

# 傾斜環境を考慮したパワーアシスト車椅子制御の高機能化

渡辺信哉\*, 畠直輝, 呉世訓, 堀洋一 (東京大学)

Development of Power Assisted Wheelchair Easy to Drive on Slope  
Shinya Watanabe\*, Noki Hata, Sehoon Oh, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

## Abstract

Aged people and disabled people who have difficulty in walking are increasing, and they need engineering support. Assisted wheelchair which assisted driving force using electric motor and enable them to move widely is one of these engineering support. They come to so many slopes when they are in the town, for example an entrance to public facilities. Driving on slope by power assisted wheelchair is a little easier than by normal wheelchair. However, if drive resistance become double, a load of user also became double. If influence of gravity is removed, user can drive easier on slope than the power assisted wheelchair now in use. In this paper two kinds of control methods which remove the effect of gravity are proposed.

First, two methods to estimate the effect of gravity by using a rotary encoder, gyro sensor and acceleration sensor are proposed.

As the second, it's easy driving on slope is shown through some experiments.

キーワード: 高齢者・障害者支援、パワーアシスト車椅子、坂道、重力、外乱オブザーバ、加速度センサ

(Key word : support for aged people and disabled people, power assisted wheelchair, slope, gravity, disturbance observer, acceleration sensor)

## 1 はじめに

現在わが国は高齢化社会を迎えており、このような状況は将来ますます深刻になると予測される。またそれに伴う少子化問題による介護者の不足も考えられ高齢者や障害者の自立が求められ、そのためには工学的な支援が必要不可欠になってきた。本研究ではこのような工学的な支援のひとつであるパワーアシスト車椅子を対象とした研究を行う。

車椅子で街中を走ると実に坂道が多いことに気がつく。坂道の走行は高齢者や障害者にとっては大変な負担になっている。現在のパワーアシスト車椅子では走行負荷が2倍になると使用者の負荷も二倍になってしまう。したがって坂道では平地と同じように快適に走行することはできない。そこで本研究では、坂道での走行を考慮しパワーアシスト車椅子制御のさらなる高機能化を目指す。

## 2 パワーアシスト車椅子の数学的モデル

### 2.1 車椅子の運動モデル

車椅子の運動モデルとして Cooper によるモデルがよく知られている [1]。車椅子の運動方程式は以下のようにあらわされる。

$$f = M \frac{dV}{dt} + \left( \frac{I_f}{r} + \frac{I_r}{R} \right) \frac{dV}{dt} + kV + F_R + Mgsin\theta + F_a \quad (1)$$

$$F_f = \frac{W_f b_f}{r} cos\theta \quad (2)$$

$$F_r = \frac{W_r b_r}{R} cos\theta \quad (3)$$

$$F_a = CV^2 \quad (4)$$

$f$  は操作者がプッシュリムに加える力、 $r$  は前輪半径、 $R$  は後輪半径、 $M$  は操作者と車椅子全体の質量、 $I_f$ 、 $I_r$  はそれぞれ前後輪の車輪慣性、 $k$  は軸粘性減衰係数、 $F_f$ 、 $F_r$  は前後輪における転がり抵抗、 $W_f$ 、 $W_r$  は前後輪の質量、 $b_f$ 、 $b_r$  は前後輪における転がり抵抗係数、 $\theta$  は地面の傾斜角 (上り坂を正とする)、 $C$  は空気抵抗係数を表す。

### 2.2 パワーアシスト車椅子の運動モデル

これを元にパワーアシスト車椅子の運動モデルを数学的に記述する。車輪慣性はその等価慣性質量が車椅子全体の質量と比べて十分小さいものとして無視できるとする。また競技用と比べて最大速度が小さいことから空気抵抗も無視できるものとする。転がり抵抗については転がり抵抗係数を効力に対する係数でまとめることができる。

