

## 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 6月 6日現在

機関番号：25403

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21700039

研究課題名（和文） 実時間ソフトウェアの最適パラメータ探索および組込みソフトウェア再利用への応用

研究課題名（英文） Optimal Design Parameter Exploration of Real-Time Software and its Application to Embedded Software Reuse

研究代表者

中田 明夫（NAKATA AKIO）

広島市立大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：60295839

研究成果の概要（和文）：

本研究では、マルチタスク実時間組込みソフトウェアの資源制約およびスケジューリング方式を考慮した性能要求の検証手法、および、性能要求を充足する範囲における設計パラメータ最適化手法を考案した。考案した検証手法では、与えられたマルチタスクソフトウェア仕様がスループット要求を満たすか否かの判定を優先権付きストップウォッチペトリネットの検証に帰着して行う。また、最適化手法ではスループット要求の検証を繰り返しながら各タスクのタイムバジェットを自動的に緩和する。さらに、得られたタイムバジェット以内で実行できるための、各タスクプログラムの各ループの繰り返し回数やプロセッサ動作周波数を数理計画法により最適化する手法を考案した。考案した手法により、同じ性能をより低性能のリソースで実現するシステムの最適化を支援し、実時間ソフトウェア部品の異なる実行環境への再利用を容易化することができる。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we developed a performance verification method for multitask real-time embedded software with processing/communicating resources shared by various scheduling policies, and a design parameter optimization method satisfying performance requirements. In the developed verification method, we verify whether a given performance requirements are satisfied using Prioritized Stopwatch Petri Nets (PrSwPN). In the developed parameter optimization, each time budget (an allocated execution time for each task) are automatically relaxed while satisfying performance requirements, and then the (possibly recursive) program for each task is statically analyzed to derive a condition of design parameters such as loop iteration numbers and a processor frequency for automatically optimizing them using mathematical programming. These methods make it easier to develop embedded systems which requires the same performance with low cost/low power resources, and to reuse of software components into different execution platforms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学、ソフトウェア

キーワード：組込みソフトウェア、実時間ソフトウェア再利用、コスト最適化

## 1. 研究開始当初の背景

近年、自動車、ロボット、携帯電話、情報家電等の機器に組み込まれる計算機システムである組み込みシステムの需要が増大している。組み込みシステムで用いられるソフトウェア（組み込みソフトウェア）の開発は、動作の実時間性、高い信頼性、CPU、メモリ、消費電力などの厳しい資源制約を考慮した最適化が要求される。一方で、組み込みシステムの高機能化および少量多品種化に伴い、年々組み込みソフトウェアは大規模化しており、なおかつ、市場出荷までの開発期間短縮が要求されている。

一般に、大規模なソフトウェアを短期間で開発するにはソフトウェアの設計モデルや実装コードの再利用が有用である。従来のソフトウェア工学においてはオブジェクト指向設計の概念により、ソフトウェア再利用を考慮したモデル化や実装が行われてきた。

しかし、従来の設計方法論においては組み込みソフトウェアが満たすべき実時間制約やCPU、メモリ、消費電力などの実行環境に関する制約を考慮していなかった。これらの制約は非機能制約と呼ばれる。ソフトウェアの非機能制約は、それが組み込まれるハードウェアやOSなどの実行環境に強く依存しており、ソフトウェアの機能のみに着目した従来の枠組みで組み込みソフトウェアの再利用に対応することは困難であった。

非機能制約を考慮した組み込みソフトウェア再利用については、要求工学の立場からの非形式的な考察が文献[1]にて成されている。しかし組み込みソフトウェア再利用の厳密な問題定義は、申請者が知る限りでは未だ成されていない。組み込みソフトウェア再利用には少なくとも次の2つのシナリオがある[2]:

- (1) 組み込みソフトウェアの実行環境に関するパラメータ(CPU,メモリ等の数,性能,消費電力等)に関する制約が変化する場合、ソフトウェアが提供する機能はそのままにサービス品質に関するパラメータ(マルチメディア処理の場合はスループット、レイテンシ、解像度、圧縮率など、暗号処理の場合は暗号強度など)を再調整することにより、再利用可能となる。これらのサービス品質に関するパラメータは、多くの場合、実行環境に関するパラメータ群とプログラムの特定箇所のループ回数に関数として表現することができる。
- (2) 逆にサービス品質パラメータに関する制約が変化する場合、実行環境パラメータ群を再調整することにより、再利用可能となる。例えば、品質要求がより厳しくなれば、対応する既存プログラムのループ回数および実行環境の性能を変更する(例えばCPUやメモ

