

CPS (Cyber-Physical System) とは？

連載 第一回：CPS からソーシャル CPS へ

北海道リージョナルリサーチ CPS 研究室室長

北海道大学名誉教授・客員教授

アルバータ大学非常勤教授

田中 譲

昨年 4 月にご縁があって総合商研株式会社の支援を受け、一般社団法人北海道リージョナルリサーチの中に、CPS 研究室を立ち上げさせていただきました。丁度、釧路工業高等専門学校を定年退職されて札幌に居を移された長年の共同研究者の野口孝文名誉教授にもご参加いただけることになり、時計台近くのマリヤ手芸店のビルの 4 階に研究室をオープンしました。

CPS 研究室という名称は、2010 年ごろから私自身が研究に関わってきた「都市を対象にしたソーシャル CPS の研究」を受けて、北海道リージョナルリサーチの樋口専務理事が名付けてくださった名称です。

研究室の開設から 10 か月余りが経ち、年も変わった折に、皆様へのご挨拶を兼ねて、CPS の目指すものと、その研究の歴史をご紹介します。当 CPS 研究室での現在の研究開発内容をご紹介しますので、ご紹介します。

1. CPS とは

CPS というのは、物理的な事物から構成されている物理世界と、コンピュータ上およびコンピュータ・ネットワーク上で定義されるサイバー世界とを相互に結合し、前者の状態変化をセンサやセンサ・ネットワークを介して実時間でモニターし、そのデータおよびデータ・ストリームをサイバー世界、つまりコンピュータ・システムに送ってそこで高度に分析処理し、その結果に応じて、物理世界を制御する信号を今度はサイバー世界から物理世界へと送り、物理世界をその動的変化に応じてより安全に最適に実時間で制御することを目指すシステムのことを言います。その特徴は、物理世界とサイバー世界が、フィードバック・ループで結合されることにあります。

CPS 研究の創成期には、対象物理世界として考えられていたのは、ペースメーカやパワード義足/義肢のような、制御理論に基づいた古典的制御装置を付加した機器でした。これに対するサイバー世界は、このような機器に組み込んで用いられる単一プロセッサでした。制御装置付きの機器の外側に、組み込みプロセッサとのフィードバック・ループをさらに設けることにより、例えば、機器の観測可能なパラメータの値が動作限界を超えないように常に

監視し、動作限界を超えるような異常事態が生じた際には、安全性を担保しつつ速やかに安全動作範囲内に動作が戻るように制御装置の入力パラメータの値を調整して、緊急強制制御を行うことを可能にすることなどが考えられました。対象機器と制御装置の間のフィードバック・ループの外側に、さらにこれらとコンピュータとの間のフィードバック・ループを設けて、動作の安全性を保障するこのような考え方は時にサンド・ボックス化 (sandboxing) とも呼ばれます。

第2世代のCPSでは、より複雑な物理世界の対象の制御へと発展し、分散化した大規模プラント、航空機や高級自動車、インテリジェント・ビルにおけるエネルギー消費の外、ITS、スマート・グリッドなどの社会インフラも対象になってきました。ここでは、物理世界の状態の変化を実時間でモニタリングするセンサ群と、サイバー世界からの信号により物理世界を実時間で操作するアクチュエータ群を介して、物理世界とサイバー世界とのフィードバック・ループを形成するネットワークが問題になるだけでなく、サイバー側のコンピュータ資源のネットワーク分散も考慮する必要が生じました。このような分散CPSのシステムに関して、新しい理論基盤を与えたのは、ペンシルバニア大学教授のGeorge Pappasで、彼は分散制御システムとサイバー側の分散をパケット・スイッチング・ネットワークと制御理論を融合して一つの理論体系にまとめ上げることで、米国のNSF (National Science Foundation) が中心となって、複数の国立研究助成機関の連携で2009年にスタートしたCPS研究助成プログラムにおいて大きな注目を浴びました。余談ではありますが、残念なことに、彼の研究は日本では殆ど知られていません。

これらの第1世代、第2世代のCPSはいずれも閉システムを対象としていました。閉システムであるがゆえに、個々のモジュールがウェル・フォームド・システムであれば、統合システムもウェル・フォームド・システムとしてモデリングできる場合が多く、その場合には理論的取り扱いも可能になります。2012年頃までのNSFのCPSプログラムの焦点は、特にこのような場合に向けられていたように思えます。

