



次世代 CPS のための ソフトウェアインフラストラクチャ

基
般

中島 達夫 坂本 瑞季 (早稲田大学基幹理工学研究科情報理工学専攻)
秋岡 明香 (明治大学総合数理学部ネットワークデザイン)

CPS におけるオペレーティングシステム (OS)

OS の役割は、リソースの仮想化とそのリソースを抽象化してプログラムから容易にアクセス可能とすることである。元来の OS は、計算機ハードウェアが提供するプロセッサ、メモリ、I/O デバイス等のリソースを最適に制御するための仮想化を行い、それらのリソースを容易に利用するためのプロセス管理等のリソースを抽象化したインタフェースを提供する。特に、CPS においては、フィードバック制御の実時間制約を満足するためのリアルタイムリソース管理が重要な役割を果たす。インターネットの普及に伴い、管理すべきリソースは単体の計算機内のリソースだけではなく、分散システム上のさまざまなリソースを扱う必要が生じてきた。VMWare^{☆1}やOpenFlow^{☆2}等の仮想化ソフトウェアはクラウド環境を仮想化し、状況に応じて必要とする計算機数を動的に増減可能としたり、コードとし

てのインフラストラクチャのような開発やテストの考え方を改変している。また、J2EE 等のさまざまな分散ミドルウェアは複雑なネットワークプログラミングをプログラマから隠蔽することを可能としている。それ以外にも、マルチメディア向け、モバイルシステム向け、ユビキタスコンピューティング環境向け等のさまざまな分散ミドルウェアが開発されてきた (図-1)。

本稿では、CPS が以上のように発展してきた OS の考え方を根本的に変化させることを解説する。まずは、スマートシティを例に、CPS における OS が扱うべきリソースがどのように変化してきているかを説明する。次に、人間の行動を新しいリソースとして扱うようにすることが多くの社会的な問題を考慮する上で重要となることを示す。次に、以上のような OS を考える場合に、元来の OS の役割である計算機リソースの管理がどう拡張していくかに関して検討を行う。最後に、本稿で解説する CPS のためのソフトウェアインフラストラクチャが社会全体に与える影響に関して検討を行う。

☆1 <http://www.vmware.com/>

☆2 <http://www.openflow.org>

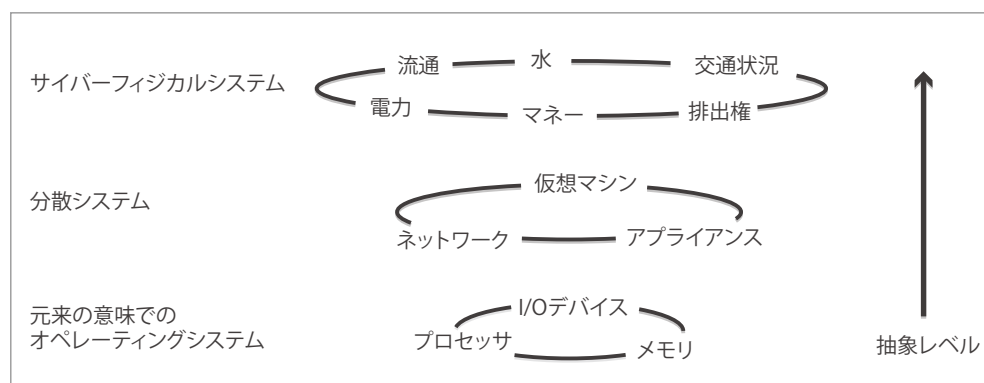


図-1 サイバーフィジカルシステムのための OS

スマートシティにおけるリソース管理

我々の日常的に利用しているリソースの利用効率を高め、ユーザ経験を向上させるための多くのスマートシティの取り組みが行われてきた²⁾。スマートシティはCPSを都市レベルで採用する取り組みであり、本章では、現状で取り組まれているスマートシティの取り組みを検討することにより、次世代のCPSにおけるOSが扱うべきリソースとして扱うべき対象が何であるかを検討していく。

