

有限要素法を用いた動力学シミュレータの開発

Development of Dynamics Simulator using Finite Element Method

○非 福留 光紀（筑波大院） 正 磯部 大吾郎（筑波大）

Mitsunori FUKUDOME, Graduate school, Univ. of Tsukuba, s1011212@u.tsukuba.ac.jp

Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba, isobe@kz.tsukuba.ac.jp

The purpose of this study is to develop a dynamics simulator using the finite element method based upon a beam element and to investigate its validity. It is confirmed that the analysis of a rigid link system is enabled with small calculation cost as an advantage of using this simulator. The analysis code uses a finite-element analysis code of an existing framework structure. First of all, a rigid link system activated in the horizontal plane is modeled and analyzed when torque is given. Then, it is confirmed that the simulator works efficiently by comparing the analysis result with a target motion. It is confirmed from the result that a precise solution of the motion can be achieved.

Key Words: Dynamics Simulator, Modeling, FEM

1. 緒言

近年、ロボット産業の発展に伴い、宇宙空間や被災した原子力発電所内など、人間が作業を行うには危険な場所で運用されるロボットの要求が高まっている。しかし、このようなロボットを開発する上で、実験環境を構築することは困難である。一方で、計算工学の発展により、計算機上で構造解析や動力学計算を行い、実機での動作を再現することが可能となった。これにより、無重力空間などの実験環境を再現することが困難な場合でも、高度な要求に対応したロボットを開発・検証することができる。

一般に知られる動力学シミュレータとしては、DADS, ADAMS 等の市販されている汎用の機構解析ソフトや従来の順動力学計算を基に開発された動力学シミュレータ[1][2]がある。前者は様々な機構を汎用的に計算できる反面、計算コストが高いという特徴がある。また後者は、厳密解に従うため計算コストが低く精度も高い反面、部材の剛性は別に取り扱う必要があるという特徴がある。

本研究では、リンク機構を有するロボットへの適用を想定して3次はり要素を用いた動力学シミュレータを開発し、その妥当性について検証・評価を行うことを目的とする。3次はり要素は、微小変形領域では1部材1要素で曲げ変形に対して高精度な解を得られるため、少ない計算コストで剛性を考慮したシミュレーションが可能と考えられる。

本研究では、その基礎段階として、与えたトルクに対し目標軌道通りに動作を実現していることを確認する。具体的には、剛性と減衰を考慮しない剛体リンク系の実機をモデル化し、動作解析を行い、結果を目標軌道および実験結果と比較することで再現性を確認する。

2. 有限要素によるモデル化

2.1 使用解析コード

本研究の解析には、3次はり要素のASI法[3][4]を用いた骨組構造の有限要素解析コード[5]を用いる。この解析コードに逆動力学計算で求められたトルクを外力として与えるアルゴリズムを組み込むことで、動力学シミュレータとして用いることとする。

2.2 能動関節のモデル化

本研究では、実機のモデル化を行う際に、要素長が小さく曲げ剛性が限りなく小さい要素を能動関節の位置に配置することで能動関節の表現を行った。以下、この要素を能動関節

要素と呼称する。この要素の概念図を図1に示す。能動関節要素は他の要素と剛接状態にあり、両端の節点にトルクを入力することで曲げ変形を発生させ関節を表現する。具体的には、動作リンク側の節点に動作を行うための動作トルクを、反対側の節点に動作トルクと同じ大きさで向きが反対である反作用モーメントを入力する。曲げ剛性が限りなく小さいため、動作トルクと反作用モーメントが相互作用することなく両端の要素は動作する。このように、能動関節要素を用いることで能動関節の1軸回りの動作が再現可能となる。