リの性能を上げる、あるいは数や容量を増やすなど)により実行可能にすることができる。

一般にサービス品質パラメータと実行環境パラメータの相互調整により、実時間制約等の非機能制約を満足する組み込みソフトウェア再利用を効率化する手法の開発を可能としたい。ただし、パラメータの調整においてはコストや消費電力の観点から最適なパラメータ値を選択することが望まれる。

申請者は先行研究[3]において、バス通信を行うパイプライン構成のマルチプロセッサシステムモデルのクラスに対して、システム全体の実時間制約(サービス品質要求)を満たすための、個々のプロセッサタスクに対する時間制約パラメータの最適選択手法(タイムバジェットティング手法と呼ばれる)を提案している。これらの先行研究はいずれも各プロセッサハードウェアは一つの処理(タスク)のみを行うことを仮定しており、近年の大規模組み込みソフトウェアシステムに見られるようなマルチタスク実行環境に対応していない。一方、単一CPUマルチタスク組み込みソフトウェアを対象とし、OSによるリアルタイムスケジューリングを前提としたタイムバジェットティングによる時間パラメータ最適選択手法が文献[4]で提案されている。しかし、この手法では単一CPU環境および競合の無い非同期通信路を前提としており、より一般的なマルチプロセッサマルチタスク実時間組み込みソフトウェアに適用するためには、同期通信、資源競合、複数CPU環境、およびリアルタイムスケジューリングを考慮した拡張が必要となる。そこで[3]で提案した手法に対して、リアルタイムスケジューリングを考慮した拡張を行い、組み込みソフトウェア再利用への応用を試みる。

## 2. 研究の目的

まず、実時間組み込みシステムモデルが実時間制約および資源制約を満たすことの検証およびコスト見積もりを行う手法を考案する。先行研究[3]では時間ペトリネットモデルへ変換して既存のモデル検査/シミュレーションツールを用いることで行っていたが、本研究ではこれをリアルタイムスケジューリングによるCPU資源共有も考慮した手法に拡張する。さらにハードウェアコストや消費電力の見積もりを行えるようにする。次に、サービス品質パラメータと実行環境パラメータの最適値探索手法を開発する。最適化手法としては、1)パラメトリックモデル検査によってパラメータに関する制約式を導出し、数理計画問題に帰着する方針と、2)パラメータ群の初期解から初めて、コストが改善される方向に発見的にパラメータ値を動かして準最適解を探索する方針の2通りの手法を

開発し、これらの手法の利点・欠点を比較評価する。最後に、開発した最適パラメータ探索手法を用いた実時間組込みソフトウェア再利用手法を開発し、具体的な例題に対してその手法の有効性を評価する。

### 3. 研究の方法

(1) まず、マルチタスク実時間組込みソフトウェアの資源制約およびスケジューリング方式を考慮した実時間制約及び性能要求の検証手法を考案した。考案した手法では、マルチタスクソフトウェアのタスク単位での振る舞いを記述したタスクグラフ、および、各タスクが必要とする資源の割り当て情報とそれらのスケジューリング方式を記述したリソース割り当て図からなる複数タスク動作仕様(図 1)が与えられたとき、これらの仕様が表現する動きを正確に表現する優先権付きストップウォッチペトリネット(以下、PrSwPN)記述(図 2)へ変換し、スループット要求を満たすか否かの検証を行う手法を考案する。