以上よりパワーアシスト車椅子の運動モデルは左辺にモータによるトルク  $T_m$  を足して、

$$f + \frac{T_m}{R} = M \frac{dV}{dt} + kV + \mu Mgsin\theta + Mgsin\theta \quad (5)$$

と表すことができる。 $\mu$  は転がり抵抗係数、 $g$  は重力加速度である。これをラプラス変換してまとめると、

$$V = \left\{ \frac{T_h + T_m}{MR} - g(\mu cos\theta + sin\theta) \right\} \frac{1}{s + \frac{K}{M}} \quad (6)$$

となる。パワーアシスト車椅子のモデル図を図 1 に、ブロック線図を図 2 に示す。

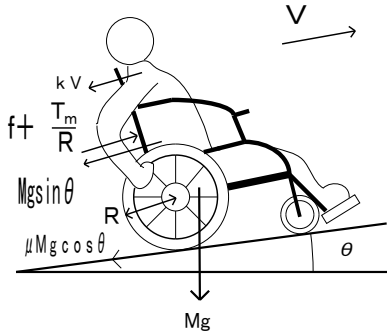


図 1: パワーアシスト車椅子のモデル  
fig. 1: Model of Power Assisted Wheelchair

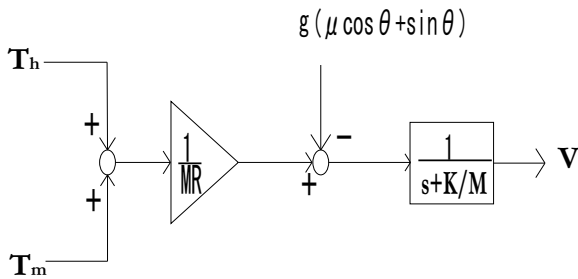


図 2: パワーアシスト車椅子のブロック線図  
fig. 2: Block Diagram of Power Assisted Wheelchair

### 3 提案する手法

#### 3.1 パワーアシスト車椅子制御の高機能化

坂道走行においていろいろと不自由を感じるのには重力の影響をうけるからである。したがって重力の影響を除去できれば平坦地と変わらない感覚で走行できるようになる。現在 YAMAHA から市販されているパワーアシスト車椅子 J W - II では操作者がプッシュリムに加えた力を読み取るためのトルクセンサが取り付けられている。しかしこれだけでは重力を検出することができないので、これに加速度センサやエンコーダを加え、新たに加速度や速度の情報を得ることで重力を検出する。ここで重力を検出する方法として 2 通りの方法が考えられる。1つは車椅子に影響する重力による力を直接求める方法で、もう 1つは車椅子が走行している坂道の角度を検出し重力成分を補償する方法である。

前者は外乱オブザーバを用いて重力による力を求める。この際重力以外の外乱も含まれるので不整地などでも快適に走れるようになる。しかし平坦地を走行するときも常に走行抵抗補償しバッテリーに負荷がかかる。また介助者が後ろから押すことができなくなるなどの問題もある。

後者は傾斜地以外ではモーターによる補償は行われず平坦地では普段と何も変わらない。しかし前輪が浮上した時にはさらにモーターにより力が加わることになるの

で後方転倒の危険性が考えられる。

#### 3.2 外乱オブザーバ

外乱オブザーバを設計するためには新たに何らかの情報を必要とする。そこでロータリーエンコーダを用いて車輪の回転角の情報を使うことにする。これより車輪の回転角速度を求め、外乱オブザーバを設計した(図 3) [2]。エンコーダの回転角情報に対する外乱としては、ピッチ方向の回転が考えられる。ウィリー動作時など車椅子が静止しているのにエンコーダは車輪の回転を検出する。ピッチ方向の回転角速度を  $\psi$  とすると、エンコーダの回転角速度  $\dot{\theta}$  の補正は単純に  $\psi$  を差し引いて

