

人間対応型電動車椅子の走行制御

住谷秀保¹⁾、白石昌武²⁾

Drive Control of Electric Wheelchair Based on Human Friendly Actuation

Hideyasu SUMIYA and Masatake SHIRAISHI

要 旨

電動車椅子が滑らかな平面上を移動する場合は比較的問題は少ないが、それでも実際の使用においては現在主に以下のような解決すべき課題が残されている。

① 走行環境変化による走行の不安定性、② 車椅子自体の状態変化に伴う走行の不安定性、③ 段差乗り越、④ バッテリーの使用時間および質量

つまり走行安定性に関するものと、構造上あるいは構成上からくる機能性に関するものがある。問題を前者に限定すると、その原因として小さな2つの前輪が挙げられる。そのため走行環境などの外部からの影響や干渉を受け易く、簡単に進行方向が変化する。これに対応する方法としては、(1)構造や構成を変えることなく制御法で補正する、(2)電動車椅子の機構や構造を変える。

このような背景と問題点を踏まえ、本研究は(1)の制御法として前輪角度フィードバック制御法を導入することにより、走行性を向上させることを目的とした。具体的には、電動車椅子の制御系としての入力が基本的には使用者のジョイスティックの操作方向となることから、前輪にエンコーダのみを装着し、それによって得られた前輪の角度とジョイスティックの操作角度との差をフィードバックすることにより、安定な走行を行うという極めて簡単な方法である。実機による動特性試験と走行試験の結果、本提案法の有効性が確認され、かつジョイスティック操作性の向上も見られたので、その概要を以下に報告する。

ABSTRACT

The electric wheelchair is one of the widely used tools for providing mobility for the elderly and handicapped. However, it still holds functional design improvements, and structural design and system improvements. For example, it is impossible to cope with changes in the driving environment such as steps, rough roads, slopes crossing transverse to the direction of travel, etc. In particular, the rapid side-to-side swiveling motion of a caster wheel is the main cause of instability travel. This vibration is mainly depending on the dynamics of the situation. The key point in these problems is how to keep stable travel of a wheelchair. Up to now, research and development efforts have been aimed at attaching new mechanisms to the electric wheelchair to improve these disadvantages. However, there have been few reports made using the control engineering approach. Rather than using construction, or hardware, research and development using control engineering, or software approach, methodology shows strong hope for improving electric wheelchair operability and drive stability. The goal of this research is to improve drive stability through the development of a new control algorithm.

Key words : wheelchair, dynamic analysis, drive stability, angle feedback control, rear wheel information

¹⁾ 茨城大学工学部助教

²⁾ 放送大学茨城学習センター所長

1. 緒 言

電動車椅子では、通常用いられる入力装置であるジョイスティックを器用に扱うことにある程度の訓練を必要とする。またそれがデジタル方式により進行方向を決定するため細かな軌道修正が難しい。現在実用化されている電動車椅子では補正なしで直進走行することは非常に困難である。これまでに電動車椅子に新たな機構を取り付け、これらの問題を解決しようとする構造上からの研究開発が行われている^{1)~3)}。しかし、電動車椅子を制御対象とみなし、その走行性に関して制御工学的アプローチからの研究例はほとんどない。

このように電動車椅子については走行性に関する種々の問題がある。そこで本研究では、特に直進の走行安定性および斜面路上における直進横断走行の制御法について検討した。

2. 車椅子のモデル化

2.1 モデルの導出過程

車椅子のモデル化についてはいくつかの報告例があるが、ここでは状態方程式の立場からモデル化を行う。車椅子のフレームの剛性は十分高いものとし、そのたわみによる影響は小さいものと仮定する。車椅子を剛体リンクで構成される各車輪が独立に回転駆動する移動車としてモデル化する。なお、固体摩擦については厳密なモデル化が困難であるため、外乱項とみなしてモデルには含めない。

また、車輪と路面の間にスリップはないものとする。

Fig. 1 に本体フレームモデルを示す。まず、重心 G の角速度 ω は左右後輪の回転角を θ_L, θ_R とすると

$$\omega = \frac{Rr}{Tr} (\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L) \quad (1)$$

