

MR 流体を用いた VR 自転車のペダルトルク制御の向上に関する研究

Study on Improvement of Pedaling Torque Control for VR Bike with MR Fluid Brake

○津畑義明*, 菊池武士*

○Yoshiaki Tsubata*, Takehito Kikuchi*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード：機能性流体 (Functional Fluid), 磁気粘性流体 (Magnetorheological Fluid),
MR 流体ブレーキ (MR Fluid Brake), ペダルトルク制御 (Pedal Torque Control)

連絡先：〒992-8510 米沢市城南 4-3-16 山形大学大学院 理工学研究科
菊池武士, Tel.: (0238)26-3892, Fax.: (0238)26-3892, E-mail: t_kikuchi@yz.yamagata-u.ac.jp

1. 諸言

高齢者が抱える病気の上位3つは「ガン」, 「心疾患」, 「脳血管疾患」である. Fig. 1 に示す日本の年齢階級別の死亡数¹⁾を見ると, 高齢者のほとんどが「老衰」ではなく先の3つの病気もしくはその他の原因により亡くなっていることがわかる.

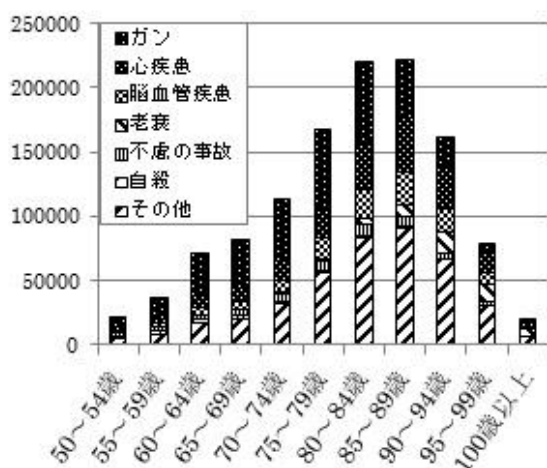


Fig. 1 年齢(5歳階級)・死因(死因簡単分類)別死亡数 (平成24年, 厚労省調べ)¹⁾

心疾患や脳血管疾患の原因には, 血管の内側の壁にコレステロールが溜まるなどして血管が厚く硬くなり, 血液が正常に器官へ送られなくなる等があり, その予防策として有酸素運動が効果的である²⁾. 中でもサイクリングは脚への負担が少なく, 手軽に有酸素運動を行う手段であり, 腸腰筋という太股を持ち上げる筋

肉を鍛えることができ, 転倒による怪我の防止, 寝たきりの予防にもなる³⁾.

しかし, 加齢に伴い筋力が低下した高齢者にとって, サイクリングには転倒や交通事故の危険性が伴う. 安全にサイクリングを行う方法として, 自転車型運動器具の使用があるが, 実際のサイクリングの楽しさを実感できるとは言い難い. 近年ではPCと自転車, 摩擦ブレーキによる仮想サイクリングシステム⁴⁾も販売されているが, アスリート向けのトレーニング機器として設計されているため, 高齢者向けの運動機器として使用するには適切ではない.

本研究では, 高齢者向けの安全かつ継続可能な運動を提供する自転車シミュレーションシステム (VR 自転車) の開発を目標とする. 昨年度開発したVR自転車⁵⁾では, 処理速度が遅いなどの問題点が挙げられた. 本稿では, VR自転車の処理速度向上のためにPICを用いた制御に関する報告を行う.

2. VR 自転車について

VR自転車や, その課題点等について述べる.

2.1 VR 自転車システム (第一次試作)

昨年度開発したVR自転車 (第一次試作) の大まかな制御の流れを Fig. 2 に示す. 第一次試作では, 入力デバイスの信号をPCが処理し, ペダルトルク制御と仮想空間の描画を行う.

Fig. 2 に示す各セクションについて説明する.

(a) 入力デバイス (Input Devices)

ユーザのペダリング, 走行中の進行方向, ブレーキ指示を行う.