$$\dot{\theta} - \psi \quad (7)$$

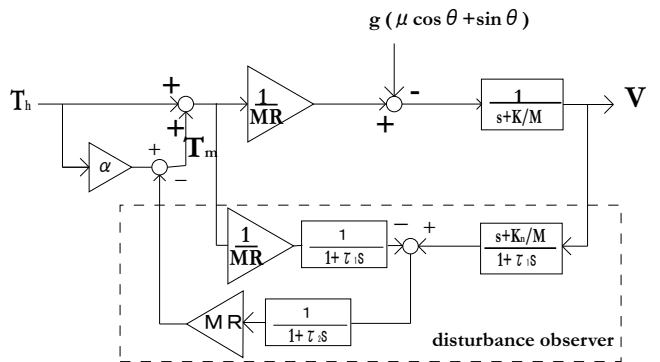


図 3: 外乱オブザーバ

fig. 3: Block Diagram of Power Assisted Wheelchair with Disturbance Observer

入力から出力  $V$  間での伝達関数  $G_u(s)$ 、外乱から出力  $V$  までの伝達関数  $G_d(s)$  は以下のように表される。

$$G_u(s) = \frac{1}{\tau_1 \tau_2 s^3 + (\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \frac{K_n}{M}) s^2 + \{(\tau_1 + \tau_2) \frac{K_n}{M} + 1\} s + \frac{K_n}{M}} \quad (8)$$

$$G_d(s) = \frac{\tau_1 \tau_2 s^2 + (\tau_1 + \tau_2) s}{\tau_1 \tau_2 s^3 + (\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2 \frac{K_n}{M}) s^2 + \{(\tau_1 + \tau_2) \frac{K_n}{M} + 1\} s + \frac{K_n}{M}} \quad (9)$$

##### 3.2.1 シミュレーション

提案した手法についてシミュレーションを行った。シミュレーションモデルには図 3 を用い、MATLAB にて行った。シミュレーションの目的は提案した手法の有効性の確認と、 $K_n$ 、 $\tau_1$  の違いによる入力応答外乱応答の違いを確認することにある。図 4 上段は  $\tau_1 = 0.1[s]$  一定の時、 $K_n = 60 \sim 140$  の間で変化させたときの入力応答を示している。下段は  $K_n = 100$  一定の時、 $\tau_1 = 0.01 \sim 1[s]$  の間で変化させた時の外乱応答を示している。図より  $K_n$  によって入力応答の形が変わり、 $\tau_1$  によって外乱応答の形が変わることが分かった。