NSFのCPSプログラムは2007年8月に発表された米国大統領の科学技術政策助言委員会報告書PCAST (President's Council of Advisors on Science and Technology), *Leadership Under Challenge: Information Technology R&D in a Competitive World*を受けて、NSFのCISE(Computer and Information Science and Engineering)部門とENG (Engineering)部門が急遽立ち上げたプログラムでした。CPSという言葉を作ったのは、Helen Gill博士で、彼女は当時、NSFのCISEのCNS(Computer and Network Systems)において、Embedded & Hybrid Systems programのプログラム主任を務めていました。前職はDARPAでソフトウェアによる制御とハイブリッドシステム、組み込みシステムのためのプログラミング技法におけるプログラム開発を行うと共に、ソフトウェア開発と進化のモデリングと形式的方法論に関する研究の管理を行った経験を持っていました。2011年当時、彼女はCyber-Physical Systems (CPS) と、NSF/FDA SCHOLAR-IN-RESIDENCE AT FDAの2つのプログラムの責任者をしていました。

2. CPSからソーシャルCPSへの発展

2010年の2月に、当時の文部科学官で、現在は情報学研究所所長の喜連川優教授から連絡を頂き、文部科学省の情報科学分野での科学政策の次の目玉になるような大きなテーマを考えてもらいたいとの話がありました。

米国では2006年に、先に述べたNSF(National Science Foundation:米国国立科学財団)のHelen Gill博士がCPS(Cyber-Physical System)という言葉をはじめて使い、2010年の頃には、CPSという言葉は既に米国の研究者の間で市民権を得ており、CPS関連の複数の国際会議とワークショップを同じ場所で1週間の間に集中的に開催するCPS Weekが2008年から開催されていました。

わが国で、CPSという言葉が普及したのが、ここ数年前からであることを考えると、大変大きな差異を感じます。

第一回のCPS Weekは、2008年4月に米国セントルイスのアメリカン・センターとルネッサンス・グランドホテル(ワークショップのみ)で、IEEE(米国電子電気技術者協会)とACM(米国計算機学会)とNSFがスポンサーとなって、3つの国際会議と、5つのワークショップが開催されました。この時のCPSの定義は、「コンピューテーションとコミュニケーションとストレージの機能を統合して、物理システムと工業システムのモニタリングと制御を行うシステム」で、「安全で、信頼でき、安心に、効率よく、実時間で運用されなければならない」とされていました。「CPSは近い将来に、技術的、経済的、さらには科学的に大きな影響を持つことになろう」と予測していました。

第2回CPS Weekは2009年4月に米国サンフランシスコのパーク55ホテルで、IEEEとACMがスポンサーとなって、NSFとマイクロソフトのサポートで開催されました。3つの国際会議、6つのワークショップ、フォーラム、5つのチュートリアルが開催されました。CPSの定義は前回のものを踏襲していました。

第3回CPS Weekは2010年4月にスウェーデンのストックホルムのKTH(スウェーデン王立工科大学)で、IEEEとACMの共催、NSF, ArtistDesign、欧州委員会第7期フレームワーク・プログラム、MdH(メーラルダーレン大学)がスポンサーとなって開催されました。この時は5つの国際会議と9つのワークショップ、2つのチュートリアルが開催されました。ここでは、「CPSは、物理環境のあらゆる種類のオブジェクトと構造物に埋め込まれた計算と通信のコアによって、その運用がモニターされ、連携され、制御され、統合されるようなエンジニアリング・システムである」と再定義されました。

文部科学省の派遣で私がCPSの調査研究のために参加したのは、第4回CPS Weekで、2011年4月に米国シカゴのホテルJWマリオットで、IEEE、ACM、NSFと共に、産業界からは、Lockheed Martin、Microsoft Research、NEC、John Deere、Boeing、GMがスポンサーとなって開催されました。5つの国際会議と、7つのワークショップ、2つのチュートリアルが開催されました。CPSの定義は前回のものを踏襲していました。その後もCPS

Week は毎年開催され、2019 年からは CPS-IoT Week と名称に IoT (Internet of Things : もののインターネット) を加えて現在に至っています。