となる。次に重心の速度 v は

$$v = \frac{Rr}{Tr} \{ (Tr + 2X_G) \dot{\theta}_R + (Tr - 2X_G) \dot{\theta}_L \} \quad (2)$$

で表される。ここに Rr は後輪半径、 Tr は左右後輪間距離、 X_G, Y_G はそれぞれ車椅子原点からの重心位置である。これより重心の運動方程式は車椅子の全体の質

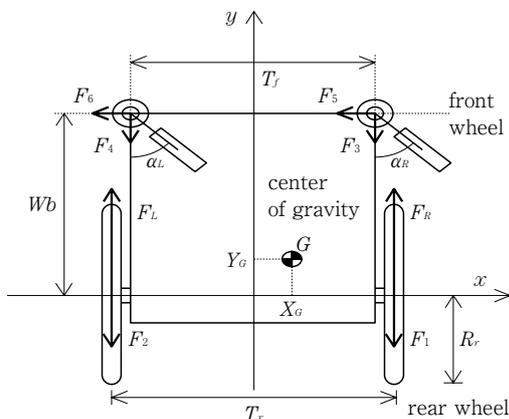


Fig. 1 Model of wheelchair

量 M 、慣性モーメントを J_G とするとFig. 1 から

$$M\dot{v} = F_R + F_L - F_1 - F_2 - F_3 - F_4 \quad (3)$$

$$J_G \dot{\omega} = (F_R - F_1) \left(\frac{Tr}{2} - X_G \right) - (F_L - F_2) \left(\frac{Tr}{2} + X_G \right) - F_3 \left(\frac{Tf}{2} - X_G \right) + F_4 \left(\frac{Tf}{2} + X_G \right) + (F_5 + F_6)(Wb - Y_G) \quad (4)$$

となる。ここで Tf は左右前輪取付け軸間距離、 Wb は前後車輪間距離である。また F_L, F_R はモータからの駆動力で、左右後輪のモータからの駆動トルクを τ_L, τ_R 、後輪の慣性モーメントを J_r 、粘性摩擦係数を D_L, D_R とすると

$$\tau_L = J_r \ddot{\theta}_L + D_L \dot{\theta}_L + F_L Rr \quad (5)$$

$$\tau_R = J_r \ddot{\theta}_R + D_R \dot{\theta}_R + F_R Rr \quad (6)$$

で表される。 F_1, F_2 は後輪の転がり摩擦力で、荷重やタイヤの空気圧、路面形状などにより変化するためモデル化が困難であるが、ここでは搭乗者質量により決まる定数とする。 F_3, F_4, F_5, F_6 は前輪からの力で、前輪は車椅子本体の動きに追従するため、その運動に依存して相互に干渉し合う。Fig. 2 に示す右前輪のモデルについてパラメータを以下のように置く。

α_R : 前輪角度、 ϕ_R : 車椅子重心と前輪重心とのなす角度、 φ : 車椅子進行角度、 lf : 前輪重心位置、 $F_{R\phi}$: 車椅子の平面運動に伴う力、 F_{RD} : 前輪転がり摩擦力、 $F_{R\omega}, F_{Rr}$: 車椅子の回転運動に伴う力 (回転方向, 向心方向)、このときの右前輪重心の運動方程式は、前輪取付け軸での前輪の慣性モーメントを J_{fR} 、粘性摩擦係数を D_{fR} とすると

$$F_3 = -F_{CR1} \cos \alpha_R \quad (7)$$

$$F_5 = F_{CR1} \sin \alpha_R \quad (8)$$

$$J_{fR} \ddot{\alpha}_R + D_{fR} \dot{\alpha}_R = F_{CR2} \cdot lf \quad (9)$$

ただし、

$$F_{CR1} = F_{R\phi} \cos(\alpha_R - \varphi) + F_{R\omega} \sin(\alpha_R + \phi_R) - F_{Rr} \cos(\alpha_R + \phi_R) - F_{RD} \quad (10)$$

$$F_{CR2} = -F_{R\phi} \sin(\alpha_R - \varphi) + F_{R\omega} \cos(\alpha_R + \phi_R) + F_{Rr} \sin(\alpha_R + \phi_R) \quad (11)$$

