

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「リアルタイム産業機械向けエミュレータの開発」

研究開発成果等報告書

平成22年3月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人ソフトピアジャパン

目 次

第1章	研究開発の概要	4
	実施期間 平成19年8月～平成21年3月	
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	4
1-2	研究体制	5
1-3	成果概要	6
1-4	当該研究開発の連絡窓口	7
第2章	個別ユニットエミュレータの基本設計	8
2-1	研究目的及び目標	8
2-2	実施内容及び結果	8
2-3	研究成果	9
第3章	個別ユニットエミュレータの開発	9
3-1	研究目的及び目標	9
3-2	実施内容及び結果	9
3-3	研究成果	11
第4章	エミュレータのハードウェア化 (ニュートンオイラー法を用いたアルゴリズムの検討)	11
4-1	研究目的及び目標	11
4-2	実施内容及び結果	11
4-3	研究成果	12
第5章	エミュレータのハードウェア化 (機構計算高速化の検討および時間分割幅の適応変更による誤差管理手順の検討)	12
5-1	研究目的及び目標	12
5-2	実施内容及び結果	13
5-3	研究成果	15
第6章	エミュレータのハードウェア化 (PCI-Express への実装)	16
6-1	研究目的及び目標	16
6-2	実施内容及び結果	16
6-3	研究成果	16
第7章	エミュレータ・ハードウェアの開発	17
7-1	研究目的及び目標	17

7-2	実施内容及び結果	18
7-3	研究成果	19
第8章	個別ユニットエミュレータの評価	19
8-1	研究目的及び目標	19
8-2	実施内容及び結果	19
8-3	研究成果	20
第9章	統合システムエミュレータの開発	21
9-1	研究目的及び目標	21
9-2	実施内容及び結果	21
9-3	研究成果	23
第10章	6軸ロボットアーム彫刻機をサポート・エミュレータ・ツールの実証	23
10-1	研究目的及び目標	23
10-2	実施内容及び結果	23
10-3	研究成果	24
第11章	6軸ロボットアーム・サポート・エミュレータ・ツールの実証	25
11-1	研究目的及び目標	25
11-2	実施内容及び結果	25
11-3	研究成果	26
第12章	シーケンサ・サポート・エミュレータ・ツールの実証	26
12-1	研究目的及び目標	26
12-2	実施内容及び結果	26
12-3	研究成果	27
第13章	全体総括	27
13-1	成果の総括	27
13-2	今後の事業化に向けての取組み	27

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 研究の目的

生産ライン等の製造業を中心に多用される産業機械には、安全性確保、高機能化、開発期間の短縮及び信頼性の向上が重要な課題となり、組込みソフトウェアの開発に対する要求が厳しくなっている。特に工場の製造ラインに代表される産業用システムにおいては、システム稼働後のトラブルは製造ラインの停止等の莫大な損失をもたらすことになるため、システムのメンテナンス及び安全稼働が重要視されている。

近年、大量生産から多品種少量生産、多品種混載生産への移行、頻繁な製品のモデルチェンジにより、産業用システム構築のスピード、信頼性及び安心・安全・安定が求められてきている。

本研究は、高い信頼性をもつ産業用システムを短期間に高効率で実現するために役立つエミュレータを開発する。これは、ハードウェア技術を最大限利用して実機械の挙動を入出力信号レベルで模倣し、実機無しでの高度な産業用システム開発を可能とするものである。

その成果を活用することにより、産業機械に必要な組込みソフトウェア開発を、分散化・高効率化することができ、日本の製造業の国際競争力を高めることができる。

2) 研究の概要

現在、産業用システムの開発には、必要に応じてシミュレーションを経て、システムの設計・構築が行われている。産業用システムの組込みソフトウェア開発は、実機の構築と平行して行われ、あらかじめソフトウェア・シミュレータ等を駆使して、デバッグ作業が実施されている。しかし、これは実機と切り離された状態であるため、このデバッグ作業は不完全であり、開発効率の向上につながりにくい。また、システムの安全性及び信頼性の確保も充分達成されない。

よって本研究は、産業機械の挙動を実時間に近い速度で模倣するエミュレータを開発することにより、机上デバッグ作業から実機デバッグに至るまでのデバッグ作業を効率的に実行することを可能とする。この結果、産業システム稼働開始後も長期間安定稼働が期待できる。

本研究では、複雑な産業機械システムをエミュレートするにあたり、階層化を図ることにより、エミュレータ開発の簡素化を図る。具体的には、産業用機械システムを構成する個々のユニットを対象とした「個別ユニットエミュレータ」と、システム全体を対象とした「統合システムエミュレータ」を開発する。

個別ユニットエミュレータは、産業機械を構成する基本ユニット（ロボット、モータ等）の機械的・電氣的な挙動を模倣し、個々のユニットの組込みソフトウェア開発を支援する。

統合システムエミュレータは、産業機械を構成する各基本要素をモジュール化（ライブラリ化）し、それらを組み合わせて開発するシステムをエミュレーションすることにより、開発する機械装置の基本機能を検証する。

1-2 研究体制

1) 研究組織及び管理体制

①研究組織（全体）



2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人ソフトピアジャパン

①管理員

氏名	所属・役職
太田 秀昭	経営支援課 課長
末松 紀昭	経営支援課 経営支援第1担当チーフ 技術課長補佐
松波 隆明	経営支援課 経営支援第1担当 主査
種田 智哲	経営支援課 経営支援第1担当 業務専門員

②研究員

【再委託先】

株式会社イーエスピー企画

氏名	所属・役職
江崎 雅康	代表取締役
大竹 正海	技術企画部 研究員

日晷オートメ株式会社

氏名	所属・役職
北野 元美	システム課 次長
松枝 俊次	システム課 係長
足立 直之	システム課 副係長
横木 正明	システム課 主任
工藤 直樹	システム課 研究員

有限会社はじめ研究所

氏名	所属・役職
坂本 元	取締役

学校法人 早稲田大学

氏名	所属・役職
山川 宏	理工学術院 教授 WABOT-HOUSE研究所 客員研究員
宮下 朋之	理工学術院 准教授

岐阜県情報技術研究所

氏名	所属・役職
稲葉 昭夫	メカトロ研究部 部長
山田 俊郎	情報システム研究部 専門研究員
田畑 克彦	メカトロ研究部 主任研究員
横山 哲也	メカトロ研究部 主任研究員

1-3 成果概要

1) 個別ユニットエミュレータ

本研究開発では FPGA ボード搭載可能な機構計算アルゴリズムを策定し、FPGA ボードでの動作を確認した。6軸ロボットアームのエミュレータに関しては、実時間に近いエミュレーション速度を実現することができた。また、機構計算アルゴリズムの数値計算誤差管理による数値積分の時間刻み変更を検討し、その有益性をパソコン上で確認した。

2) 統合システムエミュレータについて

本プロジェクトである“リアルタイム産業機械向けエミュレータ”（サポート・エミュレータ・ツール）を開発した。従来の機械のライフサイクルでは、問題が発生した時に対応するが、リアルタイム産業機械向けエミュレータは、実機を実際に制御、調整、モニター、エミュレート（代行）をするサポート・エミュレータ・ツールとなり、設計・製作のサポートや、障害メンテナンス、再生のサポートに活用できる。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理者 財団法人ソフトラピアジャパン

経営支援課 経営支援第1担当 主査

松波 隆明 Tel 0584-77-1177

研究者

株式会社イーエスピー企画

代表取締役

江崎 雅康 Tel 058-397-0660

日晃オートメ株式会社

システム課次長

北野 元美 Tel 058-383-3737

有限会社はじめ研究所

取締役

坂本 元 Tel 06-4808-0686

学校法人早稲田大学

理工学術院 准教授

宮下 朋之 Tel 03-5286-3249

岐阜県情報技術研究所

主任研究員

横山 哲也 Tel 058-379-3300

第2章 個別ユニットエミュレータの基本設計

2-1 研究目的及び目標

個別ユニットエミュレータは、産業機械を構成する個別ユニット（多関節ロボットアーム等）の機構の挙動を、組み込みソフトウェアの挙動と論理的に同期させて模倣するエミュレータである。本研究では、個別ユニットエミュレータのコアシステムを機構の挙動をソフトウェアでシミュレーションする機構解析システムを用いて構築することにより、その基本機能の実現方法について検討した。

