

サイバーフィジカルシステムの数理

田崎勇一†

† 名古屋大学 工学研究科

あらまし 本稿では近年注目を集めているサイバーフィジカルシステム (Cyber-Physical System; CPS) について紹介する。前半では近年の研究動向を俯瞰しつつ CPS の理論に求められる特性について議論する。後半では具体的なトピックとして筆者らが取り組んでいる自律移動ロボットの地図生成と多自由度ロボットの動作計画の 2 テーマを CPS の観点から紹介する。

キーワード サイバーフィジカルシステム, 自律移動ロボット, 動作計画

Towards Mathematical Foundation of Cyber-Physical Systems

Yuichi TAZAKI†

† Nagoya University, Department of Engineering

Abstract This article introduces Cyber-Physical System (CPS), which is attracting growing attention in recent years. The first half provides an overview of recent trends in CPS research and summarizes a number of key requirements on CPS theory. The second half briefly introduces two examples, map construction for autonomous mobile robots and motion planning of large-scale robotic systems, from the view point of CPS.

Key words Cyber-Physical System, Autonomous Mobile Robot, Motion Planning

1. サイバーフィジカルシステムの研究動向

サイバーフィジカルシステム (Cyber-Physical Systems, CPS) とは、複数の計算リソースがネットワークにより結ばれ、物理系と相互作用するシステムの総称であり、ここ数年の間に主に米国を中心として大きな注目を集めている研究領域である。その潜在的な応用範囲は医療機器、高度道路交通システム、環境モニタリング、アビオニクス、電力ネットワーク、分散ロボティクス等と非常に幅広い [1] [2]。

CPS はリアルタイム組み込みシステムやハイブリッドシステムなど、その前身である既存の研究領域と多くのコンセプトを共有する。このため、CPS の位置づけを明らかにするには周辺領域との差異や共通点を把握することが重要である。CPS の特徴や要求事項は様々な文献において無数に挙げられているが、その中から (筆者の興味にもとづき) 特に CPS 固有のものを抜粋すると:

- (1) 物理系 (physical element) と計算要素 (cyber element) との相互作用を意識する
- (2) 物理系の空間的な広がりやネットワークトポロジを明確に意識する
- (3) 大規模系へのスケーラビリティを有する
- (4) 構成要素や構造の非均一性 (heterogeneity)

- (5) 不確定事象を包含した全体的な予測可能性 (predictability)

(1) に関して、組み込みシステムの理論は物理系と組み込み制御系が成す閉ループの挙動を陽に考慮しないという点で CPS と異なる。(2) における「空間的」とは我々の住む物理空間の (2/3 次元的) 広がりである。例えばハイブリッドシステム理論ではシステムは抽象化された n 次元状態空間上で記述されるが、CPS ではあくまで物理空間上に広がる連続体としてプラントを意識する。制御系に対しても、複数の小さなノードが物理空間上に分布し、ネットワークを構成するという構造を陽に意識する。(3) は、CPS の応用領域がいずれも家庭規模から地域規模、地球的規模のシステムを想定していることに由来する。ただし、(4) にあるように同種の構成要素の連結のみならず機能や大きさにおいて異なる要素の混在を許すことが求められる。最後に、大規模システムには本質的に不確定で挙動予測が困難な要素が存在し得る。CPS はこのような要素を包含しつつ、全体としての予測可能性を維持することが要求される。

現在までの CPS に関する研究動向の多くは応用重視であり、CPS に特化した基礎理論の構築において目覚ましい進展は見られない。しかしながら、その中にもいくつか潜在的に有用と思われる研究成果が表れ始めている。以下ではそれらのいくつかを紹介しながら CPS の数理の有り様を模索する。

2. CPSに適したモデル表現

ハイブリッドシステム理論の延長としては、並行動作するハイブリッドオートマトンの相互結合系である並行ハイブリッドオートマトン (Concurrent Hybrid Automata; CHA) が提案されている [3]。CHA の記述性は極めて高いが、実用的な計算コストでシステム検証や制御系設計を行う方法は示されていない。

CPS を構成する個々のネットワークノードに割り当てられるリソース (使用可能電力や通信帯域) は非常に限られている場合が多い。厳しいリソース制約下で様々な要求に応えるには計算や通信のコストを最低限に抑えられる事象駆動型モデルが CPS に有効であるという立場から CPS 事象モデル (CPS Event Model) が提案されている [4] [5]。従来の事象駆動系の理論では識別子と生起時刻の対として事象が定義されるのに対し、CPS 事象モデルではユークリッド空間上の事象の生起座標と事象の観測者の情報を加えた CPS 事象が定義されている。CPS 事象モデルは今のところコンセプトの域を出ないが、従来の時相論理にもとづく解析論の拡張として事象の時間的・空間的関係性に立脚した解析論が展開すると面白い (関連としては [6] がある)。

