

配位空間における接触拘束表現を用いた組立品の機構モデル

学位論文内容の要旨

機械製品の多くは、個々の構成部品ではなく、組立品としてその機能を果たす。そのため、計算機における機械製品の設計段階において、組立状態のみならずその運動機能を検証することが可能ならば、設計の効率を大きく高めることが可能である。本研究は、理想形状の部品間の接触状態を対象とし、組立品の設計の初期段階で運動機能を検証することを可能とする機構モデルを提案するとともに、機構解析に応用することにより、その有効性を確認することを目的とする。

はじめに、組立品の設計段階で得られる部品形状及び部品形状間の接触を表現する接触拘束から、組立品の運動を構成部品の可動範囲(運動可能領域)として表現することを可能とする組立品の機構モデルを提案する。その手順は以下の通りである；(1) 接触拘束を、その拘束を満たす配位空間における領域として定式化する、(2) 組立品の中に存在する接触状態の組合せを表現するために拘束間関係を定義する、(3) これらを用いて、組立品の機構モデルを定義することにより、配位空間における領域間の集合演算により、組立品の運動可能領域を表現する。この機構モデルにより、従来の研究における以下の問題点が解決される；(1) 組立品における部品の運動を解析するために、入力運動及び物理条件等を詳細に記述する必要がある、設計の早い段階で組立品の運動を解析することが困難である、(2) 接触拘束表現に接触を表現するために必要な変数の範囲、部品間の干渉等が十分に考慮されていないため、非接触や干渉等により実現不可能な解が導出される可能性が存在している、(3) 組立解析と機構解析とを区別しているため、設計ミス等により構成部品間に自由度の存在する組立品やすべての構成部品が固定される機構等に対する解析が困難である。

このように、部品形状と接触拘束から組立品全体の運動を得ることが可能になったことは、設計された組立品の検証において重要な意味を持つ。しかしながら、機構設計において最も重要な情報の一つは、入出力運動間の関係のような、特定の部品の自由度間の関係である。更に、その自由度に対応する幾何形状(フィーチャ)を明示することが可能ならば、精度設計に対して有用な情報を提供することが可能となる。これらの情報を得る手段として拘束還元という手続きを導入することが挙げられる。拘束還元とは、組立品を表現する拘束から本質的な拘束を導出する手続きである。しかし、従来の拘束還元に関する研究では、(1) 拘束の接続形態の相違により拘束還元の手続きが異なるが十分に考慮していない、(2) 拘束還元の配位空間における接触拘束表現との関係を明らかにしていない、(3) このような拘束表現とフィーチャとの対応関係を十分に考慮していないという問題が存在する。このような問題点を解決するために、本研究では、以下のことを行う；(1) 各々の拘束の接続形態に対する拘束還元手続きを配位空間における接触拘束表現を用いて定式化し、上記の機構モデルに対して導入する、(2) フィーチャをベースとする機構モデルを新

たに定義し、マッピングルールを明らかにすることにより、上述の機構モデルとの対応関係を明らかにする。それにより、特定の部品の運動に対して等価な最小のモデルが、双方のモデルにおいて導出することが可能となり、解析ばかりでなく設計に対しても有用な情報を提供することが可能となることを示す。この結果、組立品を構成する部品及び拘束の数が増大すると、その計算に必要な時間と記憶容量が膨大になるという解析における問題点をも解決するとともに、公差付け等に必要なフィーチャ間の空間配置関係を決定付ける本質的なパラメータの導出が可能となる。

しかしながら、考慮すべき拘束の種類及び拘束還元の数学的意味を明確にしなければ、拘束還元に対する効率的な処理を望むことは困難である。一般に、拘束は、剛体の変位のなす群の部分群により表現及び分類される。従来の研究では、その部分群の導出された過程及び拘束還元の一般的な手続きを明らかにしていない。そこで、本研究では、拘束を表現する変位群に対応するリー代数を用いて、以下の手順で、それらを数学的に明らかにする；(1) リー代数を表現する六つの基底から、部分代数を構成する基底の組み合わせを選択する、(2) この部分代数には、変位群の部分群が対応することが知られており、それにより拘束を表現及び分類することにより、従来の研究で使用されている拘束を含む10個の拘束が導出されることを示す、(3) 変位群間の集合演算がリー代数間の集合演算に対応していることを明らかにし、これによりリー代数における一般的な拘束還元の手続きを明らかにする。この成果により、拘束の種類及び拘束還元が数学的に明らかになるばかりではなく、従来の研究で提案されてきた拘束還元手続き及び拘束間還元則の正当性を検証することが可能になる。