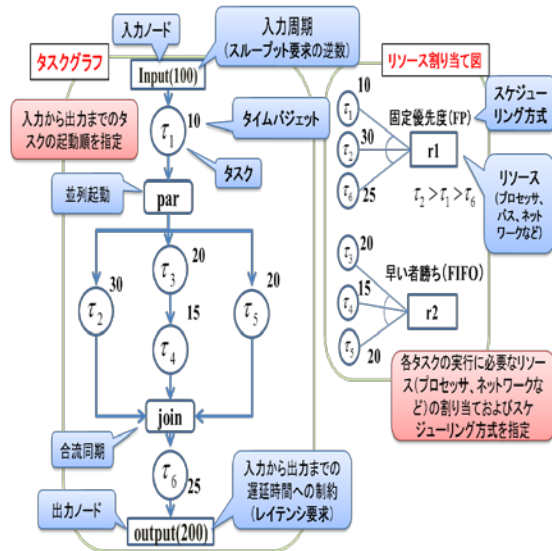


図 1 複数タスク動作仕様の例

従来研究では待ち行列ネットワークなどの確率的なモデル化により実時間性に関する性能評価を行っていたが、提案手法は確定的な実時間モデルである PrSwPN を用いることにより、特に高信頼性を要求される組込みソフトウェアの設計において重要な、最悪時における実時間制約の保証を行うことができる。また、PrSwPN を用いることにより、通常の時間ペトリネット(TPN)では表現できなかった固定優先度スケジューリング、および、プリエンティブスケジューリングのモデル化を行うことができる。優先権の概念を用いることでタスク間の固定優先度を表現可能となり、モデル上で時間の計測を任意に停止・再開できるストップウォッチ機能を用いることでタスクのプリエンプレションを表現

可能となる。一方、優先権付き時間ペトリネットでは動的優先度スケジューリングの記述はできないとされてきたが、本研究では動的優先度スケジューリングの一つである EDF スケジューリング方式の動作を離散的に近似することにより、PrSwPN によるモデル化を可能とした。

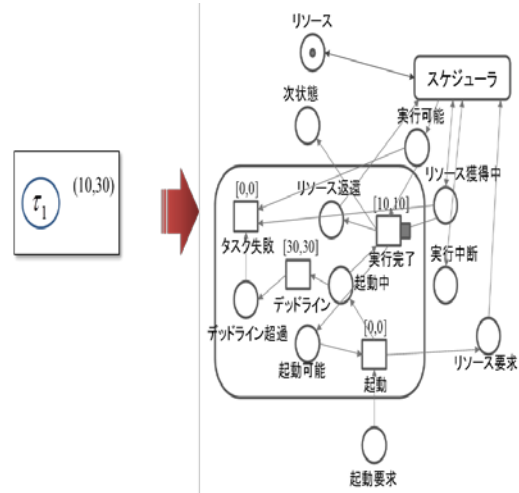


図 2 タスクの PrSwPN への変換

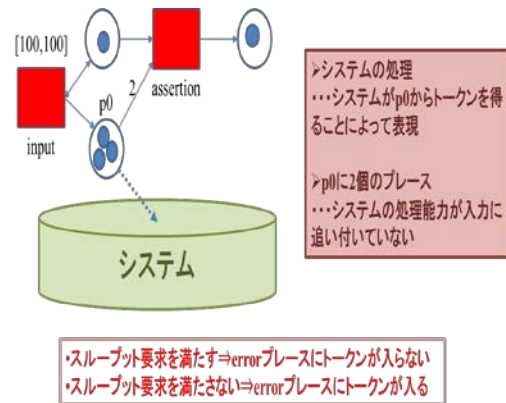


図 3 スループット要求のアサーション

さらに本研究では、入力となるタスク群の振る舞い仕様から PrSwPN への変換において、仕様モデルからの自動変換を容易にし、検証モデルにおけるエラーに対応する元の仕様の誤りをトレースしやすくするため、仕様モデルを構成するタスク・リソース・スケジューラ等の構成要素毎に検証モデルに変換し、それらを機械的に結合することにより全体の検証モデルを構成する手法を採った。また、変換したモデルを用いてスループットの検証を行うため、スループット要求を検査するアサーション(図 3)を付加することにより、既存の PrSwPN 検証ツールである The TINA Toolbox を用いて、デッドロック検証問題へと帰着させた。

(2) (1)で考案した実時間マルチタスクソフトウェア動作仕様(以下、複数タスク動作

仕様と呼ぶ)の性能検証手法をツールに実装し、飛行船自動航行ソフトウェアの事例に適用しその有用性を評価した。当該ソフトウェアの振る舞い仕様を記述したUMLシーケンス図(図4)およびリソース(プロセッサ、バス、共有変数など)の情報から複数タスク動作仕様(図5および図6)に変換し、システム全体のスループット性能の見積もりを性能検証により導出し、性能の実測値との比較を行った。

