

自転車走行中の車体加速度と走行者の体幹姿勢に関する研究

A Study on Vehicle Acceleration and Trunk Posture of a Rider During Riding a Bicycle

○学 大宮 凜太郎^{*1}, 塚田 元輝^{*1}, 齊藤 亜由子^{*1}, 木澤 悟^{*2}

Rintaro OMIYA¹, Motoki TSUKADA^{*1}, Ayuko SAITO^{*1} and Satoru KIZAWA^{*2}

^{*1} 工学院大学 Kogakuin University

^{*2} 秋田工業高等専門学校 National Institute of Technology (KOSEN), Akita College

In this research, we attempted to evaluate the cyclist's ability to maintain balance by using information from a 9-axis motion sensor attached to the cyclist's trunk, lower limbs, and bicycle body. The experiment is conducted on flat and uneven roads. First, the sensor fusion using a gyro sensor, an acceleration sensor, and a magnetometer is used to estimate the trunk posture during riding a bicycle. Then, we evaluate the coordination of acceleration between the rider's trunk and the bicycle by using the singular value decomposition. Finally, the results of the three-dimensional posture of the trunk and the coordination of acceleration between trunk and the bicycle are used to verify the balance during riding a bicycle.

Key Words : Bicycle, Coordination, Pose estimation, Trunk posture, Vehicle acceleration

1. 緒 言

自転車の定義は、ペダル又はハンド・クランクを用い、人の力により運転する二輪以上の車である。日常的な移動や、余暇を楽しむためのサイクリングスポーツにおいて、自転車は幼児から高齢者まで幅広い年齢層に親しまれている。

一般的に広く用いられている二輪車はバランスをとりながら走行する必要があるため、子どもが初めて自転車に乗る際は補助輪を使用することが多い。特に加速する際に最もバランスを崩し転倒する可能性が高いため、ペダルを踏みこむ際のバランスのとり方を運動学的観点から解明し、科学的根拠に基づいた乗り方、こぎ方を確立することが重要である。

これまでに、自転車走行時のハンドリング操作に関する研究⁽¹⁾が行われており、高速走行では周期的なハンドル操作を行う必要がないためバランスをとることが容易になることがわかっている。しかし、車体の動きに合わせて全身でどのようにバランスをとっているかは明らかになっていないことも多い。

本研究では自転車走行者の体幹・下肢と自転車車体に装着した 9 軸モーションセンサの計測情報を用い、走行者のバランス維持について評価を試みる。計測は平坦な道路と、路面の凹凸が大きい道路の 2 か所で行う。はじめに、ジャイロセンサ・加速度センサ・地磁気センサを用いたセンサ・フュージョンにより自転車走行中の体幹の姿勢を推定する。続いて、自転車走行者の体幹・左右下肢と車体から得られた加速度を特異値分解することにより、体幹と車体の加速度協調を評価する。最後に、体幹の三次元姿勢、身体と車体の加速度協調の結果から自転車走行におけるバランス維持について検証する。

2. 計測実験

被験者は成人健常男性 1 名（身長 1.75m, 体重 75kg）である。自転車走行計測実験は屋外の平坦な道路、一定間隔で凹凸がある道路において実施した。本実験については臨床実験に関する工学院大学ヒトを対象とする研究倫理審査委員会の承認を得るとともに、あらかじめ被験者に十分な説明を与え、同意を得た。