スマートシティの取り組みの例としては、リオではIBMと都市状況を一元的に管理することにより、危機管理対応の迅速化、最適化、交通状況、電気、水道、ガス等の管理を行うインフラストラクチャを構築している^{☆3}。また、スペインのAqualia社は使用水量の予測分析を行い、水資源管理を行っている^{☆4}。日立は千葉の柏の葉においてスマートグリッドを用いた電力の効率化を実現しようとしている^{☆5}。また、自動車の自動運転を利用して交通状況の最適化を図ろうと試みようとする多くの取り組みが存在する^{☆6}。

以上の例のように、スマートシティの実現においては、電気、水道、ガス等の物理リソースだけではなく、交通状況、犯罪状況等の現実の状況が作り出す論理的なリソースも扱う必要がある。従来のOSが、プロセッサ、メモリ、I/Oデバイス等を操作可能な抽象オブジェクトとして仮想化したのと同様に、以上のような実世界のリソースを操作可能な抽象リソースとして定義することがCPSにおけるOSの重要な役割の1つであると考え、CPSのためのOSが管理するこれらの抽象リソースは、実世界内に存在するInternet of Things (IoT) 等を用いて、物理リソースへのセンシング、実世界への操作を行う

ことにより、物理的なリソースと関係付けられる¹⁾。

すでに、CPSのインフラストラクチャに関するさまざまな取り組みが行われており、たとえば、文献10)では、物流管理を最適化するための実世界抽象化が提案され、文献11)では、二酸化炭素の排出権をプログラマブルに扱えるように抽象化を行っている。本稿では、実世界におけるリソース管理の例として交通状況を考える。実世界におけるリソース管理は次の3つに分類される。1つ目は、センシング、2つ目は、実世界への操作、3つ目は、リソースの抽象化である。交通状況を抽象リソースとして仮想化するため、まずは、自動車と信号、道路マップという物理リソースを抽象化する。道路マップは自動車が通過できる道路をモデル化し、自動車は現実の自動車の位置やスピードをモデル化する。同様に、信号は実際の信号の状態をモデル化する。センシングにより各自動車の現在位置とスピードに関する情報を取り出し、それを道路マップ上に配置する。現状の状況に基づき信号に対する実世界への操作を行うことで、自動車の動きを制御することが可能となる。また、直接、各自動車のルートを制御することにより、より高度な交通状況の制御が可能となる。これらの抽象リソースを交通状況として仮想化することにより、プログラムからの操作が可能となり、より高度な制御やほかのサービスとの連携を実現する。

従来のOSは計算機が扱う情報をユーザが操作するためのインタラクション手法も提供している。たとえば、広く利用されているデスクトップメタフォアは、さまざまな情報を操作するためのインタラクションパラダイムとして考えられてきた。しかし、CPSでは、操作対象に対するアフォーダンスの提供が従来のOSとは異なる。特に、スマートシティでは、実世界内のすべての対象が操作の対象となる可能性があるため、インタラクション手法も多様化せざるを得ない。実世界を操作するための手法としてはすでにさまざまなアイデアが提案されており、特に、実世界の物理的な対象を直接操作することを可能とするタンジブルインタラクションは将来

☆3 <http://enterprisezine.jp/iti/detail/4842>

☆4 <http://www-06.ibm.com/jp/solutions/casestudies/201402027aqualia.html>

☆5 <http://www.hitachi.co.jp/products/smartcity/case/kashiwanoha/index.html>

☆6 <http://news.mynavi.jp/articles/2013/11/06/itsworldcongress/>

の CPS 技術の利用において有望なインタラクション方式であると考えられる。しかし、電力等の従来は操作可能な物理的実体として扱うことができなかった対象や仮想グッズのように仮想世界のみで存在する対象に対して、どのように適切なアフォーダンスを与え、実際に存在するかのようなリアリティを提供するかは今後の CPS のための OS を実現する上での課題として重要である。

上記のように、次世代の CPS は、実世界に存在するさまざまな対象を抽象オブジェクトとしてプログラムからアクセス可能なものとして提供する。しかし、実世界の多くの社会問題を解決するためには、電力や交通状況のような物理対象を制御するだけでは、それらの問題の一部しか解決できない。多くの場合は、人間が行動を変えない限り本質的に解決できない問題である⁸⁾。

