【論文】

微速モードに基づく電動カートの操作支援に関する研究

Research on Driving Assistance of Electric Cart Using Low-Speed Mode

柴田 論 (正会員) , 山本 智規 (非会員)

1. Satoru Shibata and 2. Tomonori Yamamoto

Abstract

Accidents of electric carts by the elderly persons increase rapidly. One of the reasons of them is lack of recognition of risks in surrounding circumstance. To prevent such accidents, an automatic support system of driving electric carts is considered. In the proposed system, when a step or a gap in front of an electric cart is detected by a laser range finder installed to the cart, a method named "low speed mode", which changes the region between maximum speed and minimum speed into lower speed level, is introduced. Time margin for the operation to avoid upcoming risks can be expected using "low speed mode". Impressions of drivers to the speed change when shifting from normal speed mode to low speed mode are examined by the psychological evaluations. Furthermore, experiments are conducted to examine whether the speed change can play the role to warn the upcoming risks to the driver.

Key Words

Driving Assistance of Electric Cart, Low Speed Mode, LRF Sensor, Human Emotions

1. 緒言

近年、高齢社会の急速な進行に伴い、下肢機能の衰えを有する高齢者の自立支援のために、電動カートの使用が増加している。また、下肢等に障がいを持つ人々の移動手段として電動カートが普及している。一方で、高齢者等の電動カートでの事故も増加している¹⁾。これは、高齢者等の状況判断能力、および反射的な運動能力の低下、欠如に起因している²⁾。これらの能力の低下、欠如により、実際の生活空間において数多く存在する段差や溝などの、見落としやすい危険に対する認識遅れ、落下回避操作等には様々な不安が伴う。これらの場面において、操作性の改善や乗り心地、操作支援技術の導入が期待されている。

このような背景のもと、電動車いすに関する研究もいくつか行われている。百生ら³⁾は、乗り心地を考慮した電動車いすの制御を目指し、搭乗者を含めた電動車いすを一つの制御系ととらえ、制動時の上体の振れを抑制するために最適レギュレータによる安定化制御を行い、その効果を検証している。小宮ら⁴⁾は音声指令のみにより駆動する電動車いすシステムを構築し、狭い空間による走行テストを通じてその有効性を検討している。

これらの研究は、主に乗り心地や操作性の改善に焦点が当てられたものであり、判断能力、反射神経共に健常者に比べて劣る可能性が高い搭乗者にとって、早期の危険の認識および回避のための操縦を必要とする場面における操作支援技術に関する研究は重要である。そこで、電動カートが前方にある道路の段差や溝、崖などに落下する事故を防止するために、電動カートの前方の段差を検出し、搭乗者の操作に対して適切なアシストを加える手法に注目した。この手法に属する研究として、鈴木ら⁵⁾はミラー付きレーザレンジファインダを用いた電動車いす運転時の下り段差の検知および回避実験について検討している。ただし、この報告では検出距離が2m程度と短く、電動車椅子の走行速度によっては回避運

2010 年 3 月 16 日受理

2010 年 5 月 31 日最終原稿受理

愛媛大学大学院理工学研究科, 〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番

Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, 3, Bunkyo-cho, Matsuyama-shi, Ehime Prefecture, 790-8577, Japan

動が急激なものになってしまう可能性が高い。また、回避挙動が人間心理に及ぼす影響については検討されていない。

本報告では、計測距離性能の高いレーザレンジファインダを用い、遠距離にある段差障害物の計測方法を提案した。そして段差検知後のアシスト手法として「微速モード」という概念を導入し、通常速度から低速度域へ速度を移行することによる操縦支援の手法を提案した。すなわち、搭乗者が段差に対して接近している場合に、電動カートに装着されたセンサにより段差の位置を認識し、電動カートの速度範囲を自動的に低速度域へと移行させる速度遷移を生じることによる操縦の容易化を図った。これには、低速域へ速度遷移させることで操作の余裕を操作者に与え、さらに、速度の変化によって操作者に危険を知らせるねらいがある。また、心理的に心地よく、操作者に安心感を与える速度遷移について検証し、人にやさしい操作支援システムの構築を目指した。

本研究では、まず、微速モードへの移行のトリガーとなる、電動カートに装着されたレーザレンジファインダを用いた周囲環境に存在する複数の段差障害物の検出に関するアルゴリズムを構築した。次に、通常速度から低速度域へ速度を移行することによる操縦支援法である「微速モード」の概念を導入した。そして、実際の電動カートを用いた走行実験を行い、被験者に微速モードを実際に体験してもらった際の効果について、心理学的評価手法により検討した。

