータの必要性は実世界のセンシングから意味理解に至るプロセスにある。従来の制御システムのように、CPSではセンシングした結果をアクチュエーションにかけることになるのだが、決められた関数が用意されているというよりは、複合的な実世界の情報から意味理解を通じてアクチュエーションを行うため、センシングから意味理解の過程でビッグデータの要素を含む傾向にある。クラウドコンピューティングやビッグデータを取り入れることは、CPSの付加価値を上げることにつながるが、その反面、CPSに必要な不可欠なリアルタイム性を損なう可能性が高いため、CPSにおいてクラウドコンピューティングやビッグデータを利活用する仕組みは、まだ体系化に至っていないのが現状である。

▶インターネットとのつながり

組込みシステムや制御システムがしばしば閉じた系のシステムとして扱われるのに対して、CPSは実世界と情報通信技術が融合したネットワークシステムとして扱われる。特にオープンな系のセンサネットワークという捉え方をすると、組込みシステムや制御システムというよりは、ユビキタスコンピューティングやInternet of Things (IoT)に近い思想となる。ユビキタスコンピューティングやIoTは、どちらかという情報にアクセス、あるいは情報を交換する仕組みであり、制御システムでいうところのアクチュエーション機能が不可欠というわけではない。そういう意味では、CPSの目指すドメインとは少し違うが、実世界と情報通信技術の融合という観点では関連の深い研究領域としてコミュニティ同士の連携はよく見られる。

クラウドコンピューティングにもいえることだが、汎用的なネットワークシステムを取り入れると、どうしてもリアルタイム性という部分で問題が出てくる。古典的なリアルタイムシステムの用語を使えば、クラウドコンピューティングやユビキタスコンピューティング、IoTは総じてソフトリアルタイム性が求められるドメインであるが、今日、CPSのアプリケーションとして考えられているシステムの多くは、もう少し厳密なリアルタイム性、場合によってはハードリアルタイム性を要求する。CPSが組込みシステムと制御システム主体の系で発展するのか、それともクラウドコンピューティングやビッグデータ、ユビキタスコンピューティング、IoTなど、高度なネットワークシステムやデータ処理を取り込んでいくのか、その方向性は結局のところリアルタイム性を担保できるか否かにかかっているのかもしれない。

▶体系化に向けて

CPSを学問として確立するためには要素技術の体系化が至上命題となる。筆者はオペレーティングシステム (OS) の専門家である。OSは学問として成熟されている技術であるが、その大きな要因は技術全体が体系化されているからである。OSは、CPU (中央処理装置)、メモリ、I/O (入出力) デバイスといった計算機リソースを管理することが主な役割であるが、その方法論がスケジューリングやメモリ割り当て、割込み処理といった技術として体系化されている。そのため、研究者が問題を明確に捉えることができ、どこに新規性を見出して、どういう解決手段を提案すれば、既存の方法論を改良できるか、学問的にアプローチすることができる。一方、CPSはまだ歴史が浅いことと、分野そのものが複合研究領域であることから、いまだ体系化に至っておらず、何が問題になっていて、どういう解決手段によって、どの程度改良されるのか、見えにくい部分がある。CPSの思想自体は、将来新たな社会サービスや革新的技術を生み出す可能性を秘めているだけに、一刻も早く学問として成立させ、研究

開発を促進させるよう要素技術を体系化していくことが大きな課題である。

要素技術

CPSの要素技術は多岐にわたる。情報処理の枠を越えて、工学やロボティクス、認知科学など、さまざまな分野の要素技術が共通のインフラストラクチャとして利用できると思われる。しかしながら、実際の学問としてCPS分野に寄与している要素技術は多くない。たとえば、CPSに関する国際会議の集合体であるCPSWeekを見ると、そこで議論されている要素技術は、リアルタイムシステム、組み込みシステム、制御システム、センサネットワーク、検証技術であり、そのほかはほとんど応用システムに関する議論である。筆者は、CPSをもっとグローバルな学問として捉えるべきと考えているが、本稿ではまず、CPSWeekで主体となっている要素技術について簡単に紹介したい。CPSWeekは世界で活躍する第一線のCPS研究者が集まる場であり、そこで議論されている要素技術を理解した上で、今後どのように発展させていくかについて、本特集記事の読者を含めて大きなコミュニティとして考えていくべきではないかと思う。

▶リアルタイムシステム

CPSの最も重要な要素技術の1つにリアルタイムシステムが挙げられる。「リアルタイム」という言葉は誤認されることが多く、また実際に、複数の意味を持つ。一般的にリアルタイムと聞くと、「速い」とか「生中継」といったニュアンスを受けと思うが、専門用語としてのリアルタイムとは、「時間通り」という意味になる。狭義には、与えられたタスクが与えられた時間制約（周期、ジッタ、デッドライン）を守れる場合に、そのタスクはリアルタイム性がある、という言い方ができる。CPSは、実世界（人、社会、機械）をセンシングして、フィードバックをかけてアクチュエーションするシステムで