2-2 実施内容及び結果

試作したコアシステムは、機構解析システム、信号変換インターフェース、組み込みコントローラ、組み込みソフトウェア開発環境からなる（図1）。

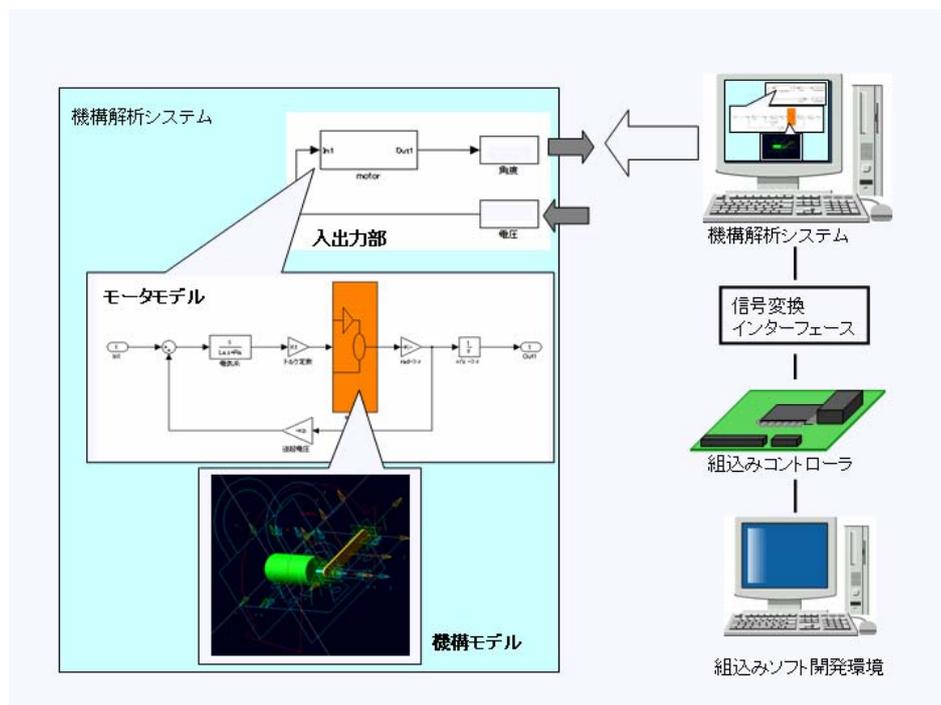


図1 コアシステムの概要

1) 機構解析システム

図1の機構解析システムは、個別ユニットの機構の挙動を組み込みコントローラからの制御信号に基づいてエミュレーション（シミュレーション）するシステムである。本システムは、入出力部、モータモデル部、機構モデル部の3つのモジュールで構成される。入出力部は、組み込みコントローラから信号変換インターフェースを介して制御信号を受取り、モータモデル部と機構モデル部の処理結果を組み込みコントローラに信号変換インターフェースを介して出力する。モータモデル部は、組み込みコントローラからの制御信号と機構モデル部でのエミュレーション結果に基づいて主に個別ユニットの電気的な挙動を模倣する。機構モデル部は、個別ユニットの機構部分のモデルデータとモータモデル部の出力（力情報）に基づいて機構の挙動をエミュレートする。

2) コアシステムの同期方法

組込みコントローラに搭載した組込みソフトウェアと、機構解析システムとの同期については、同期ソフトウェアを付加して論理時間を同期させる方法について検討した。同期ソフトウェアによる論理時間の同期は、機構解析システムと組込みコントローラ上の組込みプログラムにそれぞれ同期のためのタスクソフトウェアを付加し、このタスクソフトウェア間で、機構解析システムにおける計算単位論理時間ごとに同期信号の授受を行いながら、機構エミュレーションの機動停止とデバッグ対象の組込みソフトウェアの機動・停止を行うことにより行うこととした。

2-3 研究成果

産業機械を構成する個別ユニットの機構の挙動を、組込みソフトウェアの挙動と論理的に同期させて模倣する「個別ユニットエミュレータ」の基本構成について、機構解析システムを用いてコアシステムを構築した。

第3章 個別ユニットエミュレータの開発

3-1 研究目的及び目標

開発した個別ユニットエミュレータのコアシステムを基に作成したアームロボットのエミュレータを用いて、個別ユニットエミュレータの制御機能を付加したデバッグインターフェースを開発する。

3-2 実施内容及び結果

図2に、作成したデバッグインターフェース、個別ユニットエミュレータ、データコンバータおよび組込みコントローラで構成されたシステム構成図を示す。

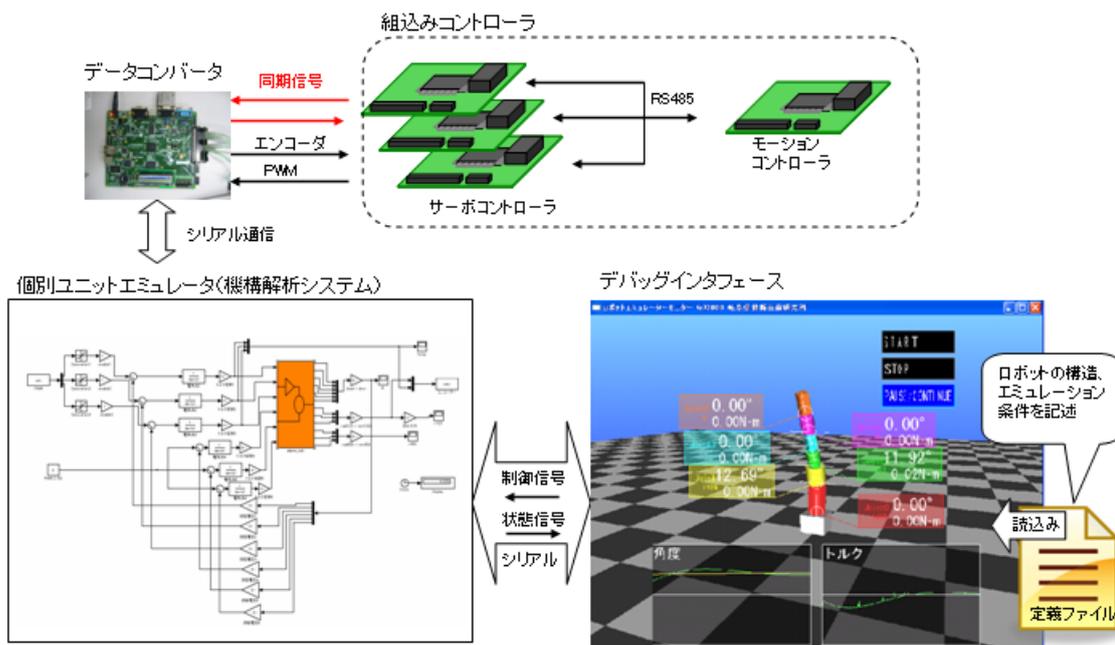


図2 システム構成図

1) デバッグインターフェース

デバッグインターフェースは、個別ユニットエミュレータの計算結果を表示する機能および個別ユニットエミュレータに対する制御機能を有する（図 2 参照）。デバッグインターフェースの具体的な機能を以下に記す。

- 制御信号を用いて、個別ユニットエミュレータの計算を一時停止／再開できる。
- ロボットの関節角度、トルクを数値およびグラフで表示。また、ログとしてこれら数値をファイルに保存可能。
- ロボットの機構を CG で描写。
- ロボットの関節角度、トルクの値に閾値を設け、閾値外となった場合は個別ユニットエミュレータの計算を一時停止できる。
- ステップ実行できる

2) 個別ユニットエミュレータ

個別ユニットエミュレータは産業機械を構成する個別ユニット（ロボットアーム等）の機構の挙動を、組込みコントローラの挙動と論理的に同期して計算するエミュレータで、機構解析ソフト MD adams と数値計算ソフト Matlab/Simulink を用いて構築した。本エミュレータは、入出力部、モータモデル部、機構モデル部の3つのモジュールで構成される。入出力部は、組込みコントローラからデータコンバータを介して制御信号を受取り、モータモデル部と機構モデル部の処理結果を、データコンバータを介して組込みコントローラに出力する。モータモデル部は、組込みコントローラからの制御信号と機構モデル部でのエミュレーション結果に基づいて、電気的な挙動を模倣する。機構モデル部は、個別ユニットのロボットアーム機構部分のモデルデータとモータモデル部のトルクに基づいて、機構の挙動をエミュレートする。

図3に個別ユニットエミュレータと組込みコントローラ間で論理的に同期を図るためのシーケンス図を示す。論理的に同期を図るため、入出力部からエミュレータおよび複数の組み込みコントローラに、計算開始フラグを一斉に送信する。コントローラおよび個別ユニットエミュレータの計算が終了したら、入出力部に計算終了フラグを送信する。全ての計算終了フラグが揃ったことを確認して、次のサンプリングに進む。

