

ロボットの動的設計支援システムの開発

川端将司*・本家浩一*・西村利彦**・廣岡栄子***

*技術開発本部・機械研究所 **FA・ロボット本部・開発室 ***㈱コベルコ科研

Development of a Computer-aided Design System for Robot Dynamics

Masashi Kawabata・Koichi Honke・Toshihiko Nishimura・Eiko Hirooka

A computer-aided engineering system for robot design, using dynamic simulation, was developed. The system has two parts: approximate preliminary design analysis, and detailed design using precise simulation based on the SINDYS nonlinear dynamic simulation program. The precise analysis part can calculate the elastic distortion of robot arms, reduction gears and support frames, including controller dynamics. The system is easy to operate and very useful for the development of robotic systems.

まえがき = 近年、産業用ロボットにおける高性能化、多目的化および低価格化の要求が高まっている。低コスト化のためには、軽量化や開発期間の短縮が必要であり、開発設計段階での最適な機構設計、モータや減速機の選定、強度評価、制御方法の検討および目的とする作業に対する性能評価を迅速かつ精度よくおこなわなければならない。

大変形運動、制御系を含めたロボット動的挙動解析技術に関して、著者らの開発した非線形動的解析プログラム SINDYS をもちいて、関節部の弾性、減速機の非線形性およびアームの弾性挙動などを考慮した多関節ロボットの大変位挙動解析が精度よくおこなえることが報告されている¹⁾²⁾。

そこで、この SINDYS による解析技術をもちいて、ロボットにおける基本設計、詳細設計の各段階で効率的に事前検討がおこなえる設計支援システムを開発した。このシステムをもちいることにより、設計者でも容易に動的挙動を加味した仕様検討をおこなうことができ、開発期間の短縮やコスト削減、性能向上に役立っている。

1. システムの概要

通常ロボットを開発する際には、まず要求される仕様を満足するための自由度数やリンク機構の選択、アーム長、機械要素の配置などについての一次案が決定される。次にモータや減速機の選定、制御方法の検討などが進められ、最終的には限界性能を狙った詳細設計がおこなわ

れる。

第 1 図にシステム構成の概略を示す。本システムはこれらの各設計段階での動的特性にかかわる部分に着目し、段階に応じた事前検討をおこなうツール群により構築されている。

基本設計段階では、ロボットが目標どおりに動作したときの簡易解析をおこなうツールによりモータ、減速機などの大まかな仕様検討ができるようにし、詳細設計段階では、SINDYS による詳細解析により制御系を含めた系の動的挙動、あるいは汎用解析ソフト NASTRAN と SINDYS を併用した解析により、ロボットアーム自体の剛性やロボットを支持するフレームの剛性を考慮した設計を可能としている。