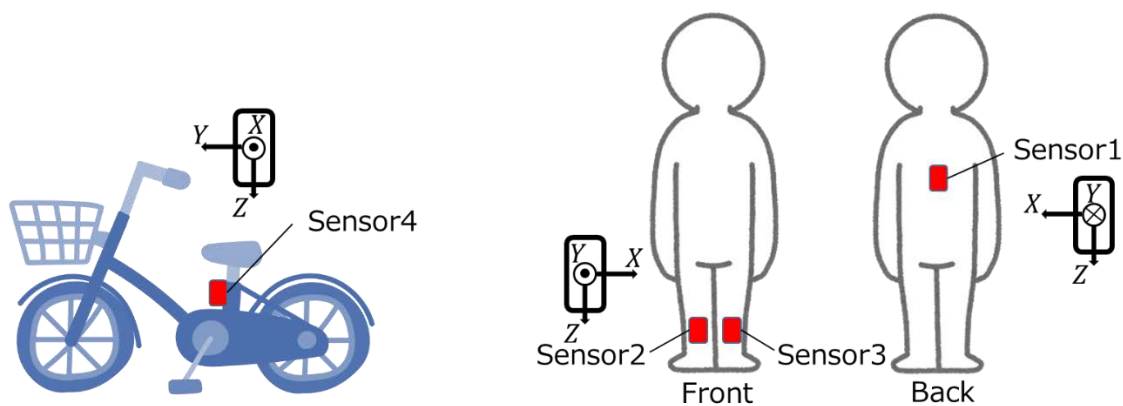


Fig.1 Sensor positions

本実験においては、図1に示すように9軸モーションセンサを被験者の体幹（背中）、左右下腿部、および自転車のサドル下に装着し路面状況が異なる2地点にて計測を行った。

3. 解析

3・1 体幹の姿勢推定

基準座標系は鉛直方向を Z 軸とした右手座標系で定義した。X 軸周りの角度をロール角(φ)、Y 軸周りの角度をピッチ角(θ)、Z 軸周りの角度をヨー角(ψ)と定義し、反時計回りを正方向とした。センサが傾斜した場合、センサの各軸出力には重力加速度が含まれる。加速度協調の評価では、センサ出力から重力加速度を除去した動加速度を用いるため、センサ姿勢を逐次推定する。はじめに、重力加速度と地磁気センサから得られる磁場を用いてロール角、ピッチ角、ヨー角の初期値を算出する。加速度センサ出力と基準座標系における重力加速度の関係式を式(1)に示す。

$${}^iA = {}^0R_i^T {}^0A \quad (1)$$

ただし、

$${}^iA = \begin{bmatrix} {}^iA_x \\ {}^iA_y \\ {}^iA_z \end{bmatrix}, \quad {}^0A = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}$$

ここで、 iA は加速度センサの出力、 0A は基準座標系の原点 O における加速度、 ${}^0R_i^T$ はセンサ座標系から基準座標系への回転行列であり、 g は重力加速度を示す

式(1)を用いることにより、ロール角とピッチ角の初期角度を式(2)、(3)で表すことができる。

$$\varphi_A = a \tan 2 \frac{{}^iA_y}{{}^iA_z} \quad (-\pi < \varphi_A < \pi) \quad (2)$$

$$\theta_A = a \tan 2 \frac{-{}^iA_x}{\sqrt{{}^iA_y^2 + {}^iA_z^2}} \quad (-\pi < \theta_A < \pi) \quad (3)$$

ここで iA_x , iA_y , iA_z は 3 軸方向の加速度センサ出力であり φ_A , θ_A は加速度センサ出力を用いて算出したロール角、ピッチ角の初期値を示す⁽²⁾。

ヨー角の初期角度は、地磁気センサから得られる磁場を用いて算出する。磁場外乱と傾斜誤差補正後の磁場を用いることにより、センサ座標系におけるヨー角の初期値 ψ_m は式(4)で表すことができる。

$$\psi_m = a \tan \frac{-i_{m_y}}{i_{m_x}} \quad (4)$$

動作中におけるロール角、ピッチ角、ヨー角の微分値は、ジャイロセンサ出力を式(5)に示すロール・ピッチ・ヨー角の微分式へ適用することにより算出可能である。

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_t \\ \dot{\theta}_t \\ \dot{\varphi}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin \varphi_t \sin \theta_t & \cos \varphi_t \sin \theta_t \\ 0 & \cos \varphi_t & -\sin \varphi_t \\ 1 & \sin \varphi_t \cos \theta_t & \cos \varphi_t \cos \theta_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで $\dot{\psi}_t$, $\dot{\theta}_t$, $\dot{\varphi}_t$ はそれぞれロール角、ピッチ角、ヨー角の微分値であり ψ_t , θ_t , φ_t は時刻 t におけるロール角、ピッチ角、ヨー角。 ω_x , ω_y , ω_z は 3 軸周りのジャイロセンサの出力である。式(5)を式(6)に適用することによって動作中のセンサ姿勢角を算出することが可能である。