3. CPS の設計開発に求められるシステム記述言語

CPS には非常に大規模な系への適用可能性と同時に高い信頼性が求められる。現在、大規模システム開発の効率化のためにモデルベース開発 (Model-Based Development, MBD) が提唱され、広く利用されている。モデルベース開発において利用されるモデル記述形式は多様であるが、CPS のように複数の異なる構成要素が階層的に連なるシステムを统一的に表現するには、それに適したアーキテクチャ記述言語 (Architecture Description Language, ADL) が求められる。既存のアーキテクチャ記述言語の分類・比較については、最新ではないが文献 [7] が詳しい。現時点で、CPS への応用を陽に意識した ADL は現れていない。

既存の多くのアーキテクチャ記述言語の 1 つの問題点は、統一的な書式を提供するのみで記述されたシステムのテストや形式検証の効率化に寄与しない点である。CPS が対象とする大規模システムでは、システムを実装した後にテスト・検証するという方法論自体が通用しなくなると考えられる。文献 [8] は CPS の大きな応用領域の一つである航空機開発について触れ、MBD は個々の構成要素 (コンポーネント) の開発の効率化には寄与するが、開発後期におけるシステムの統合の効率化には寄与しないという問題点を指摘している。システム統合において生じる問題の多くは、それぞれのコンポーネントの動作条件が正確に仕様化されていないことに起因する。そのため、各コンポーネントが暗に想定する動作条件への依存性およびそれが破られることで生じる不具合は個別テストでは発見されにくく、システム統合時に初めて露見するケースが少なくない。この状況を改善するには、コンポーネントの実装を開始する前に、動作条件や他のコンポーネントとやりとりされる情報 (=インタフェー

ス) の仕様を漏らさず仕様化しなければならない ([9])。これに必要なものは、アーキテクチャのみならずコンポーネント間のインタフェースをも機械的検査可能 (machine-checkable) な書式で記述できるシステム記述言語であると言える。

4. CPSにおけるヒューマンファクター

CPS は、その内部に人間を含む Human-in-the-Loop システムと言える。システムの中における人間の役割は、アプリケーションごとに多様であり、かつ多層的である。例えば健康状態モニタリングシステムにおいて人間は各種生体信号の信号源 (プラント) であると同時にモニタリング情報の利用者 (ユーザ) でもある。一方自動車交通システムにおいて人間は自動車の運転を行うコントローラでありながら車車間ネットワークの利用者であり、同時に運転支援システムから見ればプラントである。このように、現行の制御理論の基本的な立場であるプラント/コントローラの二元論で CPS を捉えることは本質的に困難であり、むしろ人間を含む構成要素間の関係性にもとづいて捉える方が即していると言える。関係性のユニークな例として、害意あるユーザからの攻撃に対してシステム性能を維持するという観点から Secure Control のコンセプトが提案されている [10]。

5. 自律走行車両システムの衝突安全性を考慮した地図情報生成

屋外環境の探査・モニタリングや情報化交通システムの実現は CPS の主要なターゲットの 1 つである。これに関連し、本節では筆者らの取り組んでいる自律走行車のための地図情報生成手法 [11] について述べる。

従来の自律走行車や自律移動ロボットの走行制御では、以下の手順で作業環境上における移動を実現する:

- (1) ロードマップ地図を用いて大まかな経路計画を行う
- (2) 車両ダイナミクスを考慮した精緻な軌道計画を行う
- (3) 軌道追従制御を行う

この手続きにおいて、手順 1 では領域間の連結性などのトポロジカルな情報のみを用いて計画を行うのが普通である。このため、手順 1 で採用した経路が手順 2 において車両ダイナミクスのもとで実現不能と判明するということが起こり得る (例えばカーブが急すぎて曲がりきれないなど)。加えて手順 2 と 3 は車両の時々刻々の状態変化を反映してオンライン更新を行う必要があるため、複雑な車両ダイナミクスのもとで衝突安全性などを考慮した軌道を計算するコストは非常に大きい。そこで本研究では手順 1 においてトポロジ情報のみならず車両ダイナミクスを反映した移動可能性情報を含む地図を用いて経路計画を行うことを提案する。これによりオンライン軌道計画のコストが大幅に削減されるのみならず、衝突安全な軌道計画自体もグラフ探索手法を用いて容易に行うことができるようになる。