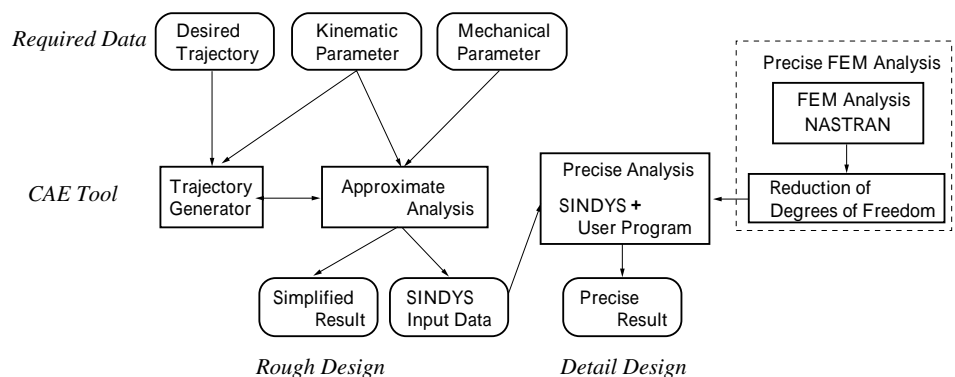
2. 解析手法

2.1 目標軌跡の生成

リンク機構やアーム長など、機構パラメータが決定し、次のステップとしてロボットの動的な性能評価をおこなうためには、まず目標とする動作を与える必要がある。

動作目標軌跡の生成には、実機ロボット制御装置内に組み込まれたロボット軌跡制御ソフトウェアをそのまま流用した目標軌跡生成ツールをもちいている。

このツールは設計中の対象ロボットを再生動作させた際の、先端位置や関節角度の時系列変化を実機をもちいずにパソコン上で忠実にシミュレートすることができる。



第 1 図 設計支援システムの構造
Fig. 1 Construction of the CAE system

この段階で、作動領域や特異点など、与えられた軌跡をロボットが実現できるかを事前に検証することが可能である。

シミュレート結果は、以降に述べる簡易解析や SINDYS による詳細解析に入力され、実際の生産現場でのロボットの動作に則した、有効な動的解析が可能となる。

2.2 簡易解析

基本設計の段階で、ロボットの機構、設置方向、アーム長、重量配分、モーター・シャ、減速機の減速比・剛性・効率など、機構に関するパラメータと、評価をおこなうための目標軌跡が決定すれば、モータの目標回転角、角速度、角加速度が計算される。

さらにロボットが剛体であると仮定すれば、次に示すロボットの運動方程式に基づいてモータのトルクが算出される。

$$J(\ddot{\theta}) + C(\dot{\theta}, \theta) + D\dot{\theta} + P(\theta) = \tau \quad \dots (1)$$

ここに、 θ は関節角度をあらわし、左辺第一項は慣性力、第二項は遠心・コリオリ力、第三項は粘性摩擦項、第四項は重力項で、 τ はモータトルクをあらわす。

この $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ に先に求めた目標回転角、角速度、角加速度を代入することにより、ロボットが目標どおりに正確に動作したときのモータに必要なトルクが算出され、この結果をもとにモータの最大回転数や最大トルク・平均トルク、減速機の疲労強度などの大まかな検討をおこなうことができる。簡易解析においては、制御系の特性、ロボットアームや減速機の剛性およびがたなどの非線形性を無視して解析をおこなっているため、詳細な精度はえられないが、SINDYS による詳細シミュレーションにくらべて非常に短時間でおこなうことができるため、基本設計段階でのトライ＆エラーに有効に活用できる。またこのツールでは、同時に SINDYS でおこなう詳細解析に必要なインプットデータを作成することが可能である。

この簡易解析および詳細解析用インプットデータの作成に必要な機構パラメータの入力は、設計者でも容易にデータ作成が可能で、第2図に示したようなデータジェネレータをもちいて簡単におこなえる。

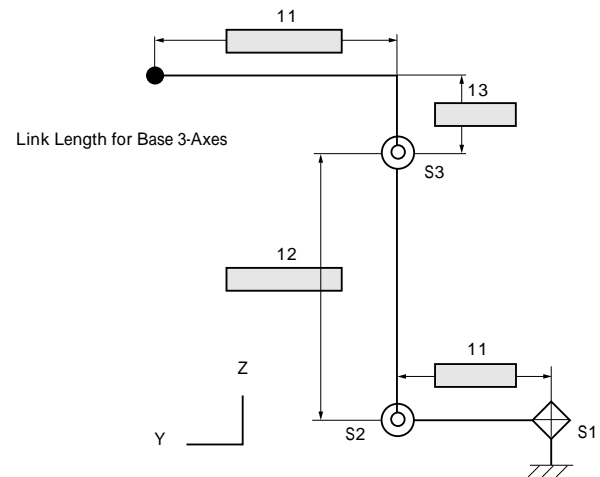
2.3 詳細解析

ロボットのようなリンク機構の動的挙動解析をおこなうためには、部材や減速機の剛性も考慮した構造系のダイナミクス、摩擦、がたなどの非線形性、および制御系の動特性を考慮する必要がある。これに対し、著者らの開発した非線形動的解析システム SINDYS による方法が非常に有効である。SINDYS では、機構系、モータ、制御系からなる複雑なシステムの運動と振動のシミュレーションを実施するにあたり、通常有限要素法と同様に系全体を有限個の要素に分割し、個々の要素の特性や座標、結合状態を入力することにより次の運動方程式が自動的に組立てられる。

