3103　駆動装置にフライホイール機構を持たせた蛇行動抑制ジャイロダンパの実現

学 [機] ○吉野 隼人　(慶應大)　　フェロー [機] 藪野 浩司　(慶應大)
正 [機]　林 世彬　(東大生研)　　フェロー [機] 須田 義大　(東大生研)

Stabilization Control for the Hunting Motion of a Railway Wheelset by Utilizing the Running gear as a Gyroscopic Damper

Hayato Yoshino, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi Kouhoku-ku Yokohama-city, Kanagawa
Hiroshi Yabuno, Keio University
Shihpin Lin and Yoshihiro Suda, Institute of Industrial Science, Tokyo University

A railway wheelset experiences the problem of hunting motion above a critical speed, which is known as a flutter-type self-excited oscillation owing to a nonconservative contact force acting between wheels and rails. It is shown that a gyroscopic damper is effective in increasing critical speed for the hunting motion. In this paper, a stabilization control method is proposed by utilizing the running gear as a gyroscopic damper which does not need additional power to rotate a gyroscopic damper. Experiments were conducted using a simple apparatus with a roller rig and a gyroscopic damper which has the mechanism equivalent to the proposed one, and the results show the validity of the gyroscopic damper for the stabilization of hunting motion.

Keywords: Hunting motion, gyroscopic damper, running gear, stabilization control, railway vehicle, experiment

1　はじめに

近年鉄道車両の安全性と快適性が求められるなか，高速走行時に車輪軸に生じる蛇行動現象の発生防止法の研究開発が，大きな課題の一つとされている [1][2][3].

蛇行動現象とは鉄道車両特有のものであり，ある速度を超えて走行した時に発生する一種の自励振動である [4]. この現象は鉄道車輪とレールの摩擦によって生じるクリープ力に起因した，車輪軸の左右運動とヨーイング運動の連成によるものであることが知られている [5]. 蛇行動現象を抑制するための方法として車両踏面形状の最適化やヨーダンパの剛性を上げる手段が一般にとられているが，これらは曲線通過性能の悪化をもたらす．そこで直線通過性能と曲線通過性能をともに向上させるため，我々の研究グループではジャイロを用いたパッシブな蛇行動の安定化法を提案してきた [6]. ジャイロの回転軸を走行方向と平行および垂直になるように台車に配置した一輪軸台車モデルについて，直線および曲線走行時における蛇行動速度の上昇が可能であることが理論および実験によって示されている [7]. しかし従来の方法では車輪駆動用モータとは個別に設けたジャイロ駆動専用モータを内部ジンバルに取り付けてジャイロを回転させていた．これは新たな付加的動力を取り付けることによる車両重量増加をまねき，また車両駆動用モータとは個別の制御が必要となり，実用化へ向けての課題となっていた.

そこで本研究では車輪駆動装置自身にフライホイール機構をもたせたジャイロダンパを提案する．この機構は球型歯車の歯面形状により車輪軸に対するモーター回転軸のローリング角を許容して車輪の回転を直接伝達することができ，駆動軸自身がジャイロの働きを持ちジャイロモーメントを発生させることが出来る（アクチュエータレスジャイロ）．更に，現行の実車のモーター回転軸の平歯車を球型歯車に代えるだけで実現することが出来るため，実用化に向けて非常に有効な手法であると考えられる．また車輪軸とジャイロ回転軸の間の減速比を適切に選定することにより，車両が走行するだけで蛇行動現象の安定化を実現できる.

提案したジャイロダンパの蛇行動現象に対する安定化効果を検証するために，本研究では提案した機構と等価な球型歯車を用いた軌条輪実験装置を製作し走行試験を行う．その実験結果を基にアクチュエータレスジャイロを搭載した一輪軸台車の蛇行動現象安定化効果について検証した.

2　駆動装置のジャイロダンパとしての利用

Fig.1 が実車における台車枠のローリング変位と車軸との相対関係，および動力伝達機構を表すモデル図である．これまで提案してきた方法ではジャイロモーメントを発生させるために，車軸に対してジャイロが自由にローリング方向に動くことが出来る機構が必要であった．しかし実車ではモーター部のたわみ軸継手により台車とモーター軸の相対変位（ローリング角）を許容することはできるものの，モーター軸に取り付けられている歯車が平歯車であるために，車輪軸に対してモーター軸の相対変位を許容することが出来ない．モーター軸を使ってジャイロ効果を発生させるためにはモーター軸が車輪軸に対して相対変位を許容することが出来るような機構が必要である.

