

自転車が倒れない理由に、ジャイロ効果は桁が足りない

— 復元に要するトルクは **68.3765** N·m、前輪のジャイロトルクは **1.2750** N·m — **53.6286** 倍の開きがある — 二つが並ぶのは時速 **965** km のときである — [論文359]

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)

Yamagishi Complexity Torus Lab, Japan | 山岸勇輝ラボ

2026年9月

— From thinking to syncing. —

要旨

走っている自転車が倒れないのは、車輪のジャイロ効果のためだと説明される。本稿が問うのはその説明の桁が合うかである——答えは合わない。新しい定理も法則も主張しない。第一に、車体と乗り手 **80** kg が **5** 度傾いたときの重力トルクは **68.3765** N·m である（第2節）。第二に、これが本稿の芯である。前輪のジャイロトルクは **1.2750** N·m しかなく、**53.6286** 倍の開きがある（第2節）。第三に、速度を四倍にしても **5.1000** N·m にしかない（第2節）。第四に、二つが並ぶ速度は **268.14** m/s、すなわち時速 **965** km である（第2節）。第五に、残るのは操舵である。傾き **5** 度は半径 **29.1385** m の旋回でつり合う（第3節）。第六に、分離子は「その機構が単独で必要か」であって、「効くか」ではない（第5節）。

本稿の射程（射程注記）：新しい定理も法則も主張しない——ジャイロ効果・キャスト角・倒立振り子はすべて既知である。自転車の力学を作らない——四自由度の線形化模型とその固有値解析（ウィーブ・キャプサイズ）には立ち入らない。名前を挙げるにとどめる。自己安定性を証明しない——どの速度域で自己安定になるかは計算しない。本稿が計算するのはトルクの大きさだけである。実験をしない——実車での測定は行わない。数値は明示した諸元の上でのものである。制御を扱わない——乗り手の反射や学習は主題ではない。タイヤを扱わない——接地面の変形・横滑り角・トー角は主題ではない。既刊との関係：論文357 は最大電力と最大効率が別の点にあることを示した——そこでは目的が二つあった。ここでは説明が二つある。論文356 は次元が同じでも別の量であることを示した——ここでは同じ次元のトルク二つの大きさを比べる。論文300 は同根か別根かが判定できることを示した——ジャイロによる復元と操舵による復元は、その基準で別根である。論文353 は条件を落とすと主張が偽になることを示した——「効く」と「単独で足りる」を混ぜると同じ誤りになる。加えたのは、二つのトルクを同じ条件で数に出したこと、比が **53.6286** 倍であることを示したこと、並ぶ速度を逆算して **268.14** m/s を出したこと、倒立振り子の時定数から使える時間を出したこと、分離子を「単独で必要か」に置いたことである。

1. 記法と問い

設定：前輪を薄いリングとみなし、質量 $m_w = 1.5 \text{ kg}$ 、半径 $r_w = 0.34 \text{ m}$ とする。

$$I_w = m_w r_w^2 = 0.1734 \text{ kg m}^2, \quad T_{\text{gyro}} = I_w \omega \Omega, \quad T_{\text{grav}} = Mgh \sin \theta$$

車体と乗り手を合わせて $M = 80 \text{ kg}$ 、重心高さ $h = 1.0 \text{ m}$ とする。

観察 1.1

よく聞く説明は二つある。車輪のジャイロ効果と、キャスト（トレール）による復元である——どちらも実在する効果である。

観察 1.2

本稿はどちらも否定しない。問うのは大きさだけである——「効く」と「単独で足りる」ことは別だからである。

観察 1.3

リングとみなすのは上限側の見積りである。実際の車輪はスポークがあるので慣性モーメントはこれより小さい——つまりジャイロトルクを有利に見積もったうえでの比較である。

問い：ジャイロ効果は、倒れを止めるのに足りるか。

2. 桁が二つ足りない

計算 2.1：二つのトルクを同じ条件で比べる（本稿で計算）。

量	値
前輪の慣性モーメント I_w	0.1734 kg m ²
速度 5.0 m/s での車輪の角速度 ω	14.7059 rad/s
操舵角速度 Ω	0.5 rad/s
ジャイロトルク T_{gyro}	1.2750 N m
傾き 5 度の重力トルク T_{grav}	68.3765 N m
比	53.6286 倍

観察 2.2

これが本稿の芯である。**53.6286** 倍は「少し足りない」ではない——桁が二つ近く違う。ジャイロ効果は、倒れを止める主役になりえない。

観察 2.3

速度を上げてでも追いつかない。**20** m/s（時速 **72** km）にしてもジャイロトルクは **5.1000** N・m——重力トルクの **68.3765** N・m には遠い。

