

1. はじめに

近年、鉄道の無人駅やワンマン運行が増加しており、車椅子の利用者は鉄道を利用する際は非常に不便である。従って車椅子の利用者が人手を借りることなく車両への乗り降りが可能になるとより便利である。鉄道車両への乗り降り、広くは段差の昇降が可能な車椅子は様々に開発されているが、車両の乗り降りが可能であるだけでなく利用者の乗り心地にも注目して乗り降りを実現する方がより望ましいといえる。

本研究では [1] を参考に躍度 (加加速度) を最小にすることが乗り心地の改善につながると仮定し、躍度最小化を実現する軌道を実装して乗り心地が改善されることの確認を行う。

2. 研究概要

2.1 機体の構造と動作

本研究では [2] で提案した車椅子を使用し、Fig. 2 に示す前後のアームにより実現される昇り動作において乗り心地の改善を図る。実機は前アーム・前サブアーム・後アーム・後サブアームの4つのアームが動作可能で、前アーム・後サブアームの2つはプログラムによって制御可能である。よって、本研究では Fig. 2 に示す前アーム・後サブアームによって実現される1段の段差を昇る動作について軌道の躍度最小化を図る。

段差の昇り動作は Fig. 2 の前アームの角度 θ_1 、後サブアームの角度 θ_3 に注目して制御を考えることができ、接地時の角度 θ_1^0 、 θ_3^0 から制御が始まり、角度の時間推移 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_3$ によって座面が持ち上がり、段差を昇ることができる。

2.2 躍度最小化となる軌道計画

実機の動作時の乗り心地に関して、評価指標のひとつに躍度 (加加速度) の大きさが挙げられる。躍度とは加速度を微分したものであり、これを動作開始

から動作終了時刻まで積分したものを評価関数 C とする。

$$C = \int_0^{t_f} \left(\frac{d^3 y(t)}{dt^3} \right)^2 dt \quad (1)$$

乗り心地に関わる上方向 (y 軸) の時間推移の軌道は、この評価関数 C が最小となるような軌道 $y(t)$ が理想的である。ここで、 $L = \left(\frac{d^3 y(t)}{dt^3} \right)^2 = (y^{(3)})^2$ として、積分値 C が極値を持つとき、オイラー・ポアソンの方程式より (2) 式が成り立つ。

$$\frac{\partial L}{\partial y^{(0)}} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial y^{(1)}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial L}{\partial y^{(2)}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial L}{\partial y^{(3)}} = 0 \quad (2)$$

さらに、 $\frac{\partial L}{\partial y^{(0)}} = 0$ 、 $\frac{\partial L}{\partial y^{(1)}} = 0$ 、 $\frac{\partial L}{\partial y^{(2)}} = 0$ より、

$$\frac{d^3}{dt^3} \frac{\partial L}{\partial y^{(3)}} = 0 \quad (3)$$

となり、さらに $\frac{\partial^3 L}{\partial y^{(3)}} = 2y^{(3)}$ より、

$$\frac{d^6 y(t)}{dt^6} = 0 \quad (4)$$

であるから、

$$y(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (5)$$

を導くことができる。 t は段差を昇る動作開始からの経過時間である。さらに制御において速度、加速度の条件を与えて整理すると、

$$y(t) = \frac{10\Delta y}{t_f^3} t^3 + \frac{-15\Delta y}{t_f^4} t^4 + \frac{6\Delta y}{t_f^5} t^5 \quad (6)$$

と実装可能な軌道を与えることができる。 t_f は動作に掛かる時間 (昇り始めてから昇り終わるまでの時間)、 Δy は動作距離 (段差を昇れる機体持ち上げ高さ) である。



Fig. 1 実験に用いる車椅子 (実機)

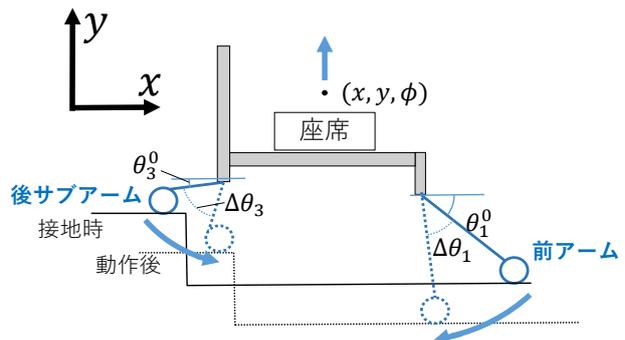


Fig. 2 実機の段差昇降の仕組み

ここで、動作させる軌道が決まっていることから動作に掛かる時間も予測可能であることに注目したい。

$$t_f = \frac{15}{8} \frac{\Delta y}{v_{max}} \quad (7)$$

(7) 式は (6) 式を元に導出した動作に掛かる時間を求める式である。実機の実現可能な上方向の最大移動速度 v_{max} と段差の高さ Δy を用いて終端時刻 t_f をあらかじめ予測することができる。 t_f と Δy の条件を揃えたとき、(6) 式の躍度最小軌道と他に実装した類似軌道を用いて、加速度から得られる C 値と搭乗者の乗り心地に注目して比較を行う。

