

報告番号	甲 第 13164 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 マルチボディダイナミクスに基づく柔軟な糸の数值シミュレーションに関する研究
(Study on a numerical simulation of flexible yarn based on multibody dynamics)

氏 名 竹内 秀年

論 文 内 容 の 要 旨

糸は単位長さ当たりの重量が非常に小さく、高引張剛性としなやかな曲げやねじりを有する構造物であり、衣料品や機械構造物に大量に使用され、工業的に非常に重要な材料である。本論文は其中でも綿繊維から作られた綿糸に着目する。綿糸は紡績機械によって作られ、加工機械によって品質や機能性を上げられる。これらの機械は繊維機械と総称される。糸は非常に大きな工場で多くの繊維機械によって大量生産が行われており、生産設備の投資額は非常に大きい糸の単価は高くないので、繊維機械メーカーは顧客から常に生産性の向上を求められる。繊維機械の従来の開発方法は、実験計画法に基づいて膨大な数の試作と実験を行うものであったが、多くのコストと時間を必要とし、競争力の高い機械を短期間で開発する方法としては限界に達していた。そこで近年は製作前の機械の動きや機械の中を流れる空気の状態を数值シミュレーションにより評価し、そこから糸の運動の軌跡や糸に作用する力を直感的に推測して機械部品を設計している。しかし直感に基づくこの方法では糸の運動の推測値が実際と大きく異なる可能性がある。そこで本論文はマルチボディダイナミクス手法に基づいた糸モデルを構築し、糸の軌跡や力学特性を明らかにできる数值シミュレーション手法を構築する。そして解析結果を実験と比較し、繊維機械のモデルベース開発において有用かつ信頼性の高いツールを開発する。

以下に各章の概要を示す。

第 1 章の緒言では上述した本論文の背景に言及し、糸の種類や歴史、繊維機械の種類、他の研究動向、本論文の前準備として行った著者らの事例を述べる。以前より糸の運動を

数値シミュレーションする方法はいくつか提案されており、本章ではそれらを大きく 6 つに分類して特徴を検討した。1 つ目は時間的に定常な糸の運動を微分方程式で表す方法である。これを用いた研究ではボビンに巻かれた糸が解かれる解舒運動を模して、糸がボビンの周りを振り回された際の半径方向に膨らんだ形状や糸の各部に作用する張力を導出している。しかし実際の解舒運動時には糸の軌跡や張力は時間的に変化するので、この方法を用いて糸の解舒運動を議論することは困難である。2 つ目は拡張ハミルトニアンを用いる方法で、極細チューブの中を糸の密度を持った物体が連続的に移動するという考えでモデル化されている。この方法は解舒運動において、糸の剛性と減衰の特性を与えたり糸の端点を引き上げる力を求めたりすることができない。またこの方法では糸の摩擦を考慮できないので、実際の糸の解舒運動を再現するのは困難である。3 つ目は Geometrically Exact 法という有限要素法の 1 方法である。この方法は微小変形を前提にしているので大きな変形に対応するには非常に細かな有限要素を多数配置する必要がある。糸の運動に対してこの方法を用いる研究は数多くあり、スプライン曲線で糸の形状を表現したり軸に垂直な方向の変形を無視したりする改良を加えて、計算負荷を減らす工夫がなされている。しかしこれらの研究でも依然要素数が多く計算負荷は高いので、実際の設計ツールには不向きと判断する。4 つ目は絶対節点枠法 (ANC 法) で、大変形と大回転を記述する絶対節点枠によって非常に柔軟な構造物を表現する方法である。これを用いた研究にはプーリーに接しながら移動するワイヤーロープの運動や、地下ケーブルの敷設時の摩擦を伴う移動を数値シミュレーションした例がある。しかし、この方法は計算負荷が非常に高く、また ANC 要素同士の接触状態の評価が困難であるので、本論文で取り扱うような糸が絡みつく状態を表現するのは難しい。5 つ目は Cosserat 理論に基づく方法で、CG 分野での適用事例が多い。この方法を用いた研究では、物理的な現象の厳密性より計算の高速性を重視した事例が多く、リアルタイムにロープに結び目を作成したり、毛髪のように多数の長尺物が接触したりする計算が行われている。しかしこれらの研究の多くは実験との整合性を議論しておらず、実際の糸の運動を再現するには糸のモデル化に更に多くの検討が必要であると考えられる。6 つ目が Kane 型運動方程式を用いる方法で、剛体や弾性体を拘束条件やばねとダンパによって接続して構造物を作成する。この方法は自由度の大きな計算モデルを作り易いという特徴を持ち、ロボットマニピュレータのような柔軟に動く機械構造物の研究事例が数多くある。これらの方法の特徴を総合的に検討した結果、本論文では Kane 型運動方程式を用いて実用性と高速計算性を備えた糸モデルを構築した。