(b) コンピュータ(PC)

入力デバイスからの信号と仮想空間における情報により、物理演算を行い、その結果によりペダルトルク制御と仮想空間の描画を行う。

(c) 力覚出力デバイス(Haptic Output Device)

PCの制御によりMR流体ブレーキにトルクを生成させ、ベルトドライブ方式によりトルクをペダルへ伝達する。

(d) ディスプレイ(Display)

ソリッドレイ研究所製のSight 3D, NVIDIA製の3D VISIONを用いてユーザーに立体的な映像を提示する。

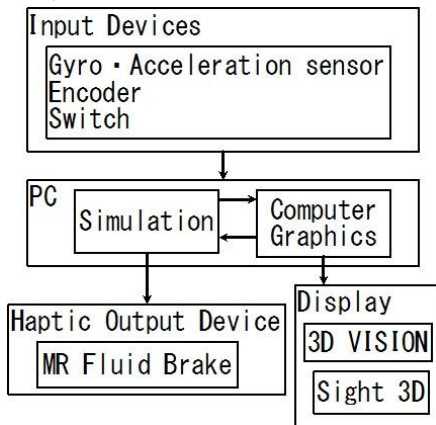


Fig. 2 第一次試作の大まかな制御の流れ

2.2 VR自転車システム (第二次試作)

Fig. 3にPICを用いたVR自転車(第二次試作)の大まかな制御の流れを示す。

ペダルトルク制御をPICで処理することにより、仮想空間の描画とペダルトルク制御の処理を独立させ、高速なペダルトルク制御を行う。PCはジャイロ・加速度センサとPICの情報により仮想空間の描画を行い、PICはエンコーダとPCの情報によりペダルトルク制御を行う。

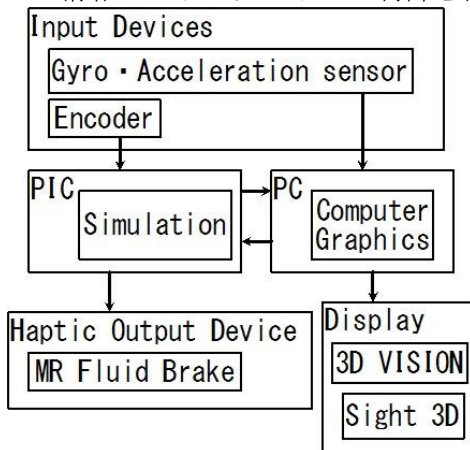


Fig. 3 第二次試作の大まかな制御の流れ

2.3 第一次試作の課題点

第一次試作の課題点を以下に示す。

- (1) 処理速度が遅い
- (2) MR流体ブレーキの応答速度が遅い

- (3) シール抵抗が大きい

2.4 変更点

第二次試作では、上記の(1)を改善するため、PICによりペダルトルク制御を行い、PCでは仮想空間の描画のみを行う。

3. PICによるペダルトルク制御

PICを用いてVR自転車の制御を行うための実験等について述べる。

3.1 PIC基盤

PICは、山形大学山野研究室で製作された汎用マイコンボード⁶⁾の簡略化したものを使用する。使用するPIC基盤をFig. 4に示す。

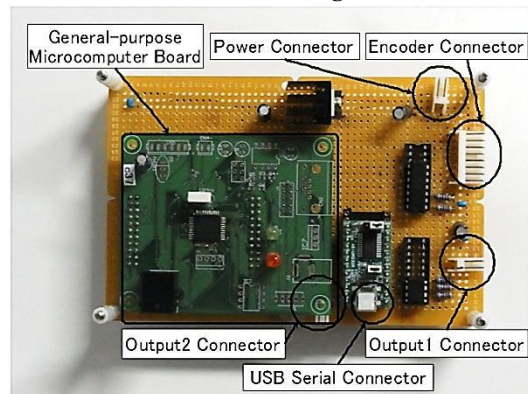


Fig. 4 PIC基盤の外観

3.2 予備実験

PICによるペダル回転速度の制御を行う。

3.2.1 目的

PICによる制御で、ペダル回転速度を参照速度に制御できるのかを調べる。

3.2.2 実験方法

ペダルに重り(約2kg)を固定し、ペダルを水平な状態まで手で持ち上げ、その状態から手を離してペダルを回転させる。MR流体ブレーキへの電圧とペダル回転速度を測定する。