簡単のために全方向に指定した加速度で運動可能な車両モデルを考え、車両の状態を $x = [p_x, p_y, v_x, v_y]^T$ とおく。各成分は左から、作業空間上の位置の x, y 座標、移動速度の x, y 座標である。始点状態と終点状態が与えられたとき、車両は一定の

移動時間をかけて等加速度で2点間を移動するものとする。このように仮定すると、与えられた始点と終点を結ぶ軌道は一意に定まる。次に移動の安全性を以下のように表す。

$$[p_x(t), p_y(t)]^T \in C^{free}$$

ここで C^{free} は作業空間上で障害物の無い領域を表す。したがって上の条件は車両が障害物に衝突しないことを表している。移動中の任意の時刻において上記条件が満たされるとき、始点 x_s と終点 x_f の対は実行可能 (feasible) であると言い、 $(x_s, x_f) \in \mathcal{F}$ と書く。

次に有向グラフ $G = \langle \mathcal{N}, \mathcal{E} \rangle$ を考える。ここで \mathcal{N} はノード集合、 \mathcal{E} は有向エッジ集合である。ノード $n_1 \in \mathcal{N}$ から $n_2 \in \mathcal{N}$ へエッジが伸びるとき $(n_1, n_2) \in \mathcal{E}$ と書く。さらに、各ノードには車両の状態空間の部分集合が割り当てられており、これを \mathcal{X}_n と書く。さて、ノード間の連結性と、車両が描く軌道の衝突安全性は以下のようにして関連付けられる：

$$(n_1, n_2) \in \mathcal{E} \Leftrightarrow (x_1, x_2) \in \mathcal{F} \quad \forall x_1 \in \mathcal{X}_{n_1}, x_2 \in \mathcal{X}_{n_2}. \tag{1}$$

つまり、有効エッジでつながる2つのノードに関し、そのノードに付随する部分集合から任意に選択した状態の対は安全に移動可能である。このような性質を持つ有向グラフ上で経路計画を行えば、車両ダイナミクスのもとでの安全性が保証された軌道を直接得ることができる。

このような性質を持つ有向グラフをいかにして構築するかが問題であるが、以下では各ノードの位置は所与としつつ、速度空間を格子状に分割し、上述の条件が概ね満足されるまで分割の粒度を細かくしていく方法について述べる。初めに、与えられた作業空間に N 個の経路点を配置する。この作業は設計者が行うこととする。また、車両が取り得る速度の範囲を \mathcal{V} とする。すると、最初グラフのノード集合は $\mathcal{N} = \{n_1, n_2, \dots, n_N\}$ であり、 i 番目のノードに付随する状態領域は $\mathcal{X}_{n_i} = \{p_i\} \times \mathcal{V}$ となる。有効エッジ集合を定義するにはすべてのノードの組 $n_i \in \mathcal{N}, n_j \in \mathcal{N}$ について以下の3通りの内いずれかが成立するか判定する：

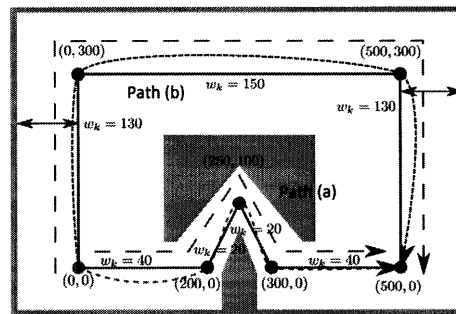
$$(x_i, x_j) \in \mathcal{F} \quad \forall x_i \in \mathcal{X}_{n_i}, x_j \in \mathcal{X}_{n_j} \tag{2a}$$

$$(x_i, x_j) \notin \mathcal{F} \quad \forall x_i \in \mathcal{X}_{n_i}, x_j \in \mathcal{X}_{n_j} \tag{2b}$$

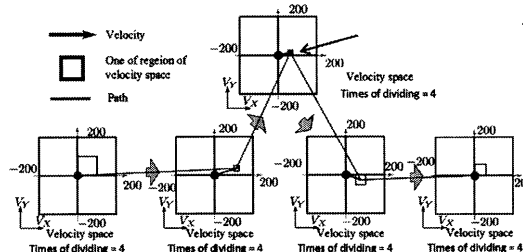
$$\text{otherwise} \tag{2c}$$

式 (2a) の場合は条件 (1) が満たされているのでノード間を有向エッジで結ぶ。逆に、式 (2b) の場合はすべての状態対が実行可能集合 \mathcal{F} に含まれないので有向エッジで結ばない。一方で式 (2c) の場合は、 \mathcal{F} に含まれる状態対と含まれない状態対が混在することを示す。この場合は、速度領域の分割粒度を高めた上で再評価を行う。

