

自動化装置開発支援統合システムに関する研究

多田 達実, 中西 洋介, 戸羽 篤也
鈴木 耕裕, 神生 直敏

Integrated Supporting System for Development of Automatizing Machinery

Tatsumi TADA, Yousuke NAKANISHI, Atsuya TOBA,
Takahiro SUZUKI, Naotoshi KAMIO

道内中小機械製造業では、高付加価値な機械装置の開発経験が不足気味であるため、度重なる試作によって性能をまとめ上げるという開発を行っているのが現状で、開発に必要以上の費用と時間を費やしてしまうこともよくある。本研究は、経験不足を補って効率的な開発を行うことができる手段・手法として、制御特性も含めた総合的な製品性能を試作前に予測し、試作回数を極力抑えることができるシステムの構築を独立に機能しているシステムの統合化によって行おうとするものである。特に、全体システムの構成および中核をなす機構シミュレーションシステム(ADAMS: Mechanical Dynamics 社)の実機制御性能予測への適合性の検討を実証モデルについての実験、シミュレーションの比較により行った。

北海道の工業は、構造の転換が遅れていることから、基礎資源型工業や地方資源型の工業が大部分を占めており、全国的に生産が拡大している加工組立型工業の比率が低い状況にある。

しかしながら、近年地場企業の中には研究開発に積極的に取り組んでいる企業が多く見られるようになってきており、産学官や異業種交流を足がかりに新製品、新技術への新しい取組みが活発になってきた。

中でもエレクトロニクスなどの先端技術を活用した製品の開発や、生産工程の自動化・システム化、さらにはメカトロニクス機器の開発などに関するものが多くなっており、今後さらにこれらに関する研究開発などが一層進むものと予想される。

開発環境も急変した。ここに来て、最近のコンピュータ技術の飛躍的な発達によって機械装置設計者がこれまで待ち続けてきたCAEシステムはかなりの実用性をもって市販されるようになった。特に、CAEシステムの中でも、複数の部品からなる機械装置全体の挙動解析を行う「機構シミュレーションシステム」は、自動車工業、航空宇宙産業、さらには家電業界の大手メーカーを中心に導入が進められ、試作前に多くの性能チェックができることで、試作を大幅に簡略化した効率的な製品開発を実現している。

一方、道内中小企業の状況を見ると、部品加工もしくは、アッセンブリ単位での製造組立が主で、完成品を扱っているところが少なく、利益率が高い高付加価値な機械装置の開発に体質の移行を図りたいという希望がありながらも、開発経験が不足気味で、度重なる試作によって性能をまとめるといふ開発を行っており、せっかくのアイデアも形になるまでに必要以上の開発費と時間を費やし、開発が完了しても製品そのもののシーズとしての時期を逸してしまうことも良くあるのが現状である。また、今後、大手機械製造メーカーの北海道進出に対処するため道内企業においても一層高度な生産技術が必要となってくることは明らかである。

さらに、道内企業においては、人件費の高騰、本州メーカーからのコスト削減の要求などの内外の圧力により企業の経営環境は厳しさを増している。また、一方で全国的に作業環境が良くない職場、いわゆる3K職場が敬遠され、人手不足が深刻となっている企業では、早急な自動化、省力化が存続のための不可欠条件となっている。

以上のような状況に対して、現在使用しているCAEシステム群を、機構シミュレーションを核として有機的に結合した統合システムを構築し、制御予測も含めた製品性能を試作前に予測できる仕組みを、道内中小企業に提供し開発効率を向上させることが一つの解決策となる。本研究は、そうした自動化装置の開発支援システムの構築を目指す取り組みの一環である。