人間の行動ナビゲーション

前章で説明したように、人間自体を OS が管理すべきリソースと考えることにより、CPS が扱える問題領域が広がる。しかし、そのためには、人間の行動をナビゲーションするための仕組みが必要となる。そのための 1 つの手段として、図-2 に示すような説得型ディスプレイが存在する⁶⁾。

説得型ディスプレイはセンサとディスプレイ部から構成される。センサはユーザが周囲に与える影響をセンサを用いてモニタリングを行う。ディスプレイはモニタリングした結果を反映する情報の表示を行う。典型的には、望ましい行動をユーザが選択することにより、提供する情報がユーザの行動を促進し、望ましくない行動を選択することにより、ユーザの行動を抑制するような情報を提供する。以上の

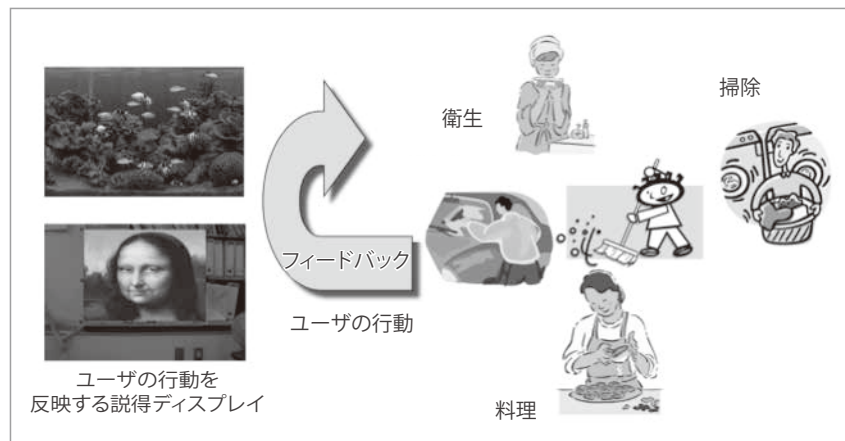


図-2 説得型ディスプレイ

ような情報を用いてフィードバックループを形成することにより人間の行動の効果的なナビゲーションを実現する。

説得型ディスプレイが提供する情報として、実世界の状況を正確に表現することが一般的である。つまり、実世界の変化を視覚化することにより、ユーザは容易に自分の行動が実世界にどのように影響を与えているかを知ることができ、それが行動を促進したり抑制したりする。しかし、視覚化が大きな効果が得られないケースも存在する。たとえば、各自の健康状態や都市の持続可能性は容易に説得力がある表現が困難なため、実世界に存在しないフィクションとして状況を提示することが望ましい⁹⁾。たとえば、文献9)で提案されているゲーミメディアモデルのようなトランスメディアストーリーテリングに基づいた方法論を導入することにより、フィクション性を現実世界に導入することも可能となる。しかし、その場合、フィクションにリアリティが感じられないとユーザの行動をうまく促進することは難しい。

以上の情報の表示は行動を促進するための一種の報酬であると考えられることができるが、ほかにもさまざまな形態の報酬を考えることも可能である。たとえば、ゲーミフィケーションではバッジやリーダーボードを用いる³⁾。また、ゲームの考え方を利用し、1つのミッションを達成することにより、より困難なミッションを提供することによって、最後に希少性が高い報酬を与えることで行動を促進することも

可能である⁷⁾。

また、人間の行動をナビゲーションするための実世界への操作は、本稿で説明した、説得型ディスプレイやゲームの考え方をを用いた方式だけではない。Nest Learning Thermostatのようにユーザの行動を機械学習により学習し、それにより自動的にリソースの最適な制御を行うデバイスも存在する。