3.2.3 ペダル回転速度制御

Fig. 5にペダル回転速度制御の流れを示す。ここで、 K_p [Nm・s/rad]は比例ゲイン、 K_i [Nm・s²/rad]は積分ゲイン、 ω_{ref} [rad/s]は参照速度、 ω [rad/s]はペダル回転速度、 T_{Bin} [Nm]はMR流体ブレーキの負荷トルクの目標値、 I [A]は電流、 T_{Bout} [Nm]はMR流体ブレーキの生成トルク、 T_l [Nm]は T_{Bout} にギヤ比 $G(=2)$ を掛けたペダルへの負荷トルク、 T_h [Nm]は人の操作によるトルクを表している。比例ゲインと積分ゲインの値は試行的に決定する。以下の式により T_{Bin} を求める。

$$T_{Bin} = K_p(\omega - \omega_{ref}) + \frac{K_i}{s}(\omega - \omega_{ref}) \quad (1)$$

ただし、 $T_{Bin} \geq 0.0$ である。

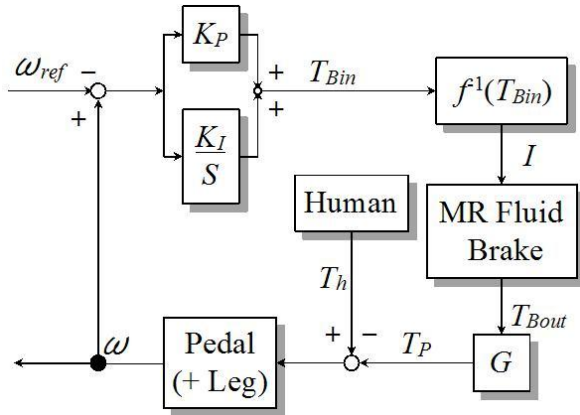


Fig. 5 ペダル回転速度制御の流れ

3.2.4 実験条件

実験時のプログラムの設定を Table 1 に示す。

Table 1 予備実験での設定

参照速度(ω_{ref})	1.0 rad/s
比例ゲイン(K_P)	5.0 Nm·s/rad
積分ゲイン(K_I)	10.0 Nm·s ² /rad
処理時間	2 ms

3.2.5 実験結果

実験の結果を Fig. 6 に示す。

ペダル回転速度が大きくなる最初の約 100ms は立ち上がりの時間である。その後約 100ms の間オーバーシュートがある。オーバーシュート後は 1rad/s 付近に制御できている。

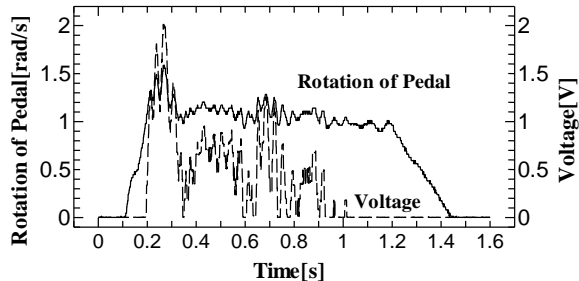


Fig. 6 ペダル回転速度制御実験の結果

3.3 ペダルトルク制御の比較実験

3.3.1 目的

VR 自転車システムの第一次試作と第二次試作により、それぞれペダルトルク制御を行い、PIC による制御性能の向上を調べる。

3.3.2 実験での制御

実験では、以下の式によりペダルトルク制御を行う。

$$\begin{cases} F_P = 0.0 & (V_P \leq V_S) \\ F_P = M_V \times (A_S(1.0 - \gamma) + A_P\gamma) & (V_P > V_S) \\ \quad - (F_G + F_A + F_V) & \end{cases} \dots (2)$$

ただし、 $F_P \geq 0.0$ である。

ここで、 F_P [N] はペダルにかかる負荷、

V_P [m/s] は実際のペダリングから換算した自転車速度、 A_P [m/s²] は実際のペダリングから換算した自転車加速度、 V_S [m/s] は物理演算による自転車仮想速度、 A_S [m/s²] は物理演算による自転車仮想加速度、 F_G [N] は重力の推進方向成分、 F_A [N] は空気抵抗、 F_V [N] は仮想的な粘性抵抗、 M_V [kg] は車両の質量、 γ [-] は A_S と A_P の貢献度の比率である。

