

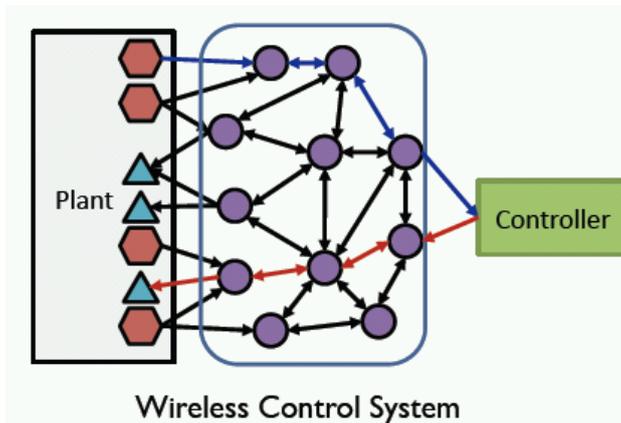
CPS Week 2011 参加報告

鹿島 久嗣（東京大学）

2011.5.18

以下では、平成 23 年 4 月 11 日から 4 日間にわたって開催された CPS Week 2011 について、主にセンサーネットワークを対象としたデータ分析技術と CPS の関わりに主眼をおいた動向をまとめる。

CPS Week とは今回で 4 回目を迎えるサイバーフィジカルシステム（以下 CPS）に関連する国際学術会議の共同開催イベントである。CPS Week 2011 は、CPS を実現するうえで不可欠となる 4 つの要素技術分野である、ハイブリッドシステム制御（HSCC）、無線センサーネットワーク（IPSN）、組み込みシステム（LCES）、リアルタイムシステム（RTAS）それぞれに関する会議と、その共通課題である CPS を名に冠する会議の計 5 つの会議から構成されている。CPS は物理世界との相互作用を行うシステムであるために、実世界から情報を引き出す「センシング」と、逆に実世界に対する働きかけを行う「制御」がその重要な位置を占める。特に、CPS がグランドチャレンジとする制御対象は、電力網、交通システムなど、これまでの制御工学において想定されてきた対象よりも広域であるため、センサー群、アクチュエーター群ともに分散し、無線接続されたネットワーク上にあることが想定されることが多い（下図参照）。これは、従来の有線接続の場合と比較すると、設置

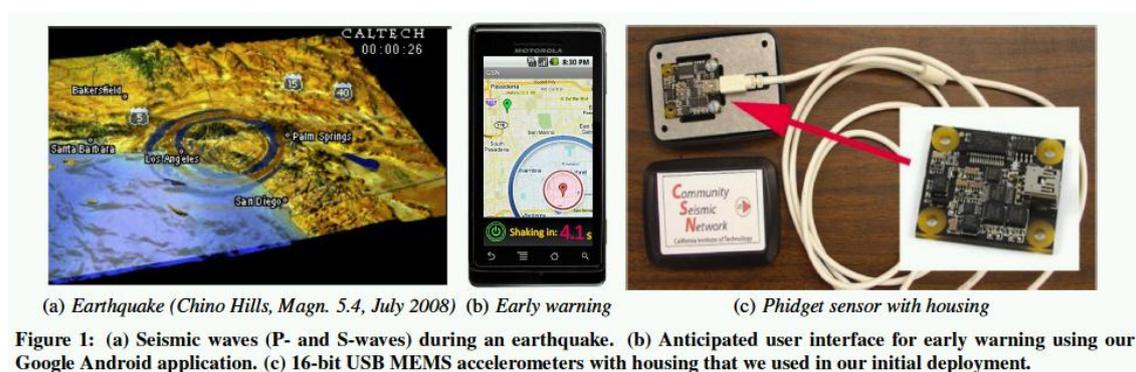


（ペンシルバニア大 Papas 教授による基調講演資料より抜粋：物理的に分散した制御対象を、無線によってネットワーク化されたセンサーとアクチュエーターによって制御する）