3. 搭乗実験と結果

3.1 実験結果

(6) 式の躍度最小軌道の他に、(8) 式の \sin 軌道、(9) 式の直線軌道をそれぞれ実装し、どの軌道が乗り心地が悪いかを比較実験した。

$$y(t) = -\left(\frac{t_f}{2\pi}\right)^2 A_0 \sin\left(\frac{2\pi t}{t_f}\right) + A_1 t \quad (8)$$

$$A_0 = \frac{2\pi\Delta y}{t_f^2}, \quad A_1 = \frac{A t_f}{2\pi}$$

$$y(t) = \frac{\Delta y}{t_f} t \quad (0 \leq t \leq t_f) \quad (9)$$

Table 1 は比較実験の結果をまとめたものである。乗り心地に関しては搭乗者が感じる加速度に注目した加速度感、実機の振動に注目した振動感、搭乗者が感じる恐怖を評価する恐怖感の3つの観点で評価をおこなった。被験者は A, B, C の3人であり、躍度最小軌道と直線軌道、躍度最小軌道と \sin 軌道で比較を行うため、A1, A2 というように軌道比較の実験を合計2回行った。被験者である搭乗者は2回の実験を行い、1回の実験ごとにどちらの軌道が乗り心地が悪かったかを比較評価する。

実験結果としては躍度最小軌道が必ずしも乗り心地が良いという評価にはならなかった。このことに関して C 値に注目すると、 C 値の差がおよそ6割以下になると躍度最小軌道が乗り心地が良いという評価に揃っており、実験時の実機の動作によって差が生まれることが分かった。なお、 C 値差とはその時の躍度最小軌道の比較対象軌道に対する割合である。

3.2 考察

実験の結果より、躍度の二乗積分値である C 値に顕著な差が出ているときは C 値が小さい方が乗り心地が良いということが分かった。一方で躍度最小軌道は理論的には C 値が小さくなるが、実機の動作においては機体の動作のさせ方、搭乗者の状況などの環境によって C 値が様々であり、躍度最小軌道に最も近づくような制御を行っても躍度が最小になる場合とならない場合があった。この実験の精度を高めるためには、実機の動作制度を高めねばならず、より精度の高い動作ができる機体を用意する必要があると考えられる。

Table 1 実験結果

被験者	実験名	実軌道	C値	C値差 [%]	加速度感	振動感	恐怖感
A	A1	Jerk	79.33	104.05	○	○	
		Linear	76.24				○
	A2	Jerk	41.14	109.39	○	○	
		Sin	37.61				○
B	B1	Jerk	41.30	28.18			
		Sin	146.54		○	○	○
	B2	Jerk	20.21	63.26	○	○	○
		Linear	31.95				
C	C1	Jerk	36.73	62.34			
		Linear	58.92		○	○	○
	C2	Jerk	28.94	92.46	○	○	○
		Sin	31.30				

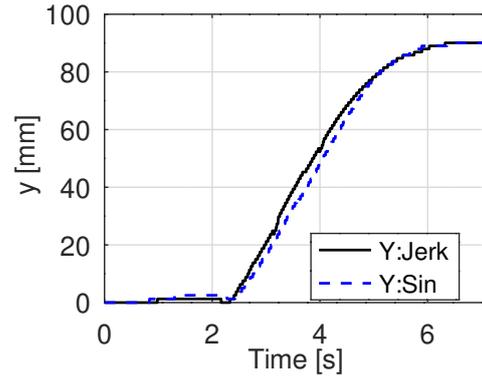


Fig. 3 実験 B1 の y 座標の時間推移

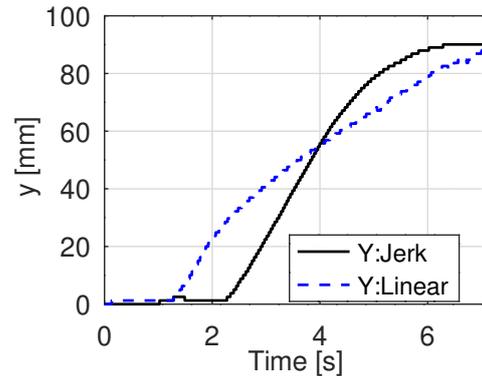


Fig. 4 実験 B2 の y 座標の時間推移

4. まとめ

本研究によって、躍度 (C 値) が最小になるような制御ができると確かに乗り心地が完全されることが確かめられた。特に本研究において用いた実機はアームによって自由度の高い動作を実現可能であり、独自の長所を有している。一方で、アームによる動作はアクチュエータによって実現されており、動作に確実性が保証できない部分がある。動作させるごとに C 値が大きく異なる差が出るほか、動作時の実軌道を理想的な軌道に近付けるのが難しく、ややむらのある実験となった。

参考文献

- [1] 草野, 大村: jerk 最小モデルを用いた人の指さし行動予測手法の検討, IPSJ Interaction 2012, pp. 929-934, 2012
- [2] Takemori, F. and Hayashi R.: Possibility of Getting on/off Public Vehicle by Manual Wheelchair with 4 Degrees of Freedom Contact Arm Mechanism, Proc. of CLAWAR 2021, pp. 477-488, 2021