2. センサによる段差検出

本報告では、周囲環境に存在する段差障害物を認識するために用いるセンサとして、レーザレンジファインダ(以下、LRF)を用いた。LRF はレーザを用いた能動的なセンシング方式であるため、その計測精度は高く、環境の明るさ、照明に左右されないという特徴を持つ。このことから、移動ロボットの環境認識のためのセンサとして用いられている^{6), 7)}。ここでは、そのような特徴を持つLRFをもちいて、電動カートが周囲環境に存在する段差を計測・認識する一つの方法を示す。

2.1 実験装置

実験で使用する電動カートの実験機を Fig.1 に示す。この電動カートは寸法 1340×700×1100mm で、市販の電動カートを参考にしており、最大速度 6 km/h で走行する。

段差検出に用いるセンサとして、LRF (SICK 社製 LMS200-30106)を採用した。これは、平面内走査型の距離センサで、検出範囲 8000mm, サンプルングタイム 25msec, 視野 180°, 角度分解能 1° であり、サンプルングごとに検出範囲の距離情報(すなわち、180 個の距離データ)を取得する。なお最大計測誤差は±15mm 未満である。ここでは、LRF を鉛直方向に走査するように設置し、センサ本体が静止時には鉛直平面内(以下、走査平面内)の距離情報が取得できる。このLRF センサ本体を、ステッピングモータを用いて水平方向に回転させることにより、回転角度毎の鉛直平面内の距離情報、すなわち、3 次元的な距離情報が取得できるようにした。得られた距離情報を統合することにより、周囲環境に存在する段

差障害物を推定することが可能となる。

まず、各回転角度位置における鉛直平面内での走行面と段差障害物の境界であるエッジ候補点(以下、エッジ候補点)の抽出を、全ての回転角度位置について行う。そして、得られた全ての段差障害物のエッジ候補点についてグループ化を行い、段差障害物の位置、大きさの推定を行うアルゴリズムを提案した。

(a) Front view

(b) Side view

Fig.1 Experimental electric cart with LRF sensor

LRF はステッピングモータ (ORIENTAL MOTOR 社製, AS66AE-N10)を用いて水平方向に回転し、電動カート真正面を基準とする、左右 90° に存在する段差障害物の検出を試みる。水平方向の回転分解能は 1.8° である。これらの装置を電動カートに取り付け、電動カート走行中、鉛直方向の角度 i 、水平方向の角度 j における LRF からの距離情報 L_{ij} を測定した。

Fig.2 Sensing area and definition of angles

Fig.2 に それらの関係を示す. ここで, i は鉛直方向の角度位置に関する番号 ($i=0,1,\dots,90$) であり, LRF の回転中心直下を $i=0$, 電動カート前方を $i=90$ とする. また, j は水平方向での回転角度に対応した番号 ($j=0,\dots,100$) であり, 電動カート真正面に対して右側垂直方向を $j=0$, 電動カート真正面を $j=50$ とする.

2.2 エッジ候補点の抽出

ある水平方向の回転位置 j での走査平面の図を Fig.3 に示す. LRF から得られる検出距離 L_{ij} と検出角度 i を基に段差の存在を明らかにし, エッジ候補点を抽出する.

まず, あらかじめ走行面が平面である場合について L_{ij} を測定しておき, このときの L_{ij} の値を平面のデータの理論値 L_{Rij} とする. この L_{Rij} を実際の走行時に計測した値 L_{ij} と比較し, 段差の有無の判別を行う. ここでは, 落下の危険がある段差について考える. このとき, $L_{ij} > L_{Rij}$ ならば段差であり, かつ, $L_{i-1j} = L_{Ri-1j}$ ならば, L_{i-1j} と L_{ij} の間に段差のエッジが存在する. このとき, L_{i-1j} を段差のエッジの位置, 以下エッジ候補点とする. エッジ候補点を L_{i-1j} としたのは, 安全性を考慮し, 電動カートにより近い位置としたためである. また, ある水平方向の回転位置において, 複数の候補点が存在する場合, 走行における危険性が高いと思われる i が最も小さい L_{i-1j} をエッジ候補点とする.