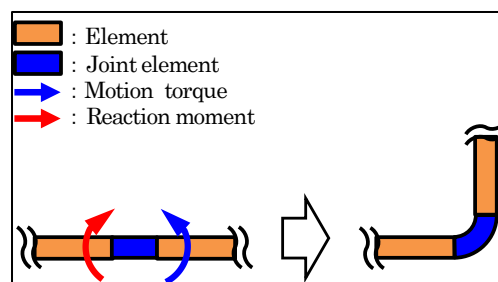


Fig. 1 Concept of joint element

3. 動力学シミュレータを用いた解析例

本章では、先行研究[6]で行われた剛体リンク系の動揺抑制実験を参考に解析モデルを作成し、動力学シミュレータの再現性を確認する。

3.1 解析概要

実機の概観を図2に示す。一般にアクチュエータを有する物体が動作する際、動作に必要なトルクに対する反作用モーメントによって系全体が回転軸回りで振れまわり動揺してしまう。この実験は、動揺を抑制するために必要なキャンセリングトルクをあらかじめ算出し、トルクキャンセリングシステム(以下TCS)に与えることで動揺の抑制を行う、というものである。この実機を参考にした解析モデルを構築して解析を行い、動作の再現性を確認する。

3.2 解析条件

実機のリンクパラメータを表1に、実機を基にした解析モデルの概略図を図3に示す。今回はTCSの機構そのものはモデル化せず、キャンセリングトルクを直接節点1に与えることでTCSを表現する。モデルとその動作を水平面に限定するため、自重は考慮

せず、また機構の摩擦等の減衰も考慮しないものとする。各要素について、要素①、②が Link1 に、要素④が Link2 にそれぞれ対応している。要素③は前章で説明した能動関節要素となっており、その要素パラメータを表 2 に示す。また、 τ_{1z} 、 τ_{3z} 、 τ_{4z} はそれぞれ、動揺抑制時のキャンセリングトルク、動作による反作用モーメント、能動関節の動作トルクを表す。各トルクの値については、Link2 を 1.0 [s] で π [rad] 回転させる軌道を与えた際に逆動力学計算により求められる値を用いる。この時のリンク系の目標軌道を図 4 に、動力学シミュレータへの入力トルクを図 5 にそれぞれ示す。

これらの条件下で、 τ_{3z} 、 τ_{4z} のみを入力し動揺抑制を行わない場合、 τ_{1z} 、 τ_{3z} 、 τ_{4z} をすべて入力し動揺抑制を行う場合の 2 つの場合で解析を行う。

3.3 解析結果

動揺抑制無しの場合と動揺抑制有りの場合における解析結果を図 6、図 7 にそれぞれ示す。図 6 より、Link2 の動作によって発生した反作用モーメントにより、受動関節を中心に系全体の動揺が発生していることがわかる。一方、図 7 より TCS で動揺抑制を行うことで系全体の動揺を抑制できることがわかる。動揺抑制を行った際の能動関節の動作角を図 8 に示す。このグラフより、シミュレータで得られた動作軌道は 1.0 [s] で π [rad] 回転する目標軌道に対し高い追従性が得られていることが確認できた。また、節点 2 (受動関節) 回りにおける Link1 の回転角を動揺抑制の有無、および先行研究の実験における動揺抑制の有無で比較したグラフを図 9、図 10 にそれぞれ示す。動揺抑制無しでは動揺が発生し回転角が大きく、動揺抑制有りでは TCS で動揺が抑制され、回転角がほぼ 0 となっていることがわかる。実験値との比較において、動揺抑制有りの場合は値がほぼ同じになっているのに対し、動揺抑制無しの場合は実験値が解析値の半分程度になっている。これは、解析条件において機構の摩擦等の減衰を考慮しなかったためと考えられる。

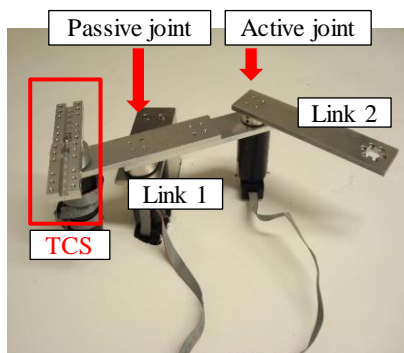


Fig. 2 Experimental setup[6]

