

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04033

研究課題名（和文）微分方程式型零空間行列法に基づくマルチボディシステムの動解析コードの開発

研究課題名（英文）Development of codes for motion analysis of multibody systems based on the null space matrix method of differential equation type

研究代表者

神谷 恵輔 (KAMIYA, KEISKE)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号：50242821

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、複数の物体がジョイントで結合されてきたマルチボディシステムに対して、冗長な拘束や特異姿勢などの拘束条件を有する場合や摩擦力などの拘束力に依存する外力が作用する場合でも、高速・高精度に解析を行うことのできる方法の開発を行った。このためのポイントは、運動方程式中に現れる拘束力を効率的に消去することおよび拘束力を効率的に算出することである。この矛盾する問題を、修正しきい値完全ピボット付きLU分解を利用して拘束ヤコビ行列に対する零空間行列を微分方程式を解いて求めることおよび必要な拘束力のみを求められるアルゴリズムを開発することで解決した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に機械は、ジョイントで結合されたいくつかの部品から成っており、各部品は結合先の部品に対して相対運動を行う。このように、複数の部品（物体）がジョイントで結合されてきたシステムをマルチボディシステムという。マルチボディシステムの運動解析を効率よくかつ高精度に行うことは、機械の動特性を考慮した設計・開発にとって極めて重要な課題である。本研究で開発した方法は、これまでに開発されている方法や商用ソフトウェアでは解析が困難な拘束条件をもつシステムに対しても適用可能で、計算効率も高い。本研究で開発した解析法を用いることで、設計・開発の効率化、機械の高性能化につながると期待される。

研究成果の概要（英文）：This study has developed an analysis method that has ability to analyze, with high efficiency and precision, motion of multibody systems which have redundant constraints and/or singular configurations and which are subjected to forces depending on the constraint forces such as friction. The key points for this are efficient elimination of constraint forces appeared in the equations of motion and efficient computation of constraint forces. In the developed method, this contradictory problems are solved by obtaining the null space matrix for the constraint Jacobian from differential equations with use of LU decomposition with modified threshold complete pivoting and by developing an algorithm that yields constraint forces necessary for analysis.

研究分野：機械力学

キーワード：マルチボディシステム 運動解析 零空間行列 拘束力 摩擦

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

一般に機械は、ジョイントで結合されたいくつかの部品から成っており、各部品は結合先の部品に対して相対運動を行う。このように、複数の部品(物体)がジョイントで結合されてできたシステムをマルチボディシステムという。マルチボディシステムの運動解析を効率よくかつ高精度に行うことは、機械の動特性を考慮した設計・開発にとって極めて重要な課題である。

マルチボディシステムの支配方程式は微分代数方程式で与えられ、解析にあたっては工夫を要する。このため、解析法に関する研究が精力的に行われてきており、現在も行われている。効率が高いとされる解析方法の一つに零空間行列法と呼ばれる方法がある。ただし、この方法では零空間行列を代数的に求めるため、系の拘束が冗長である場合には若干計算量が多いアルゴリズムが必要となる。また特異姿勢と呼ばれる状態を系がとる場合には適用できない。零空間行列法と異なる考え方で、特異姿勢を持つ系に対しても適用可能なものも提案されているが、計算効率は必ずしも良いとは言えない。また商用ソフトウェアも市販されているが、これらのソフトウェアは、「冗長な拘束は取り扱えない」、「取り扱うことができないジョイントの組み合わせがある」などの問題を持つ。したがって、実際の系とは異なる拘束条件に置き換えて解析せざるをえず、手間が生じるあるいは精度が不十分であるなどの問題を引き起こす。

2. 研究の目的

本研究では冗長な拘束や特異姿勢を有する場合や摩擦などの拘束力に依存する外力が作用する場合でも、高速・高精度に解析を行うことのできる方法の開発を目的とする。通常、零空間行列法では、解析に必要な零空間行列は、拘束条件のヤコビ行列に対する代数的な演算により求める。申請者も以前に、代数的に零空間行列を求める方法の研究を行っていたが、特異姿勢に対しては実質的には計算が不可能であるとの結論に至った。また、それまでに申請者が提案してきた解析方法では、零空間行列を、微分方程式を解くことにより求めていることとよく似ていることに気が付いた。そこで本研究課題では、微分方程式を解くことにより零空間行列を求め、これにより冗長な拘束や特異姿勢を有する場合でも解析を可能とする高速・高精度な計算を実現できる解析法の開発を行った。なお、零空間行列法の計算効率が高いのは、運動方程式中に現れる拘束力を効率的に消去することができるためであるが、摩擦が作用する場合には拘束力を求める必要がある。このような場合でも計算効率を落とさずに解析を行うことができる方法の開発を行った。

3. 研究の方法

初めに、冗長な拘束や特異姿勢を有する場合でも高速・高精度に解析を可能とするための方法について検討を行った。考えている方法では、零空間行列を求めるための微分方程式を解く際に拘束条件のヤコビ行列を係数行列とする方程式を解く必要がある。これを解くために修正しきい値完全ピボット付き LU 分解を導入した。これにより計算効率を落とすことなく、冗長な拘束や特異姿勢を有する場合でも零空間行列を求めるための微分方程式を解くことができるようにした。