$$\begin{bmatrix} \psi_{t+1} \\ \theta_{t+1} \\ \varphi_{t+1} \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} \dot{\psi}_t \\ \dot{\theta}_t \\ \dot{\varphi}_t \end{bmatrix} dt + \begin{bmatrix} \psi_t \\ \theta_t \\ \varphi_t \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで ψ_{t+1} , θ_{t+1} , φ_{t+1} は時刻 $t+1$ におけるロール角、ピッチ角、ヨー角であり、 ψ_t , θ_t , φ_t は時刻 t におけるロール角、ピッチ角、ヨー角を示す。動作中の姿勢角を算出する式(6)とヨー角の算出式（式(4)）および加速度センサ出力を用いて拡張カルマンフィルタを構築し、センサの姿勢推定を行う。

さらに拡張カルマンフィルタにより求められるセンサの姿勢を用いて、計測時の加速度センサ出力（式(1)）に含まれる静的加速度を取り除く（式(7)）。

$$A_R = {}^iA - {}^iA_g \quad (7)$$

ただし、

$${}^iA = \begin{bmatrix} {}^iA_x \\ {}^iA_y \\ {}^iA_z \end{bmatrix}, {}^iA_g = \begin{bmatrix} -\sin \theta_i \cdot g \\ \cos \theta_i \sin \varphi_i \cdot g \\ \cos \theta_i \cos \varphi_i \cdot g \end{bmatrix}$$

ここで、 A_R は加速度センサ出力から静的加速度を除去したセンサ座標系の動加速度、 iA は加速度センサ出力を示しており、 iA_g は加速度センサ出力に含まれる重力加速度を示す。

姿勢推定および動加速度の結果の一例として、平坦路と凹凸路における体幹の三次元姿勢および三軸方向の車体動加速度を図 2 に示す。平坦路においては車体の進行方向・鉛直方向加速度が $\pm 0.5[\text{m/s}^2]$ 以内で変動しており、体幹姿勢は乗り出し時に大きく屈曲しているが、その後は自然に屈曲伸展を繰り返しながら概ね 10～20 度付近を変動している。凹凸路において、車体の進行方向加速度は $\pm 2.0[\text{m/s}^2]$ 以内、鉛直方向加速度は $\pm 3.0[\text{m/s}^2]$ で大きく変動しており、体幹姿勢は平坦な路面と同様、乗り出し時に大きく屈曲しているが、走行中は平坦路よりも姿勢変化が少ない傾向である。

