

ハンドル付き一輪車の一考察

新井 清之助*・小宮 聖司*

Study on a Unicycle with Steering Device

Seinosuke ARAI and Seizi KOMIYA

Abstract

Being one point contact of wheel to the ground, unicycle is most unstable among various kinds of vehicles. It is not easy for anyone to ride unicycle except the rider's flexibility and high ability of body action. So unicycle is available only for sporting goods now.

This report deals with studying on the stability of running unicycle and making the prototype unicycle with steering device. The results show that the rider has to keep his balance on riding, and less load of body action is necessary in case with steering device than in case without one.

1. ま え が き

一点で接地する一輪車は、乗り物の中で最も不安定で誰にでもすぐに乗れるというものではなく、乗る人の運動神経や柔軟な身のこなしなどが要求される。また多くは、スポーツ器具として使われているのみである。

本研究では、乗り手がより簡単に一輪車に乗る事が出来るように、ステアリング機構を備えた一輪車を製作した。その結果、乗り手は理論的な安定速度よりも低い速度で乗りこなしている事が分かった。このことは乗り手が積極的にバランスを取っている事を示し、乗り手の感覚に依存している器具である事が分かる。そして、ステアリングを付けた場合の方が付けない場合よりも身体的に負担が軽い事が分かった。

2. 一 輪 車

一輪車は一点で接地する事によりすべての方向に対する運動が自由であり、自転車と比較すれば小型で、軽量であるため駐輪や保管が便利である。また比較的製造原価が安くすむため、これが自転車なみに誰にでも

手軽に乗れ、安全性を付加する事が出来れば日常生活において交通用具としての利用価値を増大させる事が可能であり、近年問題となっている駅前等の駐輪場不足の解消など社会に貢献する事が出来る¹⁾。また一輪車を用いる事により、平行感覚を養い適度の運動が出来るために、小学校の授業においても導入が試みられている。

一輪車の車輪の回転運動は、球体と異なり方向性があるため回転スピードが上がるほど、回転方向に対して安定性が増大する。乗り手は走行中バランスを保持するため両手を前後左右に振ったり、上半身をねじったりしてバランスをとることが必要となる。

本研究で、ステアリングを付けることにより以下の点が改善されると考えられる。

乗り手の上半身は両手でステアリングを握ることにより固定され、重心を一定に保ち姿勢が良くなる。そのことにより安定した走行が出来ると考えられる。また、ペダルを踏み込む時、手で反力が受けられるので、身体の動きを少なくし体力の消耗をおさえ、長距離の走行も楽になると考えられる。また踏み込み力を増す事が出来るのでスピードアップが可能となる。

3. 製 作 過 程

これまでに Fig. 1 に示すように種々の改良を行っ

1992年9月25日受理

* 機械システム工学科

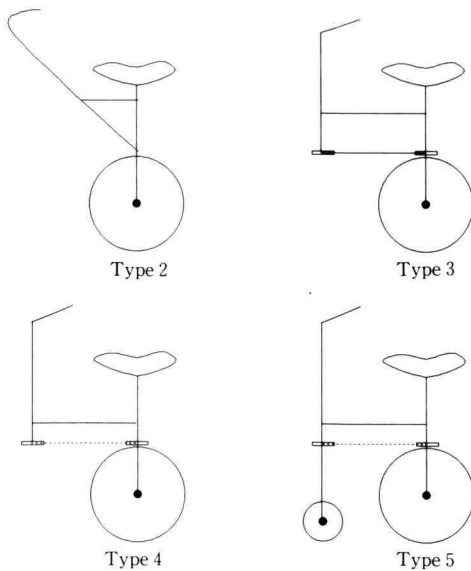


Fig. 1. Unicycle model

た。タイプ1は強度的に問題があった。そのためタイプ2において強度を考慮して製作をした。しかし車輪とステアリングが直接接続しているため、ステアリングを操作するときにバランスを崩してしまい、通常の走行の場合には向いていなかった。タイプ3はステアリングを操作する事が可能になったが、車重が重く、ワイヤー方式であったため車軸とステアリング軸とがずれてしまった。これらをふまえて以下の点を考慮してタイプ4を製作した。まず第一に、一輪車では車輪以外の重量が軽くなれば安定速度はより低くなるので、軽量化をした。第二にステアリング軸と車軸の伝達方法をワイヤー方式からチェーン方式に変更した。さらに練習用として取り外し可能な補助車輪を付けたタイプ5を製作した。

4. 円輪の理論

まず一輪車を円輪とした場合の安定速度を求める。

円輪の運動は、各記号を Fig. 2, Fig. 3 のごとくすると、式は次のようになる事が知られている²⁾。

$$I_1 \frac{d}{dt} \{(\cos \phi) \dot{\psi}\} + I_3 \dot{\phi} \omega_3 - I_1 (\sin \phi) \dot{\phi} \dot{\psi} = 0 \quad (1)$$

