

鉄道車両の自律的横転防止の為に三次元重心検知

○ [機] 勝村 元亮 (東京海洋大学) [機] 川島 進 (東京海洋大学)

[機] 渡邊 豊 (東京海洋大学)

D3DCG for autonomous prevention of railway rollover accidents

○Motosuke Katsumura, (Tokyo University of Marine Science and Technology)

Susumu Kawasima, (Tokyo University of Marine Science and Technology)

Yutaka Watanabe, (Tokyo University of Marine Science and Technology)

The three dimensional detection of the center of gravity (D3DCG) is the technological innovation to prevent rollover accidents of moving objects. D3DCG can detect the center of gravity in real-time without knowing either mass (m) or spring constant (k) of the object. The author applied D3DCG for a variety of trains, which were a high speed train (Shinkansen), a commuter train in a city, a local train in a suburb and a right rail transit on a road. The critical speed for rollover accidents was derived from the result of D3DCG and it was appropriate to be compared with the investigation of the disaster at Fukuchiyama line.

キーワード：重心，三次元重心検知，横転，鉄道車両，移動体の振動，自由振動

Key Words : Center of Gravity, D3DCG, Rollover, Railway, Vibration of Moving Body, Natural Frequency

1. はじめに

鉄道車両のカーブでの速度超過における横転事故は、福知山線の事故のように甚大な被害を生じることがある。横転事故を安価に防ぐ手段として三次元重心検知理論¹⁾が注目されている。川島らの研究²⁾によれば都市近郊の鉄道車両においては、三次元重心検知理論が適用できることが実験によって証明され、理論の妥当性も確認されている。

2. 研究の背景と目的

国内には第三セクターなどのローカル鉄道から新幹線に至るまで、多種多様な鉄道車両が運行されている。鉄道車両の減速にはATSなどの保安装置が有効である。

図1は東日本の保安装置の整備状況である³⁾。保安装置は高価なため、コストの面において全国に整備することは難しい。また保安装置は線路の分岐や信号の色などの条件が保安装置の作動に必要で自律的であるとは言い難い。そこで本研究では鉄道車両の種類やインフラに依存しない安価で自律的な方法として、三次元重心検知理論を適用し、乗客数に応じた車両個々の空間的重心位置の検知を行い、鉄道車両の横転限界速度の算出を行う。

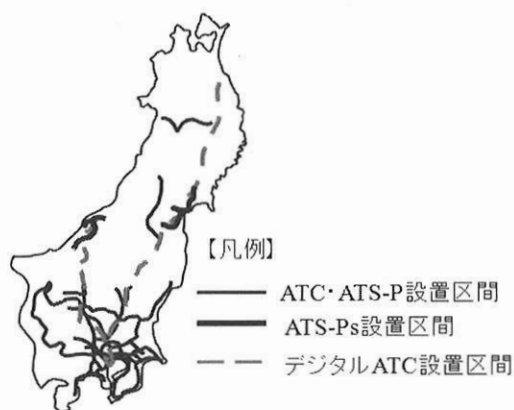


図1 東日本の鉄道路線における保安装置の整備状況³⁾

3. 三次元重心検知理論の定式化

三次元重心検知理論¹⁾は船の浮動を応用し、海上コンテナトレーラトラックの横転事故防止を目的に発明された理論である。本研究では走行中の鉄道車両の自由振動によって発生する垂直方向の上下加速度の周波数と左右方向のローリング角速度の周波数に三次元重心検知理論を適用し、鉄道車両の空間的重心位置を検知する。図2は空間的重心位置由来の鉄道車両の動揺のイメージである。

次の式(1)は図 2 に基づき三次元重心検知理論を定式化したものである。

$$L^2 + \frac{g}{4\pi^2\nu^2}L - \frac{b^2\nu'^2}{4\nu^2} = 0 \quad \dots (1)$$

ただし

L : 車両動揺中心軸から乗客を含めた車体部分の空間的重心位置までの高さ(m)

g : 重力加速度(m/sec²)

