

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17360198
 研究課題名（和文） 離散事象システム理論に基づく組み込み型制御系のエネルギーアウェアな監視機構設計
 研究課題名（英文） Design of Power-Aware Supervisor for Embedded Control Systems Based on Discrete Event Systems Theory
 研究代表者
 潮 俊光 (USHIO TOSHIMITSU)
 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：

組み込み型制御系において制御アプリケーションの最適実行と計算機システムでの消費電力の最適化を同時に達成するための監視機構設計のための基礎理論を構築した。制御アプリケーションの動作のモデル化を行い、離散事象システム理論に基づくスケジューラ的设计法を提案した。さらに、公平性と低消費電力化を達成するリソース配分手法を提案した。その結果、環境の変化に迅速に適応して、リソース最適配分と低消費電力化を協調的に達成することが可能となった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	8,100,000	0	8,100,000
2006年度	2,400,000	0	2,400,000
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
総計	15,400,000	1,470,000	16,870,000

研究分野：システム理論

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：監視機構，組み込みシステム，低消費電力，QoS 公平化制御，動的リソース配分

1. 研究開始当初の背景

携帯電話，家電製品から自動車，飛行機，電力プラントまで，様々な分野で組み込み型制御器が実装されている。組み込み型制御では，一つのCPU上でいくつかの制御アプリケーションがコンカレントに処理されており，デッドラインまでに各アプリケーションを確実に処理するためのスケジューラ的设计に離散事象システム理論を応用する研究が注目されつつある。一方で，最近の再構成可能プロセッサ技術の発達により，動的に回

路を再構成することで電力消費を抑えることが可能となっている。このような組み込み型制御器の高度化・複雑化に対応するために，システムティックなリソース及びタスク管理機構の開発が必要となっている。特に，近年の地球温暖化問題への対応として，低消費電力化を実現する管理機構の開発が急務となっている。

2. 研究の目的

システム全体の性能を最適化すると同時に、計算機システムでの電力消費の軽減をも考慮したエネルギーアウェアな実時間監視機構の実現を目指す。具体的な目的を以下にまとめる。

(1) 制御アプリケーションのコンカレントな動作をエージェントネットによりモデル化し、アプリケーション間の相互作用を評価する手法を開発する。組み込み型制御系におけるアプリケーションの挙動検証を効率よく行うために、エージェントモデルに基づいた新しい検証手法を開発する。

(2) 複数の組み込み型制御器のスケジューリングに離散事象システム理論を応用する。特に、ソフトリアルタイムシステムに関しては、言語測度を用いて、時間的な設計仕様の定量的な評価法を提案する。この評価のもとで最適な実時間スーパーバイザの設計法を開発する。得られたスーパーバイザを組み込み制御系の実時間監視機構に用いる。また、セキュアな組み込み型制御系の実現を目指して、離散事象システムのセキュリティを保証するようなスーパーバイザの設計法を開発する。

(3) アプリケーションの実行結果の評価をQoS (Quality of Service)として評価し、再構成可能プロセッサの消費電力の節約とQoSの最大化とのトレードオフを最適化問題として定式化し、その解消法を提案する。

3. 研究の方法

各組み込み型制御器はアプリケーションソフトウェアとして実装されていると仮定する。複数の制御アプリケーションがコンカレントに実行されるマルチタスク組み込み型制御システムを対象にする。各制御アプリケーションの実行をモデル化し、そのモデルに基づいて、リソースの動的再配分を行うリソース管理機構をシステム理論と最適化理論を用いて開発する。さらに、各アプリケーションの実行をオートマトンやペトリネットモデル化して、離散事象システム理論を応用したスケジューラ設計法を提案する。

離散事象システムのセキュリティに関する概念であるオパシティを形式言語上で定義することで、スーパーバイザ制御の枠組みにおいて、セキュリティ問題を理論的に取り扱う。

エージェントシステムのための記述言語であるマルチエージェントネットの枠組みを用いることにより、エージェントモデルに

おける検証を理論的に取り扱う。

4. 研究成果

(1) プロセッサ、メモリー、帯域幅などの複数のリソースを動的に適応させて、すべてのタスクのサービスの品質(QoS)を公平化することができるQoS公平化制御機構を提案した。提案した制御機構では、各タスクがリリースしたジョブの処理結果を観測して、そのQoS値を計算し、QoS公平化制御器に送る。QoS制御器では、すべてのタスクのQoS値の平均値を暫定の目標値とし、すべてのタスクがその目標値に近づくようにすべてのリソースを各タスクに再配分する。各タスクはその再配分されたリソースで処理できるようなジョブをリリースする。これを繰り返すことで、公平なQoS値へと収束するための十分条件を証明した。