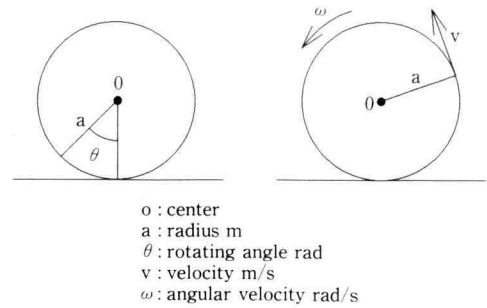


Fig. 2. wheel rotating angle and angular velocity

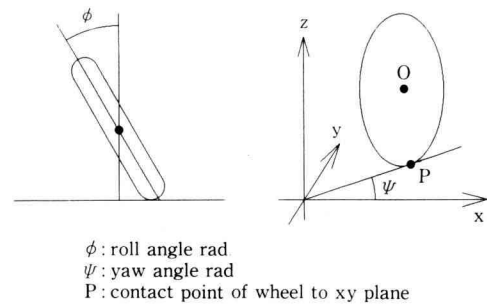


Fig. 3. angle between wheel and coordinate axes

$$(I_3 + Ma^2) \dot{\omega}_3 + Ma^2 (\cos \phi) \dot{\phi} \dot{\psi} = 0 \quad (2)$$

$$(I_1 + Ma^2) \ddot{\phi} + I_1 (\sin \phi \cos \phi) \dot{\psi}^2 - (I_3 + Ma^2) (\cos \phi) \omega_3 \dot{\psi} - Mga \sin \phi = 0 \quad (3)$$

ただし、

M : 円輪の質量 kg

I_1 : 円輪の x 軸まわりの慣性モーメント $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

I_3 : 円輪の z 軸まわりの慣性モーメント $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

円輪が直立し、一直線上を等速度で転がる場合には以下の条件が成り立つとする。

$$\begin{aligned} \phi &= 0, \phi = \text{一定}, \omega_3 = \text{一定} \\ \phi &= \dot{\phi} = \ddot{\phi} = \dot{\psi} = \ddot{\psi} = \dot{\omega}_3 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

また、 $\phi \ll 1$ とし、 $\dot{\phi}$, $\dot{\psi}$ の 2 次以上の項を省略すると、式 (1), (2), (3) はそれぞれ以下の式に変形できる。

$$I_1 \ddot{\psi} + I_3 \omega_3 \dot{\phi} = 0 \quad (5)$$

$$(I_3 + Ma^2) \dot{\omega}_3 = 0 \quad (6)$$

$$(I_1 + Ma^2) \ddot{\phi} - (I_3 + Ma^2) \omega_3 \dot{\psi} - Mga \phi = 0 \quad (7)$$

式 (5) を積分し、式 (7) に代入し $\dot{\psi}$ を消去すると、

$$(I_1 + Ma^2)\ddot{\phi} + \left\{ \frac{(I_3 + Ma^2)I_3\omega_3^2}{I_1} - Mga \right\} \phi = 0 \quad (8)$$