2011 年の CPS Week での講演で、先に紹介した Helen Gill 博士は、2011 年の CPS Week での講演で、CPS の第 2 年次という題目で講演しました。CPS プログラムが、2007 年 PCAST を受けて、NSF の CISE 部門と ENG 部門を急遽立ち上げた背景には、CPS が、科学技術の観点から重要であるだけでなく、航空宇宙、自動車、化学生産、市民生活基盤、エネルギー、保健、製造、資材、輸送など、米国の安全と競争力に重要な多くの分野におけるグランドチャレンジに重大な影響を及ぼすと考えてのことであったと説明しました。

CPS プログラムは 2009 年にスタートし、この年は 59 件を採択しました。2010 年は 43 件余りを採択しました。2010 年 6 月 10 日には第 1 回 CPS 研究代表者会議(CPS PI(Principal Investigator) meeting) が開催されました。採択プロジェクトには、中規模プロジェクトと大規模プロジェクトの 2 つのカテゴリーがあり、中規模プロジェクトは年 30 万ドルから 50 万ドルの規模で、3 年から 5 年の期間、大規模プロジェクトは、最長 5 年にわたって年 100 万ドル規模の助成が行われました。当時は、ターゲット分野として、特に保健、エネルギー、運輸の 3 分野に重点が置かれていました。2009 年には、CPS 基礎研究、輸送、保健と医療、エネルギーの 4 分野に重点が置かれ、2010 年には、重要分野として、オープン・ソース・ツールがこれらに加えられました。これは、拡張可能な CPS プラットフォーム技術を目指すものでした。

2009 年当時、NSF では、CPS を「計算リソースと物理リソースの密結合と調整」と定義していました。今後の CPS は、適応性、自律性、効率性、機能性、信頼性、安全性、有用性において、今日のレベルをはるかに凌駕する必要があるとされていました。CPS 研究の発展によって、以下のようなシステムの世界が大きく変容すると考えられていました。

- ・ 迅速な反応を要するシステム (自律的衝突回避など)
- ・ 精度を要するシステム (ロボット外科手術、ナノレベル許容度の製造など)
- ・ 危険を伴うために、近づくことができない場所での作業 (搜索、救助、消防、探査のための自律システムなど)
- ・ 高効率システム (正味のエネルギー消費が零となるビルディングなど)
- ・ 人の能力拡大、社会福祉 (支援技術、ユビキタス健康管理モニタリングおよび情報配信など)

NSF では、2010 年から毎年、プロジェクト研究代表者会議を行っていました。2011 年と 2012 年にワシントンで開かれたプロジェクト代表者会議には、私自身も文部科学省から派遣され、Helen Gill 博士に招かれて講演も行いました。

2011 年の PI 会議では、欧州委員会の Jorge Pereira 博士が講演し、EU においては、「ネットワーク結合されたモニタリングと制御 (Networked Monitoring and Control)」プログラムが米国における CPS プログラムに対応しているとしてこれを紹介しました。このプログラムでは、

- ・ 広大な地域、厳しい環境における、異種間で相互に結合された連携システムで、ちょっとした摂動のような変化から、システム全体にわたる機能不良に至るまで、想定された筋書きの範囲を超えてしまう事態にも対処しうるシステム
- ・ 多数の学術分野にまたがるシステム
- ・ ループ中に人が介在するシステム（人が意思決定を行ったり、知識や知恵を提供したりするオーグメンテッド制御）

を対象とするとしていました。このプログラムは歴史的には、「組み込みシステム」から始まり、「組み込みシステムと制御」を対象とし、その後、「組み込みシステムのネットワーク化」が進んだことから、「ネットワーク結合されたモニタリングと制御」を対象にするようになり、今後は、「システムのシステム」を含む「複雑なシステム工学」へと展開していくと考えていると述べ、今後は、「パーベイシブ組み込み型インテリジェンス」へと発展するとなると述べました。

EUの「ネットワーク結合されたモニタリングと制御」プログラムでは、防衛と国家安全保障は扱わないが、早期警報システムとエネルギーは対象としているとし、本プログラムの焦点となっている対象は

- ・ エネルギー効率のよいビル
- ・ グリーン・カー
- ・ 未来の工場
- ・ 未来のインターネット

であると紹介しました。ここで述べられている研究の方向性は、現在も大きくは変わっていません。

同じ会議で、ドイツ科学アカデミーの Manfred Broy 博士は、CPS は Internet of Things とほぼ同じと捉えているとし、物理世界とサイバー世界をつなぐもの、組み込みシステムとグローバル・ネットワークが結合したものと捉えており、応用分野として、

