

斜め傾斜情報が検知できる車椅子用の拡張運転状況オブザーバの設計

呉 世訓, 堀 洋一 (東京大学生産技術研究所)

Development of Extended Wheelchair Operation Observer to Estimate Lateral Tilt Information

Sehoon Oh, Hori Yoichi (Institute of Technology, University of Tokyo)

Abstract

An operational state observer for a wheelchair system we have proposed is extended to three dimensions. Incorporation of a 3-axis accelerometer allows an observer to estimate more precise information on conditions of hills in the lateral direction. In order to design this extended operational state observer, at first, a model dynamics illustrating the relationship between the gravity in the lateral direction and the motion of a wheelchair on a slope is derived. Experimental results verify our derivation of equations. Then, the dynamics is simplified and used in the design of the extended observer. Since the dynamics itself and the output of that have nonlinear characteristics, the extended kalman filter design algorithm is employed. By simulation, the stability and effectiveness of the application is verified.

キーワード：車椅子, 運転状況オブザーバ, 拡張カルマンフィルタ, 重力の影響, 車椅子の二次元運動方程式, 人間親和型モーションコントロール

(wheelchair, operational states observer, extended kalman filter, effect of the gravity, two-dimensional dynamics of wheelchair, human friendly motion control)

1. 序 論

人間の移動支援機器の中, 最も広く使われている車椅子のフィードバック制御による高性能化研究として著者らは車椅子の運転状況オブザーバを提案した⁽¹⁾. 本研究ではその運転状況オブザーバを拡張してより多くの情報が観測できるようにする.

1.1 車椅子における運転状況オブザーバ 文献⁽¹⁾では, 図 1(a) に示されている運転状況をカルマンフィルタ理論を利用して正確に推定できるようにした. 図 1(b) はそ

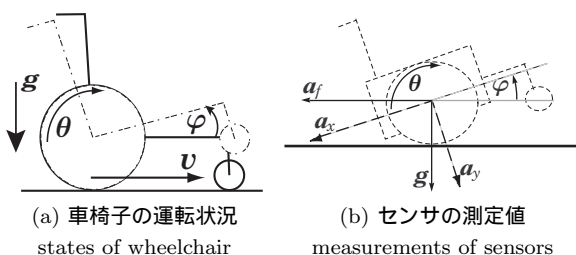


図 1 車椅子の運転状況と測定情報

Fig. 1. Operational States and Measurements in Wheelchair

のオブザーバが利用するセンサー測定値である.

このオブザーバは二軸加速度計を利用し車椅子の進行方向と水平面に対する垂直方向の加速度だけを測定しており, 横方向の加速度情報を得ることができなかった. しかし, 図 2 で見られるように, 横方向の重力は車椅子の進行方向に大きな影響を及ぼしていて, この重力の横方向への影響も推定すべきもう一つの運転状況といえる.

1.2 拡張運転状況オブザーバ 図 2 の角度 ξ が得

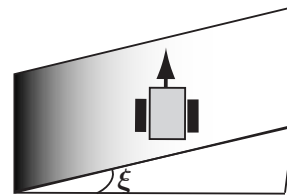


図 2 車椅子に横方向に働く重力

Fig. 2. Gravity acting laterally on a wheelchair

られたら車椅子の制御に利用することができる. より詳しくこの重力影響を二次元上で分析するため図 3 のような状況を想定し, 必要な状態を設定する. 車椅子のフレームの絶対平面に対するピッチ角度を φ , 坂の上での進行角度を α , そして坂自体の傾斜角を ξ とおく. 特に進行角度を α は, 基準を作るため坂を垂直に登るとき $\frac{\pi}{2}$ となるように設定する.

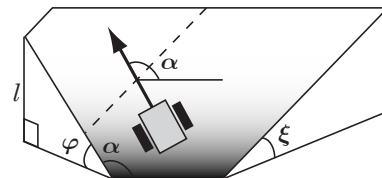


図 3 坂環境での車椅子運動に係わる状態

Fig. 3. Angles Necessary for Safe Operation on a Slope

これらの必要な角度をセンサーの測定値から正確に推定することができれば, 坂の上での車椅子の制御はより安全になり, ユーザに優しい制御ができることから人間親和型

制御につながる．

2. 車椅子制御に必要な 3 次元の運転状況

具体的な拡張運転状況オブザーバを設計するため，推定する角度を状態として定義する．

2.1 三つのセンサー出力の出力方程式 本研究では三種類のセンサーが使用される．三軸の加速度計が一つ，二つの車輪にそれぞれエンコーダが付着されていて，最後にフレームにジャイロスコプをつけピッチ角の角速度が測定可能にしている．これらのセンサー出力と図 3 の φ , α , ξ , そして 1 (a) における車椅子の進行速度 v との関係を数式に表す．

状態オブザーバの設計にもこの出力方程式は必要となるので，まずセンサー出力と必要な運転状況との関係式をここで明確にしておく．図 3 に現れている三つの角度 φ , α , ξ の関係式は式 (1) として表すことができる．

$$\sin \varphi = \sin \alpha \sin \xi \quad \dots\dots\dots (1)$$

この式を利用するとジャイロスコプで検出される φ の角速度に現れる情報を式 (3) 書くことができる．

$$\dot{\varphi} = \sin^{-1}(\sin \alpha \sin \xi) \simeq \sin \alpha \sin \xi \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{\varphi} \simeq \dot{\alpha} \cos \alpha \sin \xi + \dot{\xi} \sin \alpha \cos \xi \quad \dots\dots\dots (3)$$