である。左前輪の運動方程式についても同様に求められる。

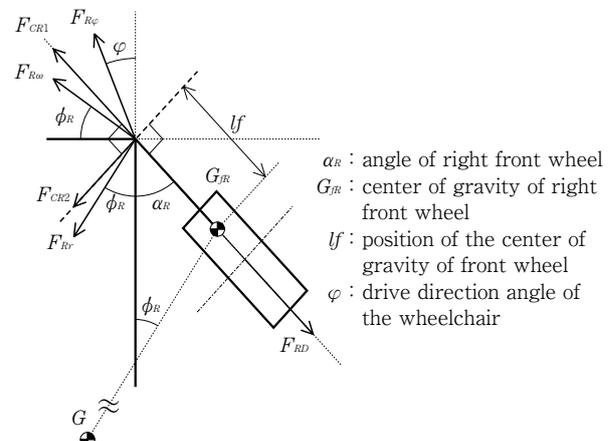


Fig. 2 Model of right front wheel

2. 2 状態方程式の導出

前述のモデルから車椅子全体の運動方程式は

$$M(\theta, \alpha) \ddot{\theta} + D(\alpha) \dot{\theta} + C(\theta, \alpha) = \tau \quad (12)$$

$$J \ddot{\alpha} + F \dot{\alpha} = \lambda(\theta, \alpha) \dot{\theta} + \nu(\theta, \alpha) \quad (13)$$

となる。そこで

$$M(\bar{\theta}, \bar{\alpha}) \ddot{\bar{\theta}} + D(\bar{\alpha}) \dot{\bar{\theta}} + C(\bar{\theta}, \bar{\alpha}) = \bar{\tau} \quad (14)$$

$$J \ddot{\bar{\alpha}} + F \dot{\bar{\alpha}} = \lambda(\bar{\theta}, \bar{\alpha}) \dot{\bar{\theta}} + \nu(\bar{\theta}, \bar{\alpha}) \quad (15)$$

を満たすノミナル値 $\bar{\theta}$, $\dot{\bar{\theta}}$, $\ddot{\bar{\theta}}$, $\bar{\alpha}$, $\dot{\bar{\alpha}}$, $\ddot{\bar{\alpha}}$, $\bar{\tau}$ の近傍 λ , ν , $\dot{\lambda}$, $\dot{\nu}$, $\lambda \dot{\theta}$, $\nu \dot{\alpha}$ についてテイラー展開を行い、2次以上の高次項を無視すれば次の線形化運動方程式を得る。

$$M_w(\bar{\theta}, \bar{\alpha}) \ddot{\theta} + D_w(\bar{\theta}, \bar{\alpha}) \dot{\theta} + K_w(\bar{\theta}, \bar{\alpha}) \theta + T_w(\bar{\theta}, \bar{\alpha}) \alpha = \lambda \tau \quad (16)$$

$$J_\alpha \ddot{\alpha} + F_\alpha \dot{\alpha} = M_\alpha(\bar{\theta}, \bar{\alpha}) \ddot{\theta} + D_\alpha(\bar{\theta}, \bar{\alpha}) \dot{\theta} + K_\alpha(\bar{\theta}, \bar{\alpha}) \theta + T_\alpha(\bar{\theta}, \bar{\alpha}) \alpha \quad (17)$$

ここに M_w , D_w , K_w , T_w , J_α , F_α , M_α , D_α , K_α , T_α は線形化した各項の行列である。

ここで状態ベクトル \mathbf{X} 、入力ベクトル \mathbf{U} 、出力ベクトル \mathbf{Y} を以下のように置く。

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ \alpha \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{U} = \lambda \tau, \quad \mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \quad (18)$$

このとき状態方程式および出力方程式は以下のように求まる。

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \mathbf{X} + \begin{pmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \\ b_4 \end{pmatrix} \mathbf{U} \quad (19)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \mathbf{X} \quad (20)$$