Table 1 Link parameters		
	Link 1	Link 2
Material	Stainless	Aluminum
Length [m]	2.20×10^{-1}	1.65×10^{-1}
Sectional area [m ²]	2.40×10^{-4}	2.40×10^{-4}
Density [kg/m ³]	4.72×10^3	2.70×10^3
Young's modulus [N/m ²]	2.06×10^5	7.03×10^4
Moment of inertia of area (I_x) [m ⁴]	7.20×10^{-10}	7.20×10^{-10}
Moment of inertia of area (I_y) [m ⁴]	3.20×10^{-8}	3.20×10^{-8}

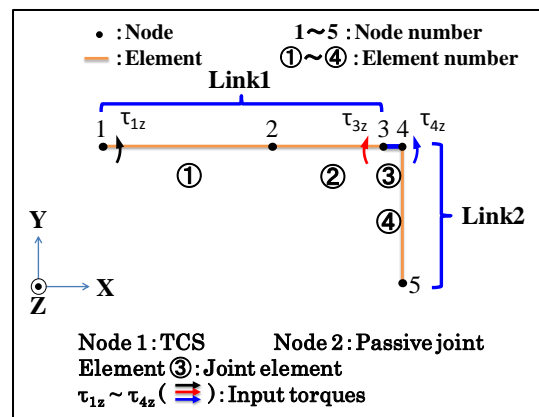


Fig. 3 Numerical model

Table 2 Joint element parameters

	Joint element
Length [m]	1.00×10^{-4}
Sectional area [m ²]	2.40×10^{-4}
Density [kg/m ³]	4.72×10^3
Young's modulus [N/m ²]	2.06×10^5
Moment of inertia of area (I_x) [m ⁴]	7.20×10^{-10}
Moment of inertia of area (I_y) [m ⁴]	1.00×10^{-20}

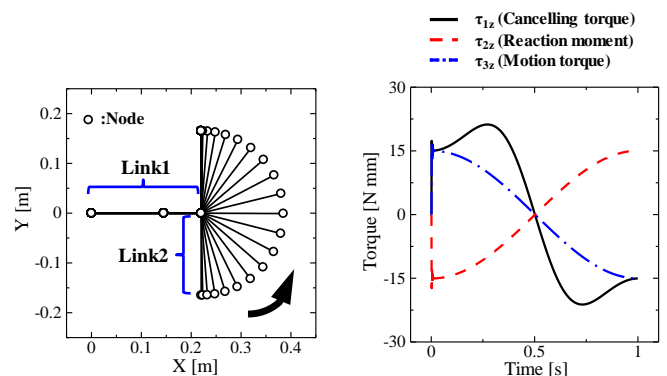


Fig. 4 Target motion

Fig. 5 Input torques

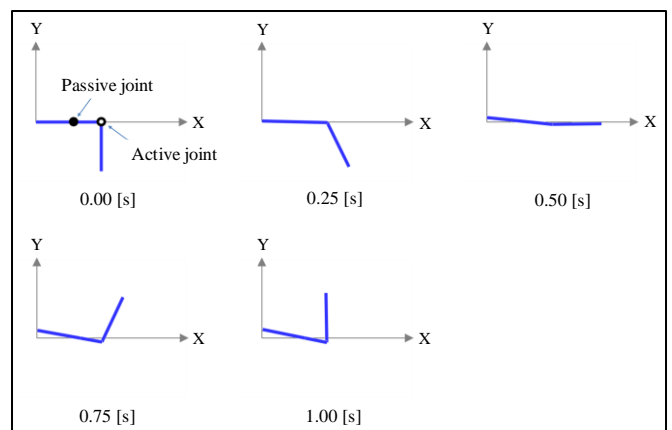


Fig. 6 Dynamics simulation of the rigid link system (without TCS)