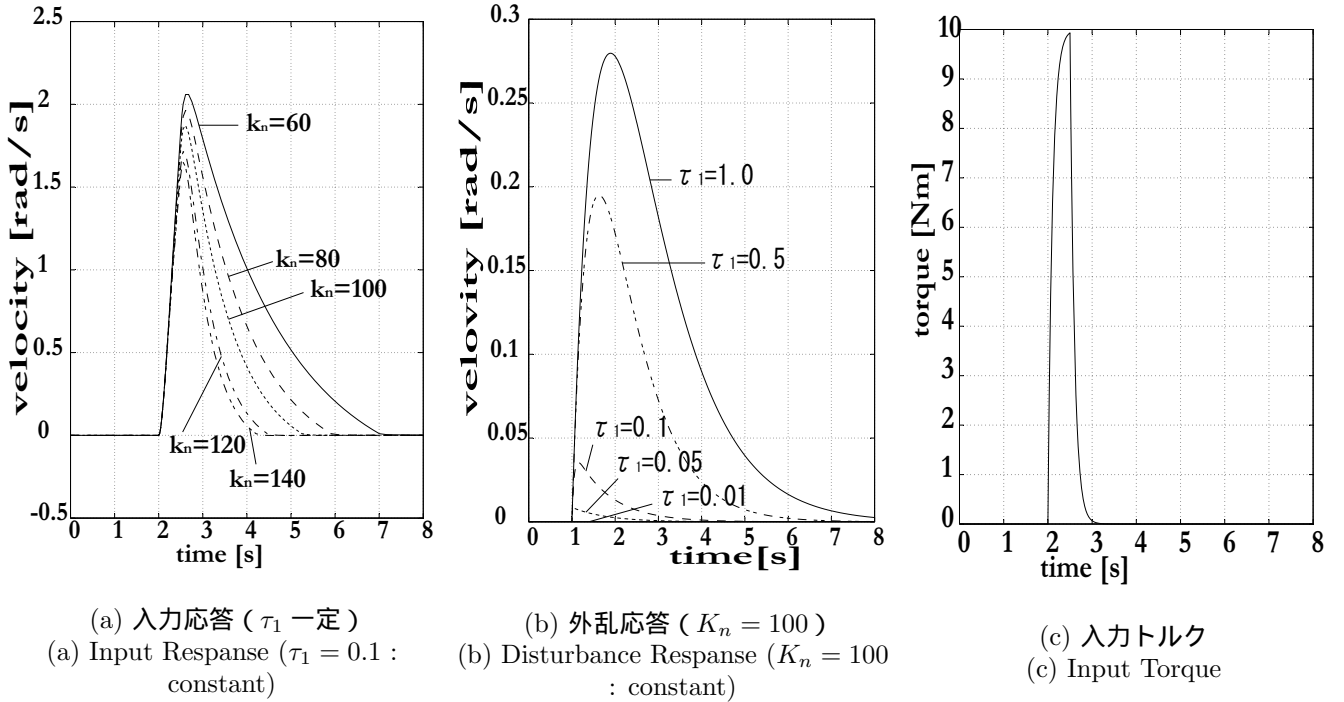


図 4: シミュレーション結果  
fig. 4: Simulation Result

### 3.3 傾斜角推定

傾斜角を推定するための手順を紹介する。加速度センサの情報による鉛直方向・水平方向の加速度をそれぞれ ( $A_x, A_y$ ) とし、ジャイロによる車椅子のピッチ回転角速度を  $\psi$  とし、エンコーダによる後輪の回転角速度を左右それぞれ ( $\theta_l, \theta_r$ ) とする。

まず加速度センサの座標系と重力ベクトルを鉛直方向とする空間座標系とのオフセット角  $\theta_0$  をそくしている。この  $\theta_0$  は実験開始後 300[ms] 後において ( $A_x, A_y$ ) を測定し求めている。

$$\theta_0 = \arccos \frac{A_x}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}} \quad (10)$$

これより加速度センサの座標系と空間座標を合わせる返還式は次式になる。

$$A_{nx} = A_x \cos \theta_0 + A_y \sin \theta_0 \quad (11)$$

$$A_{ny} = -A_x \sin \theta_0 + A_y \cos \theta_0 \quad (12)$$

静止体であれば、上式より容易に姿勢角  $\zeta$  が次式として求まる。

$$A_{ny} = g \sin \zeta \simeq g \zeta, g = \sqrt{A_{nx}^2 + A_{ny}^2} \quad (13)$$

$$\zeta = \frac{A_{ny}}{\sqrt{A_{nx}^2 + A_{ny}^2}} \quad (14)$$

基本的手法としては、上式より重力ベクトル、姿勢角を求め、車椅子が移動体であるためにさまざまな外乱要素が加わってくる。ここで外乱として扱う要素は以下の3点である。

- 直進に伴う加速度 ( $A_{ny}$  に作用)
- 方向転換に伴う遠心力 ( $A_{ny}$  に作用)
- ピッチ方向の回転角速度・加速度 ( $\dot{\theta}_l, \dot{\theta}_r, A_{nx}, A_{ny}$  に作用)

以上をまとめたブロック図を図??に示す。図中・右の車椅子モデルで、 $r_1, r_2, r_w, L$  はそれぞれ、車軸・加速度センサ間距離、車輪接地位置・加速度センサ間距離、車輪半径、左右間車輪距離を表している。