これらの機構モデル及び拘束還元により、組立品の設計の段階で与えられる部品形状、接触関係及び拘束間関係のみから、設計者の注目する特定の部品の運動を各々の部品の可動範囲として、対応する機構モデルと共に、設計者に対して提示することが可能となった。このような検証結果が得られた段階で、入力運動を指定し、より詳細な検証を行う必要がある。互いに接触する物体の運動は、物体の位置と姿勢に対する幾何学的な拘束と、その位置と姿勢の時刻に関する拘束とにより決定される。前者の拘束は、上述した接触拘束として表現することが可能であるが、この拘束に対して後者の時刻に関する拘束を付加しようとする、その表現及び処理が複雑になる。そこで、本研究では、配位空間に対して新たに時刻を軸を追加し、接触拘束表現を拡張することにより、上述の二つの拘束が統一的に表現及び処理可能となることを示す。その結果、解が一意に定まらないため従来の研究ではすべての入力運動を指定しなければ困難であった解析が可能となり、例えば、一部分の入力運動を与えた段階での他の個所の自由度の確認など、複雑な解析が可能となることを示す。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 岸 浪 建 史
副 査 教 授 五十嵐 悟
副 査 教 授 土 谷 武 士
副 査 教 授 島 公 脩

学位論文題名

配位空間における接触拘束表現を用いた組立品の機構モデル

近年、機械製品の設計に対する計算機支援を目的として、機械製品の機構モデリング及びその機構解析に関する研究が盛んに行われている。しかし、その多くは、設計の初期段階に適用することが困難であり、今後の発展が待たれている状況にある。

本論文は、このような現状に対して、設計の初期段階で得られる情報のみから、組立品の機構解析を可能とする機構モデルの提案を行ったものであり、その主要な成果は、以下のように要約される。

はじめに、組立品の設計段階で得られる部品形状及び部品形状間の接触を表現する接触拘束から、組立品の運動を構成部品の可動範囲（運動可能領域）として表現することを可能とする組立品の機構モデルを提案している。その手順は以下の通りである。(1)接触拘束を、その拘束を満たす配位空間における領域として定式化している。ここで、配位空間とは、剛体の自由度を表現するパラメータを座標とする空間であり、ある幾何学的条件（干渉、接触、非干渉など）を満たす領域を明確に表現できる空間である。(2)組立品の中に存在する接触状態の組合せを表現するために拘束間関係を定義している。(3)これらを用いて、組立品の機構モデルを定義すると共に、接触拘束を表現する領域間に対して拘束間関係に対応する集合演算を適用することにより、組立品の運動可能領域を表現する方法を提案している。このようなモデル化により、設計の初期段階で得られる部品形状及び接触拘束のみから、構成部品間の干渉回避を考慮した組立品の運動を配位空間における領域として得ることを可能としている。

機構設計において最も重要なことの一つは、組立品における部品間の相対運動から、組立品の基本的な運動を抽出することであり、この手段として拘束還元は重要である。ここで、拘束還元とは、部品間に存在する複数の拘束から、正味の働きをする等価な一つの拘束を導出する手続きである。更に、その拘束に対応する幾何形状（フィーチャ）を明示することが可能ならば、精度設計に対して有用な情報を提供することが可能となる。そのため、上記の機構モデルにおける拘束還元手続きを提案し、フィーチャとの関係を明らかにするために以下のことを行っている。(1)拘束還元手続きを配位空間における接触拘束表現とその集合演算を用いて定式化している、(2)設計に用いられるフィー

チャをベースとする機構モデルを新たに定義し、フィーチャと配位空間における拘束表現との関係を明らかにすることにより、配位空間における機構モデルとの対応関係を明らかにしている。この結果、特定の部品の運動に対して等価な最小の機構モデルを、上記の二つのモデルにおいて導出することを可能としており、解析ばかりでなく設計に対しても有用な情報を提供することを可能としている。例えば、解析の立場からは、機構モデルを単純化し、計算に要する時間と記憶容量を軽減することが可能となり、設計の立場からは、等価な働きをするより単純な機構を導出することが可能となる。

更に、拘束の種類及び拘束還元の数学的意味を、リー代数を用いて明らかにしている。リー代数は、剛体間の相対的な拘束を表す変換行列の積を、対応する基底の線形和として表現することができる空間である。基底間の独立性により、拘束の独立性・従属性が明確になることから、有限の基底の組合せにより、拘束を分類することができることを示している。このような拘束表現を用いると、リー代数間の集合演算により、一般的な拘束還元手続きを表現できることを明らかにしている。これらの成果は、拘束還元の数学的基礎を明らかにするものであり、上述の拘束還元手続きの正当性の証明を可能にすると共に、拘束還元の更なる展開を可能とするものである。

これらの研究成果に、時刻を考慮して、入力運動等を指定し、より詳細な検証を行う必要がある。互いに接触する物体の運動は、物体の位置と姿勢に対する幾何学的な接触拘束と、その位置と姿勢の時刻に関する拘束とにより決定される。両者の拘束を同一の空間に表現するため、配位空間に対して新たに時刻の次元を追加した空間を導入し、配位空間における接触拘束表現及び機構モデルを拡張している。この拡張により、両者の拘束が統一的に表現及び処理可能となることを示している。この結果、従来の研究ではすべての条件（入力運動など）を指定しなければ困難であった解析が可能となり、複数の入力運動が存在する機構において、ある部分の入力運動を与えた段階で、他の個所の自由度の確認など、複雑な解析を可能としている。

これを要するに、著者は、設計の初期段階において組立品の機構解析を可能とする機構モデリング手法を提案したものであり、設計工学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。