2214 車載用フライホイールのエネルギー貯蔵特性とジャイロによる横転防止システムに関する研究

Study on characteristics of flywheel energy storage system for vehicles and on rollover prevention

フェロー 須田義大 (東大)   ○ 安藤孝幸 (東大)   小谷 学 (東大)
正 王 文軍 (東大)   正 中野公彦 (東大)

Yoshihiro SUDA, Center for Collaborative Research, University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo
Takayuki ANDO, Graduate School, University of Tokyo
Manabu KOTANI, Graduate School, University of Tokyo
Wang Wenjun, Graduate School, University of Tokyo
Kimihiko NAKANO, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

This paper proposes a new method to control of heavy vehicles for prevent of turn over using gyroscopic moment. In the proposed method the gyroscopic moment is assumed to be generated by the flywheel, which could be applied to vehicles as energy storage device. The simple two degrees of freedom analytical model was derived to examine theoretically and the parameters of flywheel system are referred to the real system which was introduced in our Chiba Experiment Station. Vehicle dynamics model is modeled by multibody dynamics software "SIMPACK" and the control performance was examined. Finally, the compatibility between gyro actuator and flywheel system for energy stores of braking of the vehicle is evaluated by numerical simulation under the assumption of actual operation mode. It was found that the proposed control system is effective for prevention of roll turn over and energy storage system.

Key words: Roll Over prevention, Heavy Vehicle, Gyro, Flywheel, Energy Storage, CFRP

1. 緒言

近年、車両のピークエネルギー平準化や制動時のエネルギー回生を行い、エネルギーの有効活用を図ることを目的としたハイブリッドシステムの研究開発が国内外で行われている。ハイブリッドシステムにおけるエネルギー貯蔵装置として、一般的にはバッテリーが検討されているが、寿命やエネルギー密度などの観点から、力学的エネルギーとして貯蔵するフライホイールの優位性も指摘されている⁽¹⁾。従来、エネルギー貯蔵用フライホイールは車両の運動に対し、ジャイロ効果による影響を及ぼさないようにダブルジンバル支持により車載されてきた。

一方、回転体としての性質を活用すれば車両の運動を積極的に制御できると考えられる。れまでに、受動形式のジャイロ制振機構として、船舶の減揺装置や索道器の減揺、および鉄道車両の蛇行の抑制、また、能動形式のジャイロ制振機構として、宇宙構造物の姿勢制御などの研究が行われた⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

筆者らは、フライホイール式エネルギー貯蔵装置をジャイロ機能を用いて車両の制御に適用することを提案し、鉄道車両の車体傾斜制御への適用や、大型貨物車両や連結車の転倒防止制御への応用を検討してきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。本研究では、大型車の横転防止への有効性について検討を深める。

大型車や連結車はトレッドに対する重心高が高く、横転(ロールオーバー)に対して不利な構造である。横転は、車両のダメージが大きく、乗員が車外に放出されると最悪の事態を招きかねない。さらに、車の規模から交通渋滞といった二次災害を引き起こすことが少なからずある。トルクの吸収効果からロールモーメントに直接作用するというジャイロ機能は、横転防止のための有効な手段と考えられる。横転防止に対するジャイロ機能の有効性を、数値シミュレーションを用いて検証するとともに、求めた制御量に対し、ジャイロ機能とエネルギー貯蔵の両立の可能性についても検討を行った。

2. エネルギー貯蔵特性

車載用エネルギー貯蔵装置として、二次電池、電気二重層型キャパシタ、フライホイールが有力視されている。各エネルギー貯蔵装置の特徴を図 2.1 に示す。フライホイールは、出力密度が高いが比較的損失の大きいという特徴から、制動エネルギー回生やハイブリッドシステムでの短時間貯蔵に適し、大型貨物車両や LRV、鉄道車両との相性がいいと考えられる。フライホイールの特性を把握するため、本研究室では千葉実験所にフライホイール評価試験装置を導入した。

Fig. 2.1 Characteristics of energy storage

3. 車両モデル

車両重量 10.5t の大型車のモデル化を行った。前車体と後車体との分割点は、フレームのねじりに関する一次モードがホイールベース中心にあるものとして、ホイールベースの中心に設定した。重心位置は、yz 方向に関しては各車体の中心とし、x 方向の位置は車両全体の重心位置と等しくなるように設定した。また、大型車におけるフレームのねじり剛性は、前車体と後車体に分割し、回転ばねを用いることにより模擬し、サスペンション構造については、ロールセンタの位置を車体に対し固定し、ロールセンタ回りの回転自由度及び車軸の上下方向の自由度を許す構造として模擬した。さらに、ロ