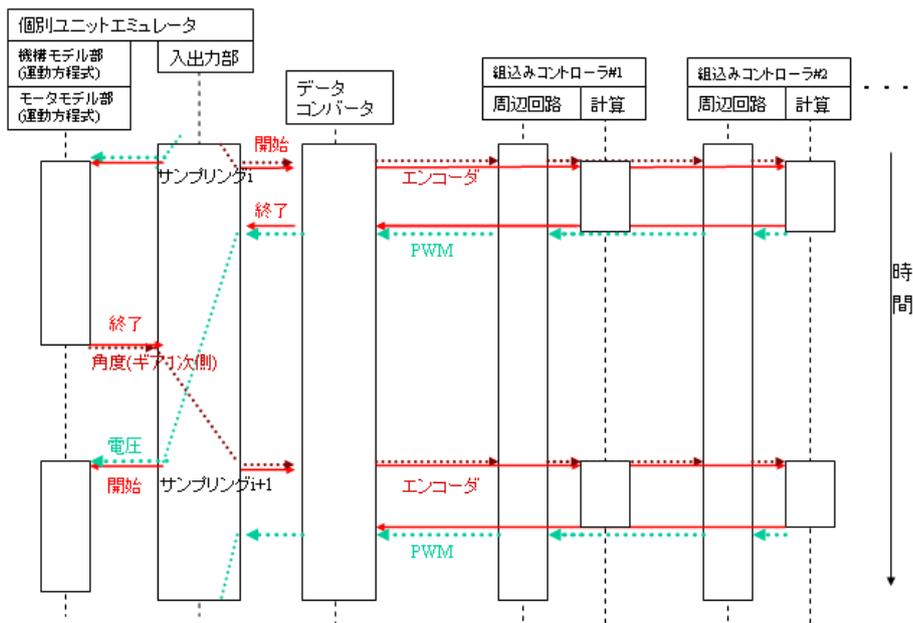


図3 シーケンス図

3-3 研究成果

個別ユニットエミュレータのコアを用いてロボットアームエミュレータを作成し、このエミュレータを用いて個別ユニットエミュレータの制御機能を有するデバッグインターフェースを開発した。デバッグインターフェースは個別ユニットエミュレータの計算表示、個別ユニットエミュレータの制御機能を有し、組み込みソフトウェアのデバッグに寄与できるものとする。

第4章 エミュレータのハードウェア化

(ニュートンオイラー法を用いたアルゴリズムの検討)

4-1 研究目的及び目標

個別ユニットエミュレータのハードウェア化を実現するため、FPGA ボードで動作可能な機構計算アルゴリズムの検討を行う。

4-2 実施内容及び結果

機構計算アルゴリズムは機構の運動方程式を算出し、時刻歴に数値積分する。運動方程式を算出する手法には、ラグランジェ法を用いて運動方程式を算出方法と、質点のニュートンの運動方程式と剛体のオイラーの運動方程式を組み合わせた再帰計算法(以下、ニュートンオイラー法と云う)がある。本研究開発では FPGA での実装のし易さおよび計算量を考慮して機構計算アルゴリズムにはニュートンオイラー法を用いることとした。

図4にニュートンオイラー法による機構計算アルゴリズムのイメージを示す。1 サンプルの数値積分の間で、前半はロボットの土台リンクから手先リンクにかけて、後半は手先リンクから土台リンクにかけて計算し、その計算結果を用いて数値積分を行

うことで、ロボットの関節角度、角速度を算出する。

※図中の記号および式に関しては、参考文献「吉川恒夫：ロボット制御基礎論、コロナ社」を参照。

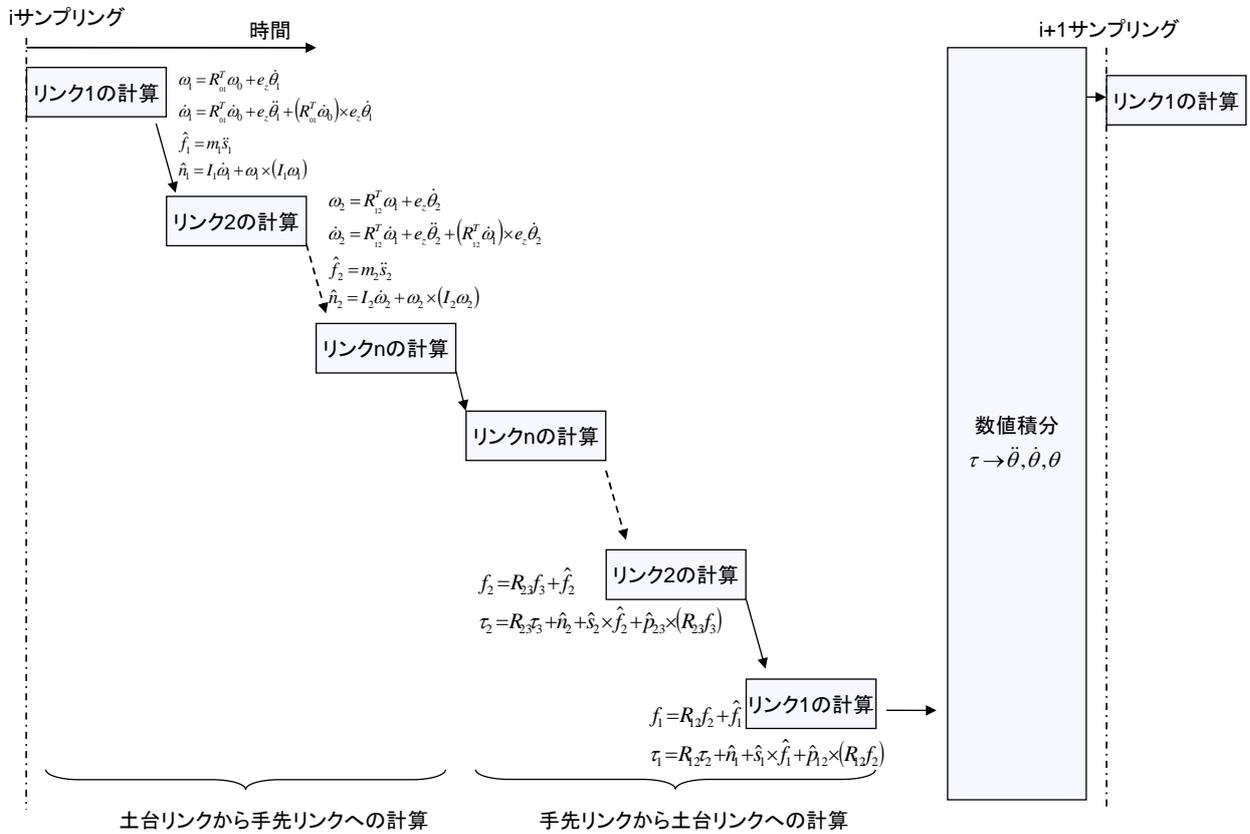


図 4 ニュートンオイラー法

4-3 研究成果

個別ユニットエミュレータのハードウェア化を実現するため、FPGA ボードで動作可能な機構アルゴリズムとして、ニュートンオイラー法を用いたアルゴリズムを検討した。ニュートンオイラー法を用いたアルゴリズムは FPGA ボードで動作することを確認した。

第5章 エミュレータのハードウェア化

(機構計算高速化の検討および時間分割幅の適応的変更による誤差管理手順の検討)

5-1 研究目的及び目標

エミュレータのハードウェア化に際して、その実行アルゴリズムの開発をするにあたり、特に計算速度面での貢献を志向し以下の各事項を目標とした。

1) 機構計算高速化アルゴリズムの研究

計算対象としてロボットアームを想定し、その並列化計算を実現するアルゴリズム

の調査を行い、アルゴリズムの新たな考案や既存のアルゴリズムを含めて、いくつかのアルゴリズムの検討を実施する。

2) 機構計算機能の実装

検討したアルゴリズムについて、その性能を検証すべく、ソフトウェアに実装する。実装した結果を踏まえ、FPGAへ実装するアルゴリズムを選定する。

3) 機構計算アルゴリズムのハードウェア化の改良

6軸ロボットアームを対象にして、運動方程式の定式化および選定対象としたアルゴリズムによる性能評価や実用上の検討を実施する。

5-2 実施内容及び結果

1) 機構計算高速化アルゴリズムの研究

計算対象としてロボットアームを想定し、その並列化計算を実現するアルゴリズムの調査を行い、アルゴリズムの新たな考案や既存のアルゴリズムを含めて、いくつかのアルゴリズムの検討を実施した。運動方程式の計算アルゴリズムの対象として、差分法、ルンゲクッタ、ニューマーク β 法等について検討した。ここでは、運動方程式の特異な形式に注目した高速化は可能であるが、汎用性および精度の面で問題が大きいことが明らかとなり、各アルゴリズムに対するゲート数の推定が必要であり、ハードウェア化に適切なアルゴリズムの制約条件となる。さらに、並列化処理アルゴリズムの有効性について検討した。ここでは、運動方程式の算出対象系の自由度に応じた方程式群を扱うにあたり、並列化におけるオーバーヘッドを考慮した取り扱いが重要であり、ハードウェアのゲート数に深く関連することが明らかとなった。また、並列化により計算精度の悪化を生じさせることとなるため、エミュレーション精度および速度の面におけるトレードオフが存在し、この点に関してもハードウェアを使用した検討が必要であることが明らかとなった。