文 献

- [1] 中村 仁彦, 山根 克, 永嶋 史朗, "構造変化を伴うリンク系の動力学計算法とヒューマンフィギュアの運動計算", 日本ロボット学会誌, Vol.16, no.8, pp.1152-1159, 1998.
- [2] OpenHRP3 Official Site, OpenHRP3 とは <http://www.openrtp.jp/openhrp3/jp/about.html>
- [3] 都井 裕, 磯部 大吾郎, "骨組構造の有限要素崩壊解析における順応型 Shifted Integration 法", 日本造船学会論文集, 第 171 号, pp.363-371, 1992.
- [4] 都井 裕, 磯部 大吾郎, "順応型 Shifted Integration 法による骨組構造の動的崩壊挙動の有限要素解析", 日本造船学会論文集, 第 175 号, pp.299-306, 1994.
- [5] ASI 法 (3 次はり要素版) による骨組構造の有限要素解析コード ASIFEM3 ダウンロードサイト <http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~isobe/asi-fem3.html>
- [6] 松井 康将, "並列的逆動力学計算法を用いたトルクキャンセルリングシステムの提案", 筑波大学システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻修士論文, 2011.

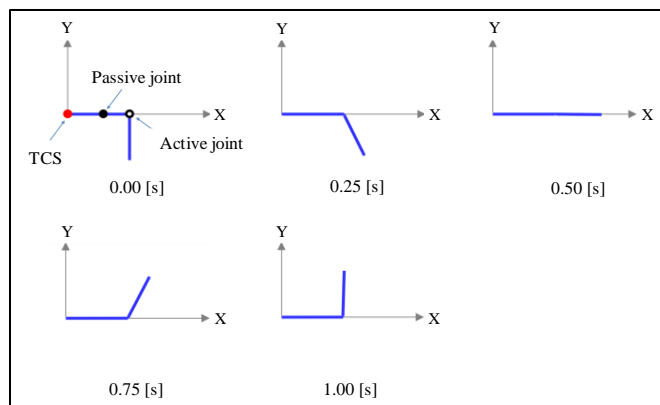


Fig. 7 Dynamics simulation of the rigid link system (with TCS)

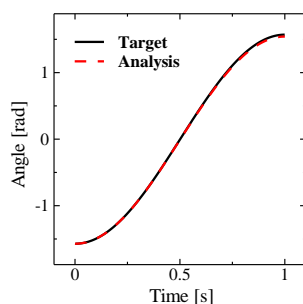


Fig. 8 Rotational angle at active joint

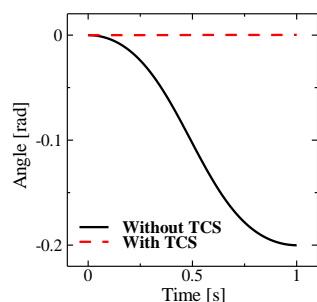


Fig. 9 Rotational angle at passive joint (analysis)

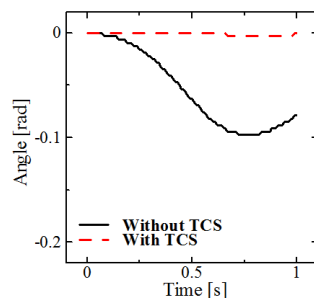


Fig. 10 Rotational angle at passive joint (experiment)

4. 結 言

本研究では、3 次はり要素による有限要素法を用いた動力学シミュレータを開発し、再現性を確認するための解析例を示した。能動関節要素を設けることで、動作トルクを与えた際のリンク動作を再現し、目標軌道への高い追従性を確認することができた。先行研究の実験と比較した結果、摩擦等の考慮がされていない解析では、実験値より回転角が大きめに算出される傾向があることが確認された。

今後の予定としては 2 つの点が挙げられる。まず 1 つ目は摩擦の考慮である。今回の解析では、動揺の抑制を行うためにトルクのみを与え機構の摩擦を考慮しなかった。しかし、動揺自体を実現象通りに再現するためには、やはり摩擦の考慮が必要である。2 つ目は部材剛性の考慮である。有限要素法に基づいたシミュレータの利点として、リンク剛性を容易に考慮できる点があるため、フレキシブル・リンク系の動作の再現を試みる予定である。