あるため、この実行サイクルにリアルタイム性がなければ、期待通りの認識、判断、計画、制御が働かない。つまり、リアルタイムシステムはCPSの最も根幹にある要素技術であり、リアルタイム性を確保することこそが、CPSが人、社会、機械と共存し、実用化するための第一歩である。

リアルタイムシステムの問題は、しばしばリソース管理とタイミング解析に大別される。リソース管理とは、OSやミドルウェアがシステムのリソース（CPUやメモリ、I/Oデバイス）を各タスクに割り当てることを指し、すべてのタスクがリアルタイム性を満たせるようなポリシーがリアルタイムシステムのリソース管理には求められる。一方、タイミング解析とは、狭義には各タスクの最悪実行時間（WCET）を求める方法論である。WCETが事前に分かっていなければ、いかにリソース管理をしたところでリアルタイム性の確保はできない。しかしながら、古典的なマイコン制御を除き、近年の複雑なコンピュータアーキテクチャ上で、WCETを厳密に求めることはきわめて難しく、また、求められたとしてもその値はきわめて悲観的なものになる。クラウドコンピューティングなどネットワーク処理が発生する環境では、このWCETの解析が困難である。最悪の場合、ネットワーク通信が途絶える可能性もあり、そうするとWCETを求めることはほぼ不可能となる。これが、クラウドコンピューティングをCPSに導入する際の最大の課題となる。

▶組み込みシステム

CPSは組み込みシステムの要素を強く持つ。特に、実世界のセンシングをする機器、あるいは実世界に働きかけるアクチュエータは、ほとんどの場合、組み込みシステムである。そのため、消費電力やサイズ、耐故障性が課題となる。また、ソフトウェアのプログラミングやハードウェアの選定も多岐にわたる。古典的な組み込みシステムとの違いは、システム全体がオープンな系になる傾向にあること、そして実世界との双方性が強いことが挙げられる。すなわち、組み込みシステムにネットワークの要素を取り込

んだものがCPSである。ここでいうネットワークとは、複数の物理過程と情報通信機器が繋がれたシステムを指し、必ずしもインターネットという意味ではないことに注意されたい。

組込みシステムにおけるプログラミングやハードウェアの多様性を抽象化するために、さまざまな高級言語や高位合成技術が提案されている。組込みシステムはしばしばハードウェアに特化したプログラミングが求められるが、CPSのようにシステム全体の系が肥大になると、必ず汎用ソフトウェアによる柔軟性のあるシステム開発が必要になる。そのときに、既存の組込みシステム開発の環境とどのように統合していくかは、課題の1つといえる。

▶制御システム

広義には、CPSは制御システムである。実世界をセンシングし、取得したデータを元に計算処理を行い、その計算結果に基づいて実世界にアクチュエーションをかけるという一連のプロセスは、まさに制御システムである。制御システムの基礎は、制御対象（プラント）から得られる観測値と目標値の誤差から評価関数を通してフィードバック制御をかけ、操作値をアクチュエータにかけるという仕組みにある。CPSではプラントが実世界の人、社会、機械となり、そこから応用システムごとの計算通信を経て、最終的に再び人、社会、機械をアクチュエータとして実世界に働きかける。

CPSの制御モデルのイメージを図-2に示す。古典的な制御システムとの違いは、センサとアクチュエータが機械（デバイス）とは限らない点と、操作値を求める評価関数が一意に与えられない点であり、この評価関数は制御だけに限定されず、計画、認識、理解など、応用システムごとに多岐にわたる。そのため、従来のフィードバック制御のような閉じた系ではなく、フィードバックとフィードフォワードがネットワークシステムを介して組み合わせられたオー

