

ジョイスティック操作状態と全身振動暴露評価に基づいた  
電動車いすの小段差踏破支援システムの開発

Development of Driving Support System for Step Climbing Electric Wheelchair  
Based on Operating Joystick State and Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration

○ 大塚亮平（埼玉大院） 綿貫啓一（埼玉大院） 楓和憲（埼玉大院）

Ryohei OTSUKA, Saitama University  
Keiichi WATANUKI, Saitama University  
Kazunori KAEDE, Saitama University

**Abstract:** It is too difficult for electric wheelchair users by the quadriplegia or motor ability lowering to fine manipulation of the joystick. Also, there is a risk causing a loss of control by the impact of collision to the step. In this paper, we built a system that performs to assist fine control of the speed depending on height of the step. This system uses a laser range finder to detect the step from remotely, and uses the valuation of human exposure to whole-body vibration in order to estimate unpleasantness from step height and step climbing speed. This system is also verified reducing impact of collision to the step.

**Key Words:** Welfare vehicles, Movement support, Barrier-free

1. 緒言

日常生活の中で「移動」は食事や入浴を行うための基礎となる重要な活動であり、肢体不自由者にとって車いすは、その移手段の一つとして生活を支える重要な役割を果たしている。特に電動車いすは、自走式の車いす操作が困難な人でも自身の意志で移動する手段が確保できることから、精神的・心理的な観点から大きな意義を持つといわれている<sup>(1)</sup>。

現在市販されている電動車いすは、操作デバイスとしてジョイスティックを用いるのが一般的である。ジョイスティックは、手先のわずかな変位で前進・後退・旋回などの指令が可能であり、麻痺がある程度強い人でも操作が可能である有効なインターフェイスデバイスである。しかし、ジョイスティックレバーはその構造上、微妙な操作を要求する走行に技術的な困難さがあることが指摘されている<sup>(2)</sup>。

また、我々の生活圏には数多くの段差が存在し、電動車いす操縦者にとって、それらを乗り越えなければならない状況がまだまだ多くある。このような段差を乗り越える操作において、段差に衝突する衝撃により体幹がずれてしまい、操縦不能になるなどの状態が発生する危険性があり、対策として操縦者は踏破する速度を落とし、残存能力で背シートに重心を移すなどの操作を行うことが推奨されている<sup>(3)(4)</sup>。しかし、その操作にはある程度の熟練が必要であり、先述の通り微妙な操作が困難な人はその技能習得がさらに困難となることが考えられる。

本論文では、操縦者の操作意図を大きく阻害せず快適な段差踏破を実現することを目的として、レーザレンジファインダ（LRF）を用いた遠隔からの段差高さ検出、全身振動暴露評価を用いた衝撃評価、段差踏破のための速度制御支援システムの構築を行い、段差踏破において必要な細かい操作をアシストする車いすを開発する。