π : 円周率

ν : 車体の左右方向のローリング角速度の周波数(Hz)

ν' : 車体の垂直方向の上下加速度の周波数(Hz)

b : 車両動揺中心軸から乗客を含めた車体部分の質量を支えている部分の幅(m)

とする。

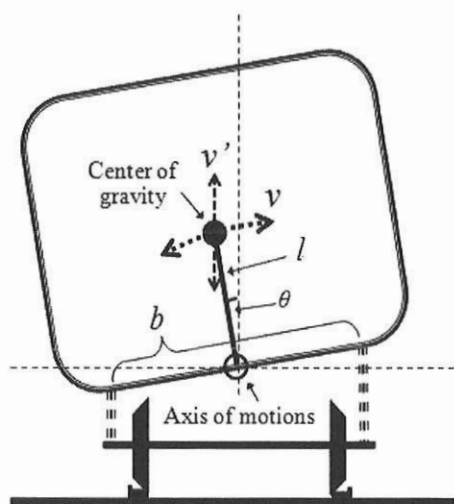


図 2 空間的重心位置由来の鉄道車両の動揺のイメージ

4. 走行中の鉄道車両における実証実験

4-1. 実験の概要

実験は運行中の各種鉄道車両にジャイロセンサーと加速度センサーとパソコンを持ち込み、ジャイロセンサーと加速度センサーを車内の床に進行方向と水平軸に合わせて固定した。固定位置の条件は、線路に対して水平を保つことである。図 3 は走行中の鉄道車両と計測の様子である。実験で用いたジャイロセンサーと加速度センサーは、それぞれ村田製作所製圧電振動ジャイロセンサーと kionix 社製加速度センサーを用いて National Instrument 社製の A/D コンバーターと組み合わせて自作したもので、計測レートは 0.005 秒である。このセンサーは垂直方向の上下加速度と左右方向のローリング角速度を同時に計測でき、かつ A/D コンバーターが内蔵されているので、計測と同時にパソコンへデータ取り込みが可能である。

上述の機器と設置状況を確保した上で、鉄道車両が駅を出発し、次の駅に到着するまでの時間の垂直方向の上下加速度と左右方向のローリング角速度を計測する。ここで、

今回の計測では複数の鉄道車両で計測したために、計測時間が個々に異なる。そこで、表 1 に各計測車両、区間、距離と時間を示す。

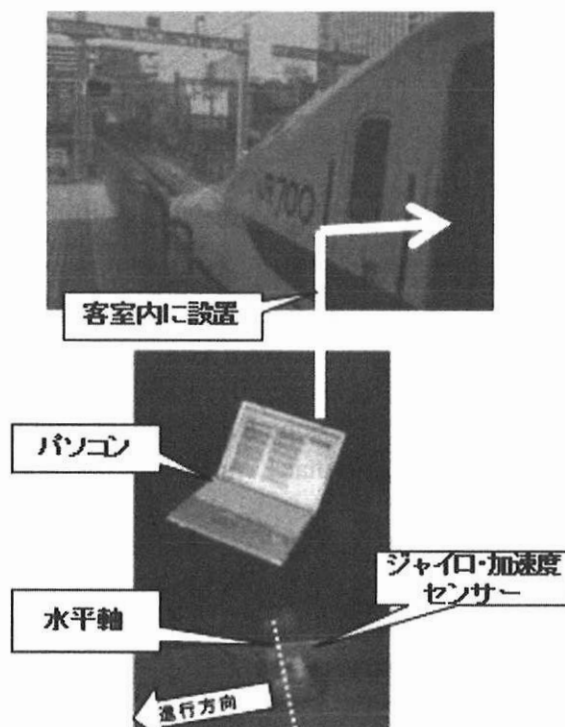


図 3 本実験における計測車両と車両内計測状況

表 1 計測車両と計測区間と計測距離と計測時間

実験番号	車両	計測区間	計測距離(km)	計測時間(秒)
1	東海道新幹線	掛川～浜松	27.8	1069
2	南海本線	和歌山市～みさき公園	12.3	600
3	都電荒川線	新庚申塚～西ヶ原四丁目	0.4	61
4	JR山手線	新橋～浜松町	1.2	92
5	JR常磐線	日暮里～上野	2.2	177

