

介助者-車いす系の降坂路での  
自律制動操作モデルの構築と性能評価

Estimation of the braking motion model of human-wheelchair system  
under autonomous manipulation by the user when traveling downhill

○学 荻野 紘史 (関大院) 正 内山 寛信 正 倉田 純一 (関大工) 正 鈴木 立人 (舞鶴高専)

Hirofumi OGINO, Hironobu UCHIYAMA and Junichi KURATA, Kansai University  
Tastuto SUZUKI, Maizuru National College of Technology

Key Words: Wheelchair, Downhill, Braking motion, wheelchair/human system, Modeling

1. はじめに

高齢者らが降坂路で介助式車いすを操作する場合には、操作負担の増大と体勢の不安定化により、事故を誘発する危険性が増す。そのため、操作負担を軽減し、安全性を確保する制動支援機構を備えた車いすの提案が望まれている。しかし、降坂路での制動操作に関する介助者-車いす系の特性とそのモデル化や支援機構<sup>1)</sup>に関する研究例は少ない。

本研究は、降坂路での介助者-車いす系の挙動を定量的に解析すると共にモデル化し、制動支援機構を開発・評価する模擬試験モデルの構築を目的とする。その際に、最も複雑な介助者の特性には、介助者の体力と路面状況に基づいて、継続的な走行操作を可能とする自律的に調整された定常的な制動力と速度特性を用いる。

本報告では、最初に制動と停止操作の基準となる水平・平坦路での制動操作モデルを構築して、介助者とモデルの制動性能を、実機を用いた実路上での試験と試作した電動歩行機式車いす操作試験機(以下、試験機と記す)を用いた模擬実験により検証する。その後、同モデルを降坂路の場合に拡張して同様に性能を検証し、それ等の知見を述べる。

2. 降坂路での介助者-車いす系のモデル化

図1に介助者-車いす系の概略的な説明図を示す。降坂路での制動操作は、山手住宅街等の斜路を前向き走行操作により下る場合を想定する。体量  $m[\text{kgf}]$  の介助者は目標速度を  $v_D(t) [\text{m/s}]$  とする推進力  $f_H(t) [\text{N}]$  を発揮し、傾斜角  $\theta[\text{deg}]$  の斜面を速度  $v(t) [\text{m/s}]$  で歩行する。 $f_H(t)$  は介助者の上体や上肢等の要素を介して、車いすの操作力  $f_W(t) [\text{N}]$  に変換される。この  $G_M(s)$  要素の特性を、粘性係数  $c[\text{N}/(\text{m/s})]$  のダッシュポットと定数  $k[\text{N}/\text{m}]$  のばねで構成される伸縮可能な伝達要素で近似する。 $f_W(t)$  により、被介助者を含み総重量が  $M [\text{kgf}]$  の車いすは、速度  $w(t) [\text{m/s}]$  で走行する。また、車いすには、前後車輪の走行抵抗  $f_R[\text{N}]$  と斜面の進行方向に作用する自重による落下力成分  $d(t)=Mg\sin\theta[\text{N}]$  が働き、 $Mg\sin\theta$  と  $f_R(w)$  の大小関係により駆動(押付け)操作または

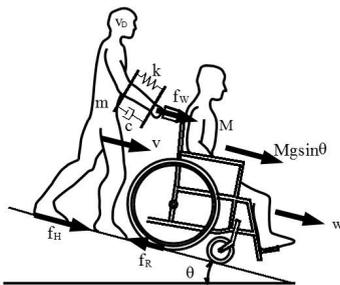


Fig.1 Explanation diagram of attendant  
-wheelchair system

制動(引張り)操作が行われる。

3. 介助者-車いす系の巨視的解析モデル

最初に、水平・平坦路( $\theta=0$ ,  $d(t)=Mg\sin\theta=0$ )での解析モデルの概要を図2に示す。モデルは介助者が自律的に直進操作と停止操作を行う場合を示し、旋回操作は含まない。