#### 3.3.1 直進に伴う加速度

車椅子を前進・後退する際に発生する加速度は、直接  $A_{ny}$  に作用する。この加速度は車輪の回転角速度、すなわち回転角の二次微分  $\ddot{\theta}_l$  に等しい。

$$g\zeta = A_{ny} - \ddot{\theta}_r \quad (15)$$

#### 3.3.2 方向転換に伴う遠心力

車椅子の方向転換は自動車に比べはるかに回転半径が小さく、定置旋回など回転中心が車体範囲内に存在する

こともある。このため後輪接地位置と加速度センサの設置位置の違いを考慮する必要がある。左右輪の回転速度をそれぞれ  $(\dot{\theta}_l, \dot{\theta}_r)$  とし、この場合の加速度センサを設置している右車輪の半径  $R$  を次式で定義する。

$$R = \frac{\dot{\theta}_l L}{\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l} \quad (16)$$

旋回角速度  $w$  は次式となる。

$$w = \frac{\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l}{L} \quad (17)$$

これより  $A_{ny}$  方向に作用する遠心力成分は、

$$Rw^2 \quad (18)$$

となる。さらに旋回角加速度は、まず加速度の回転中心を次式で定義する。

$$R_A = \frac{\ddot{\theta}_l L}{\ddot{\theta}_r - \ddot{\theta}_l} \quad (19)$$

旋回角加速度  $\dot{w}$  は次式となる。

$$\dot{w} = \frac{\ddot{\theta}_r - \ddot{\theta}_l}{L} \quad (20)$$

これより右車輪に発生する加速度と加速度センサに発生する加速度の差は、

$$R_A \dot{w} \quad (21)$$

となる。以上より、

$$A_{ny} = \ddot{\theta}_r + g\zeta + Rw^2 - R_A \dot{w} \quad (22)$$

となる。

### 3.3.3 ピッチ方向の回転角速度・加速度

ここではピッチ方向、すなわちウィリーなどの運動方向の外乱を考える。車椅子の直進速度の検出にエンコーダを用いているが、エンコーダ情報そのままではウィリーなどの直進でない運動も検出してしまう。具体的には、静止した状態で前輪を持ち上げると、静止しているにもかかわらずエンコーダは回転を検出する。したがってピッチ方向の外乱を除去する必要がある。

前項 (7) 式で述べたようにウィリー動作の外乱を除去しなければならない。

$$\dot{\theta}_{nr} = \dot{\theta}_r - \psi, \dot{\theta}_{nl} = \dot{\theta}_l - \psi \quad (23)$$

エンコーダ情報の補正は以上である。次にピッチ方向の運動が加速度センサに与える影響を考察する。回転運動に伴う遠心力などの影響が  $A_{ny}$  の外乱であるから、

$$A_{ny} - r_1 \psi^2 \quad (24)$$

が考えられる。さらに、 $A_{nx}$  においては純粋に回転の加速度が外乱として加わる。したがって  $A_{nx}$  に加わる外乱は、

$$A_{nx} - r_1 \dot{\psi} \quad (25)$$

となる。

以上より、重力ベクトル・路面傾斜角を検出するために除去する外乱も含めて記すと、

$$A_{ny} = g + r_1 \dot{\psi} + D_x \quad (26)$$

$$A_{nx} = g\zeta + \ddot{\theta}_r + r_1 \psi^2 + r_1 w^2 - r_2 \dot{w} + D_y \quad (27)$$

となる。 $(D_x, D_y)$  は依然として残っている外乱成分をまとめたものとする。

## 4 実験結果

### 4.1 外乱オブザーバ

提案する制御手法の有効性を確かめるため実験機を用いて実験した。実験機は YAMAHA の J W II を改造したものをを用いた。その際用いた各パラメータは以下の通りである。 $K_n = 140, M = 20 + 70$ (車椅子 + 人間)  $[kg], \tau_1 = 0.3[s], \tau_2 = 0.1[s], R = 0.3[m], T = 0.001[s]$