4-2. 実験の状態

表 2 は実験の日付と対象車両と実験区間、目測による乗客数の順で示したものである。これらの実験において計測された垂直方向の上下加速度と左右方向のローリング角速度の例を図 4 と図 5 に示す。これは表 2 における実験番号 3 (都電荒川線) の計測結果である (本実験における最小計測時間)。現在の鉄道車両には、乗り心地改善のために振動や動揺を軽減するための様々な装置が装備されている。しかし走行中の鉄道車両において、車体自身の固有振動や揺れは動揺を軽減する装置の上で生じる現象である。従って、それらの装置の種類を問わず走行中の鉄道車両には、空間的な重心の位置に由来する固有の振動と動揺が発生すると考えて良い。図 4 と図 5 にはそれが如実に表れている。

表 2 実験のコンディション

実験番号	実験日	車両	計測区間	乗客数
1	2011.8.17	東海道新幹線	掛川～浜松	80
2	2011.8.19	南海本線	和歌山市～みさき公園	34
3	2011.10.20	都電荒川線	新庚申塚～西ヶ原四丁目	50
4	2011.10.20	JR山手線	新橋～浜松町	150
5	2011.10.20	JR常磐線	日暮里～上野	40

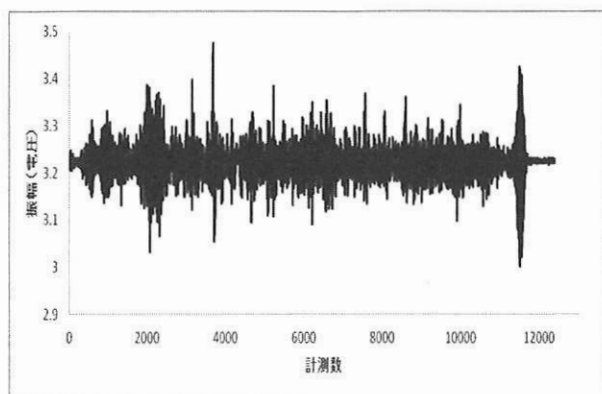


図 4 実験番号 3 での垂直方向の上下加速度の計測値

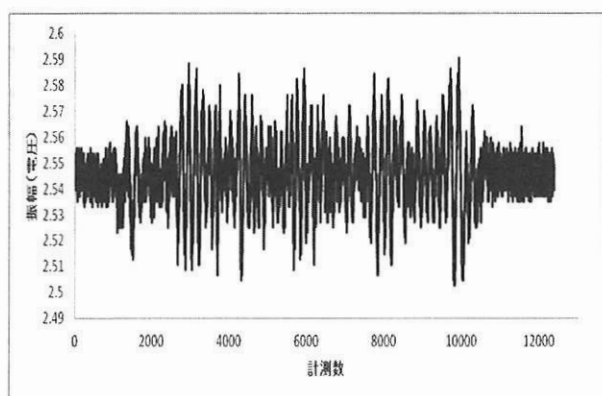


図 5 実験番号 3 でのローリング角速度の計測値

4-3. 車両の固有周波数の特定

上述した方法により実験を実施し、鉄道車両の空間的な重心の固有周波数を特定するため、計測データに対して高速フーリエ変換を行った。まず、センサー自身が持つ誤差は、周波数方向に正規分布的に分散すると仮定し、計測データに対して 0.005 秒毎に計測時の時間枠 (40.96 秒) をずらして連続して高速フーリエ変換を行い、その平均 (FFT average) を求めた。なお計測の時間枠を 40.96 秒とした理由は計測時間の最小が都電荒川線の 60 秒であったからである。その例を図 6 と図 7 に示す。両図に示されるように、本研究の実験で計測した鉄道車両の垂直方向の上下加速度と左右方向のローリング角速度には、明らかに特定の周波数帯の振幅に突出したピークが存在する。