介助者が意識下で決する推進力  $f_C(t) [\text{N}]$  は、目標速度  $v_D(t)$  と歩行速度  $v(t)$  の差に比例する。その特性を遅れがない  $G_C(s)$  要素で表す。また、 $f_C(t)$  の指令を受けて筋肉系が反応し、実際の発揮力  $f_H(t)$  に変換する際の遅れ特性を、2次遅れ+むだ時間から成る  $G_H(s)$  要素( $G_H(0)=1$ )で表す。車いす操作に要す力  $f_W(t)$  に応じて  $f_H(t)$  は調節され、体重  $m$  の介助者は歩行速度  $v(t)$  を加減速する。その時、 $v(t)$  と車いす  $w(t)$  の速度差に応じて、介助者と車いす間の間隔と伝達力に変化する。この特性を、比例+積分特性を持つ  $G_M(s)$  要素で表し、出力が操作力  $f_W(t)$  となる。車いすの走行抵抗は、 $f_R(w)=f_{R0}+Rw(t) [\text{N}]$  で近似する。なお、 $f_{R0} [\text{N}]$  は静止摩擦力、 $R [\text{N}/(\text{m/s})]$  は動摩擦係数である。

4. モデル構成要素の特性

4.1 自律特性に基づいた発揮力特性  $G_C(s)$

図2の伝達関数表示した解析モデルでは、介助者-車いす系の走行挙動が定常状態に達した際には、 $v_S(t)=w_S(t)$ ,  $f_{CS}(t)=f_{HS}(t)=f_{WS}(t)$  の関係を満たす。添え字  $s$  は定常状態を表す。 $G_C(s)$  要素の特性は図2のモデルと等価な特性を持つ、図3に示す試験機を用いて推定する。本装置では、介助者の実発揮力  $f_W(t)$  は、試験機のハンドル部に設置したロードセルで検知される。そして、 $f_W(t)$  はDSP内の演算処理要素により模擬した車いすの機械的な特性を介して、実路面に相当するベルト路の移動速度  $w(t)$  に変換される。ベルト路はAC200V, 3kWのモータで駆動される。 $G_C(s)$  要素特性の推定時には、車いすの走行抵抗  $f_R(w)$  を  $f_{R0}=0$  と仮定して、走行負荷量を支配する  $R$  値を25~250  $[\text{N}/(\text{m/s})]$  の領域で変化させ、定常操作時の  $w_S(t) \sim f_{WS}(t)$  特性を用いる。

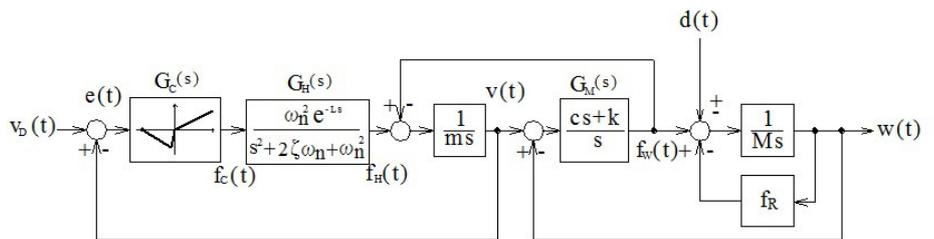


Fig.2 Block diagram of operating wheelchair on flat

被験者は健康な成人男性 3 名で、代表者 1 名 (身長:175 [cm],体重:65[kg])について、20 分間の連続操作をした際の特性を図 4 に示す。図は水平路  $\theta=0$  での押付け駆動( $f_{ws}(t)>0$ )操作と、傾斜路  $\theta=0,4,6,8$ [deg]での引張り制動( $f_{ws}(t)<0$ )操作の特性を示す。併せて、操作負担に対する相対的運動強度を、相対心拍数  $\kappa$  で表している。