2. 段差高さ検出と前進速度制御支援システム

2.1 LRF を用いた段差高さ検出

本研究では、段差に衝突する前に制動をかけなければならないため、LRF を用いて遠隔からの段差検出を行う処理を構築する。

図1はLRFを用いたセンシングの概略図を示す。LRFは

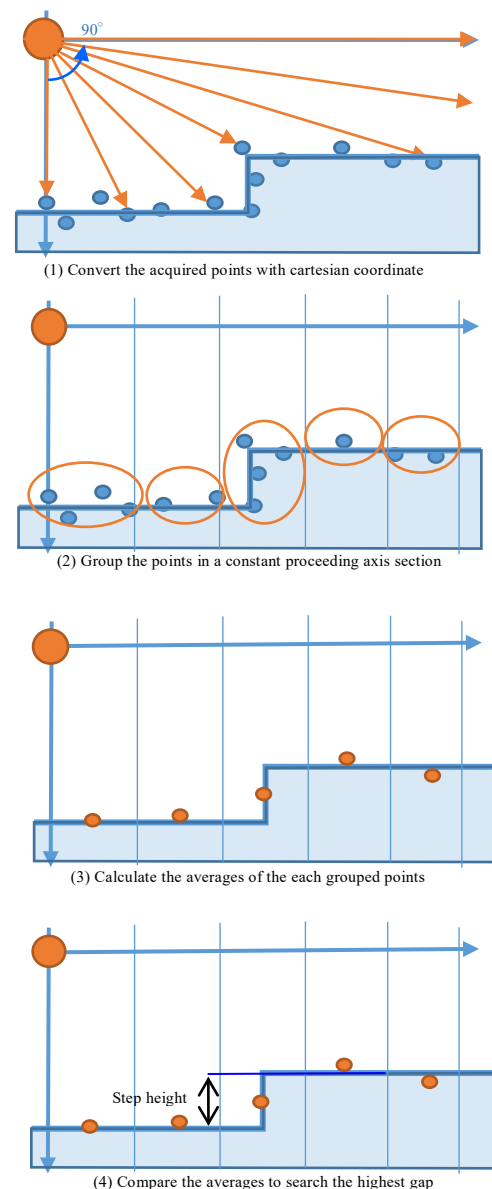


Fig. 1 Step detection method

放射状に光を放射することにより平面内の距離を取得できる光距離センサであり，本研究ではこの図のように鉛直下向きから進行方向までの90°の範囲で，路面までの離散的な距離データが取得できるように取り付ける．そして，この取得された離散的な距離データに以下のような処理を行い，段差を検出する．

- (1) LRF から取得できる距離データを直角座標系に変換する．
- (2) 一定距離区間で距離データをグループ化する．
- (3) グループ化されたデータ内で，高さ方向を平均した点をその距離の代表点とする．
- (4) その代表点同士を比較して，その高さの差が大きい点を段差として検出する．

2.2 全身振動暴露評価を用いた衝撃評価

本研究では，段差踏破の速度制御支援を実装するにあたり，電動車いすの適切な段差踏破の支援を考えるため，段差の高さと段差踏破時の速度によって段差踏破における衝撃がどのように変化するかについて，実際の踏破のデータを取得することで明らかにする．

段差踏破時の衝撃の評価の手法としては，JIS B 7760-2:2004 に基づいた全身振動暴露評価を用いる．この評価は全身に伝わる振動に対して，不快感などの客観的指標として用いられる．この評価値の算出方法は，人体の主要接触部の振動加速度を，周波数ごとに異なる補正値をかけて人体の快適性に関わる振動に変換し，その実効値を各箇所異なる重み付けをして合算することで得ることができる．この値が大きいほど振動による不快感が高いことが示される．

電動車いすのような座位姿勢の場合，全身振動暴露評価の主要接触部は図2のように，背中・仙骨・足元部分であることが定められている．また，このときの周波数ごとに掛けられる補正値は，表1および図3のように定められている．

2.3 段差踏破のための速度制御支援

速度制御支援システムは遠隔から検出した段差の高さ  $H[m]$  と，電動車いすから取得できるジョイスティックの前進操作量  $X$  を用いて，すべての支援操作量の候補に対してその操作量  $x$  で操作した場合の支援を評価し，その評価が最良のものを実際の支援操作量として反映させる．この支援の評価を式(1)に示す．

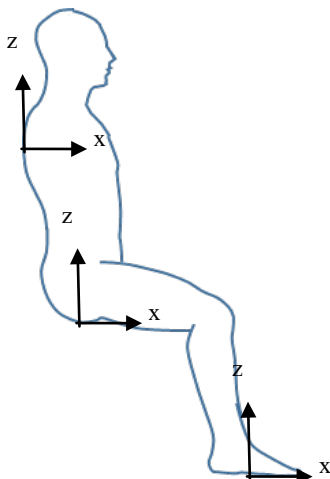


Fig. 2 Mounting locations of the acceleration sensors

$$E(x, X, H) = G(x, X)^2 + C \cdot A(x, H)^2 \tag{1}$$

ここで，関数  $A$  は 2.2 項の手法で求める衝撃評価を表しており，評価値は段差踏破時の速度と段差の高さにより決まる． $C$  は重み付けのパラメータであり， $G$  は次に示すジョイスティックの前進操作量と支援操作量とのギャップである．