各抵抗力は以下の式により求める。

$$F_G = -M_V g \sin \theta \quad (3)$$

$$F_A = -C_A (V_S - V_W)^2 \frac{V_S - V_W}{|V_S - V_W|} \quad (4)$$

$$F_V = -C_V V_S \frac{V_S}{|V_S|} \quad (5)$$

ただし、 θ [deg] は仮想空間における自転車の傾斜角度、 C_A [N·s²/m²] は空気抵抗係数、 V_W [m/s] は風速 (追い風を正)、 C_V [N·s/m] は粘性抵抗係数である。

3.3.3 実験方法

VR 自転車を人が漕ぎ、以下の値を測定する。

- 1) 速度誤差 ($V_P - V_S$)
- 2) 仮想空間における自転車の傾斜角度 (θ)

3.3.4 実験条件

式(2)の F_G 、 F_A 、 F_V に対して以下の様な条件で実験を行う。

- (a) 坂道の影響 (F_G) による制御
- (b) 上記の F_G と空気抵抗 (F_A) による制御
- (c) 上記の F_G と仮想的な粘性抵抗 (F_V) による制御

実験における設定を Table 2 に示す。

Table 2 比較実験での設定

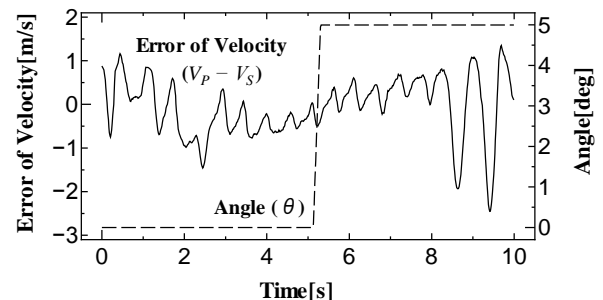
第一次試作における処理時間	約 10 ms
第二次試作における処理時間	2 ms
車両の質量(M_V)	10.0 kg
A_S と A_P の貢献度の比率(γ)	0.2