- ・ モビリティ
- ・ 保健
- ・ スマート・グリッド

の3点を挙げ、技術における深遠な変革が経済に破壊的変化をもたらすことになることを主張しました。将来の要件として、

- ・ オープンでかつ分野を超えたプラットフォーム
- ・ 相補的な拡張と統合
- ・ 系統的強化

を挙げ、挑戦課題として、

- ・ 分野間協力
- ・ 組み込みシステムの計算処理
- ・ システムのシステム

- ・ 状況と実世界に対するアウェアネス
- ・ オープン・アクセス

を挙げました。

欧州委員会の Jorge Pereira 博士が言う、ループ中に人が介在するシステム（人が意思決定を行ったり、知識や知恵を提供したりするオーグメンテッド制御）や、ドイツ科学アカデミーの Manfred Broy 博士が言う、CPS は Internet of Things とほぼ同じという立場に立つと、そのような CPS は最早クローズドなウェル・フォームド・システムではなくなります。

私自身も、先に述べた文部科学省への調査報告の中で、今後の CPS の展開の方向性として、CPS の考え方を都市やコミュニティに拡張適用することを提案し、ソーシャル CPS を情報科学分野における次の世代の大きな挑戦的研究課題として取り上げることが提案していました。先の NSF の PI 会議でもそのような観点から講演をし、Helen Gill 博士に、「私の研究紹介は今回の PI 会議で発表されている CPS（つまり閉世界を対象とした CPS）とは少し異なるが、NSF はなぜ開世界を対象としたソーシャル CPS も扱わないのですか？」と質問をしました。彼女の答えは、いずれは取り組みたいと思っているとのことでした。

現在、私は JST の CREST プログラムの一つである「ビッグデータ応用」の総括をしており、同じく CREST プログラムの「ビッグデータ基盤技術」（総括：喜連川教授）とともに、毎年 NSF との合同会議を開いていますが、NSF 側のビッグデータ関連プログラムは 2 つの柱を立てており、一つが、「21 世紀の科学技術のためのデータの高度活用」であり、もう一つが、「スマートで、相互に結合されたコミュニティ」となっています。実はこの 2 つ目の柱は、NSF の現在の CPS プログラムのテーマで、Helen Gill 博士の後、このプログラムを引き継いだ David Corman 博士によって推進されています。この 2 つ目の柱は、まさに、私が Helen Gill 博士に提案したソーシャル CPS であり、欧州委員会の Jorge Pereira 博士や、ドイツ科学アカデミーの Manfred Broy 博士が論じていた内容に沿う概念です。

3. ソーシャル CPS とは

第 3 世代の CPS では、社会基盤システムや環境システムに焦点が当てられ、結果として開システムへと拡大されつつあります。開システムであるがゆえに、対象はウェル・フォームド・システムとは言えず、統合システムを理論的基盤に基づいて論じることは不可能となります。閉ループによる制御という考えも薄らぎ、ループ中に人が介在するシステムへと関心が移ってきています。したがって実時間制御システムというよりは、モニタリングに基づいた戦略的意思決定を支援するシステムを構築するといった方向への関心が拡大されています。先に述べた、欧州連合における CPS 関連プログラムの関心もここにあったように思われます。実際、その後の欧州連合の EIT ICT Labs Call of Activities 2012, version 1.0 では

4.6 節が CPS に割り振られており、上に述べた観点での CPS に関するプログラムに関して論じられていました。

中国における CPS も物のインターネット(Internet of Things)と同一視しており、欧州連合のビジョンと似ています。わが国における現在の CPS に対する関心の拡大もこの第 3 世代の CPS ビジョンから生じています。

わが国においては、第一世代の CPS 研究の内容は、個々の対象分野で技術として研究開発されてきており、それを CPS という観点から眺めて共通の学術的基盤を確立することを目指すという点に関しては十分な努力がなされてこなかったように見受けられます。一方、CPS という言葉が独立に普及し始めてからは、第 2 世代や、第 3 世代のビジョンでの発展に対する期待が大きくなっています。この状況は、欧州連合の状況と非常に似ています。一方、第 2 世代のビジョンに立つ研究開発も、基盤理論の確立をはじめとする基礎の部分では米国に比べて研究開発が遅れており、この部分の強化も必要であると考えます。

