

## 論文内容の要旨

近年、ロボットの知能化、多能工化に伴い、その適用範囲は産業用だけでなく、サービス業やインフラ検査分野など多岐に亘ってきている。その中には高速高精度の運動が要求されるものや複雑な制御が必要なものが多くなってきている。自動車や建設機械についても、ハイブリッド化や電動化によるメカトロ化が急速に進んでいる。

メカトロ化されたロボットや自動車、建設機械などにおける動的問題としては、動作の精度、乗り心地、操縦安定性、操作性、省エネなど多岐に亘るが、その特徴としては以下が挙げられる；

- (1) 動的な課題には、振動、運動単独ではなく、両者が混在した問題が多いこと
- (2) 構造・機構系が油圧、電気、制御と複雑に絡んでおり、これらの動的な問題は、構造・機構系、油圧系、電気・制御系単独の特性で決まるのではなく、連成した問題であること
- (3) 自動車や建設機械の構成部品には、ショックアブソーバや液封マウントなどその特性が周波数依存性のある減衰定数やばね定数の計測データで表現されているものが多く、そのままでは時刻歴応答が困難であること
- (4) 乗り心地や操作性の良否は人間の感性により評価されていること

開発や設計の効率化のためには、数値シミュレーションによる検討が有効であるが、このような系の数値シミュレーションを行うためには次に示す課題に対応する必要があると考えられる；

- (A) 柔軟なはりの振動解析とマルチボディシステムの運動解析の共存
- (B) 構造・機構—油圧—電気制御系の連成解析
- (C) 周波数依存を含む周波数領域での情報を用いた時刻歴応答解析
- (D) H I L Sなどを用いたリアルタイムシミュレーションへの展開

本研究では、上記の課題の全てに対応した動的シミュレーション技術の確立を目指し、特に(A)、(B)、(C)の課題を解決するための解析手法を開発することを目的とする。

### (A) 柔軟なはりの振動解析とマルチボディシステムの運動解析の共存について

振動問題を起こす機械には、ロボットや建設機械のようにアームやブームが弾性変形しつつ運動を伴うものが多くみられる。最近では、ロボット、建設機械や自動車に代表される多くの物体から構成される機械システムの運動を扱う柔軟マルチボディダイナミクスの研究が盛んに行われ、設計段階での動的問題の解決に寄与している。柔軟マルチボディでは剛体運動と弾性変形の連成方法として、弾性体部分を有限要素法の解析コードで計算し、その結果をモード合成法を用いて表現する方法が従来主流であったが、最近、マルチボデ

ィダイナミクスに非線形有限要素法を融合させる方法が提案されている。前者の方法は固有モードの組み合わせによって、複雑な変形を表現するモード合成法であり、モーダル座標で扱うので計算時間がかからないという利点があるが、物理座標との接触を表現することができない。一方、後者の方法は有限要素法のすべての節点に自由度を持たせたまま弾性体を扱うことが可能であるので、弾性体どうしや弾性体対剛体の接触が定義でき、より現実に近い状況をシミュレートすることができる。柔軟マルチボディシステムの定式化には様々な方法が提案されている。ここでは、後述する油圧系および電気制御系との連成解析を効率良く実施するために、有限要素法をベースとした柔軟マルチボディダイナミクス解析の手法を提案する。

### **(B) 構造・機構—油圧—電気制御系の連成解析**

最近、省エネ、環境問題の観点から、自動車のハイブリッド化、電動化が進み、建設機械についてもハイブリッド油圧ショベルが製品化されている。また、ロボットについても人命救助ロボットや動作補助ロボットの開発が進んでいる。特に、ロボットについては、高精度を保ちつつ、高速化、軽量化を極限まで図ることが要求される。このような限界設計を行うとアーム先端の振動が問題になることがあり、振動を低減させる制御系の設計を行う必要がある。そのためには機構系と制御系を連成させた系での動的解析手法が必要となる。

また、油圧ショベルやクレーンなどの建設機械の油圧系はポンプから流れる流量を複数のバルブを切り替えることにより、複数のアクチュエータの動きを同時に制御している。アームやブームを急激に動作させたりすると、大きな過渡振動が生じ、構造系や油圧機器の破損につながることもある。それを防ぐために、設計段階で、機構系、油圧系、制御系を連成させて解析を行い、挙動を把握する必要がある。