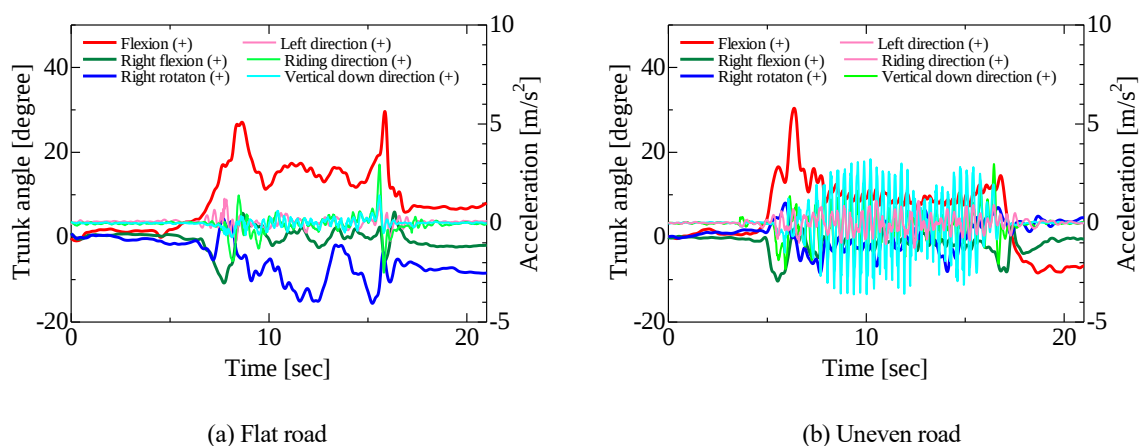


Fig.2 Trunk posture and acceleration of a bicycle

3・2 車体と身体の加速度協調

本研究では、センサの姿勢推定により重力加速度を除去した後の動加速度を用いて、左右下肢の加速度協調および体幹と車体の加速度協調の特徴を評価する。解析に用いる動加速度はセンサごとに重みづけを行っており、各センサの三軸の加速度出力の最大値を 1，最小値を-1 となるよう正規化している。協調の定量評価には、以下に示す特異値分解に基づく評価手法を適用する³⁾。

動加速度の時系列データで構成される観測行列を式(8)に示す。列方向は各軸の体幹加速度 (A_{x1} , A_{y1} , A_{z1}) と車体加速度 (A_{x4} , A_{y4} , A_{z4}) を表し、行方向が時系列方向を表す。

$$R(A, t) = \begin{bmatrix} A_{x1}(t_1) & A_{y1}(t_1) & A_{z1}(t_1) & A_{x4}(t_1) & A_{y4}(t_1) & A_{z4}(t_1) \\ A_{x1}(t_2) & A_{y1}(t_2) & A_{z1}(t_2) & A_{x4}(t_2) & A_{y4}(t_2) & A_{z4}(t_2) \\ A_{x1}(t_3) & A_{y1}(t_3) & A_{z1}(t_3) & A_{x4}(t_3) & A_{y4}(t_3) & A_{z4}(t_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{x1}(t_n) & A_{y1}(t_n) & A_{z1}(t_n) & A_{x4}(t_n) & A_{y4}(t_n) & A_{z4}(t_n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

この時、 R の積和行列 $RR^T(t)$ は行列の各要素の時系列における特徴を有し、その固有ベクトルを主成分として、動加速度間で相関の高い時系列のまとまりが得られる。一方で R^T の積和行列 $R^TR(A)$ は各動加速度間の相関の情報を有するため、その固有ベクトルを計算することで、各時刻において動加速度間にどのような相関があるか、つまり同時に活動する動加速度の協調パターンが得られる。

RR^T , R^TR の固有ベクトルは、 R を特異値分解したときにそれぞれ左特異値ベクトル、右特異値ベクトルとして定義される。 $R(A, t)$ から時間平均 R_0 を分離し、時間平均からの移動量の特異値分解することで $R(A, t)$ は式(9)に示すように動加速度情報を持つ特異ベクトル $Z(A)$ と時間情報を持つ特異ベクトル $v(t)$ に分解できる。

$$R(A, t) = R_0 + \sum_{i=1}^6 \lambda_i v_i(t) Z_i^T(A) \quad (9)$$

ここで、 λ_i は各基底ベクトルの寄与度 (特異値)、 v_i は各基底ベクトルの活性パターン (時間基底)、 $Z_i(A)$ は各基底ベクトルにおける動加速度・角速度の協調パターン (空間基底) である。

得られた特異ベクトルを特異値 λ_i の大きい順に第1モード、第2モード、... としたとき、それらの寄与率 γ_i は式(10)で表せる。

$$\gamma_i = \frac{\lambda_i^2}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i^2} \quad (10)$$

