

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560464

研究課題名（和文）サイバーフィジカルシステムにおける環境適応型制御タスク管理機構の開発

研究課題名（英文）Adaptive Management Systems for Control Tasks in Cyber-physical Systems

研究代表者

潮 俊光 (TOSHIMITSU USHIO)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：30184998

研究成果の概要（和文）：サイバーフィジカルシステムにおいて、現在の環境のもとで最適となる制御タスクの管理方法を提案した。弾性タスクモデルを用いて、低消費エネルギー化とタスクの制御性能の向上とのトレードオフを最適化問題として定式化し、その最適解を求めるアルゴリズムを求めた。また、制御性能の劣化をできる限り抑えつつ、過負荷状態を回避する手法として、マルチバージョンタスクモデル用いた手法とジョブスキッピングによる方法とを提案した。最後に、複数のエージェントが協調して作業をするときに、システム全体の性能が最適となるエージェントの位置の探索タスクの構成方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：We proposed management methods of control tasks which are adaptive to the current environment optimally in cyber-physical systems. Using an elastic task model, we formulated a trade-off between the energy reduction in real-time computing systems and the improvement of control performances as an optimization problem. Then, we obtained an algorithm for computing its optimal solution. Next, we proposed two methods to avoid overload situations using a multi-version task model and job skipping. Finally, we designed a control task to search an optimal position on-line in a multi-agent system where each agent works cooperatively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：システム理論，サイバーフィジカルシステム，

1. 研究開始当初の背景

アメリカでは、2007年8月に公表された大統領府科学技術諮問委員会(PCAST)の答申書「Leadership Under Challenger: Information Technology R & D in a Competitive World」の4章において、サイバーフィジカルシステム（以下CPSと略記する。）の重

要性を指摘された。これを受けて、2008年4月にCyber-Physical System Week (CPSWEEK)を設定し、計算機関係、センサネットワーク関係、システム制御関係の3つの国際会議を同時開催した。その後、CPSWEEKは毎年開催されており、2012年には5つの会議が同時開催している。CPS研究の目的は、制御対象

となる物理システムと制御器（制御アルゴリズム）が実装される情報システムとの間の相互干渉を解析し、より効率的な組込み制御システムを構築することにある。CPS研究は、システム制御理論（特にハイブリッド制御、協調制御、及び離散事象システム理論）と計算機科学（特にリアルタイムシステム理論やシステム検証理論）とを融合し、ポスト組込み制御システム技術でのパラダイムシフトが期待される研究分野である。

2. 研究の目的

本研究では、CPSの制御器を実装したリアルタイム計算機システムにおけるタスク管理手法、消費電力を考慮したリソースの動的最適配分法、及び、複数のエージェントの協調的動作の制御手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 過負荷状態を回避するために用いられる方法の一つに弾性タスクモデルを用いる方法がある。この手法を拡張し、消費エネルギーとシステムの実行性能のトレードオフを最適化問題として定式化し、その最適解を求めるアルゴリズムを求めた。

(2) マルチバージョンタスクモデルに対する最適なバージョン決定問題を前向き動的計画法を用いて解くアルゴリズムを求めた。

(3) 複数の制御タスクを処理するリアルタイム計算機システムでは、タスク周期を変更せずに過負荷状態を回避することが望ましい。そのためのアプローチとして、ジョブスキッピングを用いた。プラントの安定性を維持したまま、制御性能の劣化を最小に抑えるジョブの受理・拒否決定法を提案した。

(4) 複数のエージェントが協調して作業をするときに、システム全体の性能が最適となるエージェントの位置の探索タスクの構成方法を提案した。

4. 研究成果

(1) 消費エネルギーを考慮したタスク管理アルゴリズム

Dynamic voltage scaling (DVS) 技術を用いたCPUでは、クロック周波数が大きくなる程書消費エネルギーが急激に増大する。ソフトリアルタイムシステムでは、タスク処理を削減してその性能を劣化させることで、さらにクロック周波数を低下させることが可能である。このとき、消費電力削減とタスク性能向上はトレードオフの関係にある。本研究ではMarinoniとButtazzoによって提案された弾性スケジューリングにおいて、与えられた消費電力削減の重要度に応じて、消費電力削減とタスク性能向上とのトレードオフを解消する手法を提案した。消費電力関数と弾