Fig.3 Comparison of the measured distance with the theoretical distance on the floor to detect gaps

次に, エッジ候補点のグループ化の判別のために抽出されたエッジ候補点の $x-y$ 座標系への変換を行う. ただし, 電動カートの走行開始地点を原点とし, 電動カートの進行方向を y 軸, 進行方向に対して垂直方向を x 軸としている. また, 座標変換において, 電動カートの進行速度を v , 電動カート走行開始から経過した時刻を T とする. 変換された絶対座標上のエッジ候補点を (x_{ij}, y_{ij}) とすると, 絶対座標系への変換式は, 式(1)のように表される.

$$(x_{ij}, y_{ij}) = (L_{ij} \sin \theta_i \cos \theta_j, L_{ij} \sin \theta_i \sin \theta_j + vT) \quad (1)$$

2.3 エッジ候補点列のグループ化

得られたエッジ候補点から段差障害物の形状, 距離, 及び方位を得るため, エッジ候補点をグループ化する. Fig.4 に検出距離 L_{ij} と水平方向の回転角度 j の関係を表した上面

図を示す.

グループ化は, 隣り合うエッジ候補点間の距離 (以下, 候補点間距離) を基準に行うため, エッジ候補点水平方向の回転角度番号である j を 0 から順番に比較する. もし Fig.4 のように, L_{ij-2} にエッジ候補点がなく, L_{ij-1} にエッジ候補点があれば, L_{ij-1} を要素とする段差障害物 G_0 をリストに新たに登録する. G_k は段差のグループであり, k はグループ番号 ($k=0,1,\dots$) を表す. L_{ij-1} と L_{ij} の両方にエッジ候補点がある場合に候補点間の距離を求め, あるしきい値より小さいとき, すなわち $|L_{ij} - L_{ij-1}| < Thr$ あるいは $\sqrt{(x_{ij} - x_{ij-1})^2 + (y_{ij} - y_{ij-1})^2} < Thr$ ならば L_{ij-1} と L_{ij} は同一の段差のエッジを表していると考え, 段差障害物要素 G_0 に L_{ij} を加える. ただし, Thr は閾値である. また L_{ij+1} についても同様に, $|L_{ij+1} - L_{ij}| < Thr$ あるいは $\sqrt{(x_{ij+1} - x_{ij})^2 + (y_{ij+1} - y_{ij})^2} < Thr$ ならば段差障害物の要素に L_{ij+1} を加える. ここで, L_{ij+2} にエッジ候補点が無ければ, 段差障害物の要素を確定し, もし, L_{ij+2} がエッジ候補点であっても, L_{ij+1} と L_{ij+2} の候補点間距離が Thr より大きい場合, 段差障害物の要素を確定する. また, 段差障害物 G_k の要素が決定後, グループ番号 k を更新する. 得られた段差障害物のエッジの形状を推定するためには, グループ内の要素を直線や曲線で近似することが考えられる.

Fig.4 Rotation of the sensor and detection of difference

2.4 段差障害物検出実験

提案した段差障害物検出アルゴリズムの有効性を確認するための検証実験を行った.

(1) 実験方法

Fig.5 に実験環境を示す. 電動カートには LRF が取り付けられている. また, 電動カートは直進するが, その進行方向の先には段差障害物を設けている. なお, 段差障害物は, 走行面から 42cm 下がっている.

ここでは, その段差障害物のエッジ部分の検出を提案したアルゴリズムに基づき行った. このとき, 電動カートの走行開始地点から段差までの距離を 15m とし, 段差障害物の幅 17.4m, LRF の取り付け高さ 0.85m である. E_n は段差障害物

の推定を行ったときの原点からの距離を表す. 実験におけるパラメータは, 電動カートの走行速度を $V_{normal}=4\text{km/h}$, $E_n=11\text{m}$ とした. また, $Thr=1.5\text{m}$ としている.

Fig.5 Experimental environment

(2) 実験結果および考察

実験結果として, Fig.6 に $j=100$ における全ての検出点を示す. ただし検出点は(1)式を用いて, 絶対座標系に変換したものを示す. 次に提案したアルゴリズムにより得られたエッジ候補点を Fig.7 に示す.

Fig.6 All the detected points by the sensor

図を見て分かるように, 段差エッジは G_1 としてグループ化されており, 電動カートからの y 軸方向の距離は $14.1\sim 14.9\text{m}$ の範囲内に分布している. この結果から分かるように, 段差障害物の電動カートからの計測距離は, 実際の位置よりもやや手前であると認識されており, 安全面の観点からは望ましい結果であると言える. また, 直線近似を行うことによって, 対象の段差が直線状のエッジを有するものであることを予測する

のに役立つと考えられる.