次に、指定の拘束力だけを求めることができるような解析法に拡張するための検討を行った。零空間行列法の計算効率が高いのは、運動方程式中に現れる拘束力を効率的に消去することができるためであるので、ここでのポイントは運動解析時には拘束力を消去し、その結果を利用して必要な拘束力のみを求めることである。これを実現するため反拘束相対変位と名付けた、拘束条件に違反する微小変位を定義し、拘束力を必要とするジョイントに導入した。これにより、必要な拘束力のみを陽に含む形で定式化した。またこの式から拘束力を効率的に算出するためのアルゴリズムを考案した。

最後に、拘束力に依存する力が作用する場合の運動解析方法について検討した。通常、拘束力は仕事をしないが、例えばクーロン摩擦はその大きさが、拘束力に相当する垂直抗力に依存する。したがってクーロン摩擦が作用する場合を例に取り上げて、運動解析を行うための方法について考えた。上述の拘束力を求める手順では、まず拘束力を消去して運動解析を行い、その結果を用いて拘束力を求める。そこで摩擦力が作用する場合には、初めは適当な摩擦力を仮定して運動解析を行い、その結果を用いて拘束力すなわち垂直抗力を求めて摩擦力の修正を行い、この計算を数回繰り返すことで運動解析を行うようにした。

4. 研究成果

初めに、修正しきい値完全ピボット付き LU (LU with MTC) 分解を導入した解析法の解析効率に関する結果を示す。ここでは図 1 に示す 3 次元多重 4 節リンク機構の解析に要した CPU 時間を表 1 に示す。この表には比較のために完全ピボット付き LU (LU with CP) 分解、QR 分解、Callejo らの方法による CPU 時間も示してある。Callejo らの方法による CPU 時間は <https://www.iftomm-multibody.org/benchmark/solution/71/> から引用したものであり、使用したコンピュータが異なるので直接的な比較はできないが、修正しきい値完全ピボット付き LU 分解を導入することで、高速な解析ができることが確かめられた。

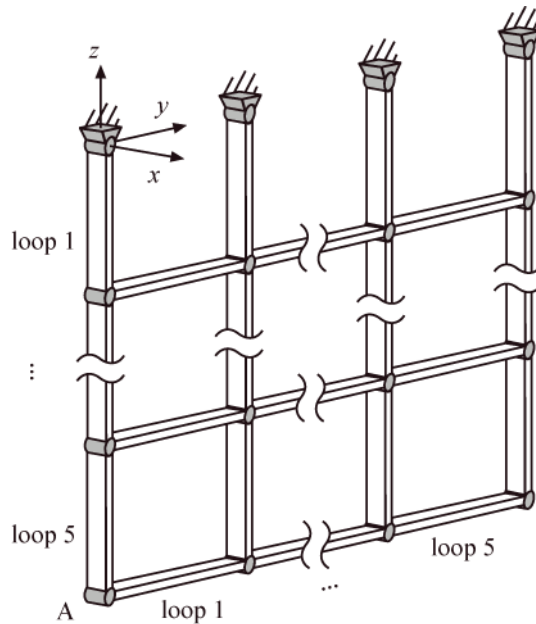


図1 3次元多重4節リンク機構

表1 3次元多重4節リンク機構の解析に要したCPUタイム

Method	CPU time [s]
LU with MTCP	0.4909
LU with CP	1.0491
QR	1.0440
Callejo	0.6314

次に、図2に示した平行5節リンク機構のジョイント J_1 および J_2 における水平方向、鉛直方向の拘束力解析結果を図4, 5にそれぞれ示す。この図には比較として図3に示した平行4節リンク機構の対応するジョイントにおける拘束力も併せて示してある。なお図2の平行5節リンク機構においてはリンク B_4 の質量は0としてある。したがって実質的には図3の平行4節リンク機構と同じであるが、冗長な拘束条件を持つ系となっている。また図4, 5中の W_c は計算に用いる重み行列で、これを0とした場合と単位行列とした場合の結果が示されている。図4の結果より、重み行列 W_c を単位行列とすることで、冗長な拘束を有する場合でも、実質的に同じ系の拘束力と等しい拘束力が得られていることがわかる。

最後に、図6に示すスライダクランク機構において、スライディングジョイント J_4 に摩擦力が作用するとして解析を行い、対応する実験から得られたスライダ位置の時刻歴を比較した結果を図7に示す。解析結果と実験結果はよく一致しており、摩擦が作用する場合でも正しく運動解析ができていることがわかる。