(2) 動的再構成可能デバイスのスケジューリングを離散事象システムの状態フィードバック制御によって求めた。各タスクの挙動を時間付オートマトンでモデル化した。動的再構成可能デバイスに対しては、複数の処理ブロックからなるコンフィギュレーションを前もって複数個求めていると仮定した。それらのコンフィギュレーション間で遷移可能かどうかを上位オートマトンで、処理ブロックの稼働状況を下位オートマトンでそれぞれ表現する2階層時間なしオートマトンで動的再構成可能デバイスの状態をモデル化した。これらのオートマトンを合成し、状態フィードバックを用いてデッドラインミスが起こらないようなスケジューリングを求めた。さらに、最適なスケジューリングを求めるための基礎研究として、言語測度に基づく最適スーパーバイザの強化学習による構成法を提案した。

(3) DVS方式のCPUでは、消費電力を低くするためには、CPU周波数を小さくする必要がある。その結果、CPUの処理速度が落ちる。このことは、タスクの実行時間の増加につながり、その結果、過負荷状態になる。この過負荷状態を避けるためには、タスクの実行結果の品質(QoS)を劣化させる必要がある。消費電力とQoSとの間のトレードオフを定式化するために、弾性タスクモデルにおける力を公平性の評価指標として用いることを提案した。一般にCPU周波数は離散値をとることから、このトレードオフの解消問題を混合整数計画問題として定式化できることを示し、弾性タスクの特性を利用し

た効率的な最適解探索アルゴリズムを提案した。また、バッテリー駆動型組み込みシステムにおける残余エネルギーの各タスクの実行への割り当てをQoSの公平化の観点から決定する方法も提案した。

(4) タスク数が増えると、すべてのタスクのQoSの更新を待ってリソースの再配分をするよりも更新できたタスク間で再配分する分散管理が望ましい。マルチエージェントシステムのパフォーマンスコンセンサス問題に対する協調制御法を応用して、メモリや通信帯域などのマルチリソースのもとで、公平なQoSを達成するための動的リソース配分方法を提案した。

(5) サンプル値事象制御器設計法はハイブリッドシステムに対する組み込み制御において重要な設計法である。制御仕様が述語で与えられたとき、その制御仕様が制御不変となるための必要十分条件を導出した。次に、与えられた述語の最大制御不変述語が常に存在することを証明した。最後に、これを求めるアルゴリズムを提案し、サンプル値事象制御器を求めた。

(6) 離散事象システムのオパシティを保証するスーパーバイザの設計は、セキュアな組み込み型制御系の実現において重要である。オパシティを保証する最大許容スーパーバイザを構成するためには、システムの振舞いを表す言語の最大可制御オペイク部分言語を計算する必要がある。そこで、システムの不可制御事象に関するある仮定のもとで、最大可制御オペイク部分言語の計算公式を明らかにした。

(7) 制御アプリケーションのコンカレントな相互作用はマルチエージェントネットによりモデル化される。そして、マルチエージェントネットの可達空間を求めることにより動作解析が可能となる。しかし、マルチエージェントネットの可達性解析問題は決定不能である。そこで、マーキングの抽象化に基づくマルチエージェントネットの可達空間を求めるアルゴリズムを開発した。

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15件)

- ① Yoshiyuki Tsuchie and Toshimitsu Ushio, Sampled-Data Event Control of

Hybrid Systems for Control Specifications Given by Predicate, IEICE Trans. Fundamentals, vol. E91-A, pp. 3365-3373, 2008, 査読有