ただし

$$\begin{aligned} a_{21} &= -M_w^{-1} \cdot K_w, & a_{22} &= -M_w^{-1} \cdot D_w, & a_{23} &= -M_w^{-1} \cdot T_w, \\ a_{41} &= J_\alpha^{-1} \cdot (K_\alpha - M_\alpha \cdot M_w^{-1} \cdot K_w), & a_{42} &= J_\alpha^{-1} \cdot (D_\alpha - M_\alpha \cdot M_w^{-1} \cdot D_w), \\ a_{43} &= J_\alpha^{-1} \cdot (T_\alpha - M_\alpha \cdot M_w^{-1} \cdot T_w), & a_{44} &= -J_\alpha^{-1} \cdot F_\alpha, & b_2 &= M_w^{-1}, \\ b_4 &= J_\alpha^{-1} \cdot M_\alpha \cdot M_w^{-1} \end{aligned} \quad \text{である。}$$

3. 実験システム

実験システムの構成を Fig. 3 に示す。各車輪は内部に電磁ブレーキを有する、ホイールインタイプの減速機付きDCブラシレスモータで駆動される。コントローラの速度指令信号を増幅し、ブラシレスモータへ電力を供給するために、3相120°の方形波出力によるモータドライバを各車輪に1個ずつ使用した。表1に車椅子およびモータの仕様を示す。制御アルゴリズムはパーソナルコンピュータを用いてソフトウェアにより構築した。各車輪の回転角度は、車輪に直結して取り付け付けたインクリメンタル型ロータリエンコーダによ

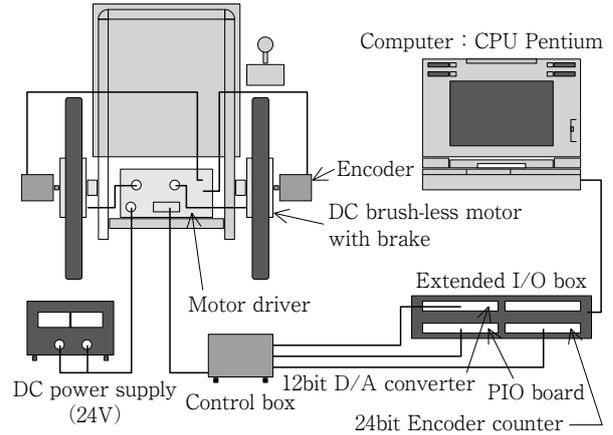


Fig. 3 Experimental setup

Table 1 Parameters

Mass	M	100 kg
Radius of rear wheel	R_r	0.3 m
Radius of front wheel	R_f	0.075 m
Wheel base	w_b	0.42 m
Distance between rear wheels	T_r	0.5 m
Distance between front wheels	T_f	0.45 m
Rated voltage		24 V
Rated output		110 W
Rated torque		0.652 Nm
Rated speed		1615 rpm
Gear ratio		36

り検出され、24bitエンコーダカウンタボードを介してコンピュータに読み込まれる。

4. 実験方法

4.1 動特性実験

電動車椅子の基本的な動特性を調べるため、以下の場合について実験を行った。

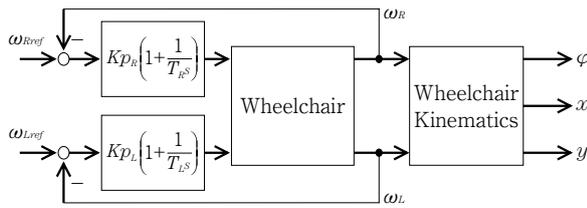
- 前後左右車輪を浮上させた無負荷の回転試験
- 開ループ制御による平面直線走行試験
- 前輪に初期角度があるときの開ループ制御による平面直線走行試験