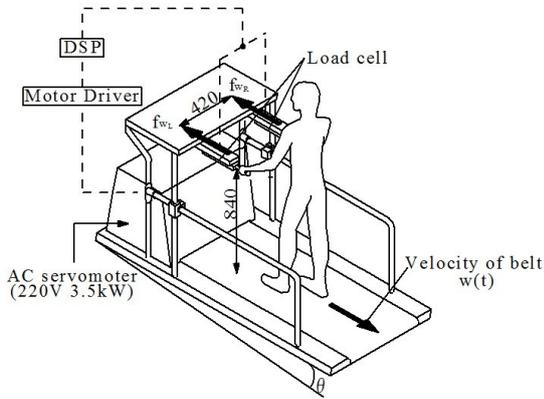


Fig.3 A device of walking test in various conditions

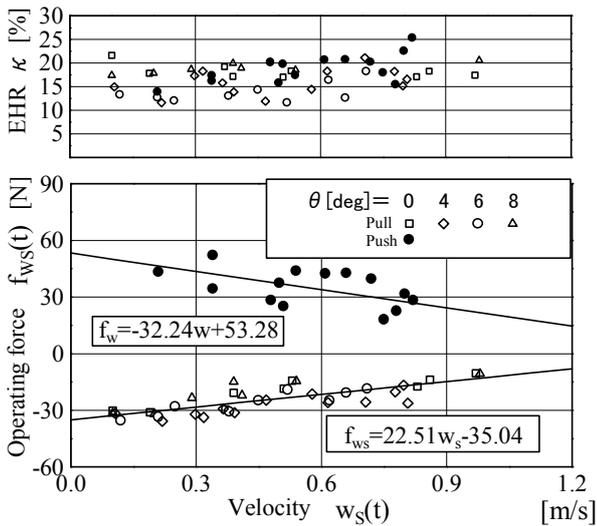


Fig.4 Autonomous characteristic on slope

図 4 に示す特性では、自律操作時の相対運動強度  $\kappa$  は  $18 \pm 5\%$  程度の領域で維持し「かなり楽(very right)」の評価語下であり、 $|f_{ws}(t)|$  は  $w_s(t)$  が増すと減少する。また、制動操作( $f_{ws}(t)<0$ )特性では、 $\theta$  が  $|f_{ws}(t)|$  に及ぼす影響は小さく、 $\kappa$  値の変動も少ない。これは、降坂路では受動的な歩行動作となり、勾配による影響が小さくなるためだと考える<sup>2)</sup>。また、 $\theta=0, f_{ws}(t)<0$  の特性は、平坦路で前進走行時の停止操作特性となる。

図 2 の信号伝達特性を整理・変形すれば、 $f_{ws}(t)=f_M-Kv_s(t)$ 、 $f_M=KV_M$  ( $K$  は定数)の関係を得る。この式と図 4 の  $w_s(t) \sim f_{ws}(t)$  特性の関係より、水平路での駆動操作時の  $G_C(s)$  要素特性は、 $v_D(t)=V_M, K=K_D$  と仮定すれば、 $f_{CS}(t)=K_D(V_M-v_s(t))=K_D e(t)$ 、 $e(t)=V_M-v_s(t)$  の関係を満たすことから  $G_C(s)=K_D=32.2$  [N/(m/s)]となる。ここで、 $V_M$  は介助者が意識下で設定した目標値であり、当該被験者の自然体での歩行速度 1.56[m/s]で近似できる。

次に、車いすを停止させる制動操作では、先と同様に考

え、 $v_D(t)=0, K=K_B(>0)$ と仮定すれば、 $f_{CS}(t)=-f_{MB}-K_B(-v_s(t))=-f_{MB}-K_B e(t)$ 、 $f_{MB}=K_B V_M$ 、 $e(t)=-v_s(t), v_s(t) \geq 0$  となり、 $K_B=22.5$  [N/(m/s)]である。これより、 $G_C(s)$  は図 5 に示す特性を持ち、駆動と制動操作では異なる非線形的な発揮力特性となる。また、制動操作は  $-K_B < 0$  となり、系は不安定化する。しかし、介助者の操作は車いすが停止する直前においては、緩やかに  $|f_w(t)|$  を減じて停止させるため、その特性を図中に破線で示す。

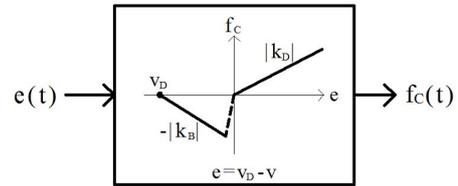


Fig.5 Characteristic of exercising power

## 4.2 他の伝達要素の特性

神経と筋肉系間の遅れ特性を表す  $G_H(s)$  要素は、オシロ画面上に呈示した  $f_c(t)$  信号に、操作力  $f_H(t)$  を追従させる周波数応答試験により推定する。図 6 に車いす速度が  $w_s(t)=v_s(t)=0, 0.83$  [m/s] の場合の周波数応答特性を示す。 $w_s(t)=0.83$  [m/s] の  $f > 2$  [Hz] では、歩調に依存した周波数成分が発揮力に重畳してばらつきが増している。この応答特性より、図 2 の  $G_C(s)$  要素は、2 次遅れ系+無駄時間で近似する。算出した  $\zeta=0.42[-]$ 、 $\omega_n=10.4$  [rad/s]、 $L=0.11$  [s] を代表値として模擬試験時に用いる。