3.3.5 実験結果

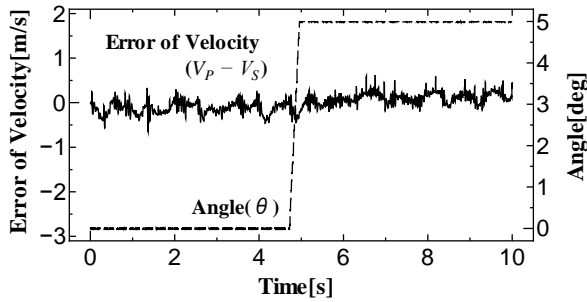
以下に各実験の結果を示す。

- (a) 傾斜角度の影響 (F_G) による制御実験

F_G による影響での VR 自転車制御の実験結果を Fig. 7 に示す。

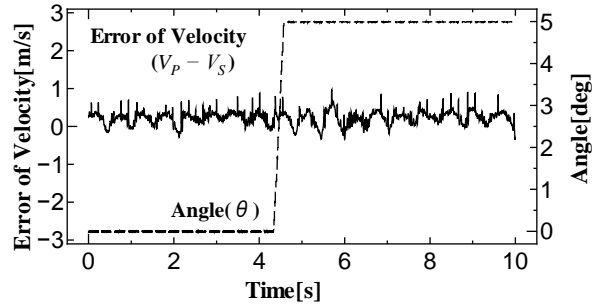


(1) 第一次試作の実験結果



(2) 第二次試作の実験結果

Fig. 7 傾斜角度の影響による制御実験の結果

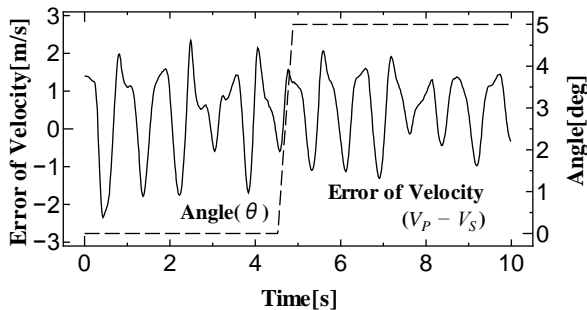


(2) 第二次試作の実験結果

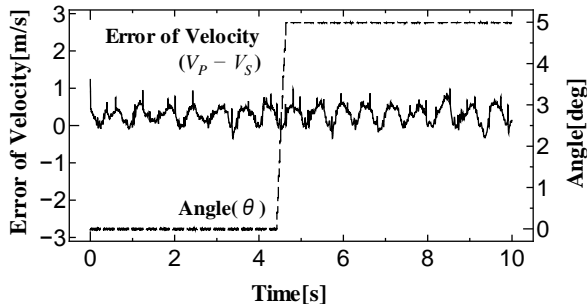
Fig. 9 仮想的な粘性抵抗($C_V: 5.0 \text{ N}\cdot\text{s/m}$)での制御実験の結果

(b) 空気抵抗の影響(F_G, F_A)による制御実験

F_G, F_A による VR 自転車制御の実験結果を Fig. 8 に示す. 空気抵抗による制御実験では向かい風を設定した.



(1) 第一次試作の実験結果

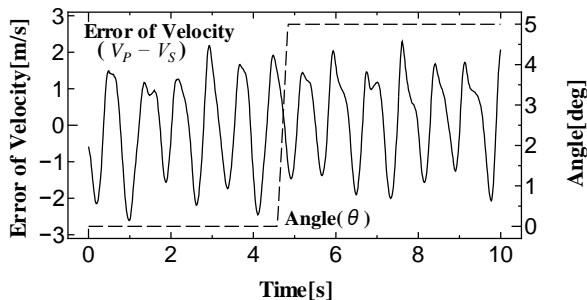


(2) 第二次試作の実験結果

Fig. 8 空気抵抗($V_W: -1.0 \text{ m/s}$)での制御実験の結果

(c) 仮想的な粘性抵抗(F_G, F_V)による制御実験

F_G, F_V による VR 自転車制御の実験結果を Fig. 9 に示す. 粘性抵抗係数は試行的に定めた.



(1) 第一次試作の実験結果

各制御において自転車傾斜角度の変化前と変化後で、速度誤差に大きな変化は見られなかった.

第二次試作では、第一次試作より速度誤差が小さくなり、制御が向上した.

処理時間の改善により、ペダルトルク制御が向上した.

4. 今後の課題点

以下に今後の課題点を示す.

- 1) MR 流体ブレーキの応答速度の改善
- 2) シール抵抗の改善

5. 結言

本研究では、PIC を用いて VR 自転車システムの開発を行い、PC による制御と PIC を用いた制御の評価を行った.

謝辞

本研究の一部は、総務省 SCOPE の助成を受けて実施した. ここに記して感謝の意を表す.

参考文献

- 1) 厚生労働省, 人口動態調査(平成 23 年人口動態統計 確定数) 年次-2011 年, 死亡数、性・年齢(5 歳階級)・死因(死因簡単分類) 別 (<http://www.e-stat.go.jp/>)
- 2) 特定非営利活動法人 日本成人病予防協会, 生活習慣病の予防 心疾患 脳血管疾患, (<http://www.japa.org/>)
- 3) 自転車探検!, 自転車の病気予防効果, (http://www.geocities.jp/jitensha_tanken/)
- 4) Virtual Bike Training (<http://www.virtualbiketraining.com/>)
- 5) 小林慧吾, 菊池武士, 杉山正雄, 円筒型 MR 流体ブレーキを用いたバーチャルリアリティー自転車の開発, 計測自動制御学会 東北支部 第 267 回研究集会, (2011)
- 6) 竹田真也, 鈴木裕一, 落合章裕, 富樫洋海, 山野光裕, ロボット制御のための dsPIC マイコン用ソフトウェアの開発, 計測自動制御学会 東北支部 第 260 回研究集会, (2010)