2) 機構計算機能の実装

検討したアルゴリズムについて、計算速度面で有利である動的解析法および並列化手法について検討した。検討対象は、図5に示す20リンクの平面フレキシブルマニピュレータとし、4次のルンゲクッタ法およびウィルソン θ 法により、5秒間の挙動を推定する計算を実施した。両アルゴリズムにおいて、繰り返し計算における時間分割幅による影響を把握するため、関節トルクを与えた際のマニピュレータ形状の差異を図5に示す。ここでは、時間分割幅の影響が両アルゴリズムにおいて見られた。また、並列化ルンゲクッタ法では、連立方程式の並列化に際して逆行列演算や固有値演算などの前作業が存在しFPGAにおける実装上の問題となることが明らかとなった。

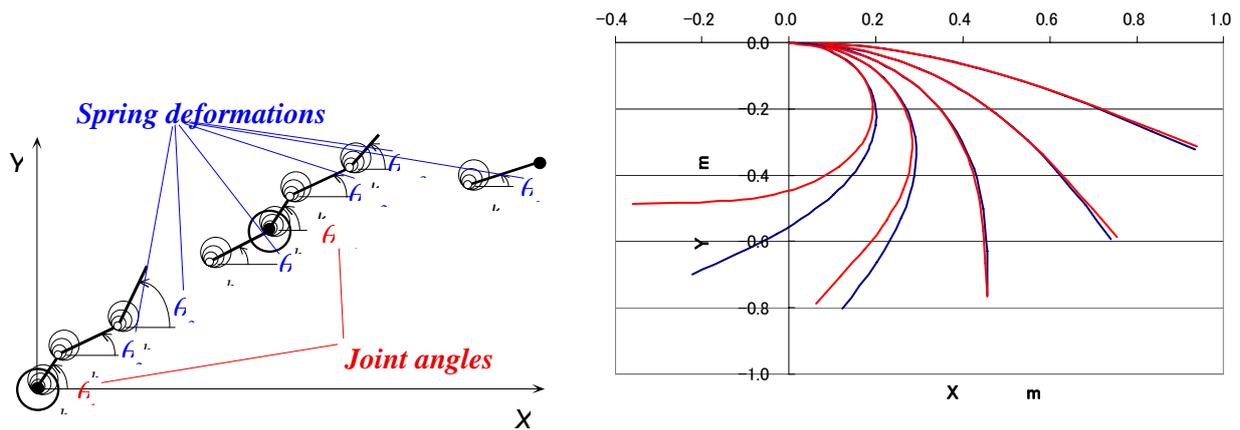


図5 機構計算機能の実装

3) 機構計算アルゴリズムのハードウェア化の改良

6軸ロボットアームを対象にして、運動方程式の定式化および選定対象としたアルゴリズムによる性能評価や実用上の検討を実施する。

ここでは、検討対象としたロボットアームについて、関節トルクを入力とし、その関節角度の時間変化を算出するための運動方程式を、数式処理システム Maple を使用して導出した。

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{h}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{k}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\tau}(\boldsymbol{\theta}) \quad (1)$$

各行列およびベクトルを導出し、C 言語により計算可能とし、微分方程式の求解アルゴリズムにより解を導出した。なお、(1) 式の運動方程式と、FPGA に搭載したニュートンオイラー法により算出した運動方程式は等価である。

微分方程式の求解にはルンゲクッタ法を使用した。ルンゲクッタ法における時間増分幅 Δt を可変とするために以下の手順によるアルゴリズムをソフトウェアにより実装した。

Step 1: $t \rightarrow t + \Delta t / 2$ による状態更新を2回実施

Step 2: $t \rightarrow t + \Delta t$ による状態更新を1回実施

Step 3: Step1 と Step2 の誤差比較により閾値

(1) $\Delta e / 2$ 以下の場合には、 $\Delta t \rightarrow 2 * \Delta t$ として、 $t = t + \Delta t$ の状態を確定し、Step1 へ

(2) Δe 以上の場合には、 $\Delta t \rightarrow \Delta t / 2$ として、更新を棄却し再度 Step1 へ

(3) (1),(2)以外は、現状の Δt を用い、 $t = t + \Delta t$ の状態を確定し、Step1 へ

計算実験により速度比較および誤差比較を実施し図6及び図7の結果を得た。

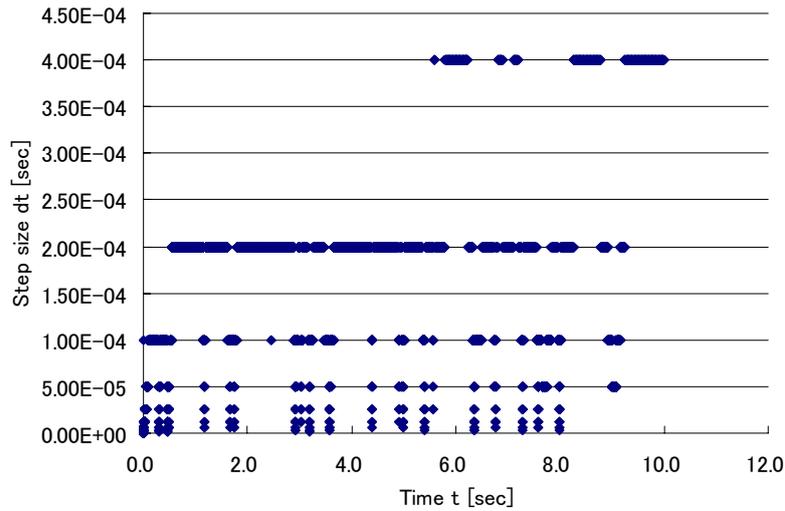


図6 計算時刻と時間増分幅との関係

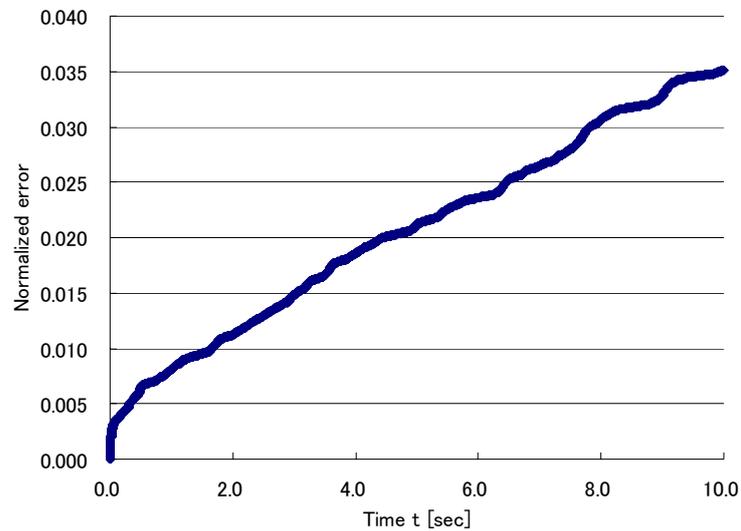


図7 計算時間の進展に伴う累積誤差の推移

$\Delta t=10^{-4}$ 、 $\Delta e=10^{-4}$ とした場合に、10秒間のエミュレーション後の状態において、固定 $\Delta t=10^{-4}$ による計算との比較により、累積誤差 0.036 以下（有効数字2桁程度）を確認した。計算速度は、固定 $\Delta t=10^{-4}$ によるものと比較し、23倍強の高速化を実現できることを確認した。

5-3 研究成果

個別エミュレータの実現に際して、第4章に記述した6軸ロボットアームの運動方程式の定式化及び時間分割幅の適応変更による誤差管理手順の検討について第5章に記述した比較を行い、その効果を明確にした。

第6章 エミュレータ・ハードウェア化 (PCI-Express への実装)

6-1 研究目的及び目標

6軸ロボットアームの機構計算アルゴリズムを市販の PCI-Express 基板に実装し、エミュレータとして機能させる。

6-2 実施内容及び結果

岐阜県情報技術研究所および学校法人早稲田大学を中心に機構計算アルゴリズムを市販 PCI-Express 基板上でハードウェア化し高速化を計った。多関節ロボットアームの機構計算は運動方程式を正攻法で解いていく手法では、現実的な時間では解くことが難しい。

そこでハードウェア化に適した並列演算アルゴリズムを開発し、市販の PCI-Express 基板に実装した。(図8参照)

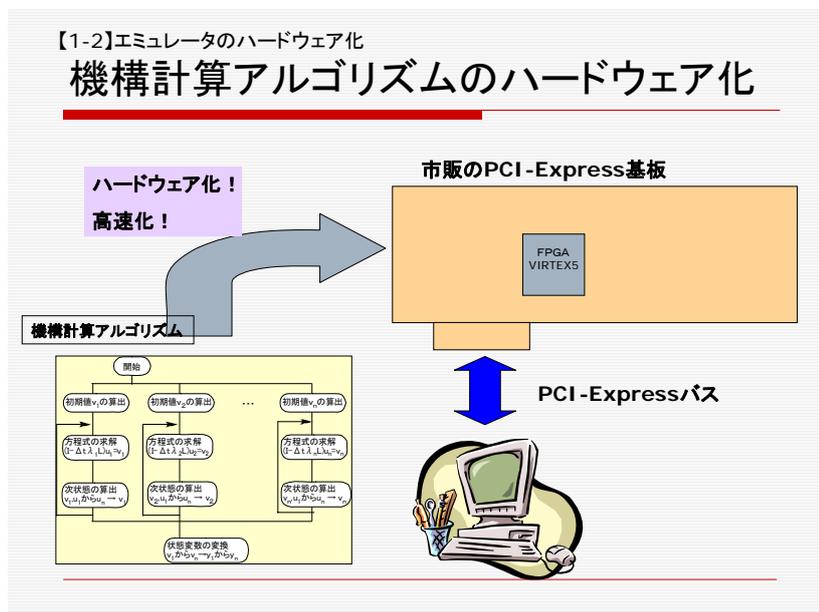


図8 機構計算アルゴリズムをFPGA基板 (PCI-Express) でハードウェア化

6-3 研究成果

6軸ロボットアームのエミュレーションを行い、ソフトウェア・シミュレーションと処理速度の比較をした結果、10倍以上の高速化を確認することが出来た。

6軸ロボットアームのエミュレーション演算時間として次のとおり得られた。

- ・主演算時間 0.5mS
- ・周辺処理時間 3.0mS

主演算時間はエミュレーションの主要演算がFPGA上の演算器およびロジック回路で処理される時間である。周辺処理時間は演算回路の制御およびデータ通信などに要する時間であり、試作システムではFPGAにMicroblaze (FPGA内に構成したCPU)によって行ったため、予期しない時間を要する結果となった。

エミュレーション時間刻みを4mSにすれば実時間のエミュレーションが実現する

ことになる。時間刻みを 1mS にすると実時間より遅くなるが、周辺処理をCPUからロジック順序回路に変更することにより、0.5mS 以下に抑えることが可能である。

6軸ロボットアームのエミュレーションを行ったPCI Express 基板搭載型の個別ユニットエミュレータの他、スタンドアロン型のエミュレータ基板も開発、制御用モータのエミュレーション・アルゴリズムを実装して、その動作を確認した。

第7章 エミュレータ・ハードウェアの開発

7-1 研究目的及び目標

個別ユニットエミュレータの実用化、商品化をめざしてコスト／パフォーマンスにすぐれたPCI-Express 実用化基板を開発する。

市販のPCI-Express 基板はFPGA ベンダが開発した汎用基板であるため、

- (1) 必要以上に高機能なFPGA が搭載されているため1枚が50万円前後と高価。
- (2) 汎用マイクロプロセッサが搭載されていないためエミュレータに必要なアナログ入出力などの機能を追加する必要がある。
- (3) 通常の組み込み制御プロセッサが備えているカウンタ／タイマ、シリアル通信、条件判定操作などをすべてハードウェア・ロジックで実現しているためFPGAのリソースの多くを費やしている。このため肝心のエミュレーション機能に供するパワーが不足する。

などの制約があった。

本委託事業で得られたエミュレーション技術をコスト的、性能的にも使いやすい商品として実用化するためには、次の物を備えたプロセッサを基板に実装した独自のPCI-Express 基板を開発する必要がある。(図10及び図11参照)

- ・ ローコストFPGA、Spartan3E
- ・ アナログ入出力、デジタル入出力
- ・ シリアル通信ポート

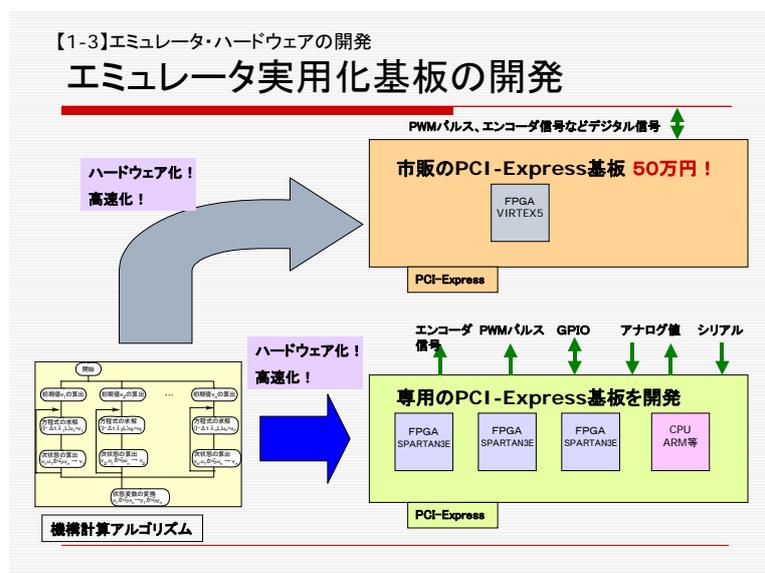


図10 個別ユニットエミュレータ実用化基板の開発

エミュレータ実用化基板の概要

- 個別ユニットエミュレータを実装する専用基板
- コスト／パフォーマンスに優れたPCI-Express基板
- ローコストFPGA、Spartan3Eを複数個搭載
- ARMプロセッサ
- 各種組み込みアプリ用入出力インターフェイス機能
 - アナログ入出力
 - デジタル入出力
 - シリアル通信ポート
 - カウンタ/タイマ、エンコーダ信号処理回路

図1 1 個別ユニットエミュレータ実用化基板の仕様と特徴

7-2 実施内容及び結果

図1 2に示す独自のPCI-Express基板を開発した。高価なFPGA；Virtex5に代えてSpartan3E1200を2チップ搭載し、アナログ入出力やPWM出力が可能なマイクロプロセッサ（STM32F103ZE）を搭載した。

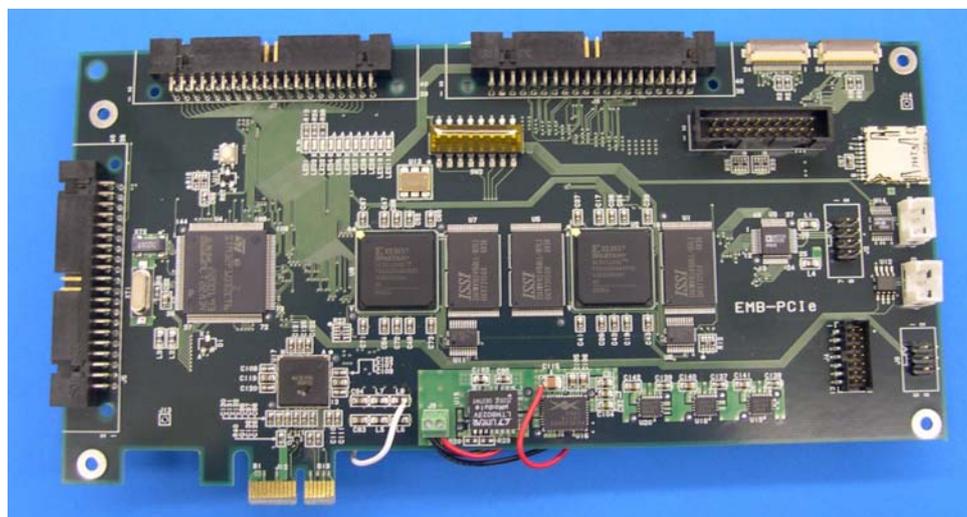


図1 2 個別ユニットエミュレータ実用化基板の外観

7-3 研究成果

市販のFPGA基板上で開発したエミュレータ・アルゴリズムを本基板上に搭載することにより、ローコストで利用しやすいエミュレータを提供することが可能になった。下表に仕様を示す。

表1 個別ユニットエミュレータ実用化基板の仕様

項目	機能	仕様
エミュレータ部	PCI Express インターフェース	1レーン
	搭載FPGA	Spartan 3E (XC3S1200-4FGG32C) × 2
	高速メモリ	4Mバイト × 3
	搭載マイクロプロセッサ	ARM Cortex M3 (STM32F103ZE)
インターフェイス部	アナログ入力	12ビット3ユニット21チャンネル
	アナログ出力	12ビット2チャンネル
	デジタル入出力	26ビット(CPU)、79ビット(FPGA)
	PWM出力	有
物理仕様	電源	PCI Express バスもしくは外部(16~36V)
	基板サイズ	111.15 × 210mm

第8章 個別ユニットエミュレータの評価

8-1 研究目的及び目標

個別ユニットエミュレータの評価をおこなうためには、組込み制御システムおよびエミュレータの制御パラメータ情報を時系列連続的に記録して解析する必要がある。このため個別ユニットエミュレーション・レコーダ装置を用意し、6軸ロボットアームの制御アルゴリズムとロボットアームのモーションを記録解析し、エミュレータの性能評価をおこなう。

8-2 実施内容及び結果

- (1) 制御マイクロプロセッサの制御パラメータ
- (2) センサ情報 (加速度、角速度、温度など)
- (2) 制御対象実機の情報 (エンコーダ信号、電圧、電流など)
- (4) エミュレータの情報

などをSD (SDHC) カードに高速・長時間記録できる個別ユニットエミュレーション・レコーダ装置 (図1 3参照) を用意し、個別ユニットエミュレータの機能の確認試験を行った。(図1 4及び図1 5参照)

エミュレーション・レコーダ装置



図1.3 個別ユニットエミュレーション・レコーダ装置

8-3 研究成果

モーションコントローラーの指示コマンドに対する、次のデータを収集し、実機とエミュレータのデータを比較することにより、個別ユニットエミュレータの基本機能を確認することができた。

- ・ 6軸ロボットアーム実機の関節角度データ及び関節に取り付けた加速度／角速度センサの情報
- ・ 個別ユニットエミュレータが生成する角度データ、加速度／角速度データ

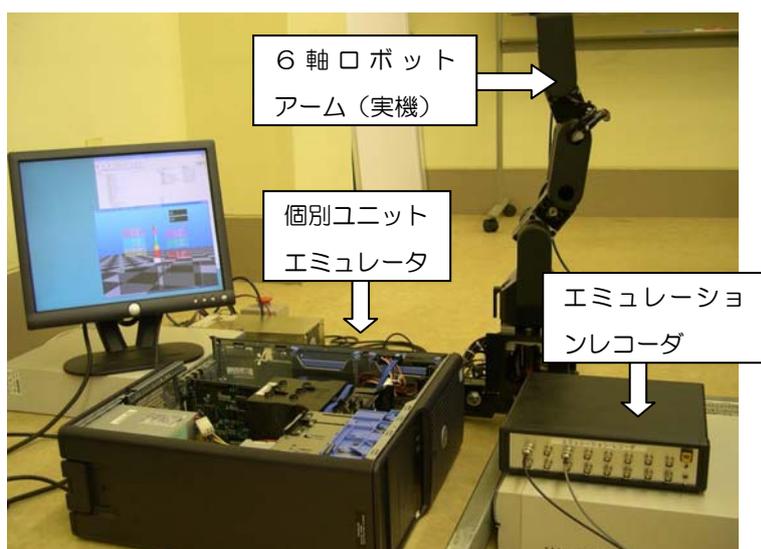


図1.4 6軸ロボットアームの機能を個別ユニットエミュレータでエミュレートする。

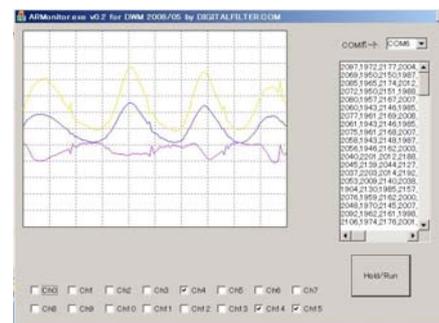


図1.5 エミュレータの動作をエミュレーションレコーダで記録

第9章 統合システムエミュレータの開発

9-1 研究目的及び目標

産業機械システムの数十年に及ぶライフサイクルの問題点を以下にあげる。

- ①設計・・・・・・・・システム全体を完成させた後でないとチェック不可能
- ②製作・・・・・・・・チェック漏れの発生
- ③メンテナンス・・・・納品された累積する機械
- ④再生・・・・・・・・納品後の機械の再生。

これらの問題を解決する手法として、本プロジェクトである“リアルタイム産業機械向けエミュレータ”のシステムを設計した。(図16参照)

9-2 実施内容及び結果

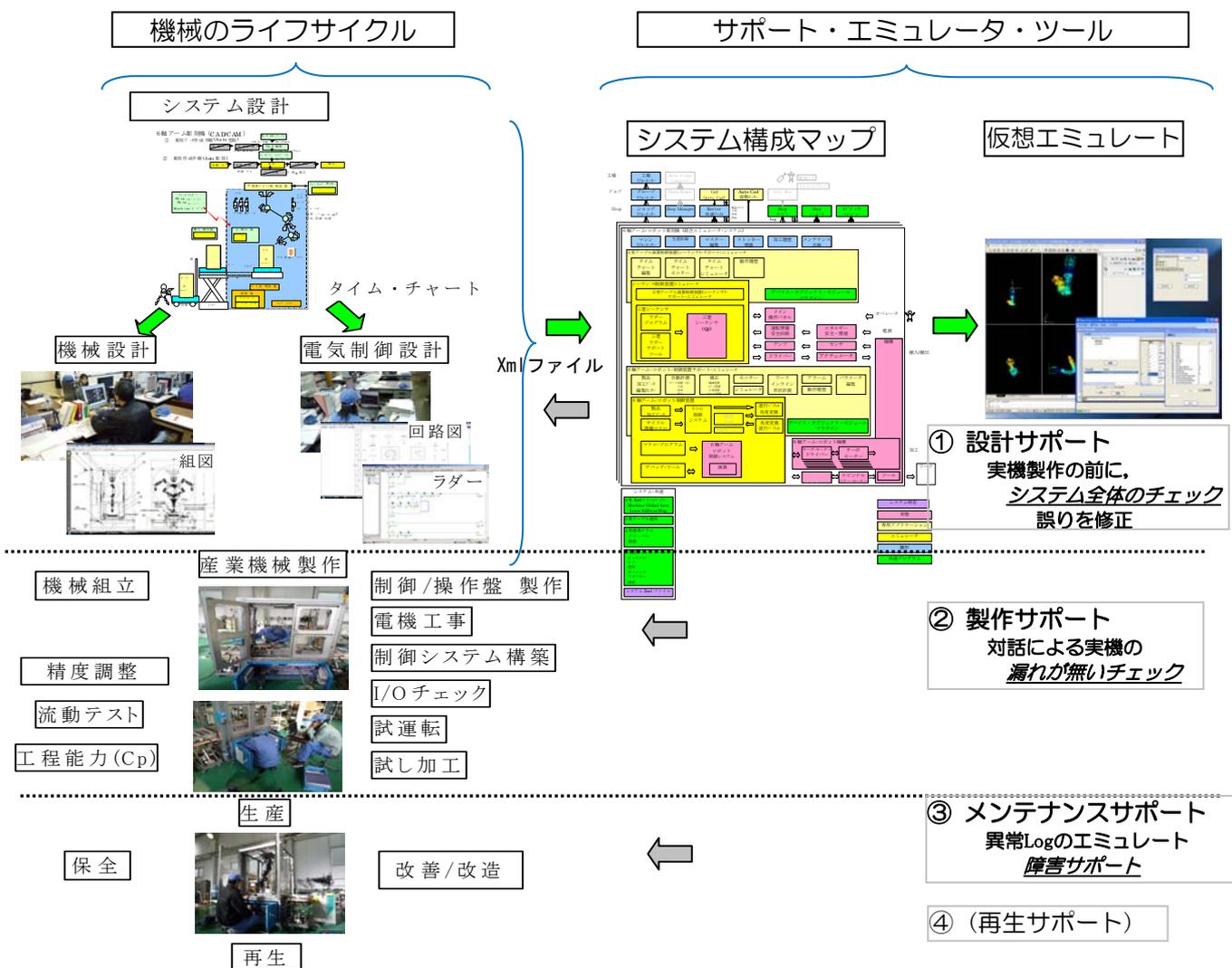


図16 産業機械システムのライフサイクルと本エミュレータとの関係図

1) 本エミュレータの構築

産業機械システムの製作では、多くの人が作業分担し図面や指示書等が製作準備さ

れる。この産業機械システムの製作の為に必要な専門集団が考えた設計データから、エミュレーションに必要な最低限の知識を持つ者が最低限の工数でシステム構成 Xml ファイルを作成し、産業機械システム全体のエミュレーションを行う。本エミュレータはその機械の為にツールであり、容易にエミュレーションできるように、エミュレータの為にプログラムを準備した。

産業機械システムにおける評価順位は、最も重要なシステムの**安全性**（安全、安心（信頼）、安定）、次に**製品**についての要求（品質:Quality、納期:Delivery、コスト:Cost、産業機械の主目的である。“人、物、情報”が滞りなく流れる自動生産性、そして**対環境性**（労働、自然等）の順となる。

2) 設計サポート

従来の機械システムのライフサイクルの設計では、機能展開した仕様書に対し、多くの人々が作業分担して設計する。各々の目的を達成する為、図面や指示書等が専門担当部署の人により製作準備される。この時作業は同時進行しシステム全体を把握する事が誤解等により困難となり、各々の目的を達成する手法やインターフェースが、システムに最適とならなくなる時がある。これは実際に機械を製作し動作したとき判明し、その時点からその問題に対応する。

本事業の成果として、実機製作の前にシステム全体の挙動を仮想的にエミュレートし、複数で様々な検証をし、早期に不適切な仕様を修正する事が可能となる。

また、同じ機能で手法が異なるオブジェクトを同時に駆動し、比較検討する事によりそのシステムの安全性、製品要求、生産性、対環境性を評価し、最適なオブジェクトを選択しバランスの良いシステムの構築が期待される。