やメンテナンスのコスト低減や、応用範囲の広がりといった利点がある半面、通信の遅延など数々の解決すべき課題が新たに生ずる。お互いに無線で接続されたセンサー群における各々のセンサーが有する資源は限定されているため、通信や情報処理にかけることのできるコストは大幅に制限され、高い省電力性が要求される。そのためデータ解析の逐次化や分散化が重要な要素となる。また、制御の対象となる物理システムは従来主に対象としてきた連続的な力学系だけではなく、より複雑な突然の非連続的变化を孕む、いわゆるハ

イブリッドシステムであるため、その制御は極めて困難となる。さらに、CPS は予め予測することのできない外界という不確定要素を取り込んだ「開いたシステム」であるため、そのリアルタイム性や健全性、安全性がきわめて重要なファクターとなる。セキュリティやプライバシーの問題は勿論のことながら、システムがそもそも「正しく」動作することの検証も非常に困難である。このように、CPS の課題は極めて分野横断的な側面をもつため、米国を中心とした CPS Week のような分野横断的な議論が盛んに行われている。

先の大震災で、我が国は近年経験したことがないほどの甚大な被害を被ったが、CPS の応用が最も期待される分野の一つが災害対策であろう。大地震などの稀な事象はその予測も難しいため、その発生の初期段階でいかに迅速にこれを捉え、早期警告を行うかが重要になる。カリフォルニア工科大のグループは、スマートフォンなどの個人がもつデバイスに搭載された加速度センサーから収集したデータをもとに地震発生を検出する試みを報告している [1]。例えば 100 万台のセンサーからのデータを一旦統合してから分析したのでは、莫大な通信コストや計算コストがかかってしまうため、検出までの時間がかかり過ぎてしまう。あるいは、通信網そのものが被害を被っているかもしれない。そのためデータを一箇所に収集することなく、各々のセンサー（スマートフォン）のレベルで個々に異常検知アルゴリズムを用いた検出結果のみを通信し、中央で総合的判断を行うことで、通信コスト、計算コストを抑えることに成功している。



(論文[1]中より抜粋： 様々なデバイスに組み込まれた加速度計を用いて、地震の発生を早期検出する)

さて、センサーデータからの実世界イベント検知と位置推定は CPS における基本的な要素技術であり、その高精度化は CPS の提供するサービスの質に大きな影響を与える。実環境では雑音や障害物の存在による隠蔽や反射、干渉などの様々な要因によって位置推定は困難となるため、その推定法は依然精力的に研究が行われているテーマである。標準的な位置推定のアプローチとして、自己の位置を知りたいセンサーが、位置が分かっているいくつかの参照ノードからの信号をもとに、そこからの距離を推定して自己の位置を算出する方法が知られているが、オックスフォード大の研究グループは、位置の分かっている信号が直接届く場合と、障害物等で反射して届く（見かけ上の距離が増大してしまう）場合をうまく判別すると推定精度が向上する（下図参照）ことに着目し、これを最適化問題と

して定式化して解くアプローチを提案している [2]。彼らはこの問題を、使用済み核燃料の保管プールに多数のセンサーを配置して監視する際のセンサー位置推定などのシナリオにおいて考察している。一方、カリフォルニア工科大の研究グループによる研究[3]では、先験的な物理モデルだけでは十分な推定精度が得られないため、データに基づく統計的な推論を行っている。彼らは、センサーネットワークを用いて、公園などの屋外環境におけるテロリスト等による放射性物質等の脅威を検出するシナリオを想定し、脅威の有無と、あるとした場合にその位置を推定する統計的手法を提案している。また、彼らは検出精度を高めるための最適なセンサー配置法も提案している。