これらは、鉄道車両の空間的な重心の固有周波数を表すものと考えられる。そこで、平均化した高速フーリエ変換の結果において、左右対称性を損なわずにより大きい振幅を持つようなピーク周波数を鉄道車両の空間的な重心の固有周波数として特定した。

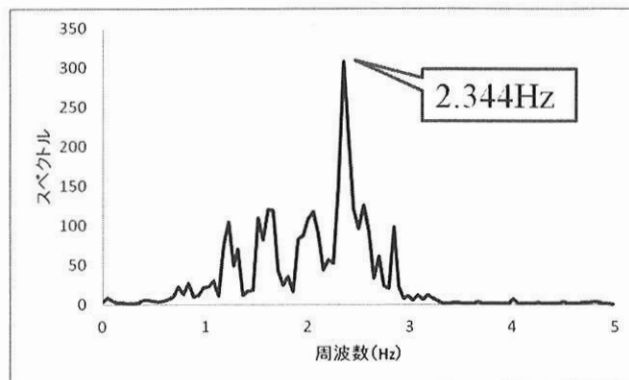


図 6 図 4 の FFT average

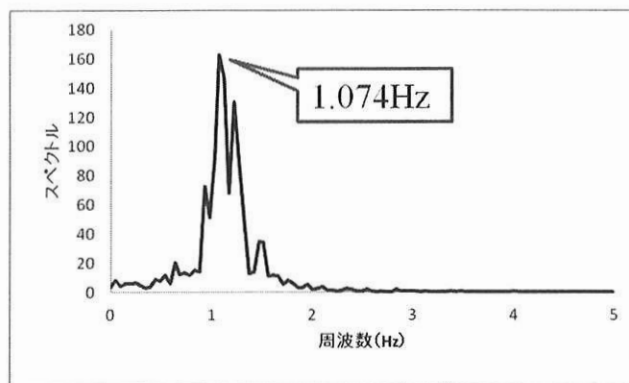


図 7 図 5 の FFT average

4-4. 三次元重心検知結果

上述した方法で特定を行った鉄道車両の空間的な重心位置の検知の結果を表 3 に示す。表 3 における車両動揺中心軸の幅は、実車の目測と台車の設計図⁴⁾を参考に設定した。

表 3 三次元重心検知結果

実験番号	車両	車両動揺中心軸の幅 $b(m)$	垂直方向の上下加速度のピーク周波数 $V'(Hz)$	左右方向のローリング角速度のピーク周波数 $V(Hz)$	車両動揺中心軸からの空間的な重心位置 $L(m)$
1	東海道新幹線	2.000	1.318	0.684	1.681
2	南海本線	1.700	1.416	0.586	1.515
3	都電荒川線	1.470	2.344	1.074	1.500
4	JR山手線	1.700	1.514	0.439	2.355
5	JR常磐線	1.700	1.563	0.586	1.934

5. 横転限界速度の算出

鉄道車両の重心位置を三次元重心検知理論で算出できたので、本研究では國枝の式⁵⁾から横転限界速度を求めることにする。

まず、國枝の式を式(2)に示す。

$$V_c = \sqrt{\left(\frac{G}{2hG} + \frac{C}{G}\right) Rg} \quad \dots (2)$$

ただし

V_c : 横転限界速度 (m/sec)

G : 軌間 (m)

C : 実カント (m)

hG : 重心高さ (レール面から:m)

R : 曲線半径 (m)

g : 重力加速度 (m/sec²)