まずはじめにパラメータの違いによる入力応答、外乱応答がどのように変化するか示す。 $\tau_1 = 0.1[s]$  で固定し、 $K_n = 50 \sim 150$  まで変化させた時の入力応答を 5 に示す。入力はすべて同じ波形を用いた。次に  $K_n = 120$  一定として、 $\tau_1 = 0.1 \sim 1.5$  まで変化させて外乱応答の様子を調べた。その様子を図 6 に示す。

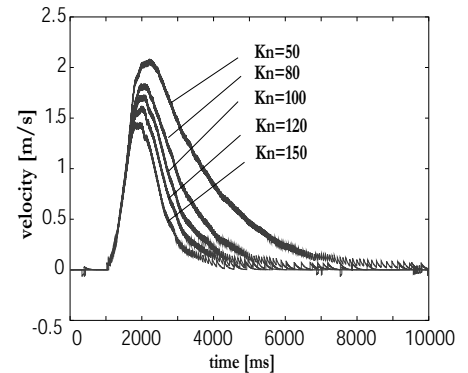


図 5: 入力応答 ( $\tau_1 = 0.1$  一定)  
fig. 5: Input Response ( $\tau_1 = 0.1$  : constant)

図 5、6 より  $K_n$  が小さくなるにつれて、速度の減衰が速くなっていき、 $\tau_1$  が小さくなるほど外乱に対して強くなっている様子が確認できた。図 4 と比べると結果は一致した。

図 7 は平坦地を走行したときの各パラメータの値を示している。図中 1 段目は左右それぞれの入力トルクとモータトルクを、2 段目は移動距離を、3 段目は推定外乱を示している。

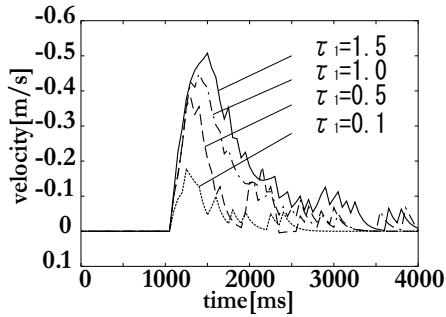


図 6: 外乱応答 ( $K_n = 120$  一定)  
fig. 6: Output Response ( $K_n = 120$  : constant)