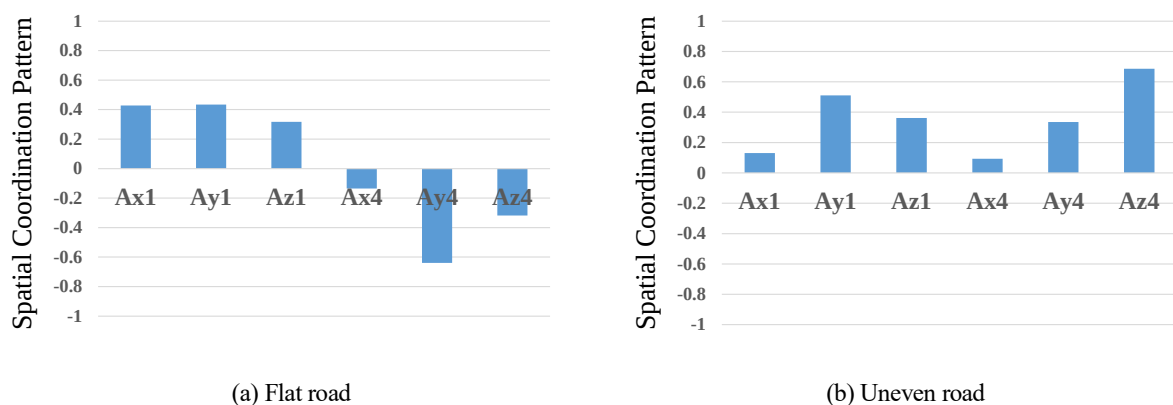


Fig.3 Special coordination patterns

左右下肢の加速度協調に関しても式(8)～(10)を用いて同様に特異値分解を行うことができる。

重力加速度を除去した動加速度を用いて特異値分解を行った結果の一例として、体幹と車体の動加速度に関する第一モードの結果を図3に示す。図3は被験者の体幹に装着したセンサ1と、自転車のサドル下に装着したセンサ4における特異値分解の結果を示しており、(a)は平坦路、(b)は凸凹路における結果である。センサ1の動加速度は、車体の動加速度を除去した被験者の動作のみによって生じる動加速度を使用して解析を行っている。

平坦路において、車体の加速度は進行方向 (A_{y4}) のみが主に生成されており、体幹の加速度は左右方向 (A_{x1})・進行方向 (A_{y1}) の生成が大きく、バランス維持のために体幹の動きを自発的に左右方向・進行方向へ調整させていたことが考えられる。一方、凹凸路では、車体の進行方向 (A_{y4})・鉛直方向 (A_{z4}) の加速度と共に体幹の進行方向 (A_{y1})・鉛直方向 (A_{z1}) の加速度の生成が確認できる。本結果は凹凸により車体が受ける衝撃に対応して、被験者が進行方向・鉛直方向に体幹の動きを調整していたことが考えられる。すなわち、平坦路では左右方向への体幹の姿勢調整が確認できるが、凹凸路では路面から受ける進行方向・鉛直方向の衝撃に合わせて体幹の動きを調整し、バランスを維持していた可能性が考えられる。

4. 結言

本研究においては、自転車の動きに対して全身でどのようにバランスをとっているか解明する試みの第一歩として、男性成人健常者の自転車走行における車体と身体部位の運動を計測した。ジャイロセンサ・加速度センサ・地磁気センサを用いたセンサ・フュージョンにより、体幹の姿勢を推定するとともに、体幹と車体の加速度協調を解析した。本稿においては両脚の加速度協調に関する解析結果を省略しているが、特異値分解を用いた両脚の加速度協調の結果から平坦路では両足の加速度協調が顕著に表れ、凹凸路では体幹の姿勢調整によるバランス維持が示唆されており、体幹と車体との加速度協調と合わせて今後さらに解析を進めていく予定である。

文 献

- (1) 仁木 宏, 村上 俊之, ハンドル制御による電動自転車の走行安全化に関する一考察, available from <https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejias/125/8/125_8_779/_pdf/-char/ja>, 参照日 (2023年7月19日).
- (2) 廣瀬圭, 近藤亜希子, 特集3:人間工学のための計測手法, 人間工学, Vol.50, No.4 (2014), pp.182-190.
- (3) 船戸徹郎, 青井伸也, 土屋和雄, ヒトの歩行における全身の関節協調動作の定量的評価, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No.8 (2010), pp.996-1003.