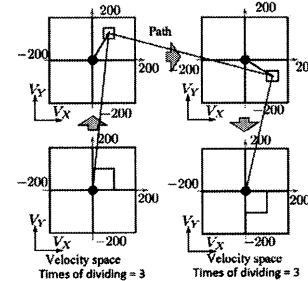
以下に数値例を示す。図1(a)に示すような作業領域において点 (0,0) から点 (500,0) へ移動することを考える。このとき、近道だが道幅の狭い経路 a と遠回りだが道幅の広い経路 b がある。図中の小さな丸で示す位置に計7個のノードを配置し、各



(a) 作業領域と計画された軌道



(b) 速度格子の分割 (path(a))



(c) 速度格子の分割 (path(b))

図1 計算結果

ノードの持つ速度格子に対して上述の方法で分割を施した。その結果を経路毎に図1(b),(c)に示す(煩雑となるため格子は図示されていない)。経路 b 上の速度格子は分割回数が3であるのに対して経路 a 上の格子は分割回数が4となっている。これは、車両の慣性を考慮して経路 a を安全に走行するにはより細かな速度の選択が必要であるという事実を反映した結果である。

今後の発展としてはこのような衝突安全性を保証する地図情報の複数の車両間での共有や、車両同士の衝突回避を考慮したルート情報を埋め込みが考えられる。

6. 多自由度ロボットシステムにおける多目的動作計画

ヒューマノイドロボットに代表される多自由度ロボットは、単体では空間的スケールこそ小さいものの、構成自由度は数百にのぼる。また、同時並行的に複数の異なる優先度のタスクの実行を求められる点などにおいて CPS と共通する要求事項は多い。以下では動作計画を複数のコストの辞書式最小化問題と捉え、反復アルゴリズムにより解を求める方法 [12] について述べる。

一般に動作計画問題とは、所定の条件を満たすロボットや作業空間を構成する剛体の時間軌道を求める問題であると言える。ここで軌道が満たすべき条件は以下のようにまとめられる：

機構学的条件 関節連結部における剛体の位置・速度の一致、関節可動範囲の制約

物理的条件 ニュートンの運動法則が成り立つ

タスク実行条件

タスク実行条件は様々なものが考えられるが、簡単な例としてロボットのハンドで目標物体にリーチングするというタスクは、所定の時刻においてハンド剛体と目標物体の位置が一致するという拘束条件で表現できる。詳細は割愛するが、これらはすべて剛体軌道を決定するパラメータに対する（非線形）等式制約条件として記述できる。

多自由度ロボットの動作計画は複数のタスク要件が同時に課される多目的最適化問題である。ロボティクス分野ではタスク毎に異なる優先順位割り当てる方式がよく用いられている [13]。これは Operations Research 分野で古くから議論されている Goal Programming の中で辞書式最小化 (lexicographic minimisation) と呼ばれるものと本質的に同じものである [14]。

以下では部分空間への射影にもとづく辞書式最小化について述べる。決定変数を $z \in \mathbb{R}^n$ 優先順位を 0 から L の $L+1$ 段階とし、0 を最高優先度とする。優先度 $l \in \{0, 1, \dots, L\}$ の拘束誤差関数を $c_l(z)$ 、そのヤコビ行列を $J_l = \partial c_l / \partial z$ とおく。優先度 l の拘束条件によって要求される変数変化量は以下で与えられる。

$$\delta z_l = \arg \min_{\delta z} \|\delta z\|^2 \text{ sub.to } J_l \delta z = -\mu c_l(z), \quad (3)$$

もしこの通りに z を変化させると、優先度 l の拘束誤差は $J_l \delta z = -\mu c_l(z)$ より指数関数的に減少するが、その結果、より優先度の高い拘束の誤差が増大する恐れがある。これを避けるため、 δz_l をより上位の優先度レベル $0, 1, \dots, l-1$ の拘束部分空間に射影する。射影後の変数変化量は以下で与えられる。

$$\delta z_l^p = \arg \min_{\delta z} \|\delta z - \delta z_l\|^2 \text{ sub.to } \begin{bmatrix} J_0 \\ \vdots \\ J_{l-1} \end{bmatrix} \delta z = 0. \quad (4)$$