性タスクモデルを圧縮する力との線形加重和を目的関数として、これを最小とするクロック周波数を選択するアルゴリズムを提案した。

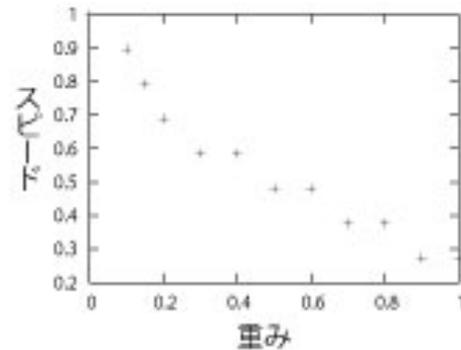


図1 重みと最適スピードとの関係

図1に重要度を表す重みと最適なクロック周波数の関係を示す。図において、スピードとは、最大クロック数に対する最適なクロック数の割合のことである。また、重みは1に近くなる程消費エネルギーの削減を重要視することになる。この図からわかるように消費エネルギーの削減が強くなる程、最適なスピード（クロック周波数）が低くなることが分かる。

(2) マルチバージョンタスクのタスク管理アルゴリズム

複数のバージョンをもつタスクからなるタスク集合を考える。各バージョンに対して実行時間とその実行性能が分かっているとき、EDFスケジューラでスケジュール可能

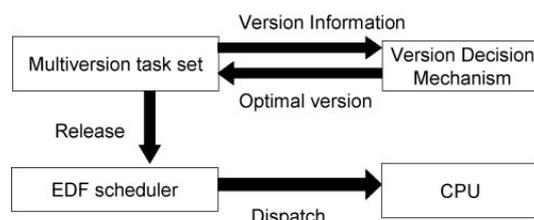


図2 最適なマルチバージョンタスク管理

となるように各タスクがリリースするジョブのバージョンを決定する方法を提案した。図2に提案するタスク管理機構を示す。各タスクはバージョンに関する情報をバージョン決定機構に伝える。バージョン決定機構はその情報を基にシステム全体としての実行結果の性能が最大となるように各タスクのバージョンを決定し、伝える。各タスクはその指定されたバージョンのジョブをリリースする。この決定機構に用いるアルゴリズムを提案した。提案アルゴリズムは動的計画法を用いるために、一般にタスク数が増加するとその計算量が指数関数的に増加する。この

計算量の削減を目的に、準最適なスケジューリングを求めるアルゴリズムも提案した。

(3) ジョブスキッピングによる過負荷回避アルゴリズム

一つのプロセッサで複数の制御タスクを処理するリアルタイム計算機システムを対象にした。システムが過負荷状態になったとき、タスク周期を変更するなどの回避策が取られるが、制御タスクの場合には、制御出力のサンプリング周期も同時に変更しなければならず、制御系の構成が複雑となる。そこで、本研究では、タスク周期を固定したまま、リリースされたジョブを適切に拒否することで過負荷を回避する方法を提案した。本研究で考えるシステムを図3に示す。

図3に示すように、本システムでは調停器を導入した。調停器は、各制御システムの安定性とスケジューラ（本研究ではEDFを対象にした）によるスケジューラビリティの保証のもとでシステム全体の評価関数が最適になるように各制御タスクがリリースするジョブに対してその受理・拒否を決定する。そのためのアルゴリズムを開発した。

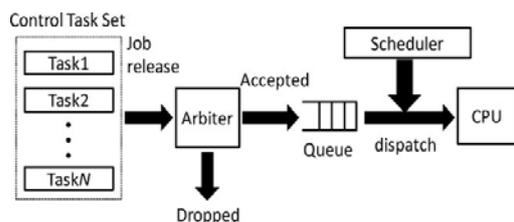
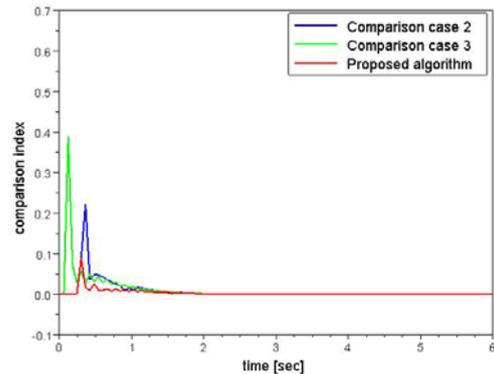
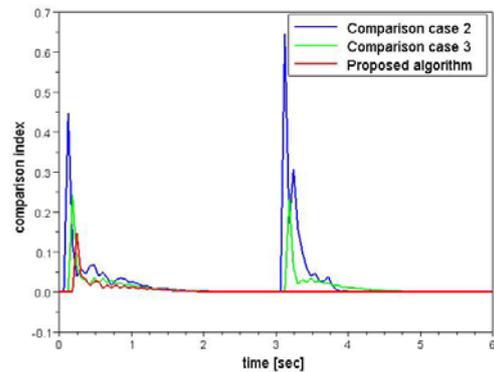