そこで本研究で提案するのが Fig.2 に示す平歯車の代わりに球型歯車を用いる機構である．球型歯車は円弧上の歯面をもち，駆動軸と従動軸の傾きを許容し，それらの間で動力伝達をすることが出来る．すなわち，駆動軸 (車輪軸) が従動軸 (モーター回転軸) に対して傾きを持った場合にも減速比が変化する

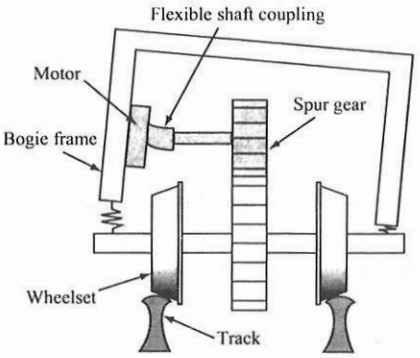

Fig.1 Vehicle model diagram representing the power transmission mechanism and the relationship between the axle and the rolling displacement of the bogie frame.

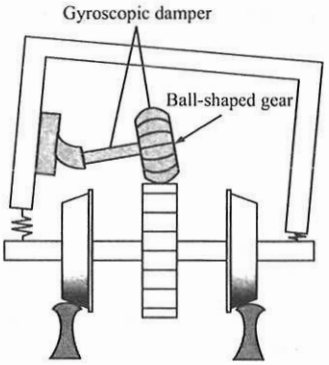

Fig.2 Realization of the gyroscopic damper by utilizing the running gear.

ことなく連続的に回転を伝達することが可能である．この球型歯車を従来のモーター軸に取り付けられている平歯車の代わりに使用することによって，球型歯車の歯面形状により車輪軸に対してモーター軸のローリング角を許容することが出来，蛇行動を抑制するジャイロモーメントを発生させることが出来る．

このような機構を採用することにより実車においても，モーター回転軸部の平歯車の代わりに球型歯車を用いるだけで駆動軸が蛇行動抑制ジャイロダンパの機能を果たすことができジャイロダンパをを用いた蛇行動安定化法は容易に実用化可能と考える．

3 ジャイロを搭載した一輪軸台車の運動方程式

3.1 解析モデル

本研究で用いるジャイロを搭載した一輪軸台車の解析モデルを Fig.3 に示す．ここで車輪軸は台車にばねで支持され，水平な線路の上を一定の速度 V で走行するものとする．また車輪軸が取りつけられている台車枠は質量が無限大であるとし，軸方向に一定の速度で進むものとする．動座標系 x-y-z の座標原点を静止時の車輪軸中央にとり，y 軸を車輪軸と平行方向，x 軸を進行方向とし，この座標系は回転せず x 方向に台車

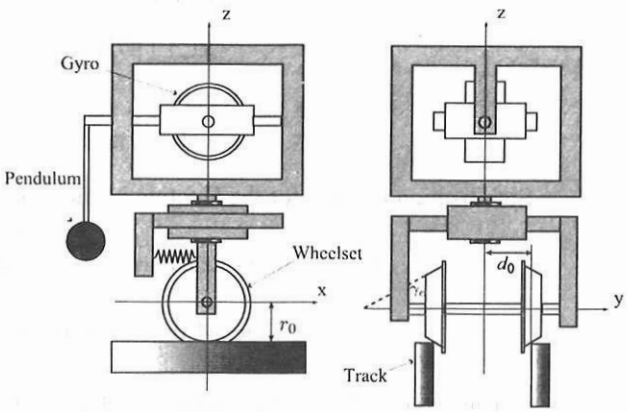

Fig.3 Analytical model of a single railway vehicle wheelset that has a fundamental two-degrees-of-freedom model with respect to the lateral and yawing motions of the wheelset.