モータへの入力角速度ステップ信号とした。

4.2 走行制御実験

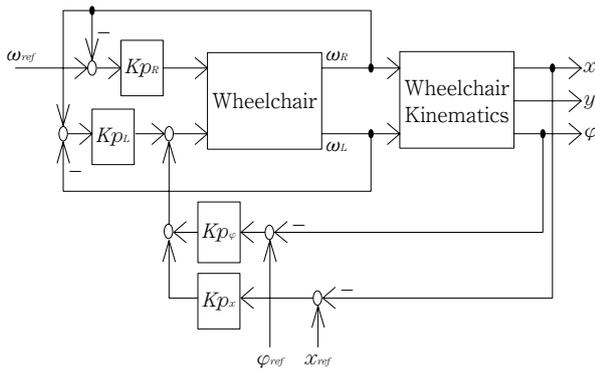
各車輪独立制御によるブロック線図を Fig. 4 に示す。各車輪に参照角速度を入力し、各車輪それぞれを独立にPI制御を行う。その比例ゲインおよび積分ゲインは実験的に求めたものを使用する。

斜面の横断走行で問題となるのは、各駆動輪の角速度に差が生ずることである。これを何らかの方法で補償できれば安定な走行が可能となる。そこで本研究では、一方の後輪を参照とし (Reference)、他方の後輪をその参照角速度に追従させるという、片車輪参照一



$\omega_{i\text{ref}}$: reference wheel speed
 Kp_i : proportional gain
 T_i : reset time ($i=R, L$)

Fig. 4 Block diagram of PI controller for each wheel



$\omega_{i\text{ref}}$: referenced wheel speed
 Kp : proportional gain

Fig. 5 Wheel control in following reference right wheel

片車輪追従制御を提案する。つまり入力に対する片側車輪の角速度を検出し、と同時に反対側車輪の角速度がそれに追従するよう角速度フィードバックを行うというものである。この場合制御遅れや走行環境などの外乱により角速度フィードバックのみでは安定した走行は不可能である。そこで Fig. 5 に示すブロック線図のように、車椅子の位置と角度の両方をフィードバックすることで安定した走行制御を行わせる。なお、車椅子の角度 $\varphi(t)$ と位置 $x(t)$, $y(t)$ は次式で求められる。

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(t) dt, \quad x(t) = \int_0^t v(t) \sin \varphi(t) dt, \quad y(t) = \int_0^t v(t) \cos \varphi(t) dt$$

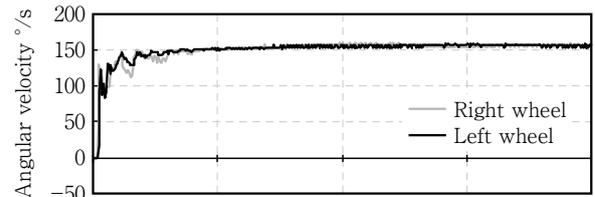
これらの制御法に対し、前輪に初期角度がある場合とない場合の平面直線走行試験、および斜面の直進横断走行試験を行った。

5. 実験結果と考察

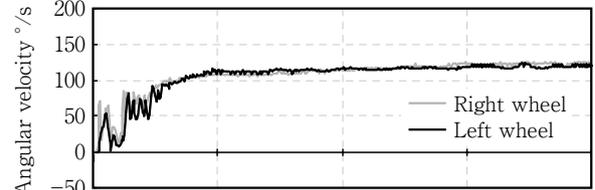
5.1 動特性実験結果

ステップ入力 $160^\circ/\text{s}$ (車椅子速度 3km/h) に対する各車輪の角速度応答を Fig. 6 に示す。また式 (19) から導出された前輪に初期角度がある場合のシミュレーション結果を Fig. 6 (c) に示す。

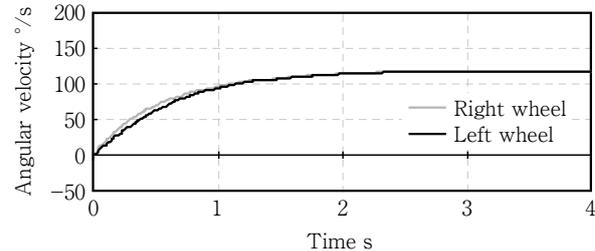
実験結果から、得られた応答にはいずれも立ち上がり時の振動が見られる。これはステップ入力に対し、使用したモータでは追従性に若干問題があるために生じたものと考えられる (必ずしも精度の良いモータで



(a) No load



(b) Linear travel



(c) Simulation ($\alpha_R = \alpha_L = 30^\circ$)