上式は振動の方程式 $m\ddot{x} + kx = 0$, $\omega = \sqrt{k/m}$ と同形になるので ϕ が増大しない条件は以下になる。

$$\omega_3 > \sqrt{\frac{I_1 Mga}{(I_3 + Ma^2)I_3}} \quad (9)$$

式 (9) より円輪が安定して転がるために必要な角速度を求めることが出来る, さらに円輪の速度は $v = \omega_3 a$ より求める事が出来る。

5. 理論計算

円輪の安定角速度を求めるために, 式 (9) を簡略化すると以下の式が得られる。

$$\omega_3^2 > g/4a \quad (10)$$

式 (10) に, $a = 0.25$ m, $g = 9.81$ m/s² を代入すると, 角速度 ω_3 および安定速度 v_s が求められる。

$$\omega_3 > 3.13 \text{ rad/s}, \quad v_s > 2.82 \text{ km/h}$$

一輪車における安定速度を求めるとともに, 一輪車

の車輪以外の質量が安定速度に及ぼす影響を調べる。

実際には重心位置は常に変化しているので h は 1.1 m として計算する。

また系を単純化するため, 車輪以外の質量による接地点における重力のモーメントを等価として換算し, Me とすれば次のようになる。

$$Me = \frac{a+h}{a} M_0 \quad (11)$$

これより式 (9) を変形すると,

$$\omega_3 > \sqrt{\frac{(Me + M_s)g}{4M_s a}} \quad (12)$$

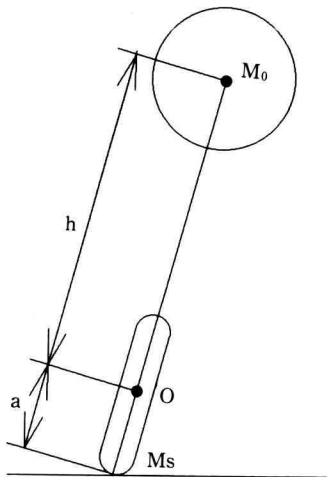
となる。ここに M_s は車輪質量。数値を代入して,

$$\omega_3 > 34.0 \text{ rad/s}, \quad v_s > 30.6 \text{ km/h}$$

これより, 前後方向の制御が安定しているときには, 安定速度は車輪以外の質量 M_0 に比例して増加する事が分かる。よって, 一輪車を安定させるには M_0 は小さい方がよいと考えられる。

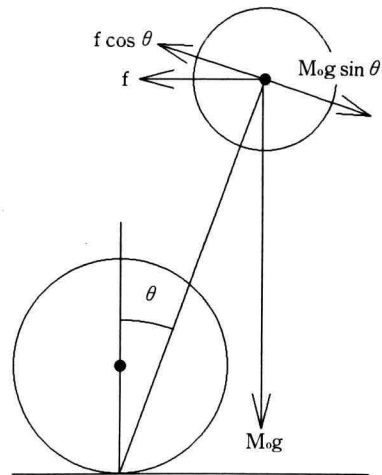
6. 一輪車の前後方向のバランス

前述の安定の理論は円輪の場合であり, 左右方向の



M_0 : rider mass 65 kg
 M_s : wheel mass 3 kg
 Me : equivalent mass of M_0 at point O
 h : distance between O and center of M_0 1.1 m

Fig. 4. Unicycle model (front view)



f : inertia force
 M_0 : rider mass
 θ : angle of inclination from vertical line

Fig. 5. Unicycle model (side view)

バランスについてであるが、一輪車の場合は重心が円輪の中心から離れているため、前後方向のバランスも問題になる。一輪車の前後のバランスは速度には関係なく、前後の加速度による慣性力で制御していると考えられる (Fig. 5)。

実際に一輪車に乗る場合、乗り始めに勢いをつけないと後方に倒れてしまう事が分かる、これはステアリング付き一輪車についても同様で、勢いをつける事によって加速度による慣性力を得ていると思われる。どれくらい加速するかは個々の体重にもよるので、経験で習得する以外にない。ここに乗り始めの難しさの一因がある。

7. 実 験

製作した一輪車の性能を調べるために、以下に述べるように (a) 角加速度による判定と、(b) 身体的な状態による判定を行った。

(a) 一輪車が自由走行するとき大きく考えて3つの角加速度 (ヨー, ロール, ピッチ) が作用すると考えられる。それらの角加速度は、安定走行中小さく、不安定走行中大くなるため、3つの角加速度を測定する事により、安定状態か不安定状態かが計測できる。

安定走行時の状態を以下の条件とする。

- (1) ほぼ等速、またはほぼ等加速度走行の状態。
- (2) ヨーイング加速度が小さく、足の位置に対して規則性がある状態。
- (3) ローリング加速度が小さく、足の位置に対して規則性がある状態。

(4) 安定走行状態の条件以外は不安定状態とする。

(b) 運動を行うと、交感神経の興奮や心臓収縮力などにより最高血圧が上昇し、脈拍も同様に上昇する。両者ともその後次第に平静状態に近づいて行くが、運動によってそれらの値は異なった値となる³⁾。

一輪車とステアリング付き一輪車とで、同一の時間に同一距離運転し、その後の心身反応の変化を調べれば、どちらの実験車が運動量が少ないか、制御しやすいかを見いだす事が可能である。

平静状態の最高血圧、脈拍数の値は、いつも同じ値になるとは限らず、その時の気温や、精神状態などにより、多少の違いが出てくる。よって、身体的な実験では、測定時の平静状態の最高血圧、脈拍数の値から、実験車を運転した事によってどの程度増加したかを、比較した。

8. 結果および考察

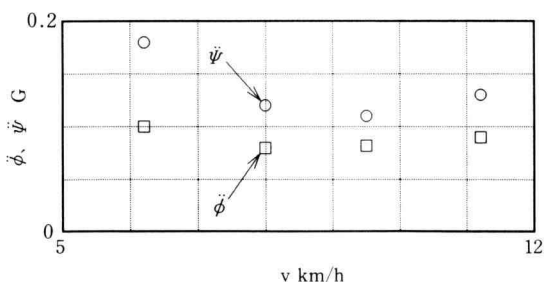
(a) 振動数が小さければ、それだけ実験車両が安定走行状態であると考えられ、測定した両実験車両のデータの振動数と比較する事により、どちらがより安定しているかが分かる。しかし、一輪車は等速走行を行う事が非常に困難で、常に加速・減速をしながら走行している事が測定データの車輪回転計から分かった。

また、等速走行に近い状態でも時としてバランスを崩す事もあり、その場合の振動数は比較の対象から除外した。

測定で求められた角加速度で、ヨーおよびロールに関して左右の足の位置との関係がある事が分かった。しかし、ピッチに関しては関係がみられず、他の角加速度とは異なる成分変動であった。ヨーおよびロールに関する結果を Fig. 6, Fig. 7 に示す。

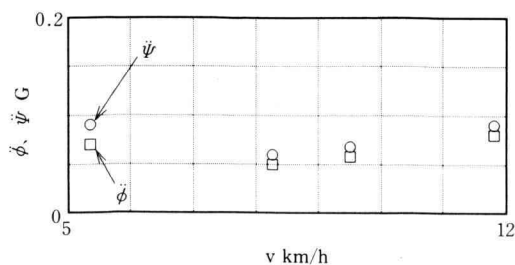
これより、以下の結果が得られた。

- (1) ステアリング機構付き一輪車のヨーイングお



ϕ : rolling, ψ : yawing

Fig. 6. Unicycle



ϕ : rolling, ψ : yawing

Fig. 7. Unicycle with steering

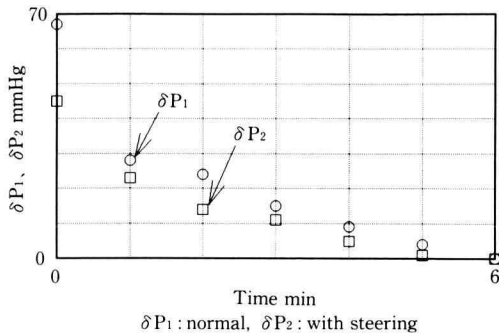


Fig. 8. maximum blood pressure difference

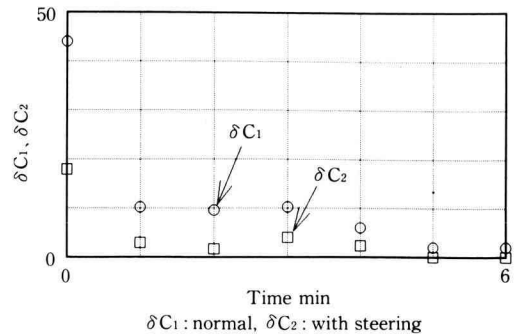


Fig. 9. pulse difference

よびローリングは、一輪車単体の時と比較して小さい値となった。

(2) 両実験車両とも、時速 8 km/h 付近が最も安定であった。

(3) ステアリング機構付き一輪車のヨーイングとローリングの差は普通の一輪車に比べて小さい。

理論計算上は約 30 km/h で安定状態となるが、実際には約 8 km/h の時が最も安定していて、それ以上速度が上がると再び不安定な状態となる。これは、車輪をこぐ足の慣性力が速度の 2 乗に比例しているためヨーイングが大きくなることや、全身のバランスを崩してしまうためと考えられる。

(b) 最高血圧と脈拍数の平静状態との差を、走行後の時間とともに測定した。測定結果はほぼ同様の傾向を示した。Fig. 8, Fig. 9 にそれぞれの値を示す。

被験者すべてにおいてステアリング機構付き一輪車の方が、平静状態との差が小さい。ここで差が小さいということは一輪車単体の時よりもステアリング機構をつけた場合の方が、運動の負荷が軽いといえる。これは、一輪車は体全体でバランスを取っているのに対し、ステアリング機構付き一輪車はハンドルを握る事によって上半身がある程度固定され、手を大きく振る動作がない。そして、一輪車単体の時の操縦は腰の大きな動きが必要なのに対してステアリングをつけた場合には腕の小さな動きで小刻みに操縦しているためと考えられる。

9. ま と め

本研究では、一輪車は人間の運動神経に非常に左右されやすい車両だけに、人間を含めた場合でのモデル化が難しい。しかし生理的な測定も考慮し走行実験により以下の結論が得られた。

実際に走行する速度は計算によって得られた値と異なる速度で、約 8 km/h が最も安定に走行できる事が分かった。

今回設定した安定条件の場合、ステアリング機構付き一輪車は、通常の一輪車と比較して安定に走行しているといえる。

ステアリング機構をつける事により、上半身が固定されるため運動量が軽減された。

ステアリング機構付きの一輪車の実用化に対しては、普通の一輪車に比し乗りやすくなったものの、更に改良が必要と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 松林：一輪車の乗り方・楽しみ方，ブリヂストンサイクル株式会社
- 2) 後藤，山本，神吉：力学演習，pp. 277/296 (1990)，共立出版
- 3) 石井，宮下：運動生理学概論，pp. 157/159 (1980)，大修館書店