と共に一定の速度で平行移動するものとする．車輪軸は y 方向と z 軸まわり (ヨーイング運動) に自由度を持つ．一方ジャイロ制振機構は，車輪軸のヨーイング軸まわりの振動がジャイロに伝わるように外部ジンバルと台車を繋げて固定する．これによりヨーイング軸まわりの角速度がジャイロに伝わり，反作用としてジャイロモーメントが一輪軸台車のヨーイング方向に加わることになる．

3.2 支配方程式

ジャイロを搭載した一輪軸台車モデルの運動方程式は以下のように表される．

・台車左右方向運動

$$M\frac{d^2y}{dt^2}+\frac{2\kappa_y}{v}\frac{dy}{dt}+k_x\left(1-\frac{l_0}{l}\right)y-2\kappa_y\psi=0 \qquad (1)$$

・台車ヨーイング運動

$$J_0\frac{d^2\psi}{dt^2}+\frac{2d_0^2\kappa_x}{v}\frac{d\psi}{dt}+\frac{2d_0\kappa_x\gamma_e}{r_0}y+k_xd_1^2\psi$$

$$+J_y''\Omega\frac{d\xi}{dt}=0 \qquad (2)$$

・ジャイロローリング運動

$$(J_x''+J_{xig}'')\frac{d^2\eta}{dt^2}+J_y''\Omega\frac{d\psi}{dt}+d_j\frac{d\xi}{dt}+m_pgl_p=0 \qquad (3)$$

式 (1)〜(3) はそれぞれ台車・左右方向運動，台車・ヨーイング運動，ジャイロ・ローリング運動を表している．M と J_0 はジャイロ機構を搭載した一輪軸台車の質量および慣性モーメント，J_x'' はジャイロの x'' 軸まわりの慣性モーメント，J_y'' および J_{yig}'' はそれぞれジャイロと内部ジンバルの y'' 軸まわりの慣性モーメント，κ_x および κ_y は前後・左右のクリープ係数，l は平衡状態の支持ばね長さ，l_0 は支持ばね自然長，$2d_0$ は平衡状態の車輪・レール接触点間隔，$2d_1$ は支持ばね間隔，r_0 は平衡状態での車輪回転半径，γ_e は車輪踏面勾配，d_j および k_j は x 軸まわりの粘性減衰係数とねじりばね係数，Ω はジャイロの自転角速度をそれぞれ表している．なお x''-y''-z''

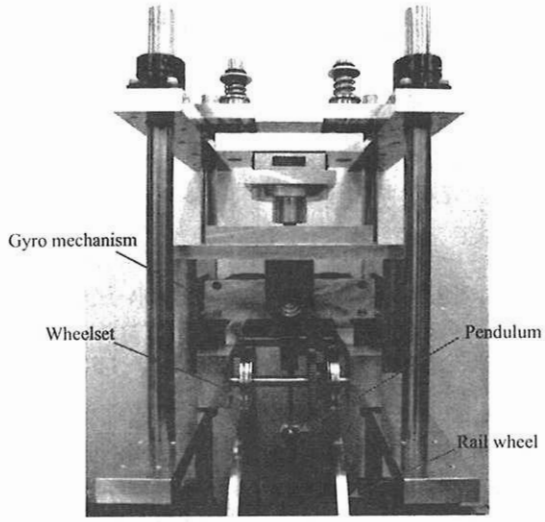

Fig.4 Experimenntal equipment designed to observe the stabilization of hunting motion by utilizing the running gear as a gyroscopic damper.

座標系はジャイロの重心を原点としジャイロとともに運動する動座標系である.

式 (1) の第 4 項の ψ の項, 式 (2) の第 3 項の y の項がそれぞれクリープ力に関する項であり, これらの連成項により蛇行動が起こる. また台車ヨーイング運動の方程式にジャイロローリング角速度に関する項が、逆にジャイロローリング運動の方程式に台車ヨーイング角速度に関する項がそれぞれ存在することにより, 蛇行動によって生じたヨーイング角速度に対応しジャイロが台車へヨーイング方向のモーメントを与えることがわかる. また, 以上の式を無次元化しモデルのパラメータを用いて固有値解析を行うことにより蛇行動速度の理論計算を行うと, ジャイロダンパによって蛇行動速度が上昇することが示されている [8].