$$G(x, X) = |x - X| \tag{2}$$

式(1)は支援操作量  $x$  がユーザの入力からどれくらい乖離するかを表す評価式  $G$  と，支援操作量  $x$  で踏破した場合衝撃がどれくらいあるかを表す関数  $A$  の 2 乗和で表される．また，重み付けのパラメータ  $C$  を変えることにより衝撃を許容する程度が変わり，支援の強さを変えることができる．これにより，ユーザの操作を大きく阻害せず，不快感が低減できるような支援が可能になると考えられる．

3. 実験

本実験で使用する実験装置の全体構成を図4に示す．本研究で用いる電動車いすは，既存の開発可能な電動車いすを用いている．そして，その車いす側部には，段差を検出する LRF を地面に向けてセンシングできるように取り付けた．さらに，それらの情報を処理し，車いすを制御する機器としてノート PC を電動車いすの背部ポケットに入れて，先述のそれぞれの機器と接続した．これにより，電動車いすから「現在の車いすの速さ」と「ジョイスティックの操作状態」を取得できる．さらに，LRF を用いて 2.1 項の処理を行うことで，「段差の高さ」を取得できる．これらの情報を利用して段差を踏破するまでの現在の状態を把握し，処理するシステムを構築する．

Table 1 Classification of frequency weighting

	Frequency weighting		
	X axis	Y axis	Z axis
Translational acceleration of seat	Wd	Wd	Wk
Angular acceleration of seat [m/rad]	We	We	We
Translational acceleration of backrest	Wc	Wd	Wd
Translational acceleration of footrest	Wk	Wk	Wk

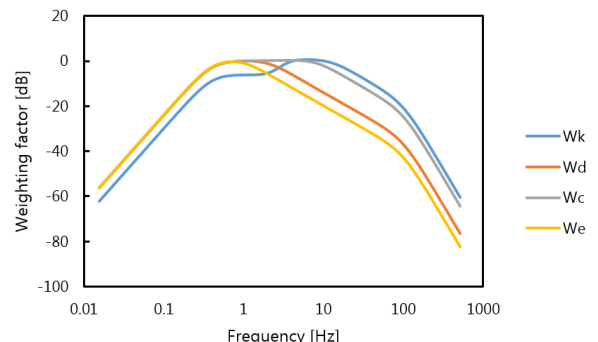


Fig. 3 Frequency weighting

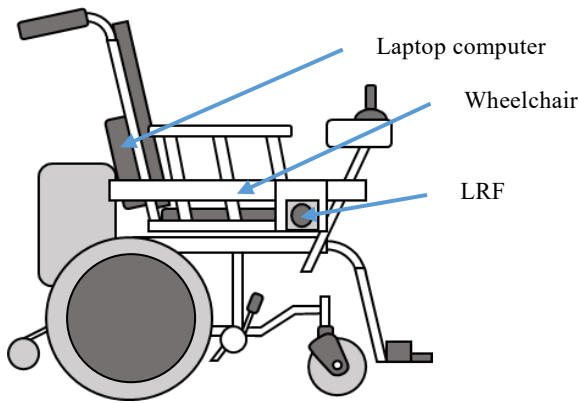


Fig. 4 Experimental wheelchair

3.1 LRF を用いた段差高さ検出

本研究で用いた電動車いすは、最高速度における制動距離が 1400mm であるため、車椅子の前方 0～1400mm での検出精度の検討を行う。

実験環境として屋内で段差が 1 段のみある空間を構築し、その段差部分から前輪の接地位置までの距離を段差までの距離とする。段差の高さは 10mm, 20mm, 30mm の 3 種類を用意する。段差までの距離を 200mm から 1400mm まで 200mm 間隔で変化させ、段差の高さをそれぞれ 1000 回計測した。