CPS における計算機リソース管理

次世代 CPS のためのソフトウェアインフラストラクチャは、図-1に示したように、より下層のリソースを抽象化する複数のソフトウェアレイヤにより構成される。本章では、最上位層となる CPS アプリケーションのレイヤから見た計算機リソース管理について考える。スマートシティアプリケーションは、1) 何らかのデータをスマートシティのさまざまなコンポーネントから入力として受け取り、2) 入力データを処理し、3) 結果を説得型ディスプレイ等に出力する。従来の「分散処理」という単語は、2) のデータ処理の部分を複数の計算機を用いて効率的に行うことを指す場合が多い。しかし次世代 CPS では、1) のデータ供給源そのものが物理的・ネットワーク的に広域に散在している可能性が高い。2) の分散処理基盤と3) の出力先についても同様である。つまり、計算機リソースのみならず、データ供給源や出力先も含めて、巨大な動的分散処理基盤とみなす必要がある。したがって、本章における議論では、計算機リソース管理を、計算ノードと同義な計算機リソースの管理とデータ供給源あるいは出力先としての計算機リソース管理の2つに分けて議論したい。後者に含まれるリソースは、スマートシティにおけるリソース管理の説明で触れた電気、水道、ガス等の物理リソースや、交通状況、犯罪状況等のリソース、人間そのものなどである。

計算ノードと同義な計算機リソースの管理については、分散処理の分野で長く研究されてきた。昨今では、クラウド・コンピューティングとして広く一

般に普及し、利用者は個別の計算資源の物理的・ネットワーク的位置や稼働状況などを把握することなく、必要な計算ノードの数のみを指定することで分散環境を手軽に利用できるまで、計算機リソースは抽象化された。さらには、データ並列などの簡単なフォーク・ジョイン型並列計算モデルであれば、MapReduce^{☆7)}などを用いることで、並列分散処理の深い知識がなくとも、手元のアプリケーションを比較的容易に並列実行することが可能になった。必要な計算機リソース数や実行形態までをソフトウェアインフラストラクチャ側で自動的に決定することが可能になり、ユーザが安心してその決定にすべてを任せる時代が来るまでには、まだ少し時間と技術の進歩が必要であろう。しかし、計算機リソースがより抽象化し、その詳細や使い方をユーザに隠蔽し、さらなる自動化が進むことは間違いない。

一方で、データ供給源としての計算機リソース管理については、今後、大きく変化していく可能性が高い。ここで、アプリケーションがデータを取り込み、何らかの処理を行って結果を出力する場合を考えてみる。アプリケーション視点で考えた場合、必要なデータの指定方法が「IP アドレス XX.XX.XX.XX に繋がっているデバイスの Y というインターフェースが取得するデータ」などという形態では、あまり使い勝手がよろしくない。理想的なデータ指定方法は「関東地方のジオタグが付いているデータ」や「この画像の人物が映っているデータ」などである。つまり、必要なデータの特性や属性のみを記述し、そのデータがどのようなデバイスにより、ネットワーク上のどの位置で収集されているかは隠蔽する、データソースの抽象化、あるいはデータソースのクラウド化が望まれる。さらには、現在のようにデータソースからひと通りデータを手元に移動してからデータクリーニングをして使用する、という形態ではなく、手元にはクリーニングやフィルタリングが済んだ、後は処理するのみの必要なデータだけが到着することが望ましい⁵⁾。

データクリーニングといえは、これまでは不要な

☆7) <http://research.google.com/archive/mapreduce.html>

データを除去し、必要なデータのみを抽出して、データ全体のサイズダウンを図ることが主目的であった。しかし、次世代 CPS では複数のデータリソースを用いた多パラメータによる解析や、従来にない新たな目的を想定した解析を行う必要が生じる可能性がある。したがって、従来は不要とされていたデータが必要になるケースが生じる可能性もあり、一概に今現在不要とされるデータを破棄してよいという時代ではなくなった。さらには、データ検索性を高めるためのタグ付けやクリーニングの技術が重要になっていく。特にタグ付けについては、データは単調増加する一方であるため、人手によるタグ付けには限界がある。タグ付けやデータクラスタリングを自動的に行うことは不可欠であろう。