自動車については、環境性能の向上を狙ったハイブリッド化および電動化が活発になっており、モータやバッテリーの高い制御技術が求められている。また、ハイブリッド車では、エンジン起動停止時の過渡振動は、乗員の意図と無関係に発生するため、非常に気になりやすく要求レベルが厳しいと言われている。このような振動を低減するために、エンジン爆発時の過渡トルク変動の車軸伝達を抑えるための制御方法や駆動系ねじり共振による車軸のねじり振動を低減するための制御方法が開発されている。その際、制御系だけでなく、トルク伝達系や駆動系と連成させて検討することが重要となる。

油圧駆動システムの動的シミュレーションとして、有限要素法的な考え方をしているものは、配管内流体系の圧力脈動解析に用いているくらいである。有限要素法以外の方法としては、特性曲線法を用いた配管内の流体の非定常解析方法がある。水撃波のように移動速度が一定で時空間図の格子点を特性直線で結び得る場合には有効な計算方法であるという報告があるが、構造系や制御系と連成することを目的としていない。柔軟マルチボディに油圧系や電気系、さらには制御系を連成させた系で、非定常応答解析を行い、運動と振

動を評価する場合、二つ以上の独立したソフトウェアを組み合わせる必要があり、連成力が外力扱いとなるので数値安定性が失われるため、計算実行中に時間刻みが細かくなり過ぎ、自由度が大きなシステムでは計算時間が膨大になり実用性が失われるという課題がある。また、市販のプログラムでは建設機械のように複雑な油圧系のモデル化を行うことは、かなり時間がかかる作業となると課題がある。この問題を解決するために、有限要素法を用いた大自由度連成システムの解析手法を提案する。

### (C) 周波数依存を含む周波数領域での情報を用いた時刻歴応答解析

近年益々、自動車や建設機械などの輸送機は市場のグローバル化が活発になってきている。それに伴い、これまで日本国内では想定していなかった悪路での強度耐久性や操縦安定性が求められ、開発時に考慮すべき物理量（加速度や荷重など）の範囲が広がっている。乗り心地の問題は、タイヤやサスペンションを含む足回りをモデル化するための柔軟マルチボディ、制御系、油圧系などを扱う必要がある。自動車の足回り部品は強度耐久性や乗り心地を左右し、特に、ショックアブソーバは乗り心地を決定する部品である。ショックアブソーバはピストンとシリンダで構成されている。一般に、ピストンスピードが遅いときには、固定オリフィスを流体が通過することによって減衰力が発生する。スピードが上がってくると、オリフィスに加え、バルブが開き、そこから流体が流れることより減衰力を抑える特性となり、操縦安定性を損なわずに、乗り心地を向上させている。したがって、ショックアブソーバの減衰特性は大きな非線形性を有している。また、入力加振周波数が高くなるにつれ、ピストンスピードと減衰力の間にヒステリシスが現れる。すなわち、減衰特性には周波数依存性が存在する。一般に、液封マウントなどの高粘性ダンパの動特性は周波数領域の特性で動剛性と損失係数で表される。定常応答解析を行う際はこれらのパラメータをそのまま用いることが可能であるが、乗り心地に影響する悪路走行や突起乗越えなどの非定常応答解析を行う時には、これらの特性を時間領域で表せるモデル化が必要である。

ショックアブソーバの内部構造がわかっている場合には、内部を詳細にモデル化することも考えられるが、一般的にはその詳細な構造は公開されていない場合が多い。また、詳細構造の情報を有する場合でもアブソーバ単体の解析には詳細モデルは有用と考えられるが、乗り心地を評価するためのフルビークル解析に適用するのは解析時間がかかるなどの欠点がある。また、実測結果より変位、速度および力の関係テーブルをあらかじめ作成し、時々刻々使用する力を算出して時刻歴応答解析を行う報告があるが、単一周波数での解析であり、突起乗越えなどの計算は困難である。

そこで、本研究では、周波数依存性と複雑な構造による非線形性を有するショックアブソーバについて、単体の周波数加振の実測結果を用いて、できるだけ簡単な周波数依存のない要素で構成された物理モデルを構築し、時間領域での解析を可能とする。

本研究では、機構-油圧-電気制御系の連成するシステムを MCK 型運動方程式で記述し、陰解法の中から、常に中立安定であり数値的な減衰も発生しない Newmark- $\beta$  ( $\beta=1/4$ )法を用いるとともに、Bisection 法による時間刻み調整方法を提案する。さらに、油圧系のバルブ要素などに用いる断片線形系の解析では、計算精度を落とさず、計算時間を短縮する方法について提案し、大自由度の機構-油圧-電気制御の連成システムの動的シミュレーション手法を開発する。