$$(M_L + M_N)\ddot{u} + (C_L + C_N)\dot{u} + (K_L + K_N)u = F - F_N \dots (2)$$

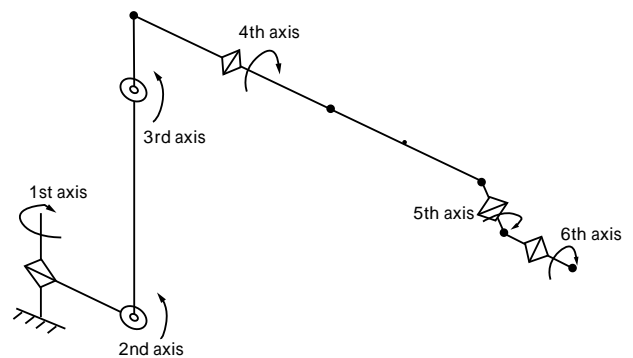
ここに、 M_L, C_L, K_L は線形の慣性、減衰、剛性マト

Comment	
Robot Type	<input checked="" type="radio"/> Serial <input type="radio"/> Parallel
Title	



Base Angle	rad			
Motor Property (Input Side)				
		S1	S2	S3
	Units	(Type)	(Type)	(Type)
Inertia	Kgm ²			
Damping Coefficient	Nms/rad			
Reduction Gear Property (Input Side)				
		S1	S2	S3
	Units	(Type)	(Type)	(Type)
Inertia	Kgm ²			
Coulomb Friction	Nm			
Damping Coefficient	Nms/rad			
Gear Ratio	-			
Spring Constant	Nms/rad			
Pulley Ratio	-			

第2図 シミュレーションデータ入力シートの一部
Fig. 2 A part of data input sheet for simulation



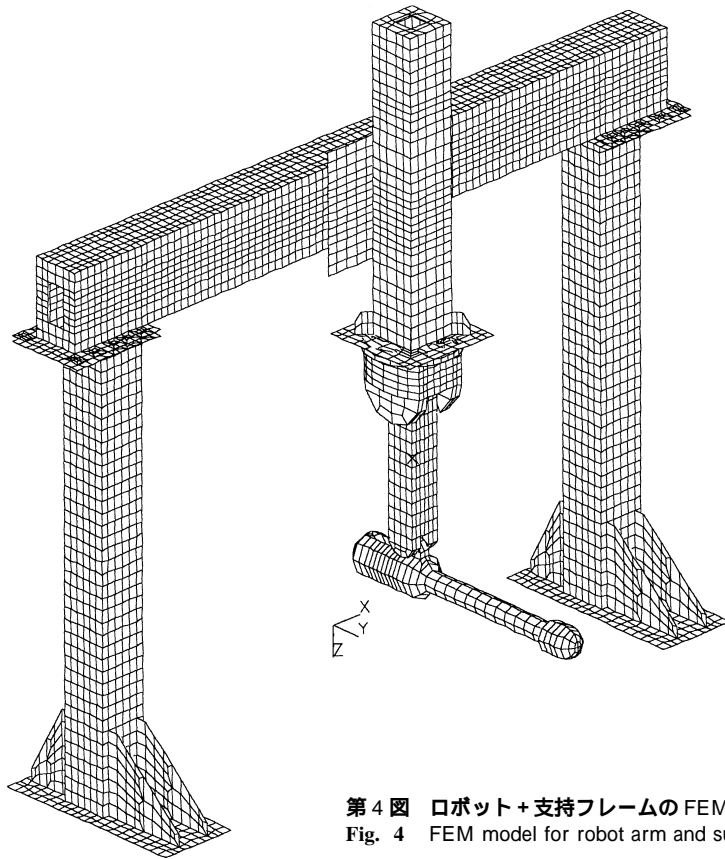
第3図 SINDYS 解析モデル
Fig. 3 Simulation model for SINDYS

リクスをあらわし、 M_N, C_N, K_N は非線形の質量、減衰、剛性マトリクス、 F は外力、 F_N は非線形部分によって生じる補正外力、 u は一般化変位である。