すると最終的な変数変化は

$$\delta z = \delta z_0 + \sum_{l=1}^L \delta z_l^p, \quad (5)$$

となる。この手続きによる z の更新を収束するまで繰り返すことで辞書式最小化解に到達する。

以下ではヒューマノイドロボットの複数の目標物体に対するリーチングタスクの例を示す。個々の目標物体は所定の位置から等速運動することとし、これらの軌道は既知とする。ロボットは 12 個の剛体と 12 個の関節から成る。ただし下半身は固定されており、動作計画の対象ではない。動作計画のタイムラインは 6 秒間である。図 2 に計画軌道を可視化したものを示す。リーチング時刻においてハンドと物体との距離がほぼ 0 となっていることが確認できる。

謝辞 本稿を寄稿する機会を与えて頂いた平石邦彦先生にこの場を借りて厚くお礼申し上げる。

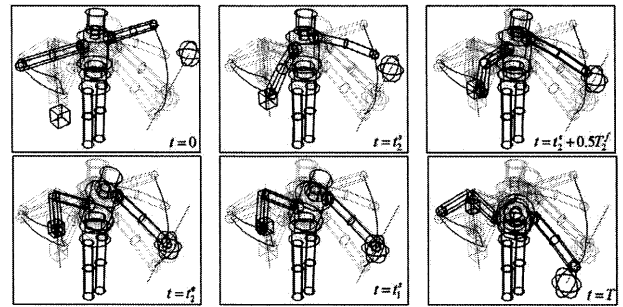


図 2 ヒューマノイドロボットの目標物体へのリーチング動作

文 献

- [1] E. A. Lee; Cyber Physical Systems: Design Challenges, 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), pp.363-369, 2008.
- [2] T. A. Henzinger, J. Sifakis; The Embedded Systems Design Challenge, Formal Methods, Vol.4085 in LNCS, pp.1-15, Springer, 2006.
- [3] M. W. Hofbaur; A Causal Analysis Method for Concurrent Hybrid Automata, Proceedings of the 21st National Conference on Artificial Intelligence, Vol.1, 2006.
- [4] Y. Tan, M. C. Vuran, S. Goddard; Spatio-Temporal Event Model for Cyber-Physical Systems, 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, pp.44-50, 2009.
- [5] Y. Tan, M. C. Vuran, S. Goddard; A Concept Lattice-Based Event Model for Cyber-Physical Systems, Proceedings of the 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, pp.50-69, 2010.
- [6] J. Reif, A. P. Sistla; A Multiprocess Network Logic with Temporal and Spatial Modalities, Journal of Computer and System Sciences, Vol.30, Issue 1, pp.41-53, 1985.
- [7] N. Medvidovic, R. N. Taylor; A Classification and Comparison Framework for Software Architecture Description Languages, IEEE Transactions on Software Engineering, Vol.26, No.1, pp.70-93, 2000.
- [8] D. Redman, D. Ward, J. Chilenski, G. Pollari; Virtual Integration for Improved System Design, 1st Analytic Virtual Integration of Cyber-Physical Systems Workshop (AVICPS2010), pp.57-64, 2010.
- [9] L. Sha, J. Meseguer; Analytical System Composition, 1st Analytic Virtual Integration of Cyber-Physical Systems Workshop (AVICPS2010), pp.17-22, 2010.
- [10] A. A. Cardenas, S. Amin and S. Sastry; Secure Control: Towards Survivable Cyber-Physical Systems, 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, pp.495-500, Beigin, China, June 17-20, 2008.
- [11] 項警宇, 田崎勇一, 鈴木達也; 速度情報を組み込んだロードマップの提案, 第 54 回自動制御連合講演会, 豊橋, 11 月 19-20 日, 2011.
- [12] S. Suzuki, Y. Tazaki; Simultaneous Optimization of Timing and Trajectory in Sequential and Parallel Tasks of Humanoid Robots, Proceedings of 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Bled, Slovenia, October 26-28, 2011.
- [13] L. Sentis and O. Khatib; A Whole-Body Control Framework for Humanoids Operating in Human Environments, Proceedings of the IEEE International Conference in Robotics and Automation, Orlando, USA, May, 2006.
- [14] M. Tamiz, D. Jones, C. Romero; Goal Programming for Decision Making: An Overview of the Current State-of-the-Art, European Journal of Operational Research, Vol.111, Issue 3, pp.569-581, 1998.