- ② Fumiko Harada, Toshimitsu Ushio, and Yukikazu Nakamoto, Adaptive Fair Resource Allocation for Energy and QoS Trade-Off Management, IEICE Trans. Fundamentals, vol. E91-A, pp. 3245-3252, 2008, 査読有
- ③ Naoki Hayashi and Toshimitsu Ushio, Performance Consensus Problem of Multi-Agent Systems with Multiple State variables, IEICE Trans. Fundamentals, vol. E91-A, pp. 2403-2410, 2008, 査読有
- ④ Shigemasa Takai, Yusuke Oka, A Formula for the Supremal Controllable and Opaque Sublanguage Arising in Supervisory Control, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol. 1, pp. 307-311, 2008, 査読有
- ⑤ Toshiyuki Miyamoto, Masaki Sakamoto, and Sadatoshi Kumagai, On Reachability Analysis of Multi Agent Nets, IEICE Transactions on Fundamentals, vol. E90-A, pp.2257-2260, 2007, 査読有
- ⑥ Toshimitsu Ushio, Haruo Kohtaki, Masakazu Adachi, and Fumiko Harada, Adaptive Fair Sharing Control in Real-Time Systems Using Nonlinear Elastic Models, IEICE Trans. Fundamentals, vol. E90-A, pp. 1154-1161, 2007, 査読有
- ⑦ Fumiko Harada, Toshimitsu Ushio, and Yukikazu Nakamoto, Adaptive Resource Allocation Control for Fair QoS Management," IEEE Transactions on Computers, vol. 56, pp. 344-357, 2007, 査読有
- ⑧ Kenji Onogi and Toshimitsu Ushio, Scheduling of Periodic Tasks on a Dynamically Reconfigurable Device Using Timed Discrete event Systems," IEICE Transactions on Fundamentals, vol. E89-A, pp. 3227-3234, 2006, 査読有
- ⑨ 原田史子, 潮俊光, 中本幸一, QoSの公平化に着目したパワーアウェアな最適CPU/周波数配分問題," 電子情報通信学会論文誌, vol. J89-D, pp. 1954-1962, 2006, 査読有
- ⑩ 谷口和隆, 山崎達志, 潮俊光, 言語測度に基づいた最適スーパーバイザ制御の強化学習, システム制御情報学会論文誌, vol.

[学会発表] (計 18 件)

- ① Naoki Hayashi and Toshimitsu Ushio, Application of A Consensus Problem to Fair Multi-resource Allocation in Real-time Systems, The 47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008 年 12 月 10 日, Cancun, Mexico.
- ② Shigemasa Takai, Yusuke Oka, A formula for the supremal controllable and opaque sublanguage in discrete event systems, The 2008 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 2008 年 9 月 10 日, Budapest, Hungary
- ③ Tatsushi Yamasaki and Toshimitsu Ushio, Reinforcement Learning of Optimal Supervisor for Timed Discrete Event Systems, The 2008 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 2008 年 9 月 10 日, Budapest, Hungary
- ④ Fumiko Harada, Toshimitsu Ushio, and Yukikazu Nakamoto, Fair resource Allocation for Energy and QoS Trade-off Management in Battery-Driven Real-Time Systems, The 2008 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 2008 年 9 月 10 日, Budapest, Hungary
- ⑤ Sayuri Terada and Toshimitsu Ushio, Power Aware Elastic Scheduling with the Resolution of Trade-off between CPU Power Consumption and Task Performance, The 2008 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 2008 年 9 月 10 日, Budapest, Hungary
- ⑥ Yuri Murata and Toshimitsu Ushio, Optimal Scheduling of Periodic Tasks in Soft Real-Time Systems Using Language Measure, SICE-ICCAS International Joint Conference 2006, 2006 年 10 月 19 日, Busan, Korea
- ⑦ Fumiko Harada, Toshimitsu Ushio, Haruo Koutaki, and Masakazu Adachi, Nonlinear Elastic Task Model and its Application to Adaptive Fair Sharing Control, SICE-ICCAS International Joint Conference 2006, 2006 年 10 月 20 日, Busan, Korea
- ⑧ Toshiyuki Miyamoto, Masaki Sakamoto, and Sadatoshi Kumagai, On Reachability Analysis of Multi Agent Nets, The 2006 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 2006 年 9 月 12 日, Bologna, Italy
- ⑨ Fumiko Harada, Toshimitsu Ushio, and Yukikazu Nakamoto, Power-Aware Resource Allocation with Fair QoS Guarantee, The 12th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, 2006 年 8 月 18 日, Sydney, Australia
- ⑩ Toshimitsu Ushio and Kenji Onogi, Scheduling of Periodic Tasks on a Dynamically Reconfigurable Device Using Timed Discrete Event Systems, The 8th International Workshop on Discrete Event Systems, 2006 年 7 月 10 日, Ann Arbor, U.S.A.
- ⑪ Fumiko Harada, Toshimitsu Ushio, Yukikazu Nakamoto, Multi-Resource Allocation Control for Fair QoS Management in Real-Time Systems, The 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 2005 年 12 月 14 日, Sevilla, Spain

6. 研究組織

(1) 研究代表者

潮 俊光(USHIO TOSHIMITSU)

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

熊谷 貞俊(KUMAGAI SADATOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10093410

(3) 連携研究者

高井 重昌(TAKAI SHIGEMASA)

京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・

准教授

研究者番号：60243177

宮本 俊幸(MIYAMOTO TOSHIYUKI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00294041

山崎 達志(YAMASAKI TATSUSHI)

摂南大学・工学部・講師

研究者番号：00368458