第 2 章では隣り合う 2 つの質点間を伸縮しない拘束条件によって結合した 3 自由度要素からなる糸モデルを構築し、解舒運動を数値シミュレーションした。外力として重力と空気の抗力、ボビン上の糸または糸道ガイドとの接触力を設定した。ボビンに巻かれた糸の全長は数 km あり、ボビンを上下に 1 往復解舒するだけでもその糸長は数 m に及ぶので、これらの糸部分全てに質点を割り当てて解析対象とすると、計算負荷は非常に大きくなる。しかし解舒運動において重要な領域は、ボビン上の糸が解舒される直前の位置から糸が引

き上げられた終点位置までであり、数値シミュレーションの対象をこの領域に限定すれば糸の長さを数百 mm に収めることができる。そこで、その範囲の始点と終点において質点の生成と削除を行う仕組みを糸モデルに実装し、計算負荷が必要以上に増えないようにした。また、解舒運動後半において糸モデルを構成する質点が糸道ガイドに接触する時に、接触力が作用してその質点の加速度が急激に変化し数値シミュレーションの安定性が悪くなることに対しては、拡張ラグランジアン法と Newmark 積分法を組み合わせることで計算の安定性を向上させた。数値シミュレーションによる糸の運動と高速度カメラで撮影した糸の運動の映像はよく一致しており、構築した糸モデルの妥当性を確認できた。

第 3 章では第 2 章で構築した糸モデル（以降 方法 A）の計算効率を検討し、隣り合う 2 つの質点間の結合を拘束条件からばねとダンパによる伸縮を許容する方法に変更した糸モデル（以降 方法 B）を構築した。方法 B の運動方程式の係数行列は、方法 A より次数が小さい対角行列として表され、その運動方程式は逆行列を解かない形に変形出来る。その他にも行列演算の方法を工夫した結果、最終的に方法 B は方法 A に比べて約 70 倍の高速化を実現した。また方法 B の数値シミュレーション結果を方法 A や実験と比較し、これらはよく一致することを確認した。更に方法 B の張力変動はばねとダンパの効果により、方法 A より小さく平滑化され実験に近い値を示した。これらの結果より方法 B は高速計算性と実験結果に対する妥当性を持ち、解舒運動を伴う繊維機械のモデルベース開発に利用できることが示された。

第 4 章では第 3 章の糸モデル（方法 B）に対して姿勢を表す自由度を追加して 6 自由度要素からなる糸モデルを構築し、ねじり運動を扱えるようにした。計算の効率化を図りつつねじり運動を加えるために、質量のない仮想的な円柱を導入しその円柱の姿勢を加味してねじりを表現することにより運動方程式ができるだけ簡単な形で得られるように工夫した。この糸モデルで解舒運動を数値シミュレーションした結果、糸の軌跡は実験や方法 B によく似た傾向を示し、糸モデルの妥当性を確認できた。そしてこの糸モデルを用いて、実験による測定が困難な解舒運動中の糸のねじれ角度の評価と考察を行った。

第 5 章では第 4 章の糸モデルに更に自己接触力を追加し、糸モデルの改良を行った。その糸モデルの評価として、糸がねじられて自分自身に絡みつくスナール運動を以下に述べる 2 つの設定で数値シミュレーションした。1 つ目は糸の両端を水平方向に把持し、片方の糸端を回転させて糸をねじり、もう一方の糸端を他端に近づけて移動させる設定であり、2 つ目は糸を U 字型にたるませて、片方の糸端を固定しもう一方の糸端を回転させる設定である。実際の綿糸はたるませると初期状態で若干のカール形状を呈するので、本章の糸モデルはそれを考慮できるように工夫した。カール形状を画像から測定して時刻 $t=0$ における初期形状として与えて数値シミュレーションしたところ、これら 2 つの設定のどちらの場合も時間が経つにつれて糸はたるみながらねじりが蓄積され、ある時刻において急激にスナールが発生することを確認し、これらの結果は実験映像から得られたスナール運動を

よく再現した。そして糸に蓄えられたねじり角度の解析結果から、スナール運動が発生すると同時にねじり角度が急激に減少する様子が捉えられ、スナール運動は「糸のねじりが自身に対する撚りに変換される」現象であることが示された。

第 6 章の結言では前章までの研究成果をまとめている。本論文で構築した 3 自由度要素からなる糸モデルと 6 自由度要素からなる糸モデルはそれぞれ糸の軌跡や力学特性を明らかにできる有用なモデルであり、そしてそれらの数値シミュレーション結果は双方とも実験結果と良い一致を示した。よってこれらのマルチボディダイナミクス手法に基づいて構築した糸モデルは繊維機械のモデルベース開発において有用かつ信頼性の高いツールとして活用でき、繊維機械の開発に大きく貢献できる。