検出した段差の高さの平均値と標準偏差を、段差高さごとに図 5 に示す。この図は縦軸が検出結果の段差の高さ、横軸が計測時の段差までの距離を示しており、1000 回の計測値の平均値と標準偏差が図示されている。これにより全体的に段差の認識は実際の高さよりも 5mm 程度高め傾向があり、平均、標準偏差いずれも段差までの距離が 800mm 前後で最も大きく ±7.6mm の値となることがわかった。

3.2 全身振動暴露評価を用いた段差踏破の衝撃評価

段差の高さと踏破するときの速度を変化させて、全身振動暴露評価を用いて衝撃の評価を行うことにより、段差の高さと踏破速度から衝撃評価の値を推測できる関数 A を構築する。

実験環境として屋内で段差が 1 段のみある空間を構築した。また、電動車いすの初期位置として、段差から 2m 手前に基準線を引き、車いすの前輪がトレーリングポジションで基準線にかかるようにした。このような状態から被験者には全速力で直進して段差踏破を行うようにしてもらい、段差踏破の様子を背中・仙骨部・足元に取り付けた加速度

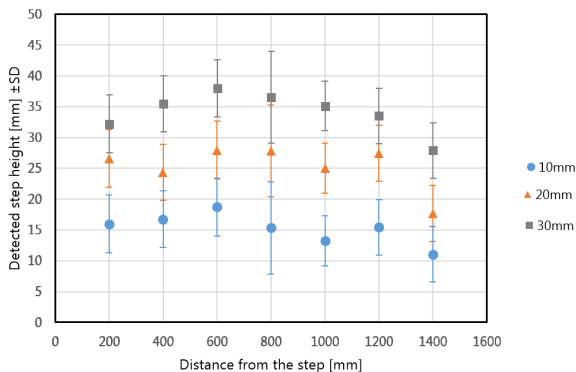


Fig. 5 Detected step height

センサで記録し、全身振動暴露評価から衝撃の評価をおこなった。この試行を段差の高さを 10mm, 15mm, 20mm, 25mm, 30mm の 5 種類と、段差に侵入する速度を車いすで設定できる 5 段階の最高速度設定で変化させて、それぞれ 10 試行ずつ行った。

実験によって取得した段差高さや踏破時の速度ごとの全身振動暴露評価の評価値を図 6 に示す。この図から、評価値は段差高さに対して線形関係、踏破速度の平方根に対して線形関係があると仮定し、これに重回帰分析を適用して段差の高さを H[m]、踏破速度 V[m/s] として関数 A[m/s<sup>2</sup>] を式(3)に当てはめた。

$$A = 4.2H + 0.087\sqrt{V} - 0.096 \quad (3)$$

この式の決定係数は 0.95、標準偏差は 0.0078 であり、これにより段差の高さと踏破速度から衝撃評価の値を推測することが可能である。

3.3 段差踏破の官能評価実験

式(3)に示す衝撃評価を用いて、速度制御支援システムを実装し、実際の環境でこのシステムを試験することで、段差前での進入速度の支援が適切に行われているか検証する。

屋内で高さ 20mm の段差が 1 段のみある環境を構築し、5 人の被験者に段差を乗り越える操作を行うようにしてもらい、そのときの加速度、車いす速度と LRF より取得できる段差の高さを記録した。

段差踏破の試行を行った際のジョイスティック操作量・支援操作量・車いすの前進速度・段差の高さの時間推移の一例を図 7 に示す。これにより、段差検出において、20mm

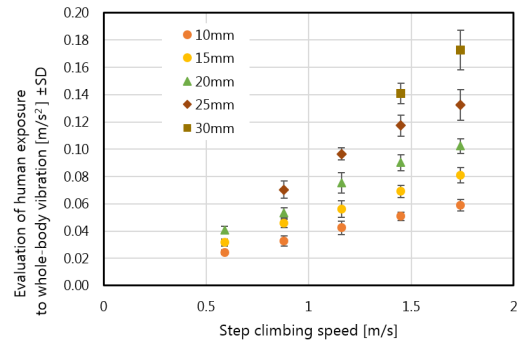


Fig. 6 Change of the evaluation level with every step height and step climbing speed