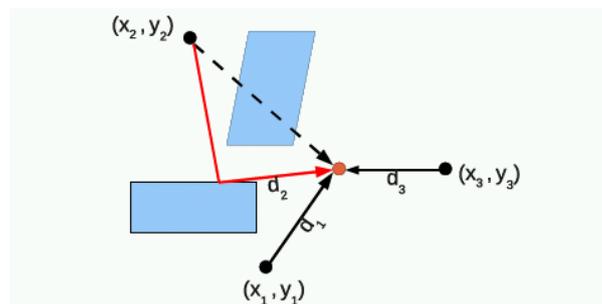
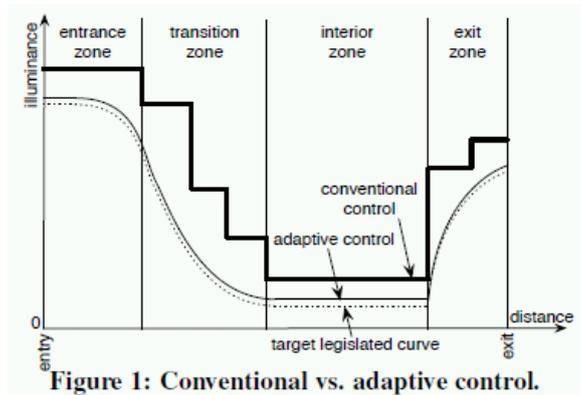


Figure 2: Non line of sight signal propagation in a cluttered environment results in an overestimated distance measurement d_2

(論文[2]中より抜粋：信号が直接届く場合と、障害物等で反射して届く場合では算出される距離が大きく異なる)

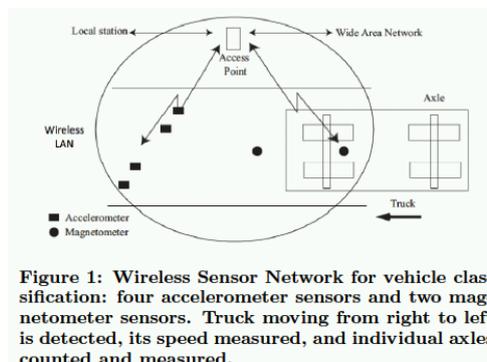
一方で、環境に配慮した交通システムの実現に向けて、CPS の考え方は大きな期待を寄せられている。イリノイ大と IBM の研究者のグループによって発表された研究 [4]では、道路の各区間における燃料消費を、信号の数や明るさなどの道路状況から予測するモデルをデータから統計的に推定する試みを報告している。予測モデルは車種、生産年などの組み合わせによって異なるため、これらを効率的に階層的に管理する方法を提案している。本研究のチームにはデータマイニングの有力な研究者も参加しており、このような高度データ解析技術の CPS への展開は今後増えて行くものと思われる。

今回の CPS Week に限らず、現在までのところ CPS 研究の多くは、シミュレーションや比較的小さな実験環境を用いたフィージビリティ・スタディによるものが多く、実環境に近い形でこれを実現したものは少ない。イタリアのトレント大、SIEMENS 社などの共同研究グループは、輝度センサーを無線で連携したセンサーネットワークによって取得したデータをもとに、トンネルの調光を適応的に行うことで、外界との光量の急激な変化を減らし安全性を高めるとともに、電力消費を減らす試みを報告している [5]。彼らは実際の 260m のトンネルに 40 個のセンサーを配置し 16 個の照明を制御する試みを行った。この規模で実環境においてセンシングと制御を統合した閉ループ系を実現している例はまだ稀であり、この点が大きく評価され、本論文は IPSN における今年度の最優秀論文（アプリケーション）部門を獲得している。



(論文[5] 中より抜粋:トンネル内光量は外部の明るさ等に応じて、場所ごとに適切に調整される)

道路の交通量の計測は、道路の利用状況に応じた各種サービスの提供や、メンテナンススケジュール策定、道路上へのリソース配置などを行ううえで重要な情報となる。とくに、道路を走る車の種類（一般車両、バス、各種トラック）を判別することによって、より細かな対応が可能になる。米国シンセシス・ネットワーク社の研究グループによる研究 [6] では、これを比較的安価に簡単に設置できる加速度計や磁気計を用いた無線センサーネットワークによって実現することを提案している。彼らは実際にカリフォルニア州の高速道路において車両タイプの識別を行った結果 9~10 割の精度が得られたと報告している。