図3 調停器による過負荷システム

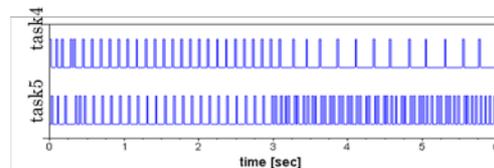
図4にシミュレーションによる本アルゴリズムと二つの従来手法との比較結果を示す。シミュレーションでは、5つの制御タスクを考え、時刻3のときに制御タスク5に外乱が入ったと仮定した。図4(a), (b)は、タスク4と5に対するプラントの理想的な振る舞いととの差を示している。図4(c)はタスク4と5の実行スケジュールである。図4(a), (b)から過渡状態において従来手法に比べて誤差が低減されていることが分かる。また、ノイズが入ったとき、図4(c)から、タスク5がリリースするジョブを優先的に受理することによって図4(b)に示すようにほとんど誤差が発生しない。また、このとき、他の制御システムでは状態が十分に収束しているために、ジョブが拒否されても、安定性にはそれほど影響を受けないことが図4(a)からわかる。以上より、提案アルゴリズムでは、その時のプラントの状態に依存して、優先的に受理するジョブを変更することでシステム全体の性能が向上することが確かめられた。



(a) タスク4の誤差の振る舞い



(b) タスク5の誤差の振る舞い



(c) タスク4と5のスケジューリング

図4 シミュレーション結果

(4) センサの分散最適配置探索タスクの設計

本研究では、図5に示すように指定された領域において複数の移動センサがある場合を考えた。図5において赤い場所ほど重要度の高いことを表す。複数の移動センサはお互いに局所的な通信を行いながら、領域全体のセンシング性能が最大になるような位置を探索し、そこに移動する。一般に領域には障害物が存在する。図6に示すように障害物の場所を反発ポテンシャルを用いて表すと、システム全体の評価を表す評価関数は、位置に関する重要度を表すポテンシャルと反発ポテンシャルの和になる。

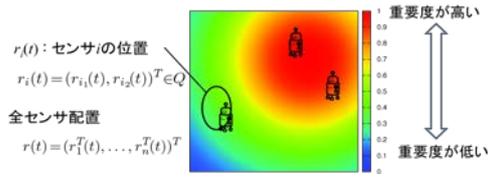


図5 移動センサと移動領域

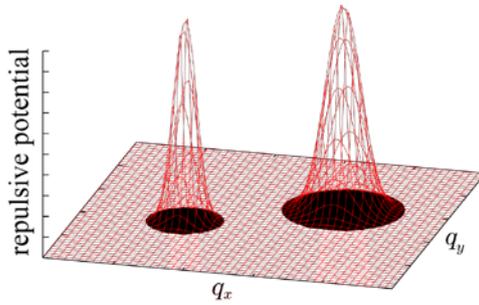


図6 障害物の表現方法

本研究では、エージェントの移動経路の決定には、この評価関数をポテンシャル関数とするポテンシャルゲームに基づく方法と最急降下法を用いる方法の二つを提案した。特に、最急降下法を用いる場合には、エージェント間で情報交換を行う通信状態とエージェントが移動する探索状態とに分けることで通信コストの削減を図った。図7にその制御タスクの構成を示す。ボロノイ更新のときのみ通信ネットワークを介して他のセンサと情報交換を行い、ボロノイ図の更新を行う。位置更新プロセスにおいて、そのボロノイ図のもとで最適な位置にセンサを移動させる。

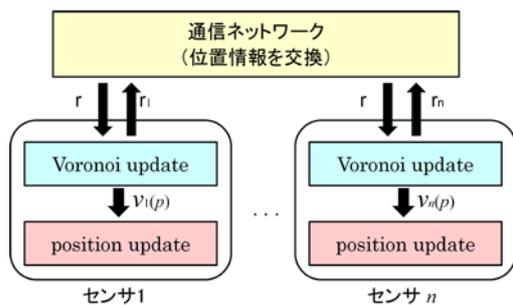


図7 時間駆動型通信による制御

図8に10台のセンサシステムにおけるセンサの移動軌跡の例を示す。黒い領域は障害物がある領域で、×印は各センサの収束位置である。障害物を回避しながら最適位置に移動していることが分かる。