観察 2.4

並ぶ速度を逆算できる。 $T_{\text{gyro}} = T_{\text{grav}}$ となるのは $v = \mathbf{268.14}$ m/s——時速 **965** km である。自転車の話ではない。

観察 2.5

見積りはジャイロに有利に取ってある。リングとみなし、車輪を軽めではなく標準的に取り、操舵角速度も小さくない値を使った——それでもこの差である。

観察 2.6

ここで注意が要る。ジャイロ効果が「無い」と言っているのではない——**1.2750 N・m** は実在する。言っているのは、それだけでは説明にならないということである。

3. 残るのは操舵である

計算 3.1：倒立振り子として見たときの時間と、つり合う旋回（本稿で計算）。

量	値
時定数 $\sqrt{h/g}$	0.3193 秒
傾き 1 度から 10 度まで倒れる時間	0.9558 秒
傾き 5 度をつり合わせる旋回半径（5 m/s）	29.1385 m

観察 3.2

約 1 秒ある。1 度から 10 度まで倒れるのに 0.9558 秒——人の反応時間からすれば十分に長い。だから乗り手は「間に合う」。

観察 3.3

立て直す方法は、接地点を重心の下へ戻すことである。ハンドルを倒れる側へ切ればよい——傾き 5 度は半径 **29.1385 m** の旋回でちょうどつり合う。

観察 3.4

この操舵トルクは重力トルクと同じ桁である。つり合いの式 $\tan \theta = v^2/(Rg)$ から直接出るからである——ジャイロトルクのように別の小さな量を経由しない。

観察 3.5

論文300の基準で別根である。ジャイロによる復元は角運動量保存から、操舵による復元はつり合いの幾何から出る——同じ「自転車が倒れない」を説明する二つの機構が、別の根をもっている。

4. 「効く」と「必要」は違う

観察 4.1

文献では、ジャイロもトレールも単独では必要でないことが示されている。両方を打ち消した自転車が自己安定になる設計が作られている——本稿はその実験を再現していない。文献として挙げるにとどめる。

観察 4.2

本稿が独立に示せるのは大きさだけである。**53.6286**倍という比——これは「単独では足りない」を桁で言う。文献の結論とは別の道からの一致である。

観察 4.3

二つの主張の強さは違う。「桁が足りない」は本稿の計算が支える——「単独では不要である」は文献が支える。混ぜない。

観察 4.4

正直に言えば——本稿は「では何が支えているのか」に完全には答えていない。示したのは、操舵が桁の合う唯一の候補として残ることまでである——自己安定性そのものは四自由度の固有値問題であって、単一の機構に帰着しない。

5. 分離子：単独で必要か

観察 5.1

分離子——その機構が「効く」かではなく、「単独で足りる」か、さらに「単独で必要」か。

問い	ジャイロ効果	操舵	支えるもの
効くか	効く (1.2750 N m)	効く	本稿の計算
単独で足りるか	足りない (1/53.6286)	桁は合う	本稿の計算
単独で必要か	必要でない	必要でない	文献

観察 5.2

三行は別の問いである。最初の行で「はい」と言えることが、次の行の答を決めない——日常の説明は、この三つを一つにまとめてしまう。

観察 5.3

右端の列が本稿の作法である。どの主張を何が支えているかを行ごとに書く——支えの出所が違えば、主張の強さも違う。

観察 5.4

分離子は動かせる。車輪を極端に重くすればジャイロトルクは大きくなる——比 53.6286 を 1 にするには慣性モーメントを 53.6286 倍、つまり前輪を 80 kg 級にしなければならない。そのとき乗り物は自転車ではない。

観察 5.5

正直に言えば——**68.3765 N·m** も **53.6286** 倍も、明示した諸元の上での値である。別の自転車なら別の数が出る——動かないのは、ジャイロトルクが速度に比例し、重力トルクが速度に依存しないという構造だけである。

観察 5.6

最後に一つ——「その効果は実在するか」と「その効果で説明がつくか」は別の問いである。ジャイロ効果は実在し、しかも足りない——実在を確かめただけで説明を終えると、桁を見ないまま納得してしまう。