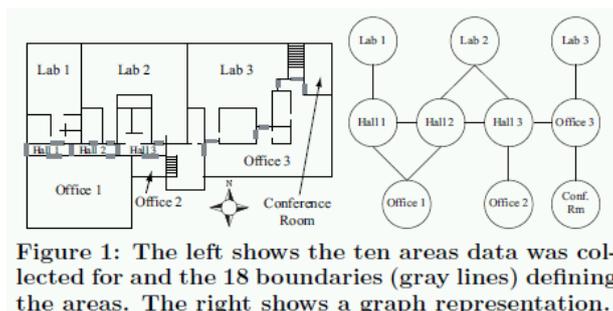


(論文[6]中より抜粋: 道路に埋め込まれた加速度センサーや磁気センサーによって車の種類を判別する)

ビル・橋などの構造物のリアルタイム監視および管理は CPS の貢献が期待される分野のひとつである。監視システムを無線ネットワーク化することによって、ケーブル設置作業などの設置、メンテナンスコストが削減され、大規模な管理を可能にする。フィンランドアールト大の研究グループは、構造物の不具合を、各所に設置された加速度センサーネットワークによってモニタリングし、早期に発見する試みを報告している [7]。集中管理された監視システムでは、生データの通信などにかかるエネルギー消費は大きく、これを抑えるため、通信容量を抑え局所的な分散計算のみで検出が行えることが理想であり、彼ら

は、低コストで周波数成分抽出が行える Goertzel アルゴリズムに基づきセンサー間の局所的なやりとりのみで問題箇所を検出できる方法によって、50%の消費電力削減に成功したと報告している。

また、現在オフィスビル等の建物における暖房、換気および空調管理システム（HVAC）は電力消費の多くを占めており、そのリアルタイムで適切な制御もまた重要な課題である。適切な冷暖房等の強さは、部屋に滞在する人数に大きく左右されるため、部屋の中に人が何人いるかを自動的に検知することが必要となる。CO₂ センサー等では満足のいくリアルタイム性を得ることは難しいため、カリフォルニア大の研究グループは、省電力カメラのネットワークを用いてこれを実現する試みを報告している [8]。彼らは、各部屋の滞在人数の統計的検出モデルに加えて、部屋間の人間の移動を明示的に確率モデル化することによって、検出精度の向上を行っている。彼らは、実際の 10 区画からなる建物の区画（下図参照）においてこれを適用し、ASHRAE と呼ばれる米国の空調基準を満たしながらも 50%以下の電力消費の実現に成功したと報告している。



(論文[8]中より抜粋：各部屋における滞在人数の検出モデルに加え、部屋間の移動を明示的にモデル化することで検出精度を上げている)

ヘルスケアもまた CPS の貢献が大きく期待される分野である。高齢化が進む我が国において、怪我や病気の治療はもちろんのこと、予防という観点からもセンサーネットワークを用いたヘルスケア支援が有望である。特に近年では、身体センサネットワーク（BSN）と呼ばれる、身体にとりつけられた、角度や加速度など計測する複数のセンサーから継続的にデータを収集するプラットフォームから得られたデータを分析（動作認識など）することなどによって、さまざまなヘルスケア用途での利用が期待されている。そこでは、センサーのもつリソースは限定されているため、センシング、処理、通信によるバッテリー消費をいかに減らすかが重要となってくる。テキサス大の研究グループは、実際に興味のあるイベントが起こる頻度は小さいという事実に着目し、不要な情報は早期に検出し処理の手間を削減することによる省電力化のアプローチを提案している [9]。各動作のテンプレートと、データのマッチングによって動作を検出する方式を採用し、省電力だが粗いマッチングから、より詳細なマッチングへと段階的にフィルタリングしていくことで、電力

消費を半分以下に削減することに成功したと報告している。本研究における、最適なフィルタリングの順序を決定する方法についての論文[10]は、CPS Week 2011 の会議の一つである RTAS において、最優秀論文賞を獲得している。