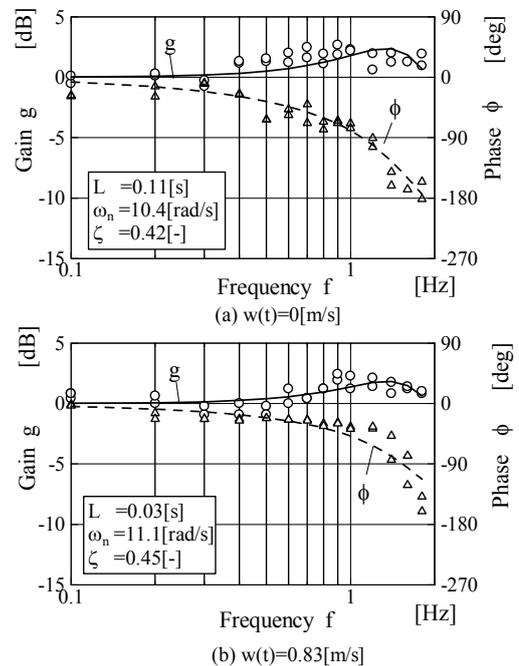


Fig.6 Frequency response of  $G_C(s)$  element

介助者と車いすとの接続要素  $G_M(s)$  の特性は、押付け駆動操作と引張り制動操作で特性が大きく異なるため、両操作について  $k$  [N/m]、 $c$  [N/(m/s)] を推定する。

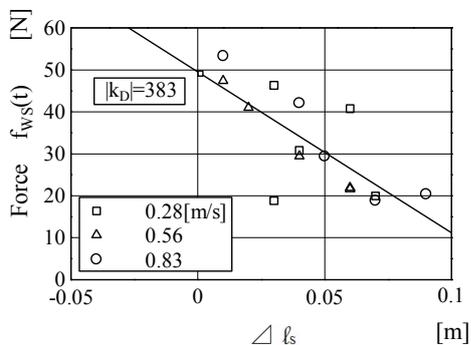
ばね定数  $k$  は、車いすを定常走行操作させた際の介助者と車いす間の相対距離  $l_s(t)$  [m] と操作力  $f_{ws}(t)$  [N] の関係より算出する。操作力  $f_w(t)$  は、 $f_w(t)=c|v(t)-w(t)|+k \int \{v(t)-w(t)\} dt$

で表され、定常操作時には  $v(t)=w(t)$  となるため、 $f_{ws}(t)=k \ell_s(t)$  で表される。

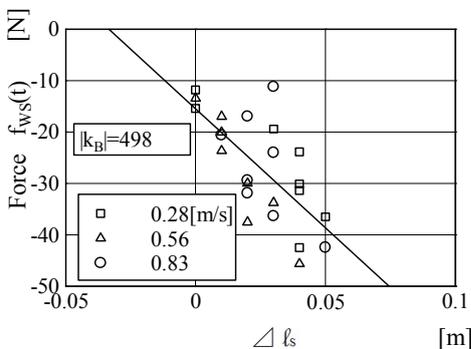
図 7(a)に押付け駆動操作、(b)に引張り制動操作について、速度  $w_s(t)=v_s(t)=0.28, 0.56, 0.83$  [m/s] (1, 2, 3 [km/h]) に対する相対距離  $\ell_s(t)$  と操作力  $f_{ws}(t)$  の関係を示す。  $\ell_s(t)$  はハンドル握り部の後端を  $\ell_s(t)=0$  とし、その点からの増分を  $\Delta \ell_s$  とする。図 7 より、駆動操作では  $|k_D|=383$  [N/m]、制動操作では  $|k_B|=498$  [N/m] を推定値とする。

粘性係数項  $c$  は、図 2 の線図系で  $f_C(t) \sim f_W(t)$  の入出力関係に着目した過渡応答特性から推定する。階段状の  $f_C(t)$  信号をオシロ画面上に提示し、被験者はそれに追従する操作力  $f_W(t)$  を発揮する。  $c$  値を算出する際には、先に推定した  $\zeta, \omega_n, L, k_D, k_B, m$  を使い、計算機上で最も応答波形に適合する値を探索する手法を用いる。