式(2)を数値積分することにより、時刻歴応答シミュレーションが可能となる。

ロボットのシミュレーションにおける SINDYS の解析モデルは、構造系については大変位はり要素で、また減速機などについては非線形ばねや摩擦要素によってモデリングしている。第3図に6軸ロボットの SINDYS の解析モデル概略図を JIS の表記法に基づいて示す。

制御系に関しては、アナログ制御部(およびサンプリングの十分早いデジタル系)とデジタル制御部に大別さ



第4図 ロボット+支持フレームのFEMモデル
Fig. 4 FEM model for robot arm and support frame

れそれぞれ扱いが異なる。

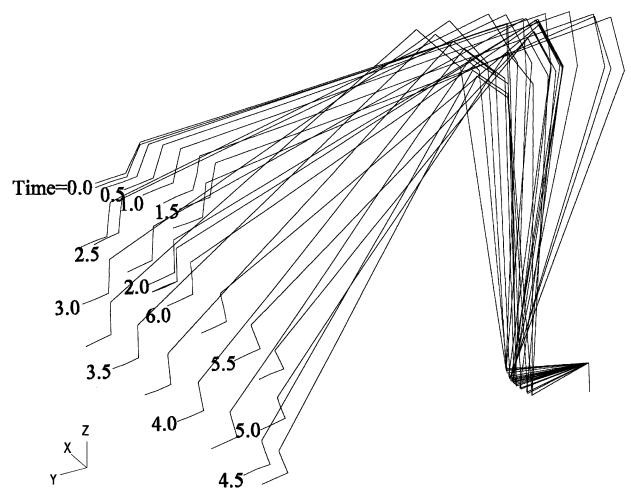
アナログ制御系は、伝達関数をもちいたブロック線図などで表現されることが多いが、これを時間領域の微分方程式に変換し、それをSINDYSの運動方程式に組み込むことによりモデル化している。

デジタル制御系については、SINDYSのユーザサブルーチン機能をもちいて記述し、制御則を忠実に再現することにより取扱う。最近のDSPなどの数値演算処理装置によるデジタルサーボ系の場合、制御アルゴリズムがC言語で書かれている場合も多く、そのような場合はソースコードに若干の変更を加えることでSINDYSに組み込みが可能である。PID制御などの古典制御から計算トルク法、現代制御理論などの制御則を実装したときの手先精度など、実機に即した検討がおこなえる。

2.4 詳細FEM解析

ロボットの軽量化が進むにつれ、ロボットアーム自体の弾性挙動が無視できない場合や、アームの強度評価をおこなわなければならない場合がでてくる。このようなときには先に述べたはり要素によるモデル化では不十分なことがある。そのような場合、詳細なFEMデータを作成して、これを自由度縮小し、アーム自体の剛性を考慮した解析をおこなうことが可能である。第4図に門型フレームにつり下げて設置される溶接ロボットの詳細FEMモデル例を示す。

具体的には、各アームの詳細FEMモデルを汎用構造解析ソフトNASTRANにより生成し、これに対して著者らの提案している大変位運動を考慮した低次元化手法により⁴⁾、必要な節点のみの情報に自由度を縮小して、第3図に示したような簡単なモデルでSINDYSをもち



第5図 SINDYS解析結果三次元挙動図
Fig. 5 3D movement of SINDYS analysis

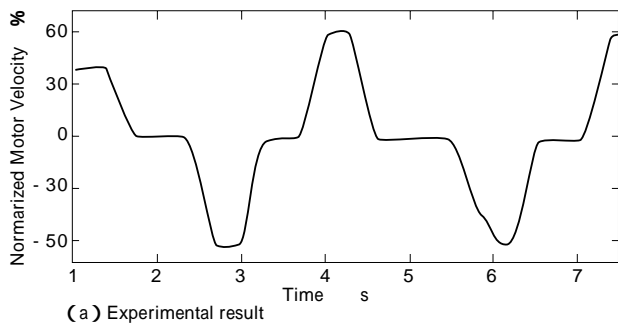
いて解析をおこなうという手法である。

また、ロボットを支持しているフレームの剛性がロボットの動的挙動に影響を及ぼすことが懸念される場合についても、同様の手法をもちいてそのフレームの自由度縮小をおこない、それをモデルに付加すればよい。