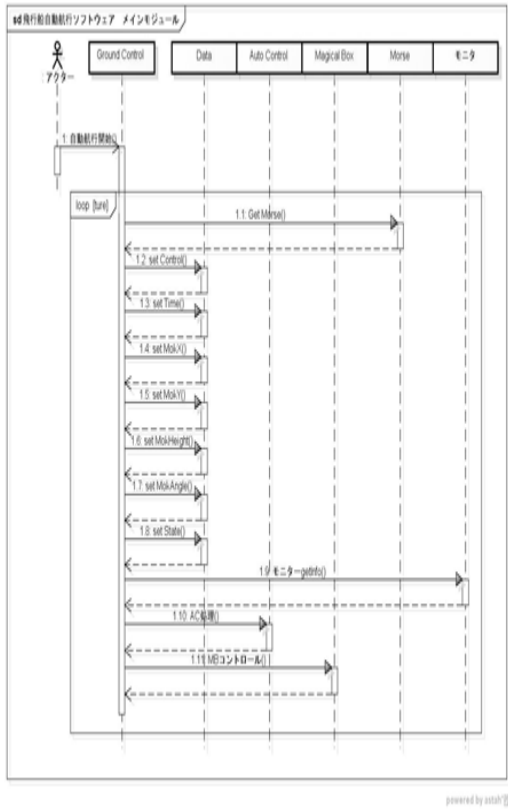


図4 飛行船自動航行ソフトウェアのUMLシーケンス図(一部)

(3)(2)で実装したツールを用い、スループットおよびレイテンシ性能を維持しながら各タスクのタイムバジェットを可能な限り緩和する自動最適化手法を考案した。この手法では、同じリソースを共有するタスク群のタイムバジェットを一定割合だけ緩和した複数タスク動作仕様を導出し、それらの性能検証を行い、性能要求を満たした仕様に対して同様の操作を繰り返すことにより自動最適化を行う(図7)。