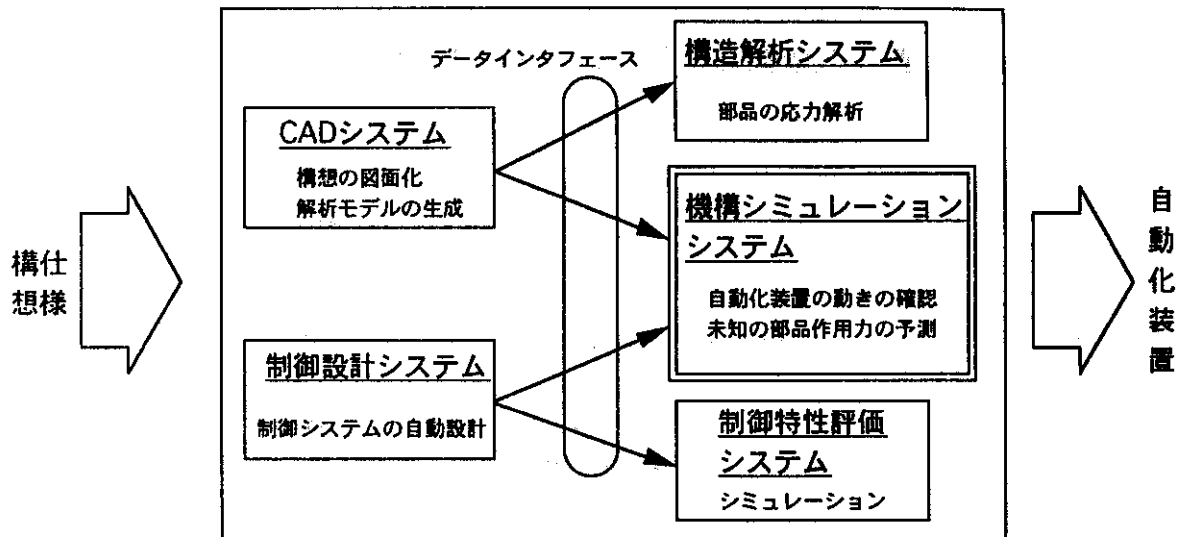


図1 自動化装置開発支援統合システム

本研究では、大手先進メーカーにおいて使用され、実績のある機構シミュレーションシステム（ADAMS：Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems）を核とした統合されたシステムの構築を行い中小企業を設計の側面から支援する。

本研究の目指すシステムの概要を図1に示す。

本システムは普段独立して機能している設計・解析システムと機械装置を開発する上で必須である制御設計システムから成り、それらをソフトウェアインタフェースにより結合することで所望の機能を発揮するものである。

本システムは以下の5つのサブシステムから構成される。

- ① CAD システム
- ② 制御設計システム
- ③ 構造解析システム
- ④ 機構シミュレーションシステム
- ⑤ 制御特性評価システム

以下、各システムについて詳しく述べる。

(1) CAD システム

一般的に CAD システムは構想を図面化する製図機能があれば十分であるが、本システムにおける CAD システムの位置付けは、他の解析もしくはシミュレーションへのモデルを

効率的に作成するツールである。従って、本 CAD システムにおいては、3次元モデリング機能は不可欠であり、しかも、その内部データはフォーマットが十分詳しく公開されており、必要な形状情報を表現するデータ量も小さい必要がある。できれば、そのソフトは広く企業に普及していることが望ましい。

(2) 制御設計システム

近年の装置において、機構を駆動するアクチュエータの自動制御は、動作を実現する機構と同等に重要である。一般に、機構の設計を行う CAD システムは、ほぼ完成の域に達し、市販されているが、制御設計を行うそれは、ワークステーションレベルで産声を上げたばかりである。また、一般的な装置制御には、シーケンス制御で十分であることが多く、比較的扱いが容易であるのにも関わらず、そのような視点にたった実用的なシステムが存在していないのが現状である。本システムには、制御仕様、例えばタイムチャートを対話的に作成することで、シーケンスのロジックが自動的に展開されるような機能が必要となる。

(3) 構造解析システム

本システムは、複雑形状をした部品の応力解析を行うシステムで、CAD システムから得られた部品形状に対して機構シミュレーションによって予測された装置に発生するマクロな力を作用させ、部品に発生する応力を予測するシステムである。