4 軌条輪を用いた走行実験

4.1 軌条輪実験装置

Fig.4 は本実験で使用した一輪軸台車である. 一輪軸台車がレールの上を走行する状況を再現するため, モータで回転する軌条輪上を一輪軸台車が走行する実験装置を使用した. 軌条輪にはモータ (三木プーリ, SEM-400B) とエンコーダ (富士計測器製作所, PG-10800, 分解能 : 10800 パルス) が取り付けられている. またエンコーダから出力されたパルスをデジタルパネルメータ (ココリサーチ, TDP-3621) に取り込み, 軌条輪の周速度に変換し表示させることにより, 現時点での走行速度を確認しながら任意の速度を与えることができる.

4.2 一輪軸台車の自由度とその機構

本実験装置は進行方向に向かって車体左右方向 (式 (1)), 車体ヨーイング方向 (式 (2)), 車体上下方向 (式 (3)) の 3 自由度をもつ. 車体の左右, ヨーイング, 上下方向はボールスライドユニット (日本トムソン, BSU44-80A) と軸受ハウジング内にあるラジアルボールベアリング (日本精工, 6003ZZ) およびボールスプラインによって自由度をもたせている. これらの自由度を実現する機構は上からボールスプライン, ボールスライドユニット, ラジアルボールベアリングの順に取り付けており, 実際の鉄道車両に用いられる一輪軸台車の自由度を再現している. また, ボールスプライン上部に取り付けられた圧縮ばねの縮み量を変化させることで一輪軸台車の車輪が軌条輪から受ける摩擦力を調節することが可能である. さらに左右方向とヨーイング方向については, 台車と取付ベースとの間に設置した引張ばねが復元力を与えている.

4.3 内部ジンバル構造とジャイロ回転伝達機構

研究で使用する一輪軸台車において制振器として用いるジャイロ機構部分 (内部ジンバル) にはジャイロ回転軸に球型歯車と二つのフライホイールを取り付けられており, 球型歯車で車輪軸の回転を伝達し, フライホイールでジャイロモーメントを発生させる際に必要な慣性モーメントを持たせている. 内部ジンバル全体は台車に対して二つのラジアルボールベアリング (日本精工, 6001ZZ) で支持されており, ローリング方向に自由度を持っている. またそのローリング軸には振り子が取り付けられており, 平衡状態で内部ジンバル機構が水平方向に戻るための復元力として働いている.

ジャイロの回転は一輪軸台車の車軸の回転を中継軸を介することにより行われる機構である. ジャイロ効果が車輪の蛇行動に影響を与える (内部ジンバルがジャイロモーメントを得る) ためにジャイロ回転軸が車輪軸に対してローリング方向に傾く機構でなければならない. このような機構を実現するため、本研究では球型歯車 (長岡歯車製作所) を採用した。

球型歯車とは円弧上の歯面をもち, 駆動軸と従動軸の傾きを許容し, それらの間で動力伝達ができる機構である, すなわち, 駆動軸 (車輪軸) が従動軸 (ジャイロ回転軸) に対して傾きを持った場合にも減速比が変化することなく連続的に回転を伝達することが可能である. またジャイロの回転数は車輪軸の回転と直結しているため, 車輪軸とジャイロ軸の間の減速比から一意に決まる.

5 実験結果

軌条輪実験装置に本研究で設計・製作したジャイロ制振機構付一輪軸台車を載せ, 軌条輪を回転させ一輪軸台車がレールの上を走行する状況を再現する. 台車が軌条輪を走行している間の左右方向の変位について内部ジンバルのローリング運動を固定した (ジャイロモーメントが発生しない:ジャイロ制振機構を作動させない) 場合と内部ジンバルのローリング運動を固定しない (ジャイロモーメントが発生する:ジャイロ制振機構を作動させた) 場合について測定し, ジャイロ制振機構の蛇行動抑制効果を検証した. 台車の左右方向の変位は地面に固定された一輪軸台車取付ベースに設置されたレーザー変位計 (キーエンス　LB-01) の出力電圧を FFT に取り込み時刻歴波形を表示させるとともに, 波形を周波数解析し, 各周波数成分による振幅を調べた.

