

マルチボディダイナミクスモデルによる集中剛性を含む二輪車運動方程式の再現

Reproducing the motorcycle equation of motion with lumped stiffness on multi-body dynamics model

寺山 敬 山口 翔大 北川 洋 矢部 昇

本報は、公益社団法人自動車技術会 2023年自動車技術会 春季大会 学術講演会予稿集に掲載された論文を同会の許可を得て転載したものです。本論文の著作権は公益社団法人自動車技術会に属し、無断複製・転載を禁じます。

要旨

二輪自動車の直進安定性解析で用いられる10自由度モデルと呼ばれる運動方程式を、マルチボディダイナミクスを用いて再構築した。二輪自動車の直進安定性は古くから研究されており、基本的な運動方程式は、Sharp氏によって4自由度モデルとして開発された。今回、再構築に用いた運動方程式は、青木氏らによりフレーム剛性が考慮され、10自由度モデルとして開発されたものである。運動方程式をマルチボディダイナミクスによって再構築した理由は、コンピュータ技術の発達により、今後のモデル拡張が期待できるためである。再構築したモデルと運動方程式の計算結果を比較したところ、ウィーブモードとウォブルモードの固有値が一致しないことが分かった。運動方程式におけるフレームの横方向の曲げは、「横力のつり合い」で式化されている。しかし、その式の中では「曲げ点における横力」が表現されていないことが判明した。そこで、両者を等価にするため運動方程式を「横力」から「曲げ点周りのモーメント」のつり合い式に変更した。この変更により、マルチボディダイナミクスモデルと運動方程式モデルは良好な一致を示した。

Abstract

Motorcycle equations of motion have long been researched and used as analysis methods for the straight line stability characteristics of motorcycles. However, it has been difficult to add degrees of freedom due to mathematical difficulties. Therefore, taking into consideration the additional study of new degrees of freedom, a multi-body model was constructed to obtain the same results as equations of motion.

1 まえがき

二輪自動車の車両運動に関する研究は古くから行われ、1970年、SHARP^[1]による4自由度モデルの運動方程式により、直進安定性に影響のある振動モードである Weave モード、Wobble モードが数値解析できることが報告された。さらに1998年には青木らによりフレーム剛性を含む10自由度モデルが開発され^[2]、直進安定性へのフレーム剛性の影響が報告された。二輪車の運動方程式は少ない計算コストと代表的な諸元のみで二輪車の基本的な振動特性を検討できるため、現在でも開発や研究の対象となっている^{[3][4]}。ところが、運動方程式の自由度を拡張しようとすると、数学的な知識の習得等の労力を要する。

一方、コンピュータが発達し、マルチボディダイナミクスモデルでも二輪自動車の車両運動が計算できるようになってきた^[5]。マルチボディダイナミクスモデルは、有限要素法モデルを縮退した弾性体要素や、非線形要素も用いることができ、ライダー

の自由度やその他の自由度の拡張等も比較的簡単に行えるため、今後さらに活用しようと考えている。しかしながら、精度を求めると揃えるべき諸元に限りがなく、必要な諸元データの取得に膨大な時間を要してしまう。

そこで本研究では、これまでの二輪車の車両運動技術を有効活用しながら自由度を拡張させることのできるマルチボディダイナミクスモデルのベースモデルを作成することとした。ベースとなるモデルとしては、二輪車両運動モデルとしてシンプルかつ必要な要素を備えていると考えられる10自由度モデルの運動方程式^[2]を参考とした。また、運動方程式で、今回作成したマルチボディダイナミクスモデルと等価な計算結果を得るためには、運動方程式の一部を変更しなければならないことがわかった。