3) 製作サポート

製作時の I/O チェック等は既存の方法では図面とチェックリストにより行うが、本エミュレータ・システムでは作業を標準化し対話により漏れない確認が可能となる。

4) 障害メンテナンスサポート

工場で稼働中の機械が故障した場合、既存の方法では現場の機械をモニターし、原因究明して一時対策及び恒久対策を行う。本エミュレータ・システムでは、異なる場所のパソコン上にて問題を発生した機械の動作 Log ファイルから、その機械をエミュレーションし問題解決を行う。

5) 再生サポート

工場で何年も稼働してきた機械のメンテナンスにおいて、交換しなければならない部品が生産中止で代替が準備されていない場合、その時手に入る同じ機能のものを接続する改造を行い、機械を駆動しチェックする。本プロジェクトのエミュレータでは、部品を代替交換（エミュレート）する事により、その改造がシステムに及ぼす影響を、事前に予測可能となる。過去の資料を解析するよりも、進化したアーキテクチャーを

取り込む手法はメリットがある。

9-3 研究成果

産業機械システムのライフサイクルの工程は非常に多く、本事業のエミュレータを応用出来る所も多くあるが、本プロジェクトでは6軸アームロボット彫刻機のエミュレータにおいて、次のとおり実証された。

設計サポート

- ・・・第10章 10-2 1) 機械の挙動エミュレーション
- 2) システム長期安定性試験

製作サポート

- ・・・第12章 12-2 1) I/Oチェックウィザード

障害メンテナンスサポート

- ・・・第10章 10-2 3) 異常Log再現テスト

第10章 6軸ロボットアーム彫刻機をサポート・エミュレータ・ツールの実証

10-1 研究目的及び目標

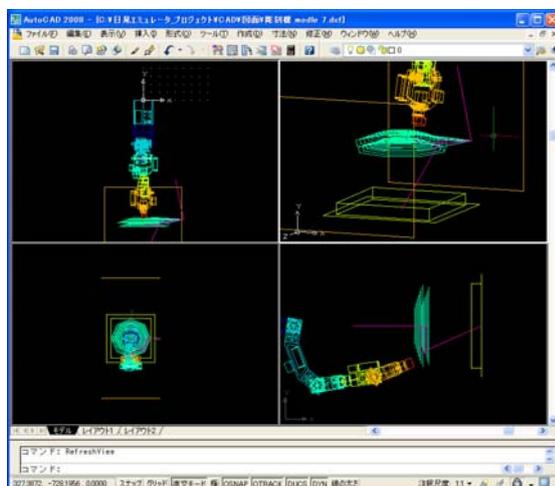
6軸ロボットアーム彫刻機において、その実機とそのサポート・エミュレータ・ツールを切り替え、姿勢という視点でその挙動が一致することを確認する。

10-2 実施内容及び結果

1) 機械の挙動エミュレーション

既存システムでは、物理的な機械を基にソフトを構築及び検証する。そのため、破損・事故等が発生する可能性が高い。本プロジェクトのエミュレータは機械の有無に関わらず、工場にある機械の動作ログ或いは動作試験ファイルから、別の場所のパソコン上にて仮想的に人の操作及び機械の挙動をエミュレーションし、破損・事故等のリスクが低く、システム全体の挙動のチェックが可能となる。

挙動エミュレーション



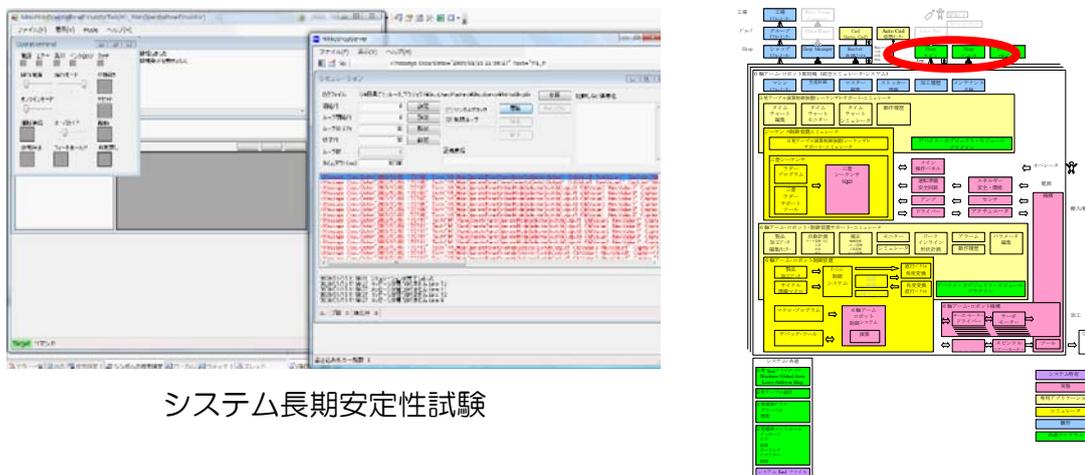
彫刻機（実機）



2) システム長期安定性試験

あらかじめオペレータの操作を含む長期安定性試験ファイルを作成しておく。

ファイルを選択し、彫刻機のエミュレーションを開始する。メモリ・リーク、ファイルサイズ、ディスク容量等、長期システムの安定性のチェックを行う。



システム長期安定性試験

3) 異常 Log 再現テスト

既存の異常解析は、異常が発生した時の Log を分析・解析して問題を解決する手掛かりとするが、本プロジェクトで準備した方法では異常が発生したときの異常動作ログファイルを選択し、エミュレーションを開始すると人の操作を抽出しエミュレートする。そのログファイルと異常動作ログファイルを比較検討し原因を究明し、応急対策及び恒久対策案を考案する。画面はシステム長期安定性試験と同じである。

10-3 研究成果

1) 機械の挙動エミュレーション

6軸ロボットアーム彫刻機において、その実機とそのサポート・エミュレータ・ツールを切り替え、姿勢という視点でその挙動がほぼ一致した。

2) システム長期安定性試験

物理相までのエミュレートでは、1動作当たり約1.3秒かかった。実機の動作時間は平均8.7秒で、約6.7倍の速度であった。しかし、システム長期安定性試験の目的が、メモリ・リーク、ファイルサイズ、ディスク容量等、長期システムのリソース安定性のチェックと考え、加工指令に対し実績を返すループバックにすると、1ワーク当たり約3.2秒、実際の加工時間は約18分なので、約337倍の速度であった。従って、1日で約1年分のエミュレートが出来た。

3) 異常 Log 再現テスト

異常 Log.Xml ファイルをエミュレートすると、問題発生場所が自動的に特定する事を確認した。

第11章 6軸ロボットアーム・サポート・エミュレータ・ツールの実証

11-1 研究目的及び目標

6軸ロボットアームの実機と6軸ロボットアーム・サポート・エミュレータ・ツールを切り替え、姿勢という視点でその挙動が一致することを確認する。

本6軸ロボットアーム・サポート・エミュレータ・ツールでは、「6軸ロボットアーム実機本位のサポート・ツール」、「6軸ロボットアーム・エミュレータ」、「6軸ロボットアーム実機のモニター」の3種の接続が可能ある。従って6軸ロボットアームを含む、上位（本彫刻機）システム全体の挙動が仮想的にエミュレーションでき、事故や破損をしない安全な本彫刻機システム全体のチェックが可能となる。

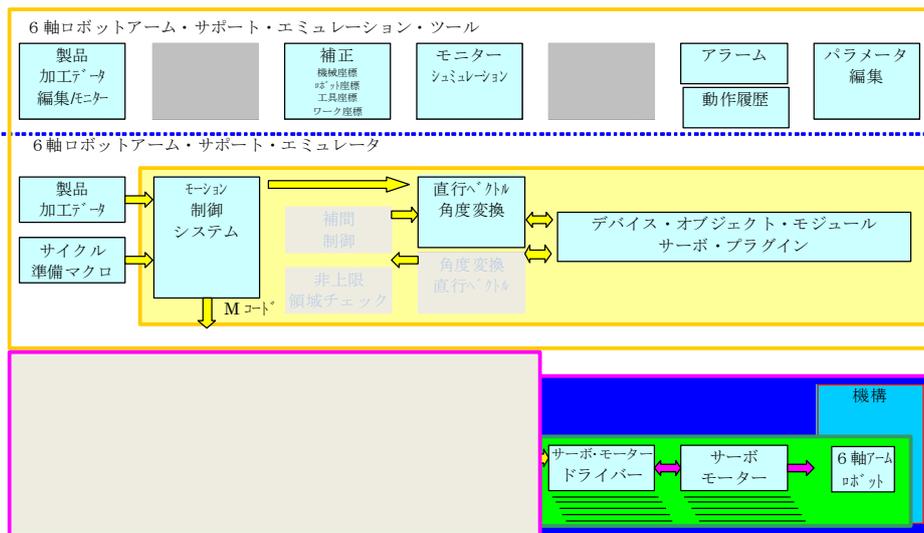
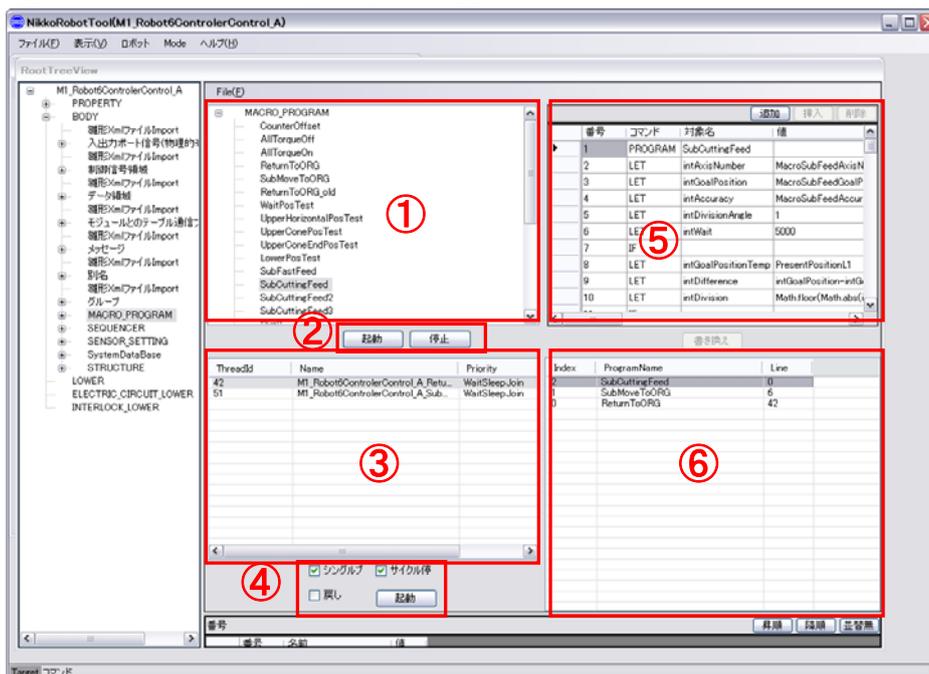