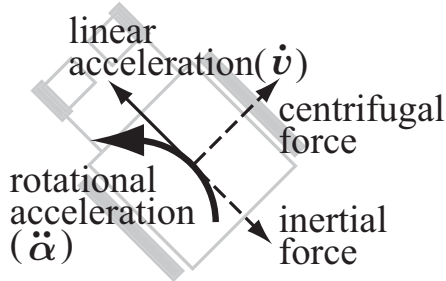


図 4 加速度計に現れる力の分解

Fig.4. Decomposition of the Force Measured by an Accelerometer

加速度計に検出される情報は少々複雑であり，車椅子の進行による線形加速度と重力加速度，それに車椅子の回転によって生じる遠心力までが加速度計に現れる．式 (4) から式 (6) までがこの三軸加速度計の出力方程式である．

$$a_x = g \sin \xi \sin \alpha + \dot{v} + f_{\text{rotation}_x} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$a_y = g \sin \xi \cos \alpha + v \dot{\alpha} + f_{\text{rotation}_y} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$a_z = g \cos \xi, \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし， v は車椅子の進行方向への線形速度であり， x, y, z の方向の定義は図 5 に示されている．

式 (4) から式 (6) のそれぞれの第一項は重力加速度成分であり，これは車椅子が置かれている坂の情報 α, ξ によって決められる．そして，式 (4) の第二項は車椅子の前進後

進による慣性力，式 (5) の第二項は車椅子の回転に伴う遠心力である．これらの第二項目に現れる力は車椅子の重心における運動の影響である．

さらに第三項目に現れている力 $f_{\text{rotation}_{x,y}}$ は加速度計が車椅子の重心に設置されていないことから生じる力である．図 5 (a) に加速度計と重心の位置関係を示した．加速度計が Δ_x, Δ_y だけ重心から離れていることで付加的に慣性力，遠心力が現れる．これらの力は式 (7) と式 (8) として書き表すことができる．ただし，車体速度 v を重心での速度でなく，以下のように加速度計の位置に合わせて比例配分し求めると Δ_y は 0 とおいてもよい．

$$f_{\text{rotation}_x} = \ddot{\alpha} \Delta_x + m \dot{\alpha}^2 \Delta_y \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$f_{\text{rotation}_y} = -\ddot{\alpha} \Delta_y + m \dot{\alpha}^2 \Delta_x \quad \dots\dots\dots (8)$$

第一項は慣性力，第二項は遠心力を表している．本研究で

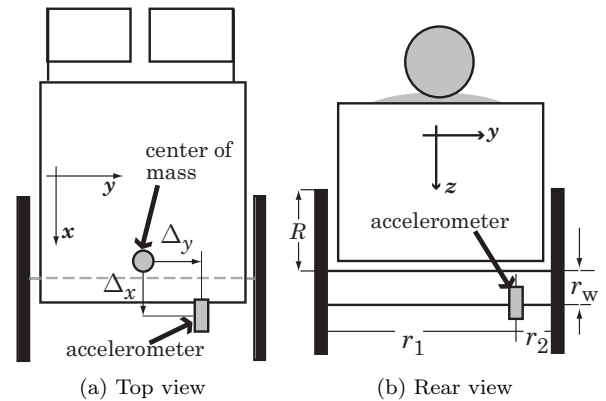


図 5 車椅子における加速度計の位置定義

Fig.5. Location of an Accelerometer in a Wheelchair

は車輪と地面のスリップはないと仮定して v をエンコーダから算出する．エンコーダから測定された回転角度を θ_l, θ_r と置いて，それと加速度計で得られた値との関係式を導く．加速度計の位置での線形速度 v は式 (9) のように θ_l, θ_r を利用して示すことができる．

$$v = \frac{r_2}{r_1 + r_2} R \dot{\theta}_r + \frac{r_1}{r_1 + r_2} R \dot{\theta}_l, \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし， r_1, r_2, R はそれぞれ図 5 に記されたとおりの距離や半径である．また式 (5) の α も式 (10) のように θ_l と θ_r と関係付けることができる．

$$\dot{\alpha} = \frac{R}{r_1 + r_2} (\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l) \quad \dots\dots\dots (10)$$

最終的に得られた，推定したい φ, α, ξ の値を含めた出力方程式を表 1 にまとめた．

加速度 a_y の出力方程式が若干複雑であることから，その方程式を確かめるため三つの実験を行った．まず，車椅子を前に進めることなく中心回りを回転し続ける実験，また，右方向に大きく進みながら回転する旋回実験，最後に

表 1 使用センサーの出力方程式

Table 1. Output Equations of All Sensors

Gyroscope	$\dot{\varphi} = \dot{\alpha} \cos \alpha \sin \xi + \dot{\xi} \sin \alpha \cos \xi$
Accelerometer	$a_x = g \sin \xi \sin \alpha + \dot{v} + m \dot{\alpha}^2 \Delta_y$
	$a_y = g \sin \xi \cos \alpha + v \dot{\alpha} - \ddot{\alpha} \Delta_y$
	$a_z = g \cos \xi$
Encoder	$v = \frac{r_2}{r_1 + r_2} R \dot{\theta}_r + \frac{r_1}{r_1 + r_2} R \dot{\theta}_l$
	$\alpha = \frac{R}{r_1 + r_2} (\theta_r - \theta_l)$