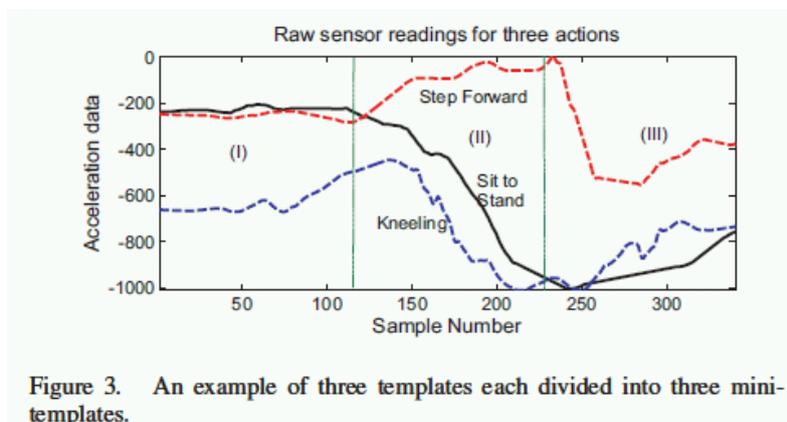


Figure 3. An example of three templates each divided into three mini-templates.

(論文[9]中より抜粋、行動に伴う加速度データのマッチングを行うために、系列全体ではなく、部分的に粗いマッチング(例えば(I)の領域のみ)を段階的に行うことで効率化・省電力化を図る)

以上、CPS Week 2011 について、主にセンサーネットワークを対象としたデータ分析技術と CPS の関わりに主眼をおいた技術動向をまとめた。全体として、CPS の研究自体が未だ黎明期であり、現在のところはまだ各要素技術分野の研究者たちが課題の洗い出しや技術の持ち寄り、適用可能性を検証している段階であるといえる。CPS としての本当の統合はこれからの課題であると思われる。

謝辞：

本会議への参加は、文部科学省の専門家派遣プログラムによるものであり、この文書は、その報告書の一部抜粋です。文書中で引用した図表の著作権は、引用論文の著者もしくは出版社に帰属します。

- [1] Faulkner, M., Olson, M., Chandy, R., Krause, J., Chandy, K. & Krause, A.: The Next Big One: Detecting Earthquakes and other Rare Events from Community-based Sensors, In IPSN, 2011.
- [2] Nawaz, S. & Trigoni, N. Convex Programming Based Robust Localization in NLOS Prone Cluttered Environments, In IPSN, 2011.
- [3] Liu, A., Bunn, J. & Chandy, M.: Sensor Networks for the Detection and Tracking of Radiation and Other Threats in Cities, In IPSN, 2011.
- [4] Ahmadi, H., Abdelzaher, T., Han, J., Pham, N. & Ganti, R.K.: The Sparse Regression Cube: A Reliable Modeling Technique for Open Cyber-physical Systems, In ICCPS, 2011.
- [5] Ceriotti, M., Corra, M., D'Orazio, L., Doriguzzi, R., Facchin, D., Guna, S., Jesi, G.P., Murphy, A.L., Cigno, R.L., Mottola, L., Pescalli, M., Picco, G.P., Pregolato, D. & Torghelle, C. Is There

Light at the Ends of the Tunnel? Wireless Sensor Networks for Adaptive Lighting in Road Tunnels

[6] Bajwa, R., Rajagopal, R., Varaiya, P. & Kavalier, R.: In-Pavement Wireless Sensor Network for Vehicle Classification, In IPSN, 2011.

[7] Bocca, M., Toivola, J., Eriksson, L.M., Hollmen, J. & Koivo, H.: Structural Health Monitoring in Wireless Sensor Networks by the Embedded Goertzel Algorithm, In ICCPS, 2011.

[8] Erickson, V., Carreira-Perpinan, M.A. & Cerpa, A.E.: OBSERVE: Occupancy-Based System for Efficient Reduction of HVAC Energy, In IPSN, 2011.

[9] Ghasemzadeh, H. & Jafari, R.: An Ultra Low Power Granular Decision Making using Cross Correlation: Minimizing Signal Segments for Template Matching, In ICCPS, 2011.

[10] Ghasemzadeh, H. & Jafari, R.: Ultra Low Power Granular Decision Making Using Cross Correlation: Optimizing Bit Resolution for Template Matching, In RTAS, 2011.