今回作成したマルチボディダイナミクスモデルと、10自由度モデルの運動方程式の変更内容について報告する。

2 集中剛性を含む二輪車の運動方程式

本研究で参考とした二輪車の10自由度モデルは、SHARPの4自由度モデル^[1]と同様に、ステアリングの回転、車体横変位、車体ヨーおよび車体ロールの4自由度も持っている。さらに、図1に示すようにフレームはフロントフォーク、メインフレーム、リアスイングアームより構成されており、それぞれのねじれ及び横曲げの自由度を、集中剛性要素で表現している。つまり、SHARPの4自由度モデル^[1]に加えて合計6自由度のフレーム剛性が考慮されている。

参考文献^[2]では二輪車の直進安定におけるフレーム剛性の影響について、実機検証結果とともに報告されている。

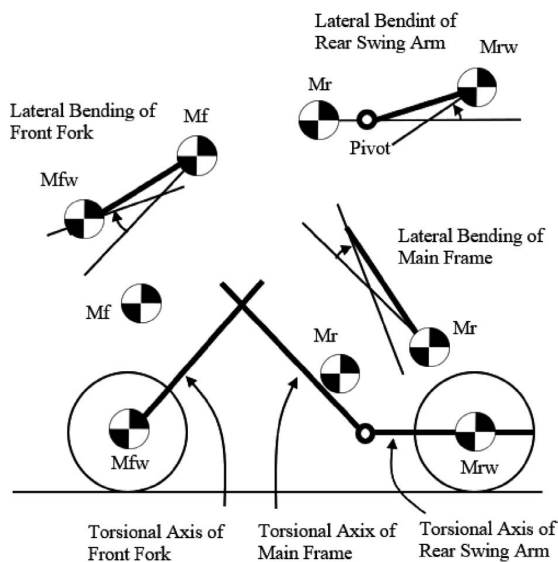


図1 Geometry of 10DoF Equations Model
 「青木章、他；フレーム剛性が二輪車の直進安定性に及ぼす影響の解析 日本機械学会論文集(C編)64巻625号(1998-9)論文No. 97-1799」参考

3 マルチボディダイナミクスモデルの作成

マルチボディダイナミクスモデルの作成において10自由度モデルの運動方程式を再現するため、参考文献^[2]の運動方程式の説明を参考に、以下の要素が同等となるよう作成した(図2)。

- 剛体ボディの質量、重心位置、慣性テンソル
- 剛体ボディ間の自由度
- タイヤ力:運動方程式のタイヤ力の式を力要素としてモデル化
- ねじり剛性:ねじれ軸上の回転バネ要素
- 横曲げ剛性:曲げ点(たわみ変換係数の逆数の位置)の横曲げ方向の回転バネ要素

- エンジンのフライホイールの極慣性モーメント:ピボット位置の回転体要素として等価換算
- 空力のかかる点:重心位置、およびホイールベース中心また、10自由度モデルの運動方程式、マルチボディダイナミクスモデルともに車両諸元はXS1100(1978年発売)を使用した。

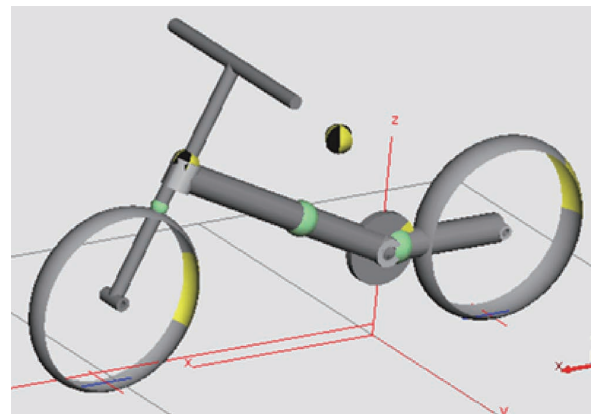


図2 Multi-body Dynamics Model

4 比較結果と運動方程式の変更

4-1. 計算結果の比較

作成したマルチボディダイナミクスモデルが10自由度モデルの運動方程式と等価なモデルとなったか確認するため、車速ごとに固有値計算を実施し、WeaveモードおよびWobbleモードについて固有値の比較を実施した。図3に示す。