ールセンタ回りに回転ばねを加え、車軸と車体間にばね、ダンパを加えた。

3.1 座標系 慣性座標系 $O-XYZ$ に対し、車体の回転中心を原点、車両進行方向を x 軸、鉛直上向きを z 軸とし、慣性座標系の Z 軸まわりに ψ 回転させる座標系 $o-xyz$ を設定する。座標系 $o-xyz$ を図 3.1 (a) に示す。車体重心を原点とし、座標系 $o-xyz$ を x 軸まわりに ϕ 回転させる車体座標系 $G-\xi_1\eta_1\zeta_1$ を設定する。車体座標系 $G-\xi_1\eta_1\zeta_1$ を図 3.1 (b) に示す。車体座標系 $G-\xi_1\eta_1\zeta_1$ を η_1 軸まわりに θ 回転させるジンバル座標系 $G-\xi_2\eta_2\zeta_2$ を設定する。ジンバル座標系 $G-\xi_2\eta_2\zeta_2$ を ζ_2 軸まわりに Ω 回転させるジャイロ座標系 $G-\xi_3\eta_3\zeta_3$ を設定する。ジンバル座標系 $G-\xi_2\eta_2\zeta_2$ 及びジャイロ座標系 $G-\xi_3\eta_3\zeta_3$ を図 3.1 (c) に示す。また、ジャイロを車載したときの横転防止図を図 3.2 に示す。

Fig. 3.1 Coordinate systems

Fig. 3.2 Rollover prevention

3.2 主な記号

$I_1 = \text{diag}(I_{\xi_1} \ I_{\eta_1} \ I_{\zeta_1})$: 車体の慣性テンソル
 $I_3 = \text{diag}(I_{\xi_3} \ I_{\eta_3} \ I_{\zeta_3})$: ジャイロの慣性テンソル
 m_v : 車体の質量
 m_g : ジャイロの質量
 l : 車体回転中心から車体重心までの距離
 V : 車体の走行速度

Ω : ジャイロの回転角速度

k : ジンバル軸まわりのばね定数

c : ジンバル軸まわりの粘性減衰係数

ϕ : 鉛直軸に対する車体傾斜角

θ : ジンバル角

g : 重力加速度

b : トレッド

h : 重心高さ

$\alpha : \tan^{-1}(b/2h)$

J : ジャイロの ζ_3 軸まわりの慣性モーメント

L : ジャイロの ζ_3 軸まわりの角運動量

$\Omega_{\max}$: ジャイロの ζ_3 軸まわりの上限角速度

b : ジャイロの回転半径 (外径)

α : ジャイロの外径と内径の比 ($= a/b$)

β : ジャイロの下限角速度と上限角速度との比 ($= \Omega_{\min}/\Omega_{\max}$)

ρ : ジャイロの材料密度

$\sigma_{\max}$: ジャイロの引張強さ

K_s : 安全率

K_a : 有効エネルギー率

3.3 運動方程式 運動方程式は以下のように導かれる。

$$\begin{aligned} & \{I_a + I_{\xi_3} + (m_v + m_g)l^2\} \ddot{\phi} \\ &= (m_v + m_g)lV\dot{\psi}\cos(\alpha - \phi) - (m_v + m_g)gl\sin(\alpha - \phi) \\ & - I_{\xi_3}\Omega\dot{\theta}\cos\theta + I_{\xi_3}\dot{\psi}\dot{\theta}\cos\phi - I_{\xi_3}\Omega\dot{\psi}\cos\theta\sin\phi \\ & + (I_{\eta_1} - I_{\xi_1})\dot{\psi}^2\sin\phi\cos\phi - (m_v + m_g)l^2\dot{\psi}^2\sin(\alpha - \phi)\cos(\alpha - \phi) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} & I_{\xi_3}\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta \\ &= I_{\xi_3}\Omega\dot{\phi}\cos\theta - I_{\xi_3}(\dot{\psi}\sin\phi + \dot{\psi}\dot{\phi}\cos\phi) - I_{\xi_3}\Omega\dot{\psi}\cos\phi\sin\theta \end{aligned} \quad (3.2)$$