今後特に重要となるのは、第 3 世代のビジョンに立つ CPS 研究で、これに関しては、米国も、欧州連合も、日本も数年前から本格的にスタートしたところです。

私自身に関していうと、米国での CPS 研究の現状と、将来のソーシャル CPS に向けた研究の立ち上げの重要性を提案する報告書を文部科学省に提出した後、2011 年に、文部科学省からこの方向でのフェージビリティ・スタディの予算が付き、北海道大学の他に、国立情報学研究所、大阪大学、九州大学の 3 機関と連携して 1 年間、ソーシャル CPS の予備研究を行いました。その後、2012 年に本格研究 5 年間の公募があり、私たちの 4 機関連携グループが予算を獲得し、私のグループでは、札幌市における除排雪を大規模社会サービスの例と考え、その効率化を都市規模のソーシャル CPS によって制御する目標を立てて研究開発を行いました。

2012 年度から 2016 年度の本格研究では、私のグループは、①北広島に設置されている X バンド MP レーダのレーダ・データの 5 分毎準実時間受信、②札幌市内のタクシートのプローブ・カー・データを統計処理し、交差点から交差点までの道路リンクごとの平均速度、台数、最高/最低速度などの統計データを 5 分毎の統計データとして受信する準実時間受信、③中央バスの協力を得て実現した路線バス 10 数台の位置情報の実時間取得、④路線バス 1 台のフロントパネルに下向き 270 度の振り幅で設置したレーザ・レンジ・スキャナを用いた道路表面並びに路側の堆雪状況の実時間 3 次元計測データの取得、⑤除排雪車 10 数台にスマートフォンを搭載し、除雪作業の軌跡と 3 軸加速度の変化の実時間取得などを実現し、これらのビッグデータの分析を行いました。そして、交差点におけるコーナー除排雪の重要性とその効果の検証として、路側の堆雪の裾野の道路中央への局所的な出っ張りが種となって、渋滞を起こす現象を示し、そのような状況の実時間での検出技術を提案しました。また、タクシーによる人の移動の流れを市全域に渡って一日の変化として可視化する技術や、路面凍結によりスリップが生じやすいエリアの実時間推定などを車の ABS 起動のビッグデータから分析によって求める基礎研究も行いました。これらの成果は札幌市雪対策室に報

告を行うと共に、学会や一般講演会を開催して公表しました。

その後、2年間の間、札幌市から新たに助成を受け、これらの技術の実適用に向けた開発に取り組みました。一方、これらのビッグデータを用いた実時間の分析によって、渋滞箇所などの実時間推定ができたとしても、それが雪の影響によるものか、違法駐車などの別の要因によるものかが分からないと、そのまま除排雪作業の出動指示には使えないとの意見が担当者の方からありました。

これを受けて、今年度からはスタートした、CPS研究室においては、市全体をカバーする、道路交通の異常検知と、検知された箇所の画像をオン・デマンドで実時間取得できるような、ワイヤレスのモニタリング・ネットワーク・システムを、安価な通信コストで構築するための研究開発を行うことを最初の目標に設定しました。具体的にはLPWAを用いて、安価な積雪計などの各種定点観測センサを大量に配置可能にする技術の開発と、路線バスや除排雪車のトラジェクトリを準実時間で取得する高度な符号化と圧縮技術の研究を行い、時速40km以下の移動体であれば、2秒ごとの位置の変化を取得し、時速40km以上になった場合には4秒ごとの位置の変化を準実時間で取得するモードへと自動的に切り替え、1分毎に128ビットのデータにして送信する技術を開発しました。

今後は、地域BWAを活用し、多数の交通状況の監視カメラによる、オン・デマンドの実時間状況把握システムの技術開発や、道路の有効幅の推定にマルチバンドのリモート・センシング画像の分析技術を用いる研究を計画しています。これらと、従来の研究成果を組み合わせ、スマート除排雪に資する基盤技術の開発と、その他の応用への展開を図っていきたいと考えています。

次回からは、スマート除排雪に関して私のグループが北海道大学で行った研究の成果や、現在、CPS研究室で取り組んでいる研究開発の内容を具体的に uptake、紹介したいと思います。