Weaveモードについては高速側で乖離が大きくなり、Wobbleモードについては全車速で大きな乖離が発生した。この結果から同じ現象を等価に計算しているモデルとは言えないと判断し、原因を調査した。その結果を次節で示す。

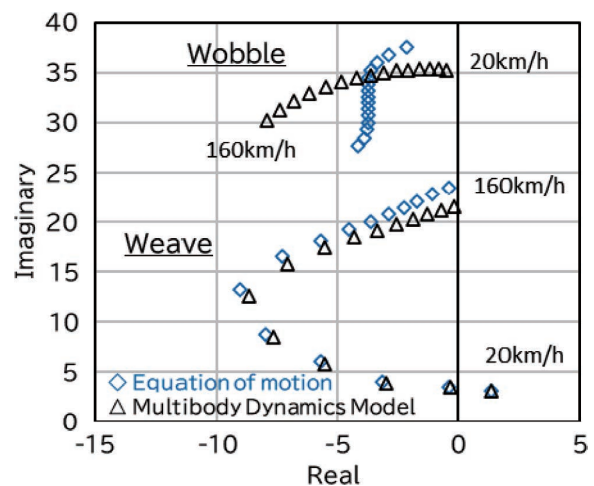


図3 Root Locus

4-2. 固有値結果乖離の原因調査

固有値結果の乖離原因を調査するため運動方程式およびマルチボディダイナミクスモデルを再確認したところ、フレーム剛性による横曲げ構造の表現について両者に違いがあることが判明した。2章のとおりマルチボディダイナミクスモデルでは曲げ点で折れ曲がる構造である。一方、10自由度運動方程式では横曲げについて「横力のつり合い式」として定式化しているが、マルチボディダイナミクスモデルと同じ横曲げ構造のつり合い式とするには「曲げ点にかかる横力」の項が不足していることがわかった。イメージを図4に示す。

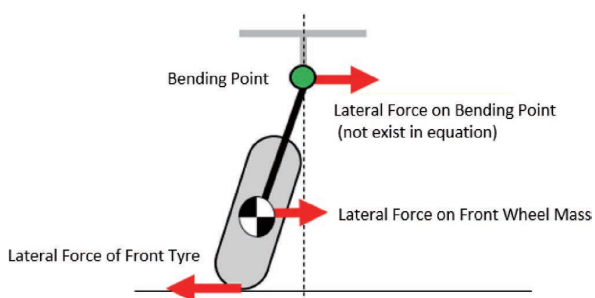


図4 Equilibrium of Lateral Force on Front Fork

上記が固有値結果の乖離原因と考えられるが、本報告ではマルチボディダイナミクスモデルと同じ横曲げの表現になるように運動方程式を変更することで、両者を等価なモデルとすることにした。

変更点はフォーク、メインフレーム、リアスイングアームの横曲げの式について「横力のつり合い式」から「モーメントのつり合い式」への変更である。つまり、「モーメントとのつり合い式」とするために、「横力のつり合い式」の力の各項に、曲げ点までの腕の長さを乗じてモーメントとした。また、曲げ点まわりのモーメントとすることで、曲げ点にかかる横力は無視できている。イメージを図5に示す。

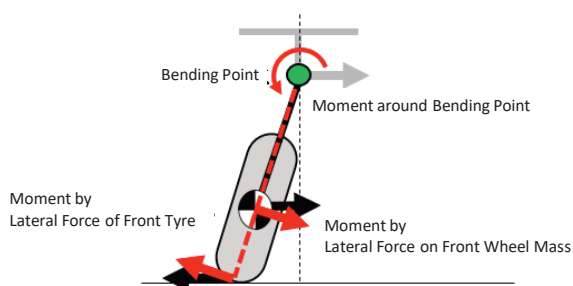


図5 Equilibrium of Moment around Front Fork Bending Point

4-3. 10自由度モデルの運動方程式変更後の比較結果

運動方程式変更後のマルチボディダイナミクスモデルとの固有値結果の比較を図6に示す。図に示すように各固有値は概ね一致した。

平均乖離量は Weave モードで Real -4.4%、Imaginary -0.13%、wobble モードで Real -2.9%、Imaginary 0.71% であった。