6. 点呼と結び

1. $I_w = 0.1734 \text{ kg m}^2$ (計算 2.1) : リングとみなした上限側。
2. $T_{\text{gyro}} = 1.2750 \text{ N·m}$ (計算 2.1) : 5 m/s ・ 操舵 0.5 rad/s 。
3. $T_{\text{grav}} = 68.3765 \text{ N·m}$ (計算 2.1) : 80 kg ・ 傾き 5 度。
4. 比は **53.6286** 倍 (観察 2.2) : 桁が二つ近く違う。
5. 20 m/s でも 5.1000 N·m (観察 2.3) : 速度では追いつかない。
6. 並ぶのは 268.14 m/s (観察 2.4) : 時速 965 km 。
7. 時定数 0.3193 秒 (計算 3.1) : $h = 1 \text{ m}$ の倒立振り子。
8. 1 度から 10 度まで 0.9558 秒 (計算 3.1) : 人が間に合う長さ。
9. 傾き 5 度は半径 29.1385 m でつり合う (計算 3.1) : 操舵は桁が合う。
10. 三つの問いは別 (観察 5.2) : 効く／足りる／必要。

結び：走っている自転車が倒れないのは車輪のジャイロ効果のためだ、とよく説明される——そしてジャイロ効果は確かに実在する。だが桁が足りない——前輪を薄いリングとみなし（実際より慣性モーメントを大きく見積もって） 5 m/s で走り、操舵角速度 0.5 rad/s でハンドルを切ったときのジャイロトルクは **1.2750 N·m** である。一方、車体と乗り手 80 kg ・ 重心 1.0 m が 5 度傾いたときの重力トルクは **68.3765 N·m**。比は **53.6286** 倍で、これは「少し足りない」ではなく桁が二つ近く違う。速度を上げて追いつかない—— 20 m/s （時速 72 km ）にしてもジャイロトルクは 5.1000 N·m にしかならず、二つが並ぶのは $v = 268.14 \text{ m/s}$ 、時速 965 km のときである。もう自転車の話ではない。残るのは操舵である——倒立振り子として見れば時定数は 0.3193 秒、傾き 1 度から 10 度まで倒れるのに 0.9558 秒あり、人の反応時間からすれば十分に長い。立て直す方法は接地

点を重心の下へ戻すこと、すなわちハンドルを倒れる側へ切ること、傾き 5 度は半径 29.1385 m の旋回でちょうどつり合う。この復元はつり合いの式 $\tan \theta = v^2 / (Rg)$ から直接出るので、重力トルクと同じ桁になる。ただし主張の強さを混ぜてはいけない——「桁が足りない」は本稿の計算が支えるが、「単独では必要でない」は文献が支える。ジャイロもトレールも打ち消した自転車が自己安定になる設計が作られているが、本稿はその実験を再現しておらず、文献として挙げるにとどめる。本稿が独立に言えるのは 53.6286 倍という比だけであり、それが別の道から同じ結論に届いている。分けているものは一つ——その機構が「効く」かではなく、「単独で足りる」か、さらに「単独で必要」か。三つは別の問いであって、最初の行で「はい」と言えることが次の行の答を決めない。比 53.6286 を 1 にするには前輪の慣性モーメントを 53.6286 倍にしなければならず、そのとき乗り物は自転車ではない。正直に言えば——本稿は「では何が支えているのか」に完全には答えていない。示したのは、操舵が桁の合う唯一の候補として残ることまでである。自己安定性そのものは四自由度の固有値問題であって、単一の機構に帰着しない。最後に一つ——「その効果は実在するか」と「その効果で説明がつくか」は別の問いである。ジャイロ効果は実在し、しかも足りない。実在を確かめただけで説明を終えると、桁を見ないまま納得してしまう。

参考文献

1. Kooijman, J. D. G., Meijaard, J. P., Papadopoulos, J. M., Ruina, A., Schwab, A. L. (2011). A Bicycle Can Be Self-Stable Without Gyroscopic or Caster Effects. *Science*.
2. Meijaard, J. P., Papadopoulos, J. M., Ruina, A., Schwab, A. L. (2007). Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle. *Proceedings of the Royal Society A*.
3. Jones, D. E. H. (1970). The stability of the bicycle. *Physics Today*.
4. Whipple, F. J. W. (1899). The stability of the motion of a bicycle. *Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics*.
5. Åström, K. J., Klein, R. E., Lennartsson, A. (2005). Bicycle dynamics and control. *IEEE Control Systems Magazine*.
6. 山岸勇輝 (2026). 『第三百回の点呼——同根か別根かは判定できる』[論文300]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22171914
7. 山岸勇輝 (2026). 『雑音を足すと検出が良くなる場合がある——ただし「多いほどよい」ではない』[論文353]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22696835
8. 山岸勇輝 (2026). 『電流は流れているのに、仕事をしていない』[論文356]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22697124
9. 山岸勇輝 (2026). 『最大の電力と最大の効率、同じ点にない』[論文357]. Zenodo. 10.5281/zenodo.22697180

— From thinking to syncing. —

山岸 勇輝 (Yuuki YAMAGISHI)