Fig. 6 Response result with step input

ないことが後に判明)。

Fig. 6 (a) より左右各車輪の応答速度に若干の差が見られるが、これは車椅子ではモータの取付けが左右で反対となることや、モータ自体のばらつきによるためであると考えられる。この実験結果から、無負荷時の各車輪の応答は 1 次遅れ系で近似可能である。

次に Fig. 6 (b) では、角速度の定常値に偏差が生じている。これは負荷および走行時の摩擦などの抵抗が車椅子の運動に大きく影響したため、このことから開ループ制御では安定した走行が困難であることがわかる。

また Fig. 6 (c) のシミュレーション結果と比較すると、初期の振動を除けば波形は全体的に大よそ一致している。このことから判断すると、導出したモデルの有効性が確認できる。

このときの走行軌跡を算出すると Fig. 7 のようになる。図の (a) では、ステップ入力による振動とモータ回転方向の特性により各車輪の角速度に差が生じるため、目標軌道から若干ずれている。また (b) でも、同様に負荷および走行抵抗などにより無負荷の場合とは逆方向にずれている。(c) および (d) では前輪に初期角度があるため、前輪の進行方向へ向きを変えてから直線走行している。(c) と (d) に差が生じているのは、(c) の場合は初期振動のためより大きく方向を変えたことによる。

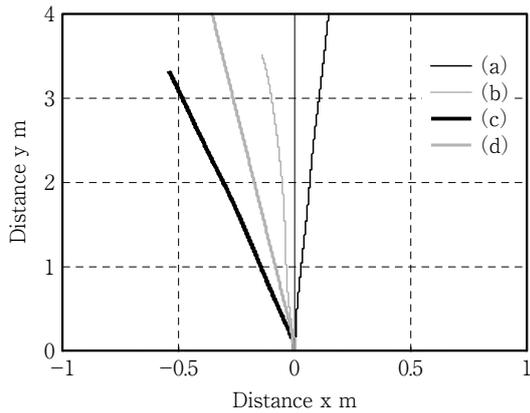


Fig. 7 Result of trajectory

5. 2 走行制御実験結果

5. 2. 1 平面直進走行

Fig. 8に平面直進走行実験の走行軌跡を示す。比較のため開ループ制御での走行軌跡も示してある。まず(a)の開ループ制御では路面からの外乱などにより直線軌道からずれを生じている。(b)の各車輪独立制御では、開ループ制御と同様に外乱によって右方向へ軌道が振れるが、最終的には目標軌道と平行に走行している。一方(c)の右車輪参照—左車輪追従制御でも目標軌道とずれを生じるが、車椅子本体の位置と角度のフィードバックにより最終的には補正されている。

次に、前輪に初期角度がある場合の直線走行軌跡を調べると(紙数の都合上データは示していない)、(a)の開ループ制御では前輪からの干渉力により走行方向が変化し、一方(b)の各車輪独立制御では目標軌道と平行に走行している。これに対し(c)の右車輪参照—左車輪追従制御では、ほぼ目標軌道に沿って走行していることが確かめられる。

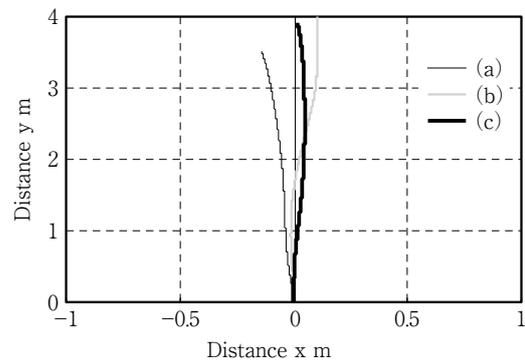
5. 2. 2 斜面直進横断走行

平均傾斜角度約 10° の斜面を直進横断走行した場合の軌跡をFig. 9に示す。図の x 軸のマイナス方向が斜面下側を示す。図中(a)の開ループ制御では車椅子の軌道が重力によって傾斜方向に移動し、そのまま斜面を下る方向に走行している。(b)の各車輪独立PI制御の場合でも重力による左右各車輪の転がり摩擦の変化、および斜面下向きの力のため左右駆動輪に角速度差を生じて斜面下側へと斜め走行している。これに対し(c)では、走行開始時に左車輪制御遅れのため傾斜方向へ若干移動するが、その後の補正によってほぼ直進走行している。このときの(b)と(c)の各車輪角速度応答はFig. 10のようなになる。この図の各車輪独立制御では左右車輪の角速度に次第に差が生じるのに対し、右車輪参照—左車輪追従制御では左右の車輪にほとんど差は生じていない。