図 8 に  $f_W(t)$  を目標値  $f_C(t)$  で正規化した時間応答波形を示す。図より、 $w_s(t)=0.3 \sim 0.8$  [m/s] 間での駆動操作では  $c_D=1207$  [N/(m/s)]、制動操作では  $c_B=1047$  [N/(m/s)] を得ている。



(a) Pushing motion



(b) Pulling motion

Fig.7 Relationship between  $f_w$  and  $\Delta \ell_s$

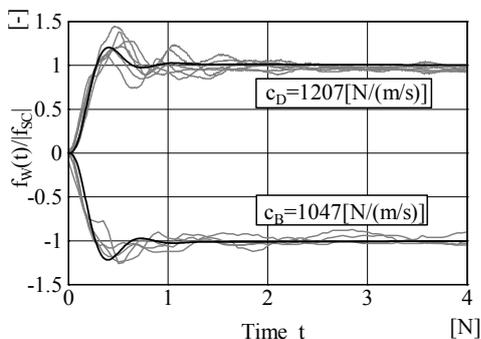


Fig.8 Characteristic of decay factor

## 5. 解析モデルを用いた操作特性の推定

### 5.1 解析モデルによる数値解析

図 2 の解析モデルに、前章までに推定した自律操作時の推定値を適用して、水平・平坦路に於ける操作挙動を推定する。ここでは、 $d(t)=Mg \sin \theta=0, v_D(t)=V_M=1.56$  [m/s],  $f_R(w)=1.87w+12.2$  [N],  $M=60$  [kgf] としている。

図 2 の解析モデルに基づいた計算結果を、 $w(t) \sim f_H(t), f_W(t)$  特性として図 9 に示す。車いす操作は、停止状態にある A 点から自律的な駆動操作 ( $v_D(t)=V_M=1.56$  [m/s]) を開始し B 点を経由して、定常な駆動操作状態となる C 点に至る。C 点の駆動状態は介助者の自律発揮力特性に準じて、その際の操作負担(路面抵抗による負荷)に応じて決定される。その後、C 点での定常走行時に停止操作 ( $v_D(t)=V_M=0$ ) を行う。その制動操作により、操作挙動は D 点を経由して A 点に達し停止する。図より駆動操作時には、 $G_C(s)$  要素のゲイン特性に準じて  $f_H(t)$  は増減するが、 $f_W(t)$  は  $G_H(s)$  や  $G_M(s)$  要素の遅れ特性の影響を受け、車いすに伝達される操作力が減じている。また、停止操作時には、介助者に比べて車いす系の慣性力が大きく、自律的な制動発揮力も小さいため、 $f_W(t)$  は相対的に減少する事が分かる。

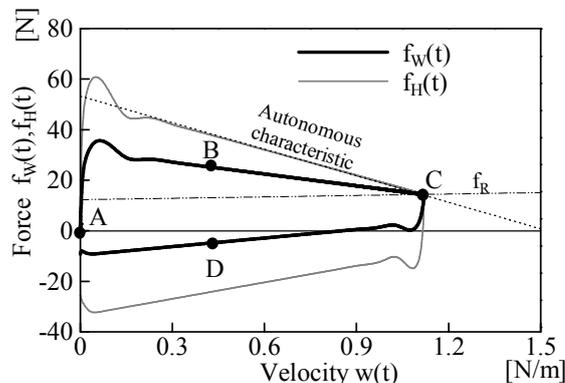


Fig.9 Result of simulation on flat

### 5.2 解析モデルの検証

解析モデルの性能を、実機を用いた実路面及び図 3 の試験機を用いた模擬試験の検証結果から評価する。

実路面での試験に用いる車いすの概要を図 10 に示す。車いすは握り部にロードセル、後輪に回転式エンコーダを備え、操作力  $f_W(t)$  と速度  $w(t)$  が測定できる。実機・実路面での自律・走行操作試験は、 $M=60$  [kgf] で平坦なアスファルト路面で実施している。