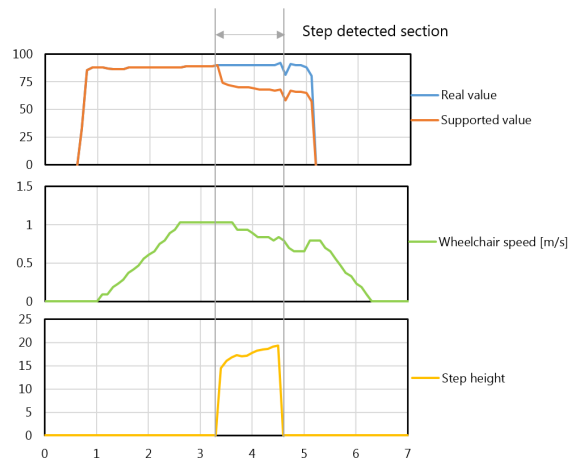


Fig. 7 Result of the assist system

の段差の高さを検出し，段差を検出すると支援操作量が変化し，それに伴い速度が減少して段差を踏破する様子がうかがえる。

#### 4. 速度制御支援システムの評価

5人の被験者において支援のある場合とない場合でそれぞれで10回ずつ振動加速度を計測した結果から，段差踏破時の最大加速度振幅を有意水準1%のt検定を用いて比較した結果を図8に示す。これにより，進行方向振動と上下方向振動にて支援の有無で有意差が見られ，段差踏破時の快適性が向上したと考えられる。特に，上下方向振動の低減が大きくCの値を大きくすることで更なる低減効果が期待できると考える。

#### 5. 結言

本論文では，本人の操作意図を大きく阻害せず快適な段差踏破を実現するために，段差踏破において必要な細かい操作をアシストする車いすを提案した。その過程において

段差を検出するシステムと段差踏破時の衝撃の評価を行い，それらを用いて適切な速度制御支援を行うシステムを構築した。さらに，このシステムにより段差踏破の支援が行われ，段差踏破時の最大加速度振幅が有意に低減することが確認され，快適性が向上されたと考える。

今後の展望として，Cを変化させて個々人への適合，段差踏破に至るまでの速度の推移のさせ方，踏破不可能である場合の制御などを検討することが挙げられる。

#### 参考文献

- (1) 端山 貴洋, 佐藤 太一, 小作 昌宏: 電動車いすの操作支援を目的とした音響情報に関する研究, 情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, No.1309 (2008), pp.101-106.
- (2) 百生 登, 大島 徹: 電動車いすのコントロールアシスト法, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference, No.605 (2006), pp.605-1.
- (3) 河村 宏: 電動車いす適合・操作練習マニュアル, 国立障害者リハビリテーションセンター <http://www.rehab.go.jp/whoclbc/japanese/pdf/J18.pdf> (参照日 2016-06-27).
- (4) 公的財団法人テクノエイド協会, 福祉用具ヒヤリ・ハット情報, [http://www.techno-aids.or.jp/hiyari/detail\\_print.php?id=14](http://www.techno-aids.or.jp/hiyari/detail_print.php?id=14) (参照日 2016-06-27).
- (5) JIS B 7760-2:2004: 全身振動—第2部:測定方法及び評価に関する基本的要求.
- (6) 黒住 亮太, 山本 透: 強化学習による電動車椅子の障害物回避補助システムの構築, システム制御情報学会論文誌, Vol. 19, No. 1, (2006), pp.7-14.

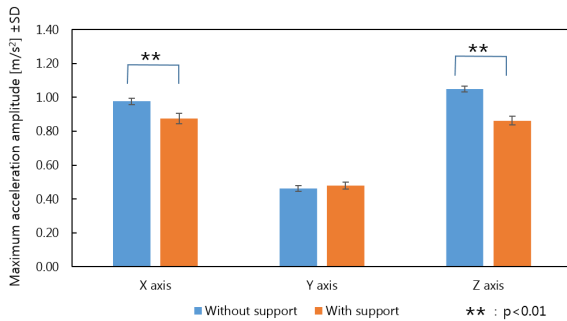


Fig. 8 Maximum acceleration while climbing step