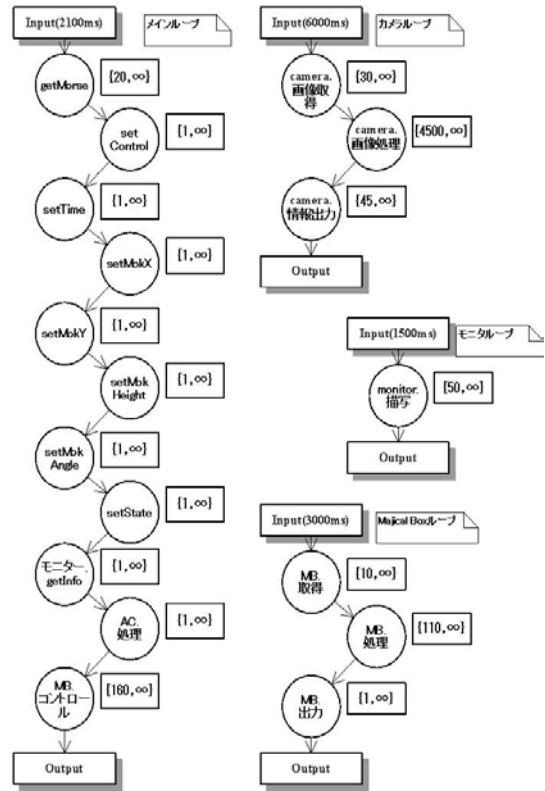


図5 飛行船自動航行ソフトウェアのタスクグラフ

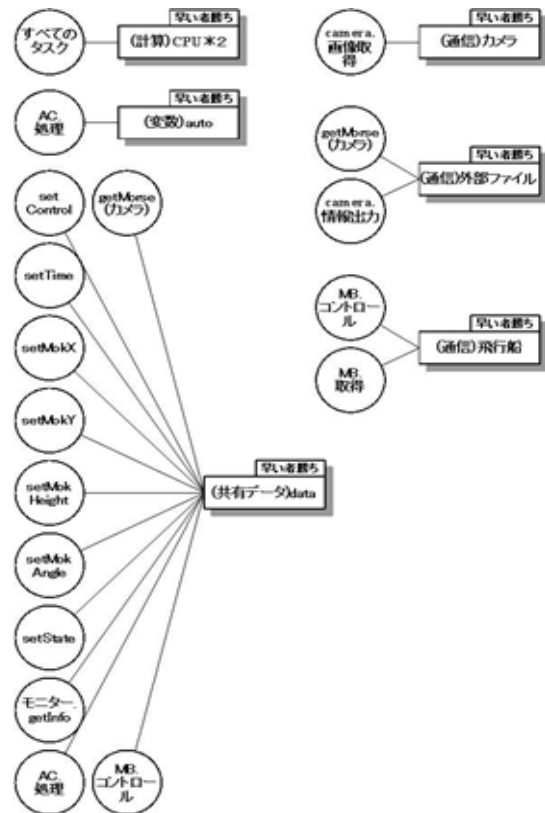


図6 飛行船自動航行ソフトウェアのリソース割り当て図

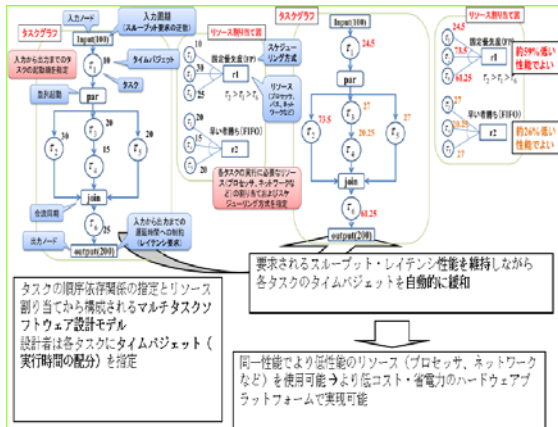


図 7 タイムバジェット最適化手法

(4) (3)で得られた各タスクのタイムバジェット以内の実行時間で実際に各タスクの処理を実行させるため、一般に再帰呼び出しを含むプログラムが与えられた実時間制約を満たすための、各ループの繰り返し回数とプロセッサの個々の命令語の実行時間（一般に動作周波数の関数）が満たすべき条件を自動導出する手法（パラメトリック実行時間解析手法）を考案した。プログラムの実行時間は個々の処理の実行回数にのみ依存し、実行順序に依存しないという性質に着目し、一般化 Parikh の定理を用いることにより、一般に再帰を含むプログラムを扱うことが可能となった。得られた条件式に数理計画法を適用することにより、与えられたタイムバジェット内で実行できるための最適なループ回数パラメータと実行環境パラメータ（CPU 動作周波数など）の組合せを求めることが容易となる（図 8）。

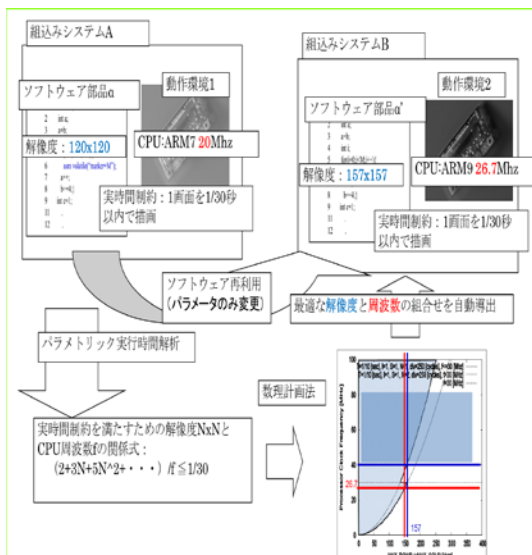


図 8 パラメトリック実行時間解析による実時間ソフトウェア再利用

#### 4. 研究成果

(1) 考案した性能検証手法を飛行船自動航行ソフトウェアの事例に対して適用し、検証結果に基づく性能見積もりと実際の性能測定結果を比較評価した結果、実測値と見積もり値の相対誤差は 3%未満という結果が得られた。このことにより、マルチタスク実時間ソフトウェアに対してどの程度のリソースを割り当てれば性能要求を満たすかといった検証を、設計段階の設計モデルに対して行うことが可能となる。また、リソース数やスケジューリング方式の変更および再検証も容易であるため、設計者によるアーキテクチャ検討の手段としても有用であると考えられる。このように、提案手法は組込みソフトウェアなどの設計段階における最悪時の性能検証に有用であり、設計の手戻りを防ぎ開発の効率化に寄与すると考えられる。性能検証手法に関する初期の成果は査読付きの国内会議「組込みシステムシンポジウム 2010」に採択され、論文集に掲載されており、その内容を進めた成果を学術論文誌に投稿すると同時に開発した検証ツールをフリーソフトウェアとして広く一般公開する予定である。

(2) 性能検証手法を援用したタイムバジェット最適化手法を用いることにより、同じ性能をより低性能のリソースで実現するシステムの最適化を支援することができる。この成果は国内研究会で発表し、国内特許に出願中であり、今後、学術論文誌への投稿を予定している。