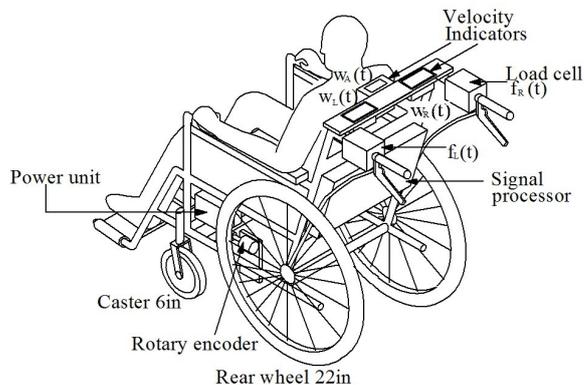


Fig.10 Wheelchair used to experiment and position of instrument

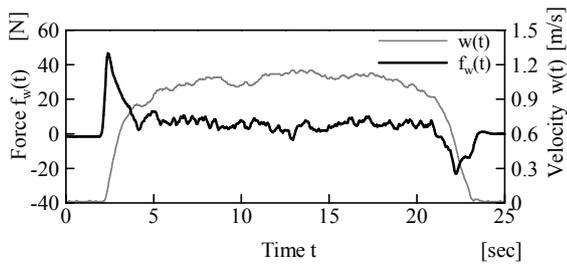


Fig.11 Process of operating force and wheelchair's velocity

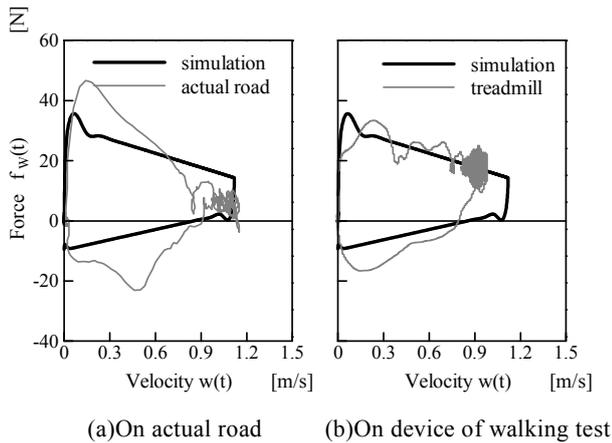


Fig.12 Comparison simulation with (a)On actual road and (b)On device of walking test

図 11 に、停止状態にある車いすに駆動操作をして定常走行させた後に、制動操作を実施し再度停止状態に至る過程の操作力  $f_w(t)$  及び速度  $w(t)$  の挙動を示す。模擬試験及び解析モデルによる数値計算時の走行抵抗  $f_R$  には、アスファルト路面を想定して、 $f_R(w)=1.87w+f_{R0}$ 、 $f_{R0}=12.2[N]$  を用いている。

12(a)に実路面、図 12(b)に模擬試験による結果を示す。図 9 の特性と比較すると、(a)より駆動・停止操作が開始される初期の加減速域では、実路面での操作力が全体的に大きく、定常操作域では低くなっている。これは、定常操作に主眼を置いた解析モデルであり、操作の開始時に介助者が行う微分動作的な操作力を考慮していない点と、実路面に於ける走行抵抗力の不確かさによるものである。他方、(b)より試験機を用いた模擬操作試験時の走行は、実路面に比べ不確定要素を排した状態での走行であるため、加減速域の応答はよく類似した軌跡を描いている。両者の特性より、巨視的な解析モデル図 2 は、車いすの定常操作挙動の解析に有用であると考えられる。

## 5. 降坂路での操作挙動解析

図 2 の解析モデルに基づく降坂路でのモデルと、構成要素の特性および操作性能とその検証結果の詳細は、講演時に述べる。

## 6. まとめ

降坂路における車いす操作モデルを構築するため、基準となる平坦路における車いすの駆動・停止・制動操作モデルを構築し評価をした。その結果、自律的な定常操作特性を基準にして解析すれば、介助者と車いす系の挙動をモデル化できる事が判明し、操作特性とモデルの妥当性を検証した。

## 謝辞

本研究が、文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業の助成を一部得て実施できたことに謝意を表す。

## 参考文献

- (1) 垣本映:高齢者の移動支援のための制御技術, 計測と制御, 第 40 巻, 第 5 号, pp.357~362, (2001)
- (2) 宮脇和人ら:坂道における車いす介助者の評価, 日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集VII, pp.111~112, (2003)