(4) 機構シミュレーションシステム

本システムは、緒言で述べたように、装置の動きによって各構成部品に生じる力を予測するためのシステムである。本

システムでは、制御特性を機構を構成する一つの要素として定義することができ、制御特性も含めた装置全体の挙動を予測することができる。また、本システムでシミュレーションできる動きは時間的に連続なものが基本であるが、「条件信号により各部品がシーケンシャルに動く」という機能が実現できると実際の装置の動きを画面上で確認することができ、可視的なプレゼンテーションとしての多方面な利用が期待できる。

(5) 制御特性評価システム

本システムは、(2)制御設計システムの性能確認をするためのシステムであり、(2)で生成されたシーケンスプログラムを入力として与えることで、制御対象のシーケンシャルな動きをタイムチャート表示により簡便に確認することができ

る。

(6) システム構築に向けての取り組み

① CAD システム

他システムとのデータ交換の方法について現在設計製図用に使用されている CAD システム (Auto Desk 社 AUTOCAD) と他システムとのデータ互換性について検討した。その結果、AUTOCAD 側から外部システムとの変換ファイル (DXF ファイル) が提供されており、他のシステムの入力ファイルも同様に公開されていることから、ファイルの対応関係を調査整理し、適当な変換を行うプログラムを作成することでリンクが可能であることが分かった。

図 2 に Auto Desk 社が使用している DXF ファイルのフォーマットを示す。

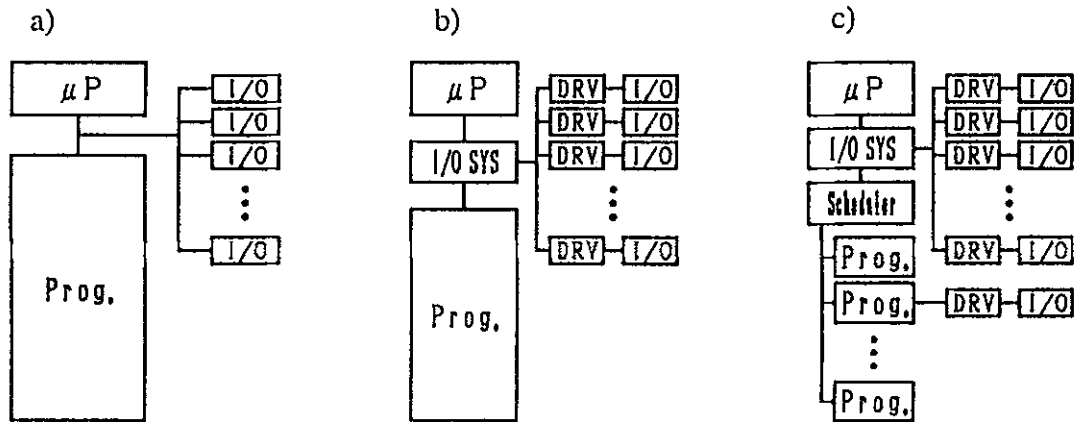
ファイル構造

HEADER (見出し) セクション ・図面の全般的な情報
TABLES (テーブル) セクション ・線種 : LTYPE ・画層 : LAYER ・字体 : STYLE ・視点 : VIEW ・ユーザ座標系 : UCS ・ビューポート設定 : VPORT ・寸法スタイル : DIMSTYLE ・アプリケーション識別 : APPID
BLOCKS (複合図形) セクション ・複合図形定義データ
ENTITES (データ) セクション ・図面データ
END OF FILE (ファイルの終わり)

ENTITES データ

グループコード	意味
0	ファイル分離符号、テーブルの記入項目、データの開始を示す
1	1つのデータに対する最初の文字の値
2	名前 (属性名称、複合図形名)
3~4	その他も文字の値あるいは名前
5	16進数文字列として表される図形ハンドラ
6	線種名
7	字体名
8	画層名
9	変数名の特定 (DXFファイルのHEADERで使用)
10	最初のX座標
11~18	その他のX座標
20	最初のY座標
21~28	その他のY座標
30	最初のZ座標
31~37	その他のZ座標
38	図形の高度
39	図形の厚さ
40~48	浮動小数点値 (文字の高さ、尺度)
49	反復値
50~58	角度
62	色番号
66	後続図形ありフラグ
70~78	反復数、フラグビットあるいはモードなどの整数値
210、220、230	突出方向のX、Y、Z成分
999	コメント

図 2 DXFファイルフォーマット



- a) 最もシンプルなプログラム構造
- b) 入出力プログラムのモジュール化
- c) 多プロセスの並列処理

μP : マイクロプロセッサ
 I/O : 入出力プログラムのモジュール化
 Prog. : フロー制御プログラム (プロセス)
 I/O SYS : 入出力管理プログラム
 DRV : 入出力制御プログラム (ドライバ)
 Scheduler : 多プロセス管理用プログラム

図3 制御プログラム開発支援システム

② 制御設計システム

対象とする制御システムをシーケンス制御とデジタル制御に分け、それぞれについて開発試験を行った。

1) シーケンス制御設計

各種シーケンスコントローラの機能調査を行い支援システムに要求される基本機能の整理を行った。また、機構シミュレーションへの制御性能予測機能の組み込み可能性について検討を行った。その結果 ADAMS への組み込みは運動を定義するモーション要素に動きの時間変化を示す関数を定義することにより可能であることが分かった。

2) デジタル制御設計

速度が要求され、かつ柔軟な機械の制御を実現するには、マイクロプロセッサを利用したデジタル制御手法の導入が必要である。しかし、この手法を用いる場合、フロー全体の制御、入出力装置制御、システム全体の管理など、複雑なプログラム作成作業を伴うため、多くの労力と時間を費やさなくてはならない。

そこで、マイクロプロセッサを利用した制御系設計を、少ない労力で行う開発支援システムの設計を試みた。本システムは、特に入出力関連プログラムのモジュール化と、多プロセスの並行処理に重点をおいた。

図3に制御プログラム開発システムの概要を示す。

最もシンプルなプログラム形態は、図3-aのように1つのプログラムがフロー制御、入出力制御を行う形式である。この形式は、汎用性、互換性に乏しく、開発効率も低い。図3-bのように、入出力部分をフロー制御プログラムと切り離し、モジュール化すると、入出力プログラムが部品化されることから、汎用性、互換性が向上する。さらに、図3-cのようにフロー制御プログラムを小さな単位に分割して並立実行すると一つ一つのプログラムが簡潔になることから、デバッグ時のミスの発見が容易になり、プログラムの開発効率が向上する。こうした概念設計のもと、8ビットマイクロプロセッサ(Zilog製 Z80-CPU)を対象とし、具体的な開発支援システムを試作した。

③ 構造解析システム

応力解析に利用している有限要素解析システム(EMRC社 NISA II)とパソコンCADシステムとのリンクを検討した。NISA IIから提供されるニュートラルファイルのフォーマットを調査した結果、他システムとのデータ交換が可能であることを確認した。

図4にNISA IIが使用しているニュートラルファイルのフォーマットを示す。

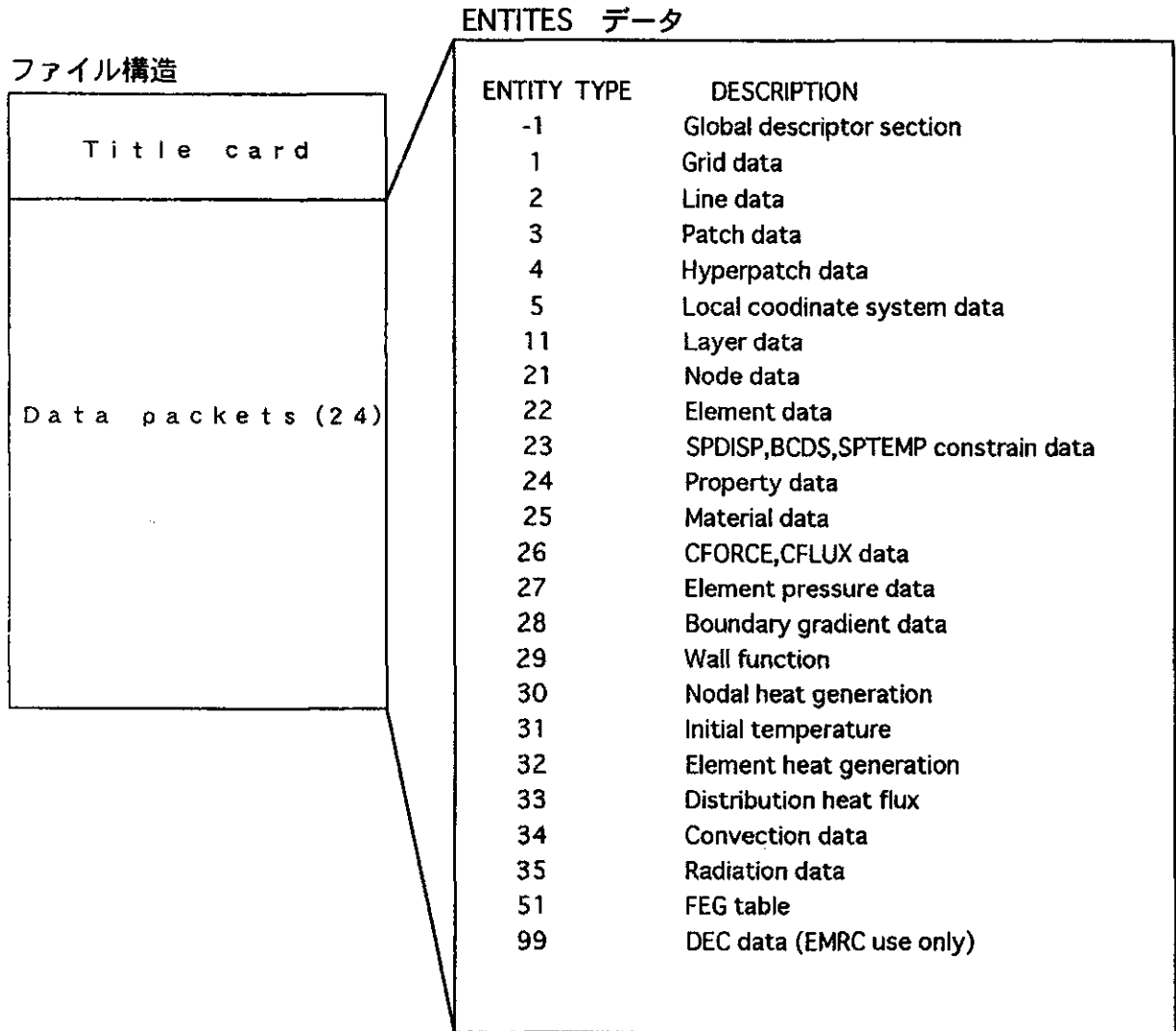


図4 ニュートラルファイルフォーマット

④ 機構シミュレーションシステム

制御則の組み込み性について、簡単なモデルを作成し、制御要素の具体的な使用方法について検討した。また、機構シミュレーションのモデリング（部品形状、モーション）のファイル形式を調査し、他システムとのデータ交換が可能であることを確認した。

⑤ 制御特性評価システム

シーケンス制御の評価方法としてタイムチャートベースの評価システムの基本構想をまとめた。

ンできるシステム ADAMS は効率的な開発を行う上で強力な手段となる。本研究では、ADAMS において①フィードバック制御特性を含めたシミュレーションモデル構築が可能か、また操作性はどうであるか。②シミュレーション結果と実機の挙動との対応関係について、比較し易い実証モデルを製作して両者の差違を検討した。

(1) 実験装置

実験装置として製作した倒立振り子の装置構成を図5に示す。

高付加価値な自動化装置には、定値制御や追値制御などのフィードバック制御が不可欠である。そうした装置を開発する場合、機構と制御の適合性が大きな問題となる。そういった意味から、制御特性を含めた機構の挙動がシミュレーンヨ

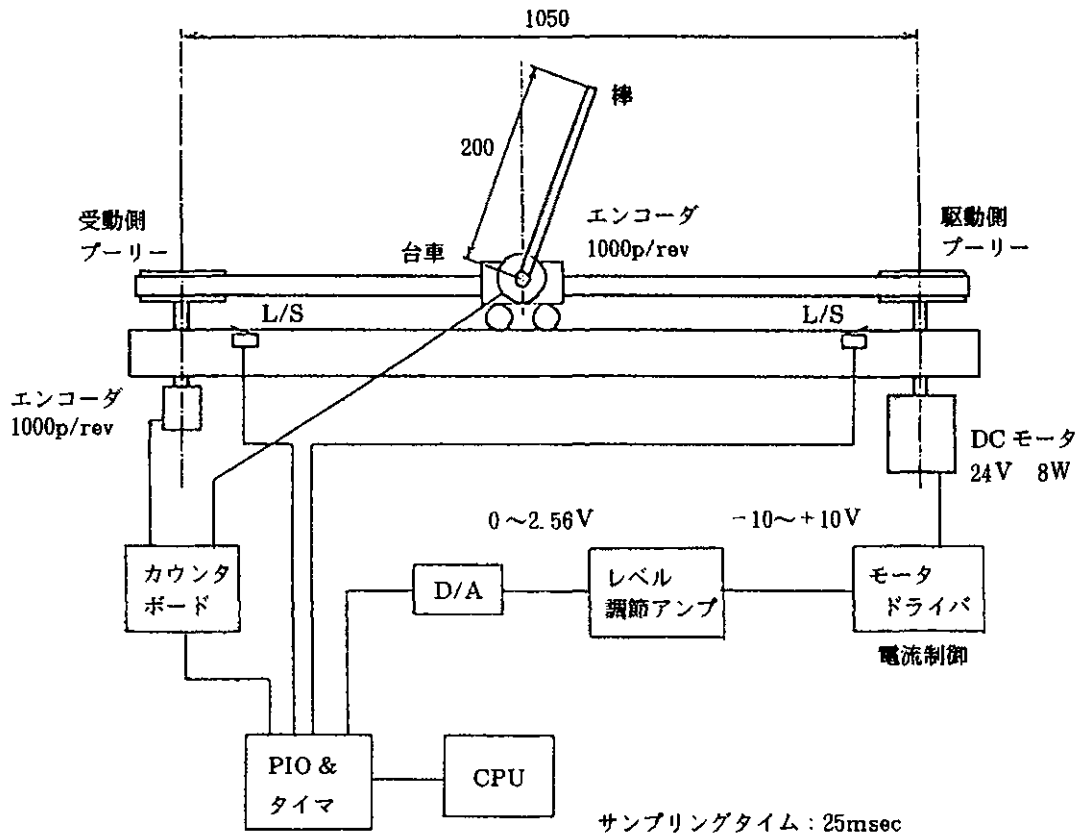


図5 倒立振り子装置構成

台車は質量が小さく伸びの少ない絹糸で接続され、プーリーを介してDCモータにより駆動される。また、台車の位置は、DCモータに直結された駆動側プーリーと対をなすもう一方のプーリーに取り付けられた1000pulse/revエンコーダにより検出される。さらに、台車の走路の両端にはオーバーラン防止用のリミットスイッチが取り付けられている。さらに、振り子自体の傾きは、台車と振り子を回転自在に結合するエンコーダの出力によって知ることができる。

制御時には、台車の位置および傾きはエンコーダからの出力パルスがカウンタボードにより計数され、その積算値が計算機に取り込まれ、倒立振り子が倒れないようにD/A変換ボードを介して指令値がモータドライバに与えられる仕組みとなっている。なお、倒立振り子を立たせる制御では、振り子に作用する力を制御する必要があり、そのためモータドライバは一般的な電圧制御ではなく電流制御用となっている。

(2) 倒立振り子の姿勢制御
倒立振り子の制御モデルを図6に示す。

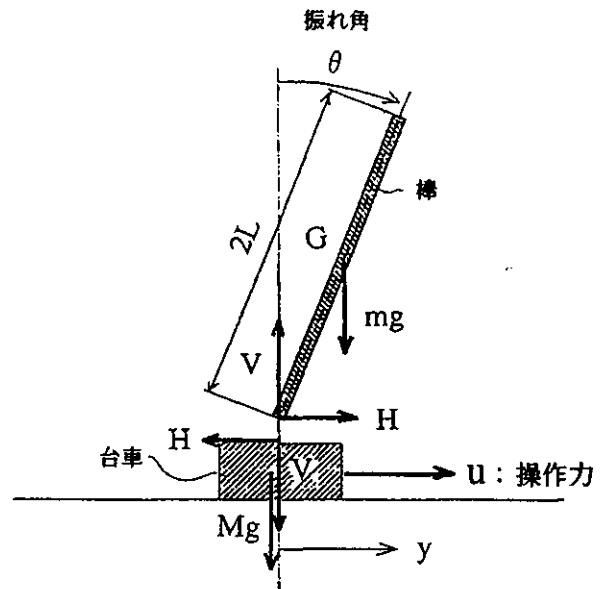


図6 倒立振り子制御モデル

振り子は、長さ $2L$ 、質量 m の棒が質量 M の台車に回転自在に支持され、台車に適当な操作力 u を作用させることにより倒れないような制御を実現することができる。

以上のような制御を実現した制御のブロック図を図7に示す。

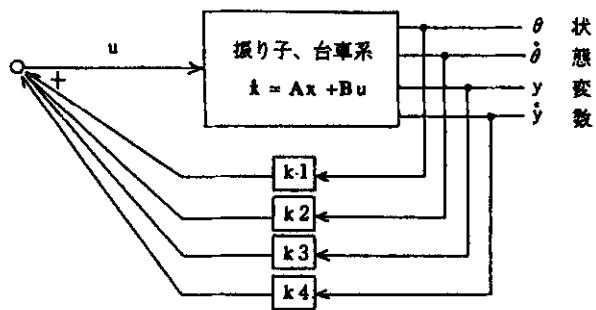


図7 倒立振り子制御ブロック図

ここで、台車、振り子系への操作力は以下の式で表現される。

$$u = Kx \quad K: \text{フィードバック係数行列}$$

$$x: \text{状態変数行列}$$

また、振り子の挙動は次式に示される。

$$x = Ax + Bu \quad A: \text{システム行列}$$

$$B: \text{配分行列}$$

ここで、AおよびBは振り子・台車系の運動方程式から求められる、

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ b & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ c \\ 0 \\ d \end{pmatrix}$$

また、a, b, c, dは、以下の式で求められる。

$$a = \frac{mL(m+M)g}{I(m+M)+mML^2} \quad c = \frac{mL}{I(m+M)+mML^2}$$

$$b = \frac{m^2L^2g}{I(m+M)+mML^2} \quad d = \frac{I+mL^2}{I(m+M)+mML^2}$$

※ I: 棒の重心Gまわりの慣性モーメント

なお、フィードバックゲインは、振り子・台車系が安定となるよう極配置法により以下のように決定した。

$$K = [10.49, 0.8723, 0.3414, 0.4097]$$

ここでの極配置法とは、可制御な線形状態方程式で表されるシステムを対象として、状態フィードバック制御を行った時、制御系の特性根(極)が指定した値となるフィードバック係数行列を決定する設計手法を言う。

(3) ADAMS シミュレーションモデル

ADAMSのシミュレーションモデルは基本的には図6と同様であるが、ADAMS独自の記述もあるのでここで説明する。

ADAMSは、機械を質量特性(重心、慣性モーメント)等が明確に定義された複数部品の各種ジョイント(回転、直動、球)を介した結合体として定義する。

図8に倒立振り子のADAMSモデルを示す。

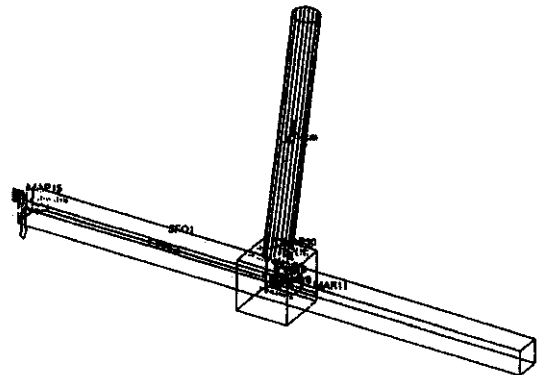


図8 倒立振り子ADAMSモデル

本モデルは、3個の部品(棒、台車、レール)と2個のジョイント(回転、直動)から構成されており、台車への作用力は、ADAMSの力要素として提供されているs-forceを用い、前述の制御則(状態フィードバック)を表す関数形式で定義した。

すなわち、

$$u = k1 \cdot \theta + k2 \cdot \dot{\theta} + k3 \cdot y + k4 \cdot \dot{y}$$

で与えた。

(4) 実験とシミュレーションとの比較

実験により得た振り子の振れ角の時間変化を図9に、同様なシミュレーションの結果を図10に示す。

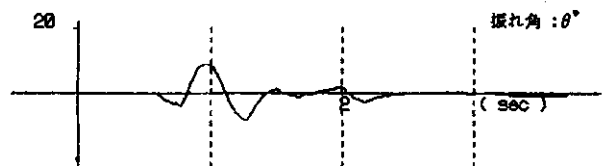


図9 倒立振り子振れ角の時間変化

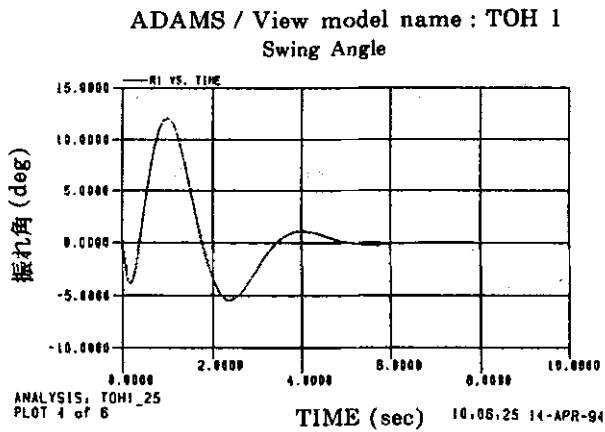


図10 倒立振り子シミュレーション結果

両方の結果を比較すると、収束時間など定量的には異なった結果となっているが、収束する様子は定性的にほぼ一致した。

このように、定量的な差が出た理由としては、ADAMS のモデリングにおいてパラメータの実機への適合が不十分であったことが考えられる。

(5) 今後の取り組み

ADAMS では、リンクモーションなどの運動学的解析については、簡便なモデリングで実用に供する結果を得ることができるが、制御を含んだ動力学解析においては制御対象の実際の挙動に合致した ADAMS パラメータの設定が必要となる。そこで、今後は利用頻度が高い機構から、実験的にパラメータと機構の対応関係についてのデータを蓄積し、その効率的な利用方法について検討する必要がある。

機構シミュレーション ADAMS を中核とした自動化装置の開発を支援するシステムについての研究を行い以下の結果を得た。

- ① 機構シミュレーションシステム (ADAMS) と現在設計業務に使用されている既存システムを構成要素とした、試作前に製品性能を予測するための統合システムの設計を行い、基本システムの要件をそれぞれ整理した。
- ② 機構シミュレーションシステム (ADAMS) を用いた制御性能予測の可能性を実証モデルの実験およびシミュレーションにより明らかにした。

今後は、開発が完了できなかった基本システムの開発を進め、統合システムを完成させ、道内企業への効率的な開発に

寄与して行きたい。

- 1) 金原昭臣, 黒須茂 共著:「デジタル制御入門」, オーム社
- 2) 土手康彦, 原島文雄 共著:「モーションコントロール」, コロナ社
- 3) 石田勝久 ら 著:「メカニカルシステム制御」, オーム社
- 4) 宮崎誠一, 宮崎仁 共著:「パソコンで学ぶ自動制御の実用学」, CQ 出版社
- 5) 宮崎誠一, 宮崎仁 共著:「パソコンで学ぶ自動制御の実用学」, CQ 出版社