車両のロール角 ϕ について十分小さいとし、微小項を無視すると、次式で表される。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I_{\xi_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & I_{\xi_3}\Omega \\ -I_{\xi_3}\Omega & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} -ml(V\dot{\psi}\sin\alpha + gl\cos\alpha) & 0 \\ 0 & k + I_{\xi_3}\Omega\dot{\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} ml(V\dot{\psi}\cos\alpha - gl\sin\alpha) \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.4 ジンバル角の制御 (3.3)式は、ジンバル角 θ 回りの運動方程式において、車両のヨーレートによりジャイロの運動が異なることを示しており、鉄道車両にくらべヨーレートの比較的大きい自動車では顕著に差が表れると予想できる。また、ジンバル角が大きくなるにつれ、車両のヨー運動への影響も大きくなると予想される。

そこで、ジャイロによる外乱トルクの吸収効果、車載時における許容運動を考慮し、ジンバル角変位を 30deg に抑制することとする。横転防止制御の流れを図 3.3 に示す。横転の危険性のある横加速度が発生したとき、はじめに、外部ジンバルを拘束し、内部ジンバルにより外乱トルクを吸収する。そして内部ジンバル角が 30deg に達したとき、ヨー運動への影響を小さくするため、内部ジンバルを固定する。

Fig. 3.3 Flow of control

4. 横転防止効果の数値シミュレーション

3章で示した車両モデルを用い、大型貨物車両および連結車両の横転防止に関する有効性について、数値シミュレーションを用いて検証した。尚、車両モデルは MBD 汎用ソフトである SIMPACK を用いて作成した。

4.1 計算条件 車速 80km/h において実舵角 6deg を時刻 4s においてステップ上に与えるものとする。本条件は発生する横加速度がロールオーバー条件に近く、制御なしでは横転の危険性がある条件である。本計算モデルにおける横加速度のロールオーバー条件は、約 0.58g である。ジャイロの慣性テンソルは、千葉実験所における評価試験装置を参考にし、 $I = \text{diag}(7.5 \ 7.5 \ 7.5)$ (単位は kgm^2) とし、回転角速度を 0rad/s, 500rad/s, 750rad/s, 1000rad/s, -500rad/s, 750rad/s, -1000rad/s と変化させて計算した。

また、ジャイロの制御開始はロール角が 5deg になった時と設定した。ジンバル角は 30deg または、-30deg において拘束されるようにした。本数値シミュレーションにおいては、ばねにより拘束を行うように設定している。ただし、750rad/s, 1000 rad/s の条件においてはジンバル角は 20deg において拘束されるものとした。

4.2 計算結果 計算結果より、10.5t 車両では、回転軸の向きに関わらず、慣性モーメント 7.5kgm^2 のフライホイールで 750rad/s(約 7000rpm)以上、即ち角運動量で約 5600Nms 以上の条件で横転を防止できることが分かった。また、解析では、接地した際の路面からの跳ね返りにより、ロール角が振動的になった。ジンバル角を 30 度までに拘束することによって、車両のヨー軸回りの回転運動との影響は少なく、フライホイール回転軸の向きによるジャイロの効果の差はほとんどでないことが確認できた。

Fig. 4.1 Vehicular swept path

Fig. 4.2 Roll angle

5. エネルギー貯蔵とジャイロ機能の両立

本章では、エネルギー貯蔵とジャイロ機能の両立性に関する検討を行う。車両が一般道路を走行するとき、フライホイールは、車両の駆動時に車両へ駆動トルクを供給し、逆に、制動時には車両の運動エネルギーを吸収する。この過程において、ジャイロの角運動量は変化するが、その値が常に横転防止制御に必要な値より大きければ、フライホイールは常にジャイロ機能としても働くことができる。そこで、大型車両が代表的な 10 モード走行を行ったときのフライホイールの両立性について、数値シミュレーションによる解析を行う。

5.1 モード走行 モード走行には目的によって様々なものがあるが、ここでは、市街地に近い 10 モードを想定し、その間におけるジャイロの回転数や角運動量、エネルギー変化について計算する。10 モードを図 5.1 に示す。

Fig. 5.1 10mode

5.2 フライホイールの成立条件 フライホイールの成立条件は、次式のように表される。

$$\frac{\beta^2}{2} J \Omega_{\max}^2 \leq \frac{L}{2J} \leq \frac{1}{2} J \Omega_{\max}^2 \quad (5.1)$$