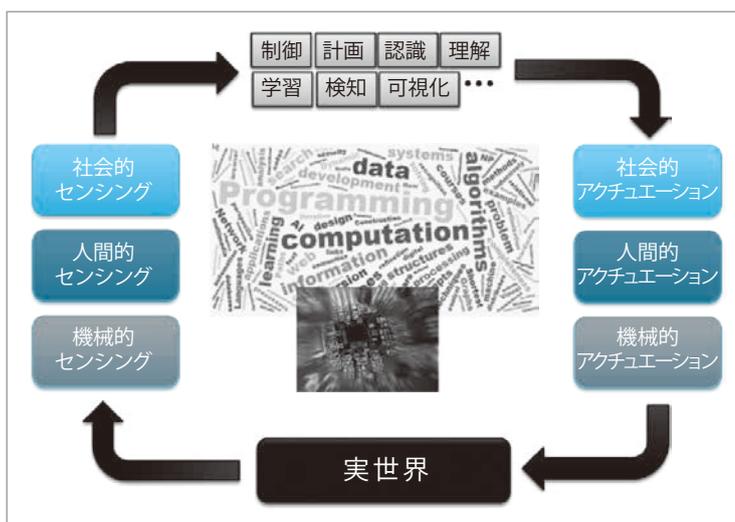


図-2 CPSの制御モデルのイメージ

プンな系となり、制御理論上の安定状態に持っていくことはきわめて困難である。しかしながら、センシングとアクチュエーションからなるシステムモデルという点では制御システムと重なる部分が多く、特にロボットの制御に近い。

▶センサネットワーク

CPSはセンサネットワークでもある。実世界と情報通信技術をつなげるには、単一のセンサでデータを取得するだけでは困難であり、複数の異種のセンサを組み合わせることでデータ融合し、複合的な情報通信処理によって実世界の認識や理解に至る。クルマの自動運転やスマートグリッドなどはその典型的な例である。単純に多数のセンサを配置して情報を取得、交換するだけであれば、従来のユビキタスコンピューティングやIoTの枠組みで収まるが、CPSはそこからさらに実世界に働きかけるための計算と通信、そしてアクチュエーションを兼ね備える必要がある。また、一般的にセンサネットワークというと、小型のセンサノードによってセンシングを行うことが多いが、CPSではセンサが必ずしもデバイスであるとは限らず、人や社会全体を使ってセンシングしてデータ融合することで、これまでは得られなかった情報を用いてアクチュエーションが可能となる。

センサネットワークのコミュニティでは、しばし

ば無線通信が介入する環境の中で、いかにリアルタイム性を確保するかを大きな課題の1つとして扱っており、その知見はCPSにおけるリアルタイム性の確保に対しても寄与できるものである。

▶ 検証技術

CPSは人、社会、機械と協働するシステムであり、CPSに基づく多くの製品・サービスには高い信頼性が求められる。すなわち、セーフティクリティカルシステムである。1つの想定外のエラーによって、システム全体に致命的なダメージを与えることになる。たとえば、リアルタイムシステムには時間的なエラーを排除する機能があり、組込みシステムはシステムのキャパシティに関するエラーを排除する機能を持つ。ほかにもさまざまなエラー要因が考えられるが、それらを事前に想定内に持ち込む技術が検証である。

CPSのようなセーフティクリティカルを対象とする場合、しばしば形式的検証が用いられる。システム全体やハードウェア、ソフトウェアの挙動を数理モデルで表現し、いかなる条件においても期待通りに動作するかを数学的に検証する手法である。対照的なアプローチとしてシミュレーションがある。これは、検証対象のシミュレータを別途開発し、さまざまな入力や条件を与えて、処理の中間結果や出力結果が期待通りであるかを網羅的に検証する手法である。セーフティクリティカルシステムの観点からは、当然ながら形式的検証によって検証されることが好ましいが、現代のシステムの複雑さから必ずしも数理モデルで表現できるとは限らないため、シミュレーションも有効な手法として実用されている。近年では、何らかの手法によって検証済みのCPSを指して“High-Confidence”という用語を使っている。また、従来では“Reliable”や“Dependable”といった形容で信頼性の高いシステムを表現している。

▶ その他

先に述べたとおり、CPSの定義は広がりを見せ

ており、近年ではクラウドコンピューティングやビッグデータ、さらにはユビキタスコンピューティングやIoTといった領域も含まつつある。これらに共通している課題は、オープンなネットワークシステムをいかにCPSの機能として導入するかという点にある。最近では、エッジコンピューティング構想が出ているが、やはりネットワークシステムにおいてリアルタイム性や信頼性を確保する上では、どの処理をクライアントで行い、どの処理をサーバ側にオフロードするのか、このシステム全体のアーキテクチャを確立することが急務であるといえる。

本特集記事では、リアルタイムシステムはもちろんのこと、要素技術検証のための実証実験の必要性や、実体情報学のような新しい学問、さらにはCPSのインフラストラクチャの方向性などについて解説している。

応用事例

図-1に示したように、CPSの応用分野はきわめて多岐にわたる。本章では、CPSWeekのコミュニティ内で主要な応用分野として理解されている事例について紹介する。

まず、CPSの応用事例として最も活発に議論が進んでいるのがクルマの自動運転とそれに関連する交通システムである。特にカーネギーメロン大学が進められている自動運転プロジェクト²⁾は、ロボティクス技術を中心に、リアルタイムシステムや組込みシステムの研究技術を多く取り込んだCPSのプロジェクトといえる。自動運転は2010年にGoogle社がカリフォルニアからネバダへの社会実験を公開して以降、一層研究が進んでいる領域である。