Fig.7 Recognized obstacles

ところで, 段差エッジ G_1 の x 軸方向の分布は $-7.7\sim 7.3\text{m}$ となっており, 実際の幅 17.4m に比べてやや小さなものとなった. この誤差を軽減するためには, センサの水平方向の回転分解能をさらにあげることが考えられるが, それは計測データ量の増加に繋がり, 走行しながらの実時間処理を考えると難しく, 今後の課題である. ただし, 次章で示す微速モードに基づく走行支援は, 進行方向前方の段差障害物の認識に基づいているため, 電動カート前方の段差障害物を良好に計測・認識できている本実験結果は, 本センサシステムが微速モード活用のために有効であることを示しているといえる.

以上の実験結果は再現性のあるものであり, 5 回同様の実験を繰り返しても電動カートからのエッジの y 軸方向における検出位置は $14.1\sim 14.9\text{m}$ の範囲内に分布し, x 軸方向における分布は $-7.7\sim 7.3\text{m}$ よりもその幅が小さくなることはなかった.

3. 微速モードの導入

3.1 微速モードの概念

操作支援システムである微速モードの概念を速度変化により説明したものを Fig.8 に示す. 微速モードは, 電動カートの設定可能な通常速度域の最小～最大の幅 ($2.0\sim 6.0\text{km/h}$) を, センサによる障害物認知後に, ある変換係数をかけて得られる低速域 (以下, 微速) へ移行するものである. 本研究では, 基礎的な場合として, Fig.8 の区間 BC で示されるように一定の加速度で減速する場合を考える. ここで, 通常速度を V_{normal} , 微速を V_{low} とする. Fig.8 より, まず, 電動カートが通常速度で走行中, ある時点 A においてセンサが段差障害物候補の信号を発生する. そして, T_r の時間により前方の段差障害物の存在を認識し, 段差障害物であることが確認された後, 時点 B において微速モードへの速度変換を開始する. そして, T_l 時間後の時点 C において微速モードへの

移行が終了する。この時、BC間における速度変化の傾き、つ

Fig.8 Velocity profile of transition from normal mode to low speed mode

まり加速度は負で一定である。その後、微速を維持し、走行する。微速モードへの移行の役割として、速度を低下させることによって段差の接近に対する操作に余裕を持たせる、段差への落下を回避するための時間的余裕を確保する、速度変化により搭乗者に段差の存在を知らせるといったものがある。

3.2 微速モードの有効性に関する検証実験

(1) 実験方法

ここでは搭乗者に微速モードを体感し評価してもらうため、Fig.8 の速度波形に従う走行を行う電動カートの搭乗実験を行った。電動カートに被験者が搭乗し、前方 10m に存在する段差に対して、直進する。LRF センサが段差を検出すると、電動カートは微速モードへの移行を開始する。移行後は微速を維持しつつ走行する。段差への落下防止のため、搭乗者が落下防止のための操作を行わなかった場合は、電動カートは段差障害物より手前で停止するように設定した。実験では、通常時の速度を 4km/h とし、Table 1 に示されるような T_l と V_{low} のパラメータの組み合わせのもとに実験を行った。ただし、表のように、9 つの組み合わせそれぞれに対し、1~9 のパラメータ番号を付した。

Table 1 Evaluated combinations of parameters

		T_l [sec]		
		1.5	1.0	0.7
V_{low} [km/h]	0.5	1	2	3
	1.0	4	5	6
	1.5	7	8	9

これらのパラメータの組み合わせを用いて微速モードへの移行を行った際の被験者が受ける印象について明らかにす

るために、アンケート形式の心理評価を実施した。心理評価は、評価すべき心理に関する複数の形容詞対を両極に配置し、7段階のいずれかに被験者が○をつけるという評定尺度法により行った。形容詞対は電動車いすが減速した場合、その速度変化が人間にとって安心できるものであり、人間心理に好ましい反応をすべきであるという観点、および電動カートの操作において必要と思われる観点を考慮し、「安心できるー不安な」、「感じの良いー不快な」、「滑らかなーぎこちない」、「落ち着いたー驚く」、「速いー遅い」、「やさしいーこわい」、「好きー嫌い」の7個を選出した。また、通常速度から微速モードに移行する際の速度変化が、前方に段差障害物など危険が迫っているということを搭乗者に伝える警告としての役割を果たしているかどうか検証するために、上記の心理評価と同様に、「警告になるー警告にならない」の7段階でアンケート形式の評価を行ってもらった。実験は健康な成人男性・女性 10 名 (22-25 歳) に対し行った。ただし、すべての被験者に対して実験の目的および内容を説明し、十分なインフォームドコンセントが得られた後に実験を実施した。なお、実験における実施の順序はランダムに決定している。また、学習の転移を考慮し、1 つのパラメータ番号における実験を行った後は少なくとも1週間は時間をおいて異なるパラメータ番号について実験を行った。

(2) 実験結果および考察

実験によって得られた心理評価結果から、電動車いすの動きに対し、人間がどのような印象を抱いたかについて検討する。Fig.9 に心理評価結果の一例を示す。ただし、図はパラメータ番号 1、すなわち $T_l = 1.5\text{sec}$ 、 $V_{low} = 0.5\text{km/h}$ の組み合わせのときの心理評価結果である。ここで、図は各段階に1ずつの得点を与えたときの、平均と標準偏差を示している。

Fig.9 Results for the parameter number 1

図を見てわかるように、速さに関する評価はほぼ中央の値を示し、速くも遅くもないという印象を示している。また、それ以外の形容詞対については、全て評価が中央より左寄り、すなわち優れているという印象を示している。この他、パラメータ

番号 4, 7 についても同様に被験者は優れた印象を抱いた。これらのパラメータについて共通することは、負の加速度の絶対値が比較的小さいことである。

これら以外のパラメータ番号については、いずれも好ましい結果は得られなかった。その一例として、パラメータ番号 6 の時の心理評価結果を Fig.10 に示す。

Fig.10 Results for the parameter number 6

図を見てわかるように、速さに関する評価はほぼ中央の値を示し、速くも遅くもないという印象を示している。しかしながら、安心感についてはばらつきが大きく、それ以外の形容詞対については、全て評価が中央より右寄り、すなわちネガティブな印象を示した。

次に、微速モードが搭乗者にとって段差障害物の接近を知らせるための警告になりうるかについての検討を行う。Fig.11 は、通常速度から微速へと移行する際の負の加速度の大きさの観点から、警告になりうるかについて示したものである。ただし、図中の番号は、パラメータの組み合わせ番号を示している。

Fig.11 Relation between parameter numbers and ability of warning

図を見てわかるように、負の加速度の絶対値が大きいほど警告としての評価は高い傾向がある。ただし、パラメータ番号 1 のように、警告としての評価が中央より左に位置しており、かつ心理評価結果が望ましいパラメータの組み合わせが存在することは注目すべきことであると思われる。

4. まとめ

本報告では、電動カートが前方にある道路の段差や溝、崖などに落下する事故を防止するために、電動カートの前方の段差を LRF センサにより検出し、搭乗者の操作に対して適切な速度調整を行う「微速モード」という支援方法を提案した。

まず、微速モードへの移行の指標となる、電動カートに装着された LRF センサを用いた周囲環境に存在する複数の段差障害物の検出に関するアルゴリズムを構築した。次に、通常速度から低速度域へ速度を移行することによる操縦支援法である「微速モード」の概念を提案した。そして、実際の電動カートを用いた走行実験を行い、微速モードのパラメータの組み合わせによっては、心理的に好ましく、かつ搭乗者に段差障害物の危険の接近を知らせる効果があることを明らかにした。

なお、微速モード移行に関して、減速時間の長さや最終速度というパラメータがどのように人間心理に影響を与えるかは重要であるため、今後それらをパラメータとして実験を行い、明らかにしていきたい。また、段差障害物の回避が終了した際の、微速モードから通常走行へ戻るプロセスについても今後検討していく予定である。

参考文献

- 1) 電動車いすの安全利用に関するマニュアル. 警察庁交通企画課 2009.
- 2) 百生登, 大島徹, 池田都砂子, 乗り心地を考慮した電動車いすの制御. 日本機械学会論文集C編 2004;70(689):207-212.
- 3) 小宮加容子, 中島康博, 橋場参生, 景川耕宇, 黒須亜頭 二狭い空間における音声指令による電動車いす走行テスト. 日本機械学会論文集C編 2003;69(688):3350-3357.
- 4) 藤井文武, 和田憲造, 乗り手にやさしい電動車いすの実現に関する研究. 日本機械学会論文集C編 2000;66(645):1645-1651.
- 5) 鈴木雄介, 松本治, 足立吉隆, ミラー付きLRFを用いた電動車いすの危険回避に関する研究～下り段差検知・回避実験～. 第 27 回 日本ロボット学会 学術講演会講演予稿集 2009;2C2-03.
- 6) 竹内栄二郎, 坪内孝司, 移動ロボットによる環境地図生成のための 3 次元化 NDT を用いた高速 3 次元スキャンマッチング. 第 11 回 ロボティクスシンポジウム予稿集 2006:252-257.
- 7) 橋本雅文, 緒方聡, 大場史憲, 岡田三郎, 車載レーザレンジセンサによる複数移動物体の検出・追跡法, 日本機械学会論文集C編 2006;72(717):1566-1573.