量産開発での利用を想定した場合には、影響がないとし、等価なモデルができたと判断した。

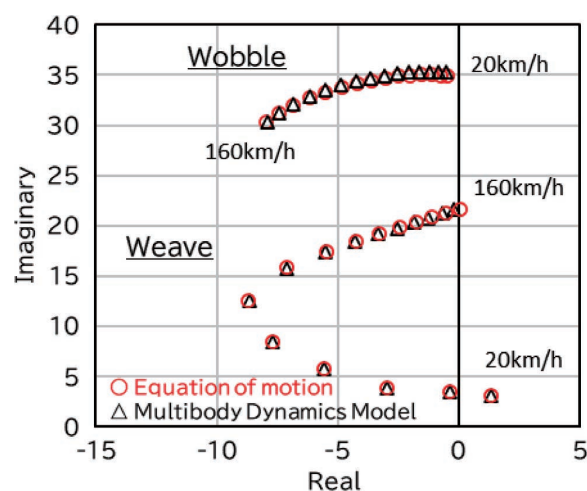


図6 Root Locus

5 まとめ

本報告では、二輪自動車の車両運動解析におけるベースモデルとして活用するため、二輪自動車の10自由度モデルの運動方程式を再現したマルチボディダイナミクスモデルを作成した。また、10自由度モデルの運動方程式の一部の変更した上で、両モデルの振動特性で比較することで整合をとることができた。

両モデルの活用方法として、代表的かつ少ない二輪自動車の諸元での検討や、大規模なパラメータスタディについては計算コストの低い運動方程式の使用が適しており、新たに自由度を考慮して検討する場合はマルチボディダイナミクスモデルの使用が適していると考えている。また、運動方程式の自由度を変更する必要がある場合、マルチボディモデルと再び整合をとることで運動方程式の、あるいは両者の検算としても利用をすることができる。

6 おわりに

今回二輪自動車の基本的な運動特性である直進安定性を評価するモデルについて報告したが、二輪車の車両運動は、操縦性も含めてまだ未解明な部分が多い。そのため、今回作成したモデルやその他の手法も取り入れながら、効率的に検証、研究を進め、当社の開発思想である人機官能の追求、および安全で楽しい魅力ある乗り物をつくることに貢献していきたい。

■参考文献

- [1] Sharp, R.S: THE STABILITY AND CONTROL OF MOTORCYCLES, JOURNAL MECHANICAL ENGINEERING SCIENCE Vol 13 No 5 1971 316-329
- [2] 青木章, 西見智雄, 岡山巧, 片山硬: フレーム剛性が二輪車の直進安定性に及ぼす影響の解析, 日本機械学会論文集 (C編) 64巻625号 (1998-9) 論文 No. 97-1799
- [3] 片山硬, 吉野貴彦: 二輪車の後フレーム剛性モデルの定式化, 自動車技術会秋季学術講演会 2022
- [4] 片山硬, 田本洋高, 吉野貴彦, 高橋昭: 二輪車の直進安定性解析手法の定式化, 自動車技術会論文集 52(2), 299-304, 2021
- [5] 内藤重男, 北川洋, 大富部寿一: 車両の弾性変形を考慮した二輪車の安定性解析モデル, 自動車技術会学術講演前刷集 108(1), 1-4, 2001

■著者



寺山 敬
Takashi Terayama
技術・研究本部
デジタル開発統括部
MBSE 推進部



山口 翔大
Shota Yamaguchi
技術・研究本部
デジタル開発統括部
MBSE 推進部



北川 洋
Hiroshi Kitagawa
PF 車両ユニット
PF 車両開発統括部
車両実験部



矢部 昇
Noboru Yabe
技術・研究本部
デジタル開発統括部
MBSE 推進部