(3) パラメトリック実行時間解析手法により、個々のタスクの実装として既存の実時間ソフトウェア部品をパラメータ調整によりタイムバジェット内で実行できるように実行時間を調整可能となり、異なる実行環境への実時間ソフトウェア再利用を容易化することができる。また、プログラムの実行時間は個々の動作の順序に依存しない点に着目し、計算機科学の古典的な理論的成果である一般化 Parikh の定理を応用することにより、一般に再帰を含むプログラムを解析可能としたことは学術的にも価値が高いと考えられる。この成果は国内研究会で発表し、国内特許に出願済みであり、今後学術論文誌への投稿を予定している。

#### 参考文献

- [1] Nancy G. Leveson and Kathryn Anne Weiss, Making embedded software reuse practical and safe, In Proc. of the 12th ACM SIGSOFT Int. Symp. on Foundations of Software Engineering (FSE 2004), pp. 171-178. ACM Press, 2004.
- [2] 河井敏弘, 中田明夫, 「実時間ソフトウェア再利用のためのパラメトリック実行時間



解析の一手法」, 信学技報 SS2007-57, 電子情報通信学会, 2007.

[3] Tadaaki Tanimoto, Seiji Yamaguchi, Akio Nakata, and Teruo Higashino, A real time budgeting method for module-level-pipelined bus based system using bus scenarios, In Proc. of the 43rd ACM/IEEE Int. Design Automation Conf. (DAC 2006), pp. 37-42. ACM Press, 2006.

[4] R.Gerber, S.Hong, and M.Saksena, Guaranteeing real-time requirements with resource-based calibration of periodic processes, IEEE Trans. Softw. Eng., Vol.21, No.7, pp. 579-592, 1995.

#### 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4件)

- ① 百々太一, 山脇弘, 中田明夫, リソーススケジューリングを考慮した UML MARTE 振る舞い仕様の性能検証、情報処理学会研究報告、査読無、Vol. 2010-EMB-16, No.35, 2010.
- ② 百々太市, 中田明夫, プリエンプティブスケジューリングによりリソースを共有する複数タスク動作仕様の性能検証、組込みシステムシンポジウム 2010 論文集、情報処理学会シンポジウムシリーズ、査読有、Vol. 2010, No. 10, pp.107-112, 2010.
- ③ 梶島和宏, 中田明夫, 再帰を含むプログラムに対するパラメトリック実行時間解析手法とツールの試作、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、Vol.111, No.268, pp.37-42, 2011.
- ④ 倉田和哉, 百々太市, 中田明夫, リソース制約を含む複数タスク動作仕様におけるタイムバジェット最適化の一手法、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、Vol.111, No.268, pp.43-48, 2011.

[学会発表] (計4件)

- ① 百々太一, 山脇弘, 中田明夫, リソーススケジューリングを考慮した UML MARTE 振る舞い仕様の性能検証、情報処理学会組込みシステム研究会第 16 回研究発表会、2010 年 3 月 27 日、八丈シーパークリゾート (東京都八丈島).
- ② 百々太市, 中田明夫, プリエンプティブスケジューリングによりリソースを共有する複数タスク動作仕様の性能検証、情報処理学会組込みシステムシンポジウム 2010、2010 年 10 月 29 日、国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都渋谷区).
- ③ 梶島和宏, 中田明夫, 再帰を含むプログ

ラムに対するパラメトリック実行時間解析手法とツールの試作、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、2011 年 10 月 28 日、北陸先端科学技術大学院大学 (石川県能美市).

- ④ 倉田和哉, 百々太市, 中田明夫, リソース制約を含む複数タスク動作仕様におけるタイムバジェット最適化の一手法、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、2011 年 10 月 28 日、北陸先端科学技術大学院大学 (石川県能美市).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称: パラメトリック実行時間解析装置及び解析方法

発明者: 中田明夫, 梶島和宏

権利者: 広島市立大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-33488

出願年月日: 2012 年 2 月 20 日

国内外の別: 国内

名称: タイムバジェット最適化装置及び最適化方法

発明者: 中田明夫, 倉田和哉, 百々太市

権利者: 広島市立大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-33489

出願年月日: 2012 年 2 月 20 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.sos.info.hiroshima-cu.ac.jp/~nakata/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中田 明夫 (NAKATA AKIO)

広島市立大学・情報科学研究科・教授

研究者番号: 60295839

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし