

路面状況に応じたアシスト力を生成するパワーアシスト車いすの開発

Development of Electrical Wheelchair with Power-assist System Adapting to Road Condition

研究代表者 豊橋技術科学大学工学部 野田善之
(助成金受領者)

[研究の目的]

現在、下肢の不自由な障害者の多くは、手動式車いすを利用しており、健常者と変わらない行動範囲を希望している。しかし、車いすを利用する障害者が道路を走行する際に、路面状況によって、操作する腕に加わる負担が変動する。とくに、一般的な道路は、図1に示すように雨が路肩へ流れるように断面が円弧形状になっており、道路を車いすで走行する際に、路肩の方へ向いてしまう。これに対して、障害者は路肩側の車輪に多くの力を加えて、道路上を走行することになり、路肩側の腕の疲労が大きく、行動範囲が狭くなってしまふ。同様に、坂道を車いすで上がる際に、非常に大きな駆動力を必要とし、下る際には、ブレーキ力を必要とする。これは、搭乗者にとって大きな負担となる。また、介助者によって、障害者を搭乗させた車いすを走行させる際に、坂道では非常に大きな力を必要とする。これらのことから、坂道や斜面路走行時には、搭乗者や介助者の操作力に加えて、駆動力を支援するパワーアシスト車いすの開発が望まれている。

その一方で、車いすを電動化すると車いす重量が増加し、バッテリー切れや駆動部の故障時に、移動することができないといったユーザの電動車いすに対する不安を抱えている。これらのことから、車いす重量は、現状の手動車いすと同等でありながら、坂道走行では駆動力を支援する軽量パワーアシスト車いすの開発が求められている。

そこで、本研究では、平地路では、駆動力

アシストは行わず、坂道走行時に駆動力アシストを行うことで、モータ容量やバッテリー容量が小さくできる路面状況に応じたアシスト力を生成する軽量パワーアシスト車いすを開発する。本報告では、介助者の介助力に対してアシスト力を生成する介助者のためのパワーアシスト車いすを開発する。

[研究の内容、成果]

1. 介助者用パワーアシスト車いす

本研究で構築したパワーアシスト車いすの外観を Fig.1 に示す。Fig.1 に示す車いすは、介助者の力を検出するために、操作ハンドルにバネを内蔵し、操作ハンドルに加わる操作力を変位へ変換し、可変抵抗により変位を測定することで、操作力を計測している。また、各車輪は DC モータで独立に駆動する。各車輪の回転数を検出するために、プーリーとロータリーエンコーダを設置している。

車いすの駆動制御システムを Fig.2 に示す。Fig.2 において、介助者の操作力は左右のハンドルに設置してある可変抵抗間の電位差によって検出される。また、左右のロータリー

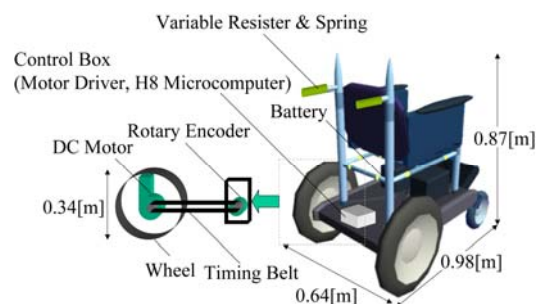


Fig.1 Power-assist Wheelchair

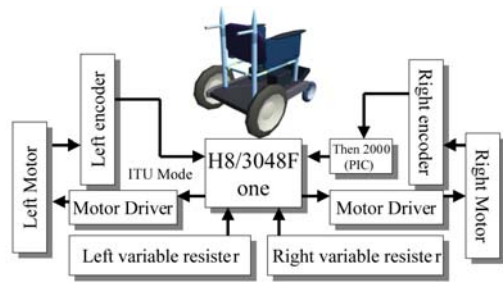


Fig.2 Control System of Wheelchair

エンコーダによる車輪回転数は、位相係数モードで H8 マイコンへ送信される。H8 マイコンは位相係数モードが 1ch のみであることから、右側車輪の回転数は、Then2000 を経由して H8 マイコンへ送信される。H8 マイコンでは、操作力と左右車輪回転数情報からモータへの指令電圧を左右モータドライバーへ送信し、左右モータがそれぞれ駆動する。

2. 坂道走行を考慮した車いすモデル

坂道を走行する車いすを Fig.3 に示す。また、坂道走行中の車いす運動モデルを(1)式に示す。

$$f + \frac{T_m}{r} = M \frac{dv}{dt} + cv + \mu Mg \cos \theta + Mg \sin \theta \quad (1)$$

ここで、 $f[N]$ は介助者による車いすへの操作力であり、 $T_m[Nm]$ はモータによる駆動トルクである。 $r[m]$ は車輪半径であり、 $M[kg]$ は搭乗者と車いすの合計質量である。 $c[N/(m/s)]$ は車軸摩擦による粘性減衰係数、 $v[m/s]$ は移動速度、 μ は車輪の転がり抵抗係数、 $g[m/s^2]$ は重力加速度、 $\theta[deg]$ は坂道の傾斜角である。(1)式はCooperによって提案された車いす運動モデル¹⁾である。Cooperモデルは搭乗者が車輪に操作力を加えた力を外力 $f[N]$ として表現していたが、本研究では、介助者が車いすへ与える力として、外力 $f[N]$ を表現する。

また、DCモータの発生トルク $T_m[Nm]$ は、モータへの入力電圧 $e_i[V]$ と(2)式に示す比例

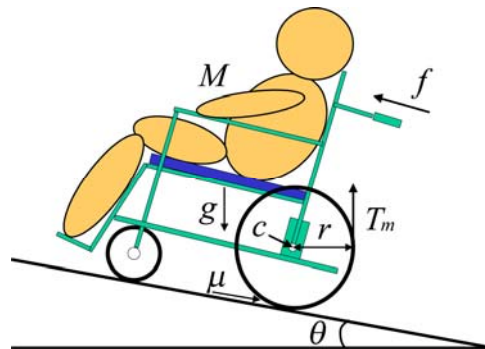


Fig.3 Kinematics Model of Wheelchair の関係にある。

$$T_m = K_m e_i \quad (2)$$

ここで、 K_m は入力電圧を発生トルクへ変換するゲイン定数である。

(2)式を(1)式に代入し、ラプラス変換すると電動車いすモデルは(3)式の一次遅れ系で表現できる。

$$V(s) = \frac{K_w}{T_w s + 1} (K_e E_i(s) + F(s) - D) \quad (3)$$

$$T_w = \frac{M}{c}, \quad K_w = \frac{1}{c}, \quad K_e = \frac{K_m}{r},$$

$$D = \mu Mg \cos \theta + Mg \sin \theta$$

(3)式より、外乱項 D は平面路では0であり、傾斜角の増加にともない増加することがわかる。また、モータへの入力電圧 $e_i[V]=0$ において、手動車いすとなる。

3. パワーアシスト制御システムの構築

本研究で構築するパワーアシスト制御システムは、モデル規範型制御システムをベースに構築する。モデル規範型制御システムを Fig.4 に示す。Fig.4 において、介助者の介助力が車いす操作ハンドルから計測され、介助力が参照モデルへ与えられ、参照速度が計算される。そして、参照速度とロータリーエンコーダによって計測された車いす速度の速度誤差がフィードバックコントローラへ与えられ、モータへの入力電圧が出力される。破線内は、(3)式に示す電動車いすの運動特性を示

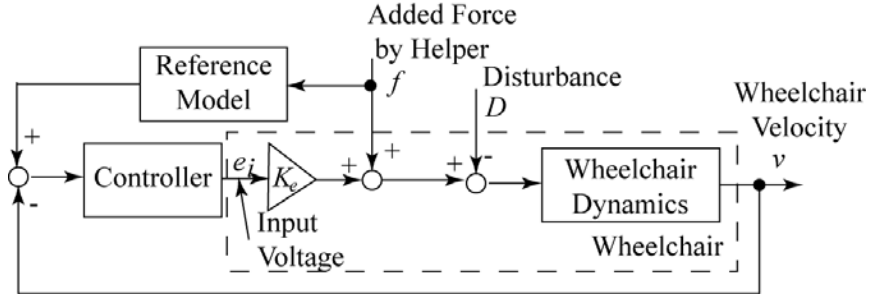


Fig.4 Control System of Power-assist System

している．Fig.4に示すパワーアシスト制御システムは片輪に対する制御システムを示しており，左右両輪に同様の制御システムを構築する．パワーアシスト制御システムは，参照モデルとの誤差が生じた場合において，モータが駆動トルクを発生し，介助力をサポートする．ここで，参照モデルは(4)式とする．

$$V_r(s) = \frac{K_w}{T_w s + 1} F(s) \quad (4)$$

(4)式は，(3)式のモータ駆動力項と外乱項を取り除いた車いすを平面路で操作するモデルとなっている．したがって，参照速度 v_r [m/s]は介助者が加えた力に対して，平面路を走行する速度となり，参照速度と車いすの速度誤差に応じてモータの駆動トルクを発生させるため，介助者は斜面においても平面路での操作力で車いすを走行させることができる．

フィードバックコントローラは，参照速度と車いす速度との誤差を減少させるように設計する必要がある．そこで，フィードバックコントローラは H^∞ 制御を用いて構築する．一般化プラントをFig.5に示す．Fig.5において，ノミナルプラント P は，55[kg]の搭乗者

が車いすに搭乗した際の車いす平面路走行モデルであり，(5)式に示す．

$$P(s) = \frac{K_w}{T_w s + 1} = \frac{1.03}{0.865s + 1} \quad (5)$$

重み関数 W_R はロバスト安定を目的に，(6)，(7)式のように設定する．

$$|\Delta_m(s)| \leq |W_R(s)| \quad (6)$$

$$W_R(s) = \frac{1.3660s + 0.0001}{s + 2.0} \quad (7)$$

ここで， Δ_m は乗法的モデル化誤差であり，車いす搭乗者が搭乗していない場合と80[kg]の搭乗者が車いすに搭乗した場合のモデル変動を示したものである．そして，(3)式からもわかるように，外乱項 D が傾斜路走行時にステップ外乱となるため，内部モデル原理よりフィードバックループに積分特性を含ませることで，傾斜走行時の外乱抑制特性を向上させることができる．そこで，重み関数 W_M に(8)式に示すような疑似的な積分特性をもたせることで，外乱を抑制させる．

$$W_M(s) = \frac{2.30}{s + 0.0001} \quad (8)$$

また， d_2 は観測ノイズに関する重みであり， $W_N=1$ とする．(5)式のノミナルプラントに重み関数 W_R ， W_M ， W_N を与えて， H^∞ 制御問題をDGKF法で求解すると(9)式となる．

$$K(s) = \frac{69.06s^2 + 235.03s + 193.81}{s^3 + 57.43s^2 + 1.06.26s + 0.01} \quad (9)$$

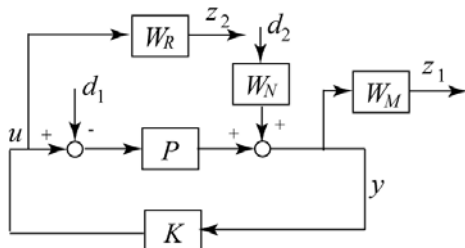


Fig.5 Generalized Plant

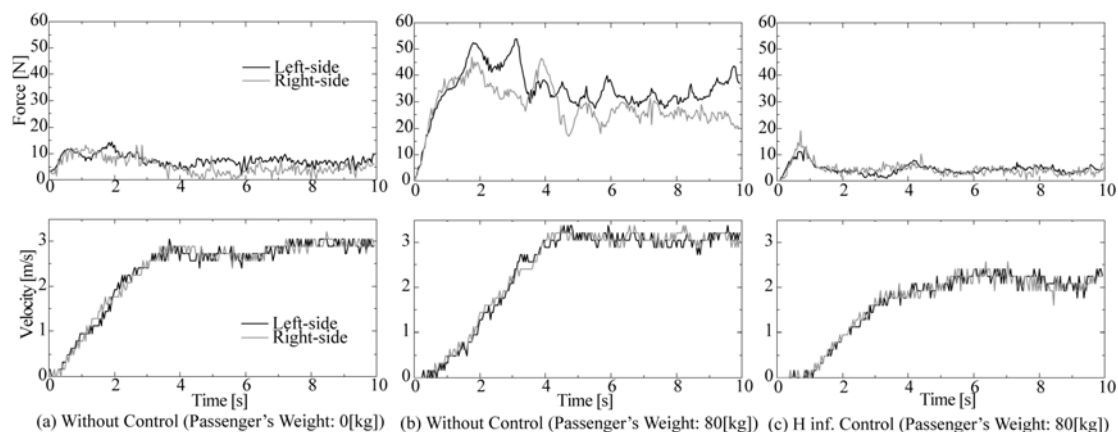


Fig.6 Experimental Results of Climbing Up Slope

(9)式のコントローラを Fig.4 に示すフィードバックコントローラへ導入することで、搭乗者の体重誤差が生じた場合にも安定し、坂道でも介助者が平面路走行と同じ介助力で操作できるように車いす速度が参照速度へ追従するパワーアシスト制御システムが構築できる。

4. 実験結果

傾斜路面を登坂した実験結果を Fig.6 に示す。Fig.6 において、(a)の上段図はパワーアシスト制御を適用せずに、搭乗者なしで登坂走行した際の介助力を示し、(a)下段図は車いす走行速度である。(b)の上段図はパワーアシスト制御なしで、80[kg]の搭乗者が車いすに搭乗し、介助者によって登坂走行した際の介助力を示し、下段図はそのときの車いす速度である。(c)上段図はパワーアシスト制御を導入し、80[kg]の搭乗者が搭乗し、介助者によって登坂走行した際の介助力を示し、下段図は速度を示す。パワーアシスト制御なしで、搭乗者が車いすに乗っていない場合には、介助力 10[N]以下と小さな力で登坂走行が可能であることがわかる。しかし、搭乗者がいる場合の車いす登坂走行においては、パワーアシスト制御を用いない場合、40[N]を超える介助力を必要とすることが確認できる。一方で、パワーアシスト制御を適用した際には、搭乗者がいない場合の登坂走行と同様の介助

力で 80[kg]の搭乗者がいる場合でも走行することができることが確認された。

参考文献

- 1) R. A. Cooper, A System Approach to the Modeling of Racing Wheelchair Propulsion, Journal of Rehabilitation R&D, Vol.2, No.1, pp.151, 1991.

[今後の研究の方向, 課題]

本報告では、路面状況に応じた介助者の操作力をアシストするパワーアシスト車いすを開発した。登坂走行において、介助者が小さい操作力で走行できることを確認した。今後は、一般路面走行などで生じる左右輪の高度差に対して、本提案システムの有用性を確認する。また、搭乗者による自走式車いすに対して、パワーアシストする電動車いすを開発し、軽量化を実施する予定である。

[成果の発表, 論文等]

- A. Kawaguchi, Y. Noda, Y. Sato, Y. Kondo, K. Terashima, Mechatronics Support for Mobile Wheelchairs, Proc. of 10th Int. Conf. on Application of Advanced Technology in Transportation, Athens, Greece, 846/1-16, 2008