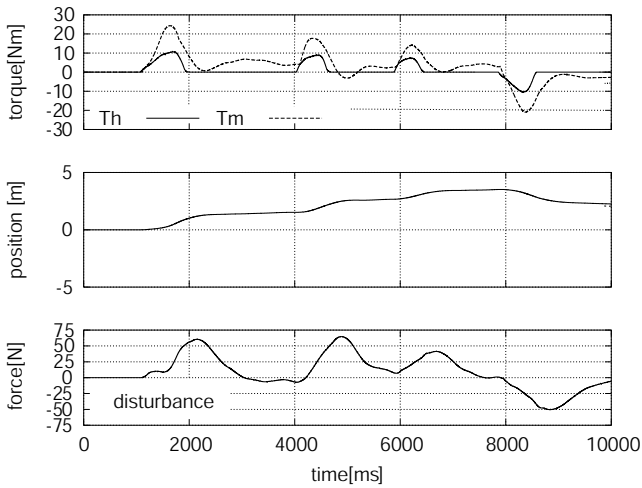


図 7: 平坦地の移動結果  
fig. 7: Drive on Plane with Feedback Control

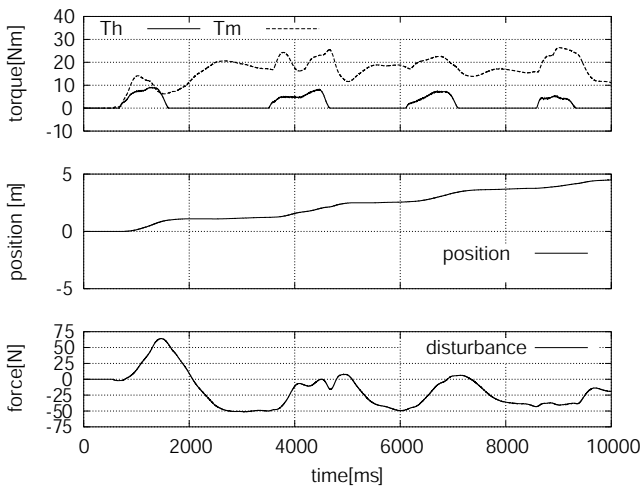


図 8: 上り坂の移動結果  
fig. 8: Drive on Slope with Feedback Control

図 8 は傾斜角約 8.5 度の坂を上ったときの様子を示したものである。坂道に入ってからモーターの出力が急に増加したことが分かる。また同じような力で平坦地と移動距離が変わらないことが分かる。

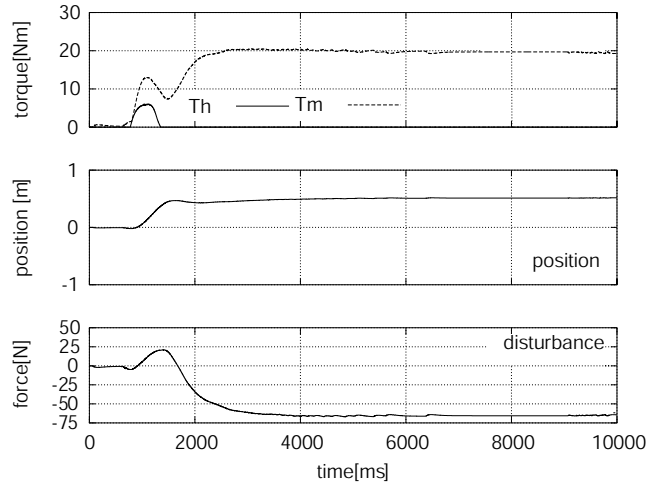


図 9: 坂道での静止  
fig. 9: Stop on Slope

図 9 は坂の途中で完全に手を離れた状態である。図からわかるように坂道で手を離しても止まっていることができるので非常に坂道ののぼりが楽になった。

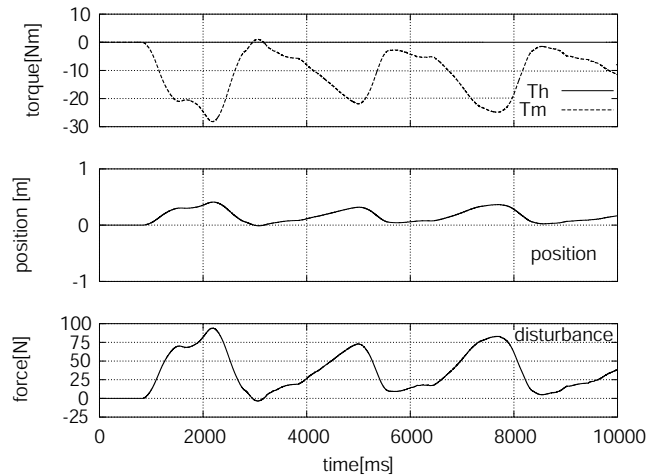


図 10: 外乱応答  
fig. 10:

図 10 はタイヤを直接つかんで目いっぱい力で回したときの様子である。このように強い外乱が加わってもほとんど車椅子が動くことはなかった。

## 5 考察

### 参考文献

- [1] R. A. Cooper, "A system approach to the modeling of racing wheelchair propulsion", *Journal of Research and Development*, Vol.27, No.2, pp.151-162, 1990.
- [2] 堀洋一, 大西公平, "応用制御工学", 丸善株式会社, 1998.