次にFig. 9の場合と逆傾斜による走行軌跡を調べると(同じく紙数の都合上データは省略)、(a)の各車輪独立制御では前述と同様に重力による左右各車輪の角速度差のため、斜面方向へ移動している。一方(c)

の右車輪参照—左車輪追従制御では、前述の場合とは逆に左車輪の追従遅れからわずかに斜面を上る方向へ移動するが、ほぼ目標軌道に沿って走行している。これらの結果から、本研究で提案した片車輪参照—片車輪追従制御の有効性が確認された。

なお本報告と併行して、前出のモデルを用いて外乱オブザーバとファジィによる走行制御を実施している。その場合に制御のためのノミナル値の設定により制御性が大きく変わることから、検討の余地があることが判明した。



(a) Open loop, (b) PI control, (c) Left wheel control

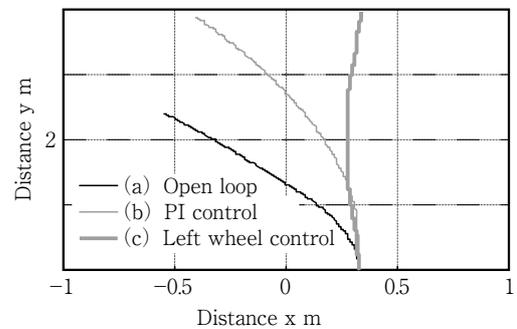
Fig. 8 Trajectory of linear traveling ($a_R - a_L = 0^\circ$)

Fig. 9 Trajectory of linear travelling

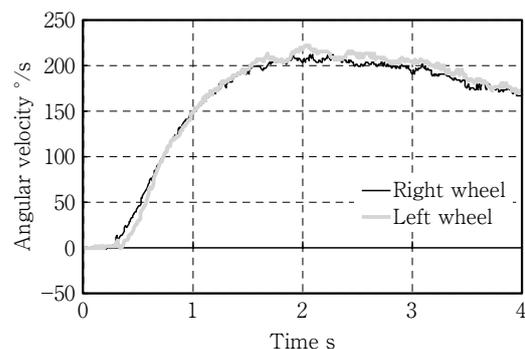


Fig. 10 Response of left wheel control

6. 結 言

電動車椅子の走行性を向上させることを目的として制御実験用車椅子を製作し、その動特性実験および走行制御実験を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 制御用電動車椅子の動特性試験から、導出した線形化状態方程式による車椅子モデルの有効性を確認した。
- (2) 走行時の安定性を向上させる制御法として、右車輪を参照角速度として左車輪の角速度を追従させる制御法を提案し、前輪に初期角度のある場合とない場合の平面直線走行、および斜面の直進横断走行実験を行い、その有効性を確認した。

今後の課題としては、モデルを用いた最良な制御則の設計法を構築することであり、と同時にシステム全体をいかに軽量化するかである。

参考文献

- 1) M.Shiraishi, T.Takeuchi, S.Aoshima: Design and Analysis of a Manually Powered Wheelchair Capable of Traversing Steps by Pneumatic Actuation, JSME Int. J., Ser. C, 40, 3 (1997) 425.
- 2) 青島伸一, 橋本靖治, 竹内 亨, 白石昌武: 片漕ぎ型パワーアシスト車いすの提案と走行制御シミュレーション, 日本ロボット学会誌, 63, 611 (1997) 2262.
- 3) 米田隆士, 舟久保熙康: 車椅子・歩行介助装置の現状と課題, 日本ロボット学会誌, 11, 5 (1993) 44.

(2011年 9月30日受理)