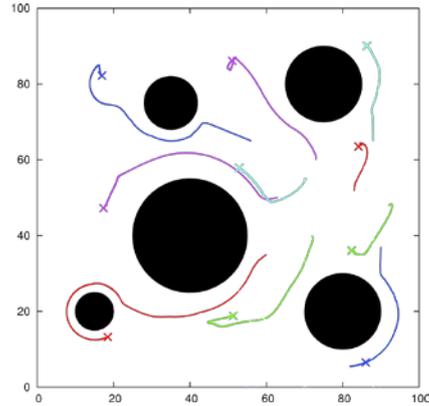


図8 収束位置までのセンサ軌道例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- (1) Saori Teraoka, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, "Potential Game Based Distributed Control for Voronoi Coverage Problems with Obstacle Avoidance," *IEICE Transactions on Fundamentals*, Vol.E95-A, No.7, 2012 (to appear).
- (2) Jun Kohjina, Toshimitsu Ushio, and Yoshiki Kinoshita, "A Coalgebraic Approach to Supervisory Control of Partially Observed Mealy Automata," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6859, pp. 253-267, 2011
- (3) Naoki Hayashi, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, "Potential Game Theoretic Approach to Power-aware Mobile Sensor Coverage Problem," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol.E94-A, no.3, pp.929-936, 2011.
- (4) Naoki Hayashi, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, "Adaptive Arbitration of Fair QoS Based Resource

- Allocation in Multi-tier Computing Systems," IEICE Transactions on Fundamentals, vol. E93-A, no. 9, pp. 1678-1683, 2010.
- (5) Sayuri Terada and Toshimitsu Ushio, "Optimal Configuration for Multiversion Real-Time Systems Using Slack Based Scheduling," IEICE Transactions on Fundamentals, vol. E93-A, No. 12, pp. 2709-2716, 2010.
- (6) 赤井 裕一, 潮 俊光, 林 直樹, "マルチティアサーバシステムにおける QoS 公平性のもとでの最適リソース配分法," システム制御情報学会論文誌, vol.23, no.3, pp.39-45, 2010.
- (7) 和田 仁志, 潮 俊光, 林 直樹, "計算遅延とオーバフロー特性を考慮した 1 次元ディジタル制御系における分岐現象," 電子情報通信学会論文誌 A, Vol.J92-A, No.11, pp.925-928, 2009.
- (8) 寺田 早百合, 潮 俊光, "消費電力とタスク性能とのトレードオフを解消する弾性スケジューリング," 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J92-A, No.10, pp.690-698, 2009.
- [学会発表] (計 29 件)
- (1) Tatsuya Yoshimoto, Toshimitsu Ushio, "Design of Modified Observer to Reduce State Estimation Error Caused by Job Skipping in Cyber-Physical Systems," Proc. ACM/IEEE Third International Conference on Cyber-Physical Systems, pp.236, 2012.
- (2) Saori Teraoka, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, "Voronoi Coverage Control with Time-Driven Communication for Mobile Sensing Networks with Obstacles," Proc. 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, pp.1980-1985, 2011.
- (3) Saori Teraoka, Toshimitsu Ushio, Takafumi Kanazawa, and Naoki Hayashi, "Application of Potential Games to Voronoi Coverage Problems with Vehicle-free Areas," Work-in-Progress Proc. of 17th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, pp.53-56, 2011.
- (4) Tatsuya Yoshimoto and Toshimitsu Ushio, "Optimal Arbitration of Control Tasks by Job Skipping in Cyber-Physical Systems," Proc. of 2nd ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, pp.55-64, 2011.
- (5) Saori Teraoka, Toshimitsu Ushio, Takafumi Kanazawa and Naoki Hayashi, "Potential Games Based Coverage Control with Voronoi Partition," Proc. 2010 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, pp.229-232, 2010.
- (6) Naoki Hayashi, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, "Application of Potential Games to Power-aware Mobile Sensor Coverage Control," Work-in-Progress Proc. of 16th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, pp.13-16, 2010.
- (7) Naoki Hayashi, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, "Adaptive Fair Resource Management with an Arbiter for Multi-tier Computing Systems," Proc. of 14th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Reference Number: 000701, 2009.

- (8) Naoki Hayashi, Toshimitsu Ushio, and Takafumi Kanazawa, "Poster Abstract: Arbitration of Adaptive Resource Allocation for Fair QoS Control in Multi-tier Computing Systems," Proc. 15th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2009.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

潮 俊光 (TOSHIMITSU USHIO)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号：30184998

(2) 研究分担者

なし.

(3) 連携研究者

なし.