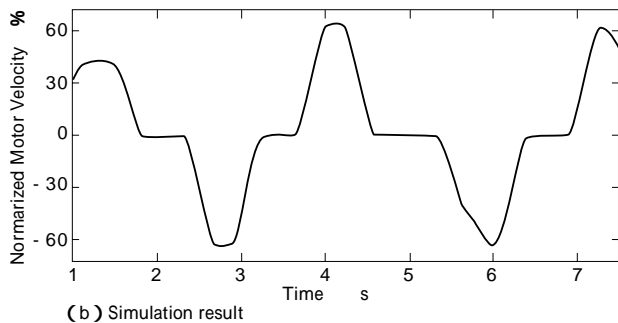
3. 解析例

第5図はある平面上に四角形を書かせるような目標軌跡を与えたときの、SINDYS解析結果の三次元挙動を示したものである。図中の手先先端位置に示した数字は解析時間をあらわしている。

また、実機と解析結果との整合性を確認するため、実際に測定したモータ回転速度とモータトルク波形につい



(a) Experimental result



(b) Simulation result

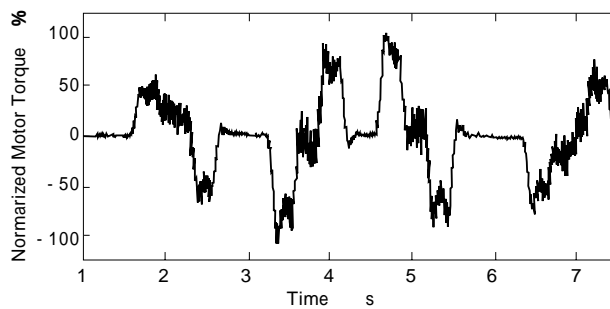
第6図 モータ速度波形の実験値と解析結果の比較

Fig. 6 Simulation and experiment of motor velocity output

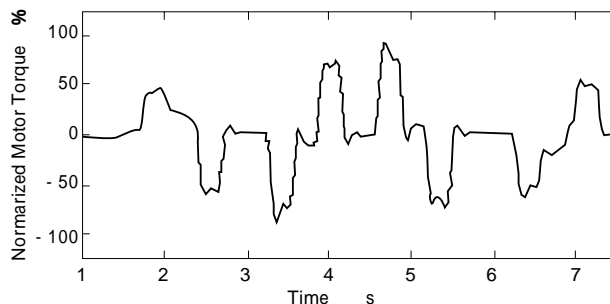
て、実機と同じ目標軌跡を与えたシミュレーション結果とあわせて、第6図および第7図に示す。回転速度についてはモータの定格回転数で、トルクについては定格トルクでそれぞれ正規化している。どちらも、実機と一致した非常に精度のよい解析結果がえられていることがわかる。これらはある一軸のみについて示したものであるが、ほかの軸の応答についても同等レベルの整合性がえられることが確認されている。

むすび= ロボットの動的設計支援ツールとして、本設計段階での簡易的な解析から、詳細設計段階での厳密な解析まで、段階に応じた設計支援をおこなう総合的なCAEシステムを開発した。

本システムは設計者でも容易にもちいることができる



(a) Experimental result



(b) Simulation result

第7図 モータトルク波形の実験と解析の比較

Fig. 7 Simulation and experiment of motor torque output

ようにユーザインターフェースを整備し、パソコンレベルで計算をおこなうことが可能である。各設計段階で効率的な事前検討がおこなえ、開発効率の向上に役立っている。

参考文献

- 1) 井上喜雄ほか：機械設計，Vol.40，No.6（1996），p.48．
- 2) 井上喜雄ほか：日本機械学会論文集，Vol.57，No.534，C編（1991），p.14．
- 3) 本家浩一ほか：日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集，Vol.B，No.95-8（I）（1995），p.14．
- 4) 藤川 猛ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.37，No.1（1987），p.93．
- 5) 本家浩一ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.45，No.3（1995），p.35．