とする。

ここで、式(2)に代入するデータを表4に示す。 G に関しては東海道本線は広軌(1.435m)、都電荒川線は馬車軌間(1.372m)、山手線・常磐線・南海本線は狭軌(1.067m)であり、 C は福知山線鉄道事調査報告書⁶⁾から引用し、 hG は表3の結果に台車の設計図¹⁾もしくは目測した鉄道車両の車輪の半径を加えてレールからの高さに行っている。また、カーブ半径 R は18から400までの値を変動させる。ここで、18mを下限にした理由は都電荒川線の最急カーブ半径だからである。図8に都電荒川線の当該カーブの写真を示す。400mを上限にした理由は新幹線のカーブ半径に400mが存在し、また福知山線の横転事故のカーブ半径が304mだからである。そして、以上の条件に基づいて計算した横転限界速度とカーブ半径の関係を図9として表す。

福知山線の横転事故時の速度が約110km/hであったことから、この結果は妥当であると考えることができる。



図8 都電荒川線王子駅付近の急カーブ (R=18m)

表4 國枝の式への入力データ

車両	G(m)	C(m)	hG(m)	g(m/sec ²)
東海道新幹線	1.435	0.097	2.111	9.800
南海本線	1.067	0.097	1.843	9.800
都電荒川線	1.372	0.097	1.952	9.800
山手線	1.067	0.097	2.812	9.800
常磐線	1.067	0.097	2.391	9.800

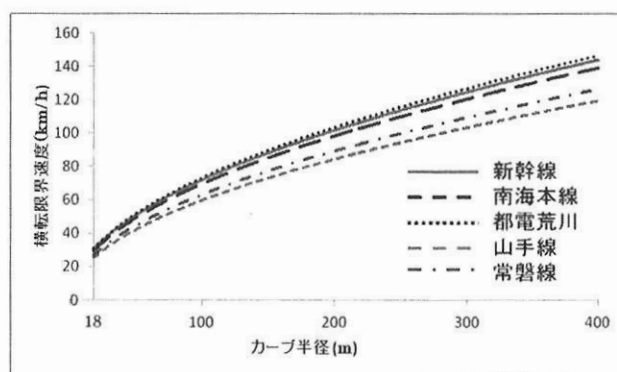


図9 本研究が検出した重心に基づく横転限界速度の試算

6. おわりに

本研究では、様々な鉄道車両に三次元重心検知理論が適用できることを実証した。そして、鉄道車両の重心を知ることによって横転限界速度のリアルタイム算出が可能なることを示した。重心の検知を安価かつ自動的にできる三次元重心検知理論は鉄道車両の安全運行の一助となることができると考えられる。

今後は、さらに様々な環境下にある鉄道車両を対象に実験を行い、三次元重心検知理論の実効性を高める研究を継続していく必要がある。

参考文献

- 1) 渡邊豊, 重心検知装置および横転限界速度予測装置並びに貨物重量予測装置並びに演算プログラム, 日本国特許第4517107号, 2010.
- 2) 川島 進, “走行中の鉄道車両における空間的重心位置の検知に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.778, 2011, PP.208-210, 2011.
- 3) 東日本旅客鉄道, “安全報告書 2011” P.25.
http://www.jreast.co.jp/safe/pdf/report2011/report2011_all.pdf
- 4) 奥井淳司, “鉄道 CAD 製作所” 台車のページ
http://www.geocities.jp/rail_cad/truck/truck.html
- 5) 國枝正春, “鉄道車両の転覆に関する力学的理論解析”, 鉄道技術研究所報告, No.793, 1972.
- 6) 国土交通省 航空鉄道事故調査委員会, “西日本旅客鉄道株式会社 福知山線 塚口駅～尼崎駅間 列車脱線事故” 鉄道事故調査報告書,
<http://jtsb.mlit.go.jp/jtsb/railway/report/RA07-3-1-1.pdf>, p188, 2007.