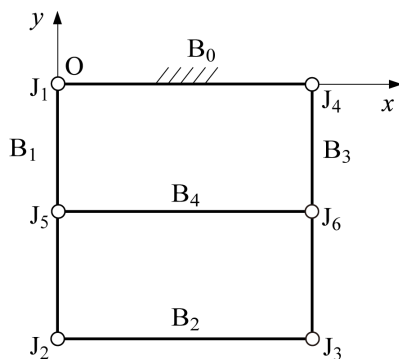


図2 平行5節リンク機構

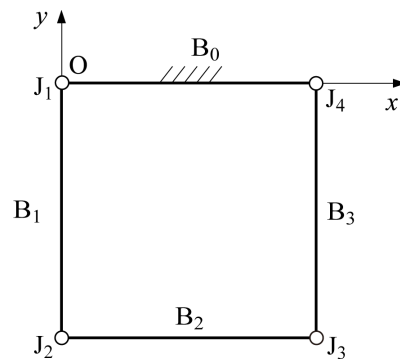


図3 平行4節リンク機構

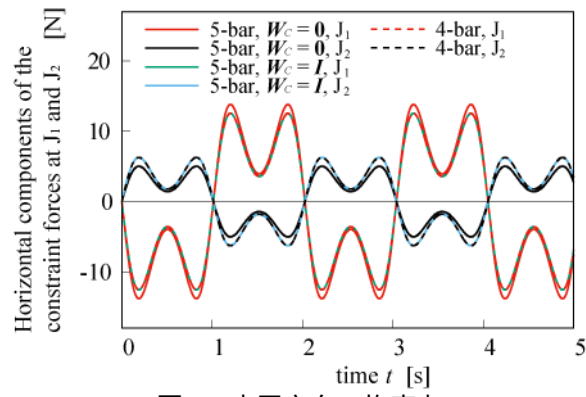


図4 水平方向の拘束力

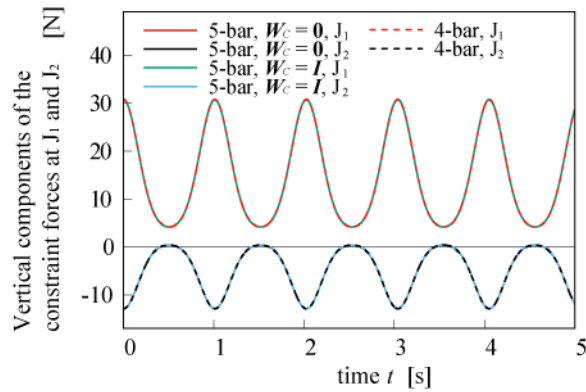


図5 鉛直方向の拘束力

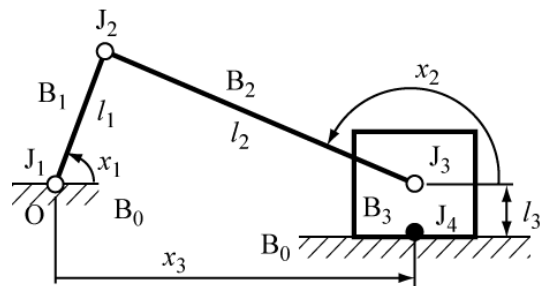


図6 スライダクランク機構

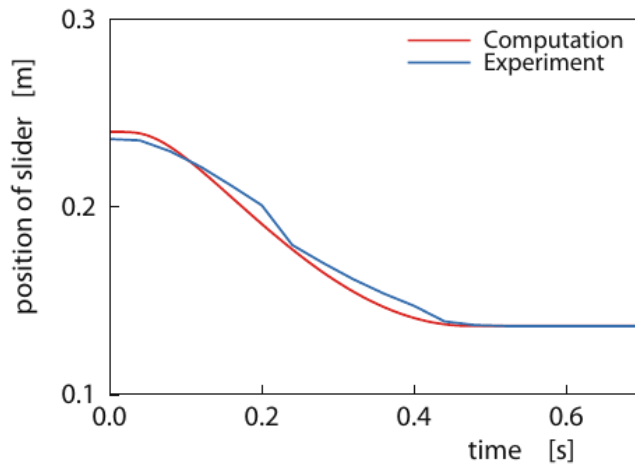


図7 スライダ位置の時刻歴

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 神谷恵輔	4. 巻 86
2. 論文標題 微分方程式型零空間行列法に基づくマルチボディシステムの拘束力解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1,14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00419	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 神谷恵輔	4. 巻 84
2. 論文標題 マルチボディシステムの運動解析のための微分方程式型零空間行列法の改良	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 1,14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00288	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Keisuke Kamiya
2. 発表標題 ANALYSIS OF CONSTRAINT FORCES IN MULTIBODY SYSTEMS BASED ON THE DIFFERENTIAL NULL SPACE MATRIX METHOD
3. 学会等名 ASME 2019 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神谷恵輔
2. 発表標題 微分方程式型零空間行列法に基づくマルチボディシステムの拘束力解析
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Kamiya
2. 発表標題 IMPROVED DIFFERENTIAL NULLSPACE MATRIX METHOD FOR THE DYNAMIC ANALYSIS OF MULTIBODY SYSTEMS
3. 学会等名 ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神谷恵輔
2. 発表標題 零空間行列法に基づく拘束力の効率的計算法 (拘束が冗長な場合)
3. 学会等名 日本機械学会東海支部TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2019(TEC19)第68期総会・講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神谷恵輔
2. 発表標題 摩擦力が作用するマルチボディシステムの微分方程式型零空間行列法に基づく運動解析
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	井上 剛志 (INOUE TSUYOSHI) (70273258)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------