医療デバイスもCPSの主たる応用分野の1つである。ペンシルベニア大学が進めているプロジェクトでは、患者の状態の急変に対応可能なソフトウェアを組込んだインプラント（ペースメーカーなど）を開発している。彼らのソフトウェアは、モデ

ル検証機能とシミュレーション機能を兼ね備えており、まさにCPSの技術によって開発が進められている。また、近年では人体向けセンサネットワークの規格としてBody Area Network (BAN) が注目を集めている。このようにヘルスケアの分野においてもCPSの重要性は増してきている。

スマートグリッドに代表される電力システムもCPSのコミュニティで議論されており、家庭内あるいはオフィス内の消費電力をセンシングし、最適な電力供給となるように電力ネットワークを再構成し、消費電力を制御する。センサネットワークの技術が主体となったCPSの応用といえる。

発電システムの中で、プラズマ制御などによって核融合を起こす部類のシステムは、厳しい遅延制約の中で複雑アルゴリズムによって粒子の衝突を制御するため、マイクロ秒レベルの厳密なリアルタイム性とアルゴリズムの高速実行が求められる。図-3に示すコロンビア大学のTokamakシステムは、カリフォルニア大学サンタクルーズ校が開発した特殊なドライバソフトウェアを利用してシステムを構築し、2013年にCPSの国際会議であるInternational Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs) で論文発表された³⁾。

本特集記事では、これら主要な応用事例の中からクルマの自動走行についての応用事例を紹介するとともに、クラウドを用いた家電やヘルスケア、農業や排出権管理の問題、さらには説得工学や行動のデザインといった観点から、CPSの応用事例を紹介する。

今後の展開

本稿では、CPSの概要と最近の動向について述べてきた。今日、学術的に議論されているCPSは、リアルタイムシステムとセンサネットワークの発展形が多い。一方、国内の動向としては、クラウドコンピューティングやビッグデータ、ユビキタスコンピューティング、IoTなどを取り入れたCPSが

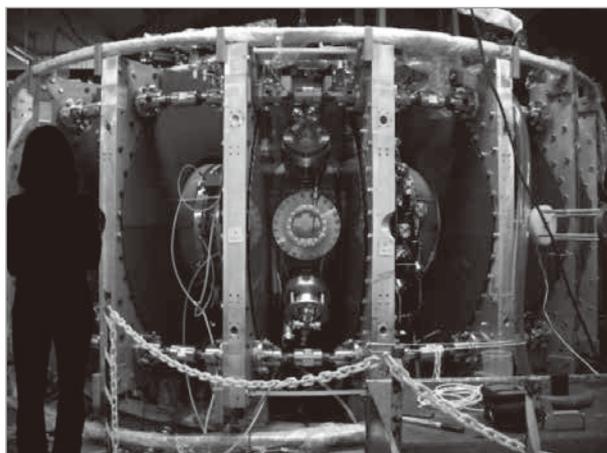


図-3 コロンビア大学のTokamak³⁾

議論されており、これは将来のCPSの在り方の1つといえる。現在、CPSの先端研究を議論する場として2つの国際会議がある。ICCPsは、NSFのCPSワークショップの後継として、主に米国の大学を中心に運営されている。もう1つの国際会議がInternational Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications (CPSNA) であり、これはアジアの大学を中心に運営されている。どちらの国際会議もIEEEのTechnical Committee on Real-Time Systems (TCRTS) がテクニカルスポンサになっており、リアルタイムシステムのコミュニティがCPSの中心に在ることを暗示している。今後は、より一層多くのコミュニティがCPSの研究領域に踏み込み、真の分野横断型の複合研究領域として確立していくことを願っている。

参考文献

- 1) Wing, J : Cyber-Physical Systems, Computing Research News (2009).
- 2) Wei, J., et al. : Towards a Viable Autonomous Driving Research Platform, Intelligent Vehicles Symposium (2013).
- 3) Kato, S., et al. : Zero-Copy I/O Processing for Low-Latency GPU Computing, International Conference on Cyber-Physical Systems (2013).

(2014年5月31日受付)

加藤真平 (正会員) shinpei@is.nagoya-u.ac.jp

2004年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒。2008年同大学大学院理工学研究科開放環境科学専攻後期博士課程修了。博士(工学)。同年慶應義塾大学理工学部特別研究員。2009年東京大学大学院情報理工学系研究科特別研究員。同年カーネギーメロン大学訪問研究員。2011カリフォルニア大学研究員。2012年より名古屋大学に勤務。現在、情報科学研究科准教授。オペレーティングシステム、サイバーフィジカルシステム、並列分散システムの研究開発に従事。