図16 6軸ロボットアーム・サポート・エミュレータ・ツール

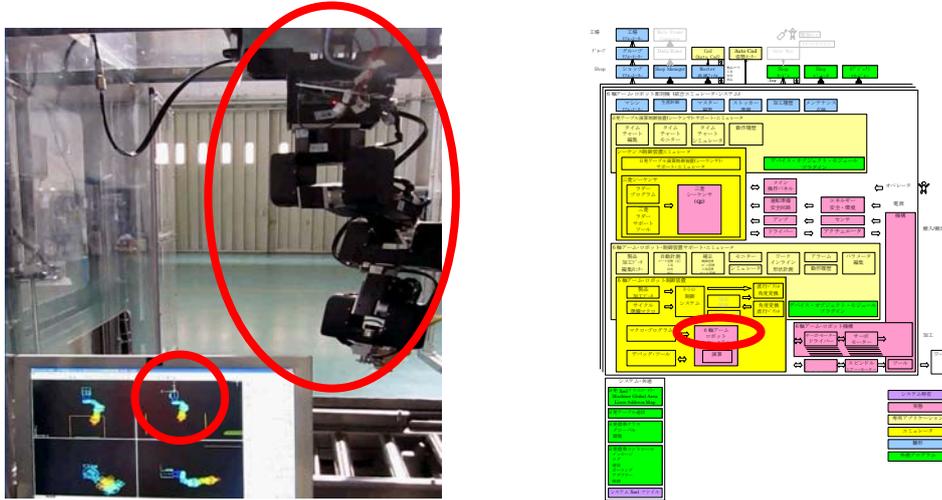
11-2 実施内容及び結果

1) 可逆マクロプログラムのデバッグ画面



2) ベクトル角度変換（逆運動学）オブジェクト・モジュール

ベクトル軌跡データ（ワーク座標系：X、Y、Z、ピッチ、ロール、ヨー）に、ロボット座標系、ワーク座標系、工具座標系を補正したカッターパス（逆運動学：6軸の関節角度）を計算するプログラムを作成する。



1 1-3 研究成果

6軸ロボットアームの実機と6軸ロボットアーム・サポート・エミュレータ・ツールを切り替え、姿勢という視点でその挙動がほぼ一致した。

第12章 シーケンサ・サポート・エミュレータ・ツールの実証

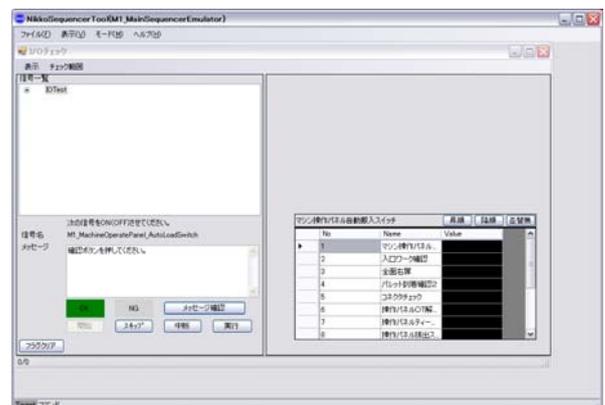
1 2-1 研究目的及び目標

既存の三菱シーケンサ・システムでは、ラダー・サポート・ツールにてラダー・プログラムをチェックする。本エミュレータ・システムでは、本彫刻機システムにおける三菱シーケンサ&ラダー・プログラムを日晷パターン・シーケンサにてエミュレーション（代行）する。従ってシーケンサを含む上位（本彫刻機）システム全体の挙動が仮想的にエミュレーションでき、事故や破損のリスクが少ない安全な本彫刻機システム全体のチェックが可能となる。

1 2-2 実施内容及び結果

1) I/Oチェック・ウィザード

製作時のI/Oチェック等は、既存の方法では図面とチェックリストにより行うが、本エミュレータ・システムでは、作業を標準化し、対話画面にて全ての入出力ポートについて名板、線番、場所等を漏れなく確認チェックする。



12-3 研究成果

本彫刻機システムにおける、三菱シーケンサ&ラダー・プログラムを日晷パターン・シーケンサにてエミュレーション（代行）すると、その挙動が一致した。

第13章 全体総括

13-1 成果の総括

1) 個別ユニットエミュレータ

本研究開発では FPGA ボード搭載可能な機構計算アルゴリズムの策定し、FPGA ボードでの動作を確認した。また、個別ユニットエミュレータの制御機能を有するデバッグインターフェースを開発し、個別ユニットエミュレータの計算結果が数値、グラフおよびアニメーションとして表示できることを確認した。

また、運動方程式の数値解析法を FPGA にて実行可能とすべく一連の検討を実施した。FPGA などの利用により実時間性を持たせることにより、単なるシミュレーションから組込みソフトウェア開発環境に融合され使用可能となるエミュレーションとして利用可能となる。FPGA の特性を考慮することにより、数値計算面からの利用では必ずしも複雑な演算は可能ではないが、誤差管理の側面を備えることにより簡便なアルゴリズムにより、エミュレーションを実施する時間や誤差の範囲を踏まえた利用が可能になると考えられる。

本事業の中心の柱となる「エミュレーション・アルゴリズムを FPGA ボードに搭載することによるハードウェア化、並列演算を採用した個別ユニットエミュレータを開発し、組込みソフトウェアの開発の信頼性向上、スピードアップを図る」という当初目標は達成できたと考える。

2) 統合システムエミュレータ

6軸ロボットアームの実機と6軸アームロボット・サポート・エミュレータ・ツールを切り替え、姿勢という視点でその挙動がほぼ一致した。今後は、自社商品として必要な他メーカーの商品モジュールの機能エミュレータを作成し、付加価値が高いエミュレータ機能付き自動生産機械装置の製作を行う。

13-2 今後の事業化に向けての取組み

1) 個別ユニットエミュレータ

本プロジェクトの成果物である個別ユニットエミュレータは

- ① FPGA 搭載 PCI-Express 基板」などの高速演算ハードウェア
- ② エミュレーション対象のロジック IP
- ③ ユーザ・インターフェイス用アプリケーション・ソフトウェア

で構成される。今後、市場ニーズを踏まえて「AC サーボモータ」、「多関節ロボットアーム」、「車載パネル・エミュレータ」など開発ターゲットごとにロジック IP、アプリケーション・ソフトウェアを開発し、すぐ使えるエミュレータ・モデルをラインアップし市場に供給していく。

また「エミュレータ単体ではなくて、開発基板、開発ツール、評価プログラムとエミュレータをキットにしたオール・イン・ワン型の開発キットとして供給してほしい」という市場ニーズを反映した商品化を進めていく。そのためにツール・ベンダ、チップ・ベンダとのアライアンスを視野に入れて事業化をすすめる。

2) 統合システムエミュレータ

本プロジェクトの最終成果物である、リアルタイム産業機械向けエミュレータのシステム構成マップは、日晷オートメの集大成であり、パソコン制御システム商品の雛形である。本プロジェクトを通し、共通基本プログラムや雛形プログラムが概ね出来た。受注の折には本エミュレータのアーキテクチャーを十分活用し、ターゲット機械システムにカスタマイズする。