また、ジャイロの許容回転角速度は、安全率を考慮すると、以下の式で表される。

$$\Omega_{\max} \approx \frac{1}{b} \sqrt{\frac{\sigma}{K_a \rho}} \quad (5.2)$$

これらを考慮すると、以下のような条件をみたすとき、ジャイロ機能が成立することになる。

$$\sqrt[4]{\frac{2L}{\pi(1-\alpha^4)^2} \sqrt{\frac{K_a}{\sigma \rho}}} \leq b \leq \sqrt[4]{\frac{2L}{\pi \beta(1-\alpha^4)^2} \sqrt{\frac{K_a}{\sigma \rho}}} \quad (5.3)$$

横転防止制御システムで必要とされるジャイロの角運動量は、4.2 節で約 5600Nms であることが分かった。下限回転数で回転しているときの角運動量がこの値になるためのジャイロの質量、半径を求めた結果を表 5.1 に示す。ただし α, β の

値はともに 0.5 とし、安全率は 2 とする。また、ジャイロに用いる材料として、高張力鋼、マレージング鋼、CFRP の 3 種類について比較する。これらの材料の物性値を表 5.2 に示す。

Table5.1 Numerical values

	high-tensile steel	maraging steel	CFRP
radius[mm]	284	222	257
mass[kg]	282	205	64

Table5.2 Properties

	high-tensile steel	maraging steel	CFRP
tensile strength[MPa]	1024	2450	3820
density[10 ³ kg/m ³]	7.8	7.9	1.6

5.3 シミュレーション結果 5.2 節で求めたジャイロの諸元を用い、各材料に対して求めた、10 モードにおける回転角速度、角運動量、エネルギー変化を図 5.2～5.4 に示す。また、簡単のため、フライホイールのエネルギーの授受はすべて、大型車の運動エネルギーとの間に行われるものとした。図より、車両の速度が最も大きい時刻において、フライホイールの角運動量の値は最小値の 5600Nms をとり、その他の時刻についても、横転防止システムに必要な角運動量を上回っていることがわかる。また、どの時刻においても、CFRP を用いたフライホイールのエネルギー量が他の材料に比べて 1kWh 程度大きいことがわかる。さらに表 5.1 より、軽量という点においても、CFRP は他の材料より優れているということが出来る。

Fig 5.2 Fluctuation of rotation speed

Fig 5.3 Fluctuation of angular moment

Fig 5.4 Fluctuation of flywheel energy

6. 結言

本研究では、フライホイールエネルギー貯蔵装置のジャイロ機能を有効に活用した車両運動制御の提案を行い、大型自動車の横転防止制御の可能性を検討した。基礎的な理論解析を踏まえ、数値シミュレーションを用いて、10.5t の車両モデルにおいて、ジンバル角を±30deg に制限したジャイロを車載することによって、大型車両の横転防止への有効性を示した。さらに、エネルギー貯蔵とジャイロ機能の両立について検討を行い、ジャイロ機能を有効活用するための角運動量を持ちながら、エネルギー貯蔵装置としての要件を満たせることを示した。また、フライホイールの材料として、CFRP が優れていることを確認した。

7. 参考文献

- (1) Henning,U., Thoolen,F., Lamperth,M., Berndt,J., Lohner,A., Janig,N., Light Rail Transit with Ultralow Emission Hybrid Tractoin Drive System, Proceedings of International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems, 2006,282
- (2) Den Hartog, J. P., Mechanical Vibrations, 106, (1956), McGraw-Hill
- (3) Kanki,H., Nekomoto,Y., Monobe,H., Ogura,H., Kobayashi,K., Development of CMG Active Vibration Control Device for Gondla. JAME International Journal Series C Vol37 No.3,Sept. 1994,468
- (4) Okamoto,H., Lin,S., Kotani,M., Yabuno,H., Suda,Y., Stabilizatoin Control for Hunting Motion of Railway Vehicle by Gyroscopic Damper, Proceedings of 10th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies(VSDIA2006), Budapest
- (5) 黒河: コントロールモーメントジャイロを用いた人工衛星の姿勢制御, システム/制御/情報,33-4 (1989),157
- (6) 須田義大, 王文軍, 小谷学: 新方式による車両の姿勢制御に関する研究, 第 15 回交通・物流部門大会講演論文集, No.06-52, pp253-256, 2006
- (7) 須田義大, 王文軍, 小谷学: ジャイロを用いた車体傾斜システムに関する研究, 日本機械学会年次大会講演論文集, No.06-1 pp369-370, 2007
- (8) 須田義大, 小谷学, 王文軍: 横転防止制御システムに関する研究, 日本機械学会年次大会講演論文集, No.07-1, pp365-366, 2007