内部ジンバルのローリング運動を固定した場合と固定しない場合の一輪軸台車の各走行速度における定常状態の振幅の時刻歴波形と周波数解析の結果から, 台車全体の振幅を軌条輪成分, 車輪成分, 蛇行動成分にそれぞれ区別し, そのうちの

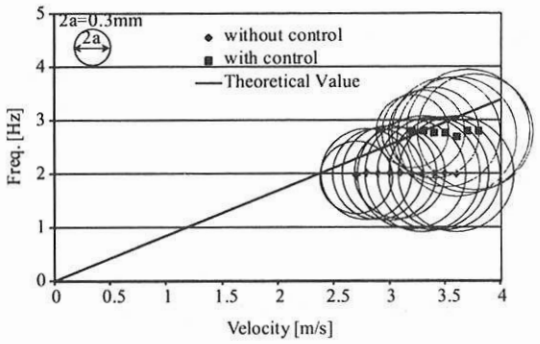

Fig.5 Campbell diagram for relationship between velocity and frequency when the hunting motion occurs. The size of the circle is proportional to the magnitude of the amplitude.

蛇行動成分のみに着目し横軸を走行速度，縦軸を周波数，振幅を円の直径で表した丸解析法によるグラフを描き，Fig.5 に示した．

図中の円の直径が蛇行動の各周波数成分における振幅の大きさに比例している．また蛇行動周波数の理論値は輪軸の蛇行動波長 S_1 が

$$S_1 = 2\pi\sqrt{\frac{d_0 r_0}{\gamma_e}} \tag{4}$$

とあらわされことにより求めている [4]．

ジャイロローリング軸を固定してジャイロモーメントを発生させない場合では v=2.70m/s から蛇行動が始まり，ジャイロローリング軸を固定せずにジャイロモーメントを発生させた場合では v=3.20m/s から蛇行動が始まることがわかる．よって本実験において，ジャイロローイング軸を固定せずにジャイロモーメントを発生させ制御を行う場合とジャイロモーメントを発生させない場合と比較して蛇行動速度は約 15.6 %上昇する結果が得られた．

6 おわりに

本研究ではジャイロダンパを用いた鉄道車両の蛇行動現象の安定化の実用化を目的として，球型歯車を用いた駆動装置にフライホイール機構を持たせたジャイロダンパ機構を提案し，それと等価な球型歯車を用いた一輪軸台車を設計し，提案する機構による蛇行動現象安定化効果を実験的に検証した．得られた結果をまとめると以下のようになる．

1. 実車において駆動装置にフライホイール機能を持たせたジャイロダンパが有効であることを示した．
2. 実車に球型歯車を使用した場合と等価な一輪軸台車を設計・製作し，実験を行った．
3. 製作した一輪軸台車の蛇行動現象の安定化効果を実験的に検証し，ジャイロ制振機構を動作させた場合は動作させない場合と比較して蛇行動速度が約 15.6 %上昇することがわかった．

今後，走行実験に加え実車のパラメータを用いた固有値解析により蛇行動速度の理論計算を行い，ジャイロダンパ機構の蛇行動安定化効果に対する有効性を定量的に調べる．

参考文献

1) Y.C. Cheng, C.T. Hsu, Hunting stability and derailment analysis of a car model of a railway vehicle system, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit, Vol.226, pp. 187-202, (2012).

2) W. J. Chung, J. K. Shim, Influence factors on critical speed hysteresis in railway vehicles, JSME International Journal Series C-Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing,Vol. 46, pp. 278-288, (2003).

3) H. Fujimoto, K. Tanifuji, M. Miyamoto, Influence of track gauge variation on rail vehicle dynamics(an examination based on comparison between data from a test train running on track with irregularity artificially set and numerical simulation), Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 214, pp. 223-230, (2000).

4) 日本機械学会, 鉄道車両のダイナミクスー最新の台車テクノロジーー, 電気車研究会, (1994).

5) 南秀樹, 鉄道車両の駆動軸系自励振動 (台車系振動が及ぼす影響についての理論的考察), 日本機械学会論文集, 64 巻 622 号 C 編, pp. 1912-1919, (1998).

6) H. Yabuno, H. Takano, H. Okamoto, Stabilization control of hunting motion of railway vehicle wheelset using gyroscopic damper, Journal of Sound and Vibration , pp. 209-230, (2008).

7) 岡本浩典, 小谷学, 林世彬, 藪野浩司, 須田義大, ジャイロを用いた鉄道車両に生じる蛇行動現象の安定化, 日本機械学会論文集,74 巻 738 号 C 編, pp. 235-241, (2008).

8) K. Nishimura, H. Okamoto, S.P. Lin, H. Yabuno, Y. Suda, Experiment on stabilization of hunting motion by gyroscopic damper, STECH, (2009)