スマートシティからデザインアクティビズム、新しい社会形態へ

多くの社会問題を解決するためには技術の発展だけでなく、多くの人々が問題解決に貢献するように促す必要がある。本稿で解説した行動ナビゲーションを可能とするインフラストラクチャはデザインアクティビズム⁴⁾を実現するためのドライビングフォースとしての役割を果たすと考えられる。CPSのためのOSは、そのためのサービスの構築を容易にするためにキーとなる実世界の抽象化を提供する必要がある⁸⁾。

実世界リソースの情報を取得するための手法として、クラウドソーシングを利用することも考えられる⁷⁾。クラウドソーシングは、大きな問題を多数の問題に分割し、それを個々の人間がさまざまなインセンティブを利用して実行することで問題全体を解決する手法であり、物理センサに代わりに人間を利用して実世界情報を取得することも可能である。

CPSの究極の目標は、我々の日常世界をプログラマブルにし、さまざまな今まで実現が困難であった付加価値をソフトウェアにより実現することにある。CPSのためのインフラストラクチャは実世界

を仮想化、抽象化したプログラミングインタフェースを提供することにより、実世界を拡張することで実現可能となる、今までとは異なる政治や経済の在り方を検討していく可能性も提供する。

参考文献

- 1) Alessandro, B. et al. : Enabling Things to Talk : Designing IoT solutions with the IoT Architectural Reference Model, Springer (2013).
- 2) Hafedh, C. et al. : Understanding Smart Cities : An Integrative Framework, In 45th Hawaii International Conference on System Science (HICSS), pp.2289-2297 (2012).
- 3) Sebastian, D. et al. : From Game Design Elements to Gamefulness : Defining "Gamification", In Proceedings of Academic Mindtrek Conference (2011).
- 4) Alastair, F-L : Design Activism - Beautiful Strangeness for a Sustainable World, Earthscan (2009).
- 5) 丸山 宏 : エッジ・ヘビー・データとそのアーキテクチャ ビッグデータ時代の IT アーキテクチャ, 情報管理, Vol.56, No.5, pp.269-275 (2013).
- 6) Nakajima, T. and Lehdonvirta, V. : Designing Motivation Using Persuasive Ambient Mirrors. Personal and Ubiquitous Computing, Vol.17, No. 1, pp.107-126 (2013).
- 7) Sakamoto, M. et al. : Designing Incentives for Community-based Mobile Crowdsourcing Architecture, In Proceedings of 25th International Conference on Database and Expert Systems Applications (2014).
- 8) Sakamoto, M. et al. : A Methodology for Gamifying Smart Cities : Navigating Human Behavior and Attitude, In Proceedings of the 2nd International Conference on Distributed, Ambient and Pervasive Interactions, LNCS 8530 (2014).
- 9) Sakamoto, M. et al. : The GamiMedia Model : Gamifying Content Culture, In The 6th International Conference on Cross-Cultural Design, LNCS 8528 (2014).
- 10) Satoh, I. : RFID-enabled Carbon Offsetting and Trading, Pervasive and Mobile Computing, Vol.9, No.1, pp.149-160 (2013).
- 11) Satoh, I. : A Formal Approach for Milk-Run Transport Logistics, IEICE Transactions, Vol.91-A, No.11, pp.3261-3268 (2008).

(2014年4月25日受付)

中島達夫 (正会員) tatsuo@waseda.jp

早稲田大学基幹理工学部情報理工学科教授。慶應義塾大学にて博士課程修了後、カーネギーメロン大学、北陸先端科学技術大学院大学、AT&Tケンブリッジ研究所等を経て、1999年より現職。2005年 Nokia リサーチフェロー。

坂本瑞季 mizuki@dcl.cs.waseda.ac.jp

早稲田大学情報理工学専攻博士課程2年。日本学術振興会特別研究員。ゲーミフィケーション等に関する研究に従事。2012年 Google アニタボルグ記念奨学金受賞。また、最優秀論文賞を過去に3回受賞。

秋岡明香 (正会員) akioka@meiji.ac.jp

明治大学総合数理学部ネットワークデザイン学科准教授。2004年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程単位取得退学。博士(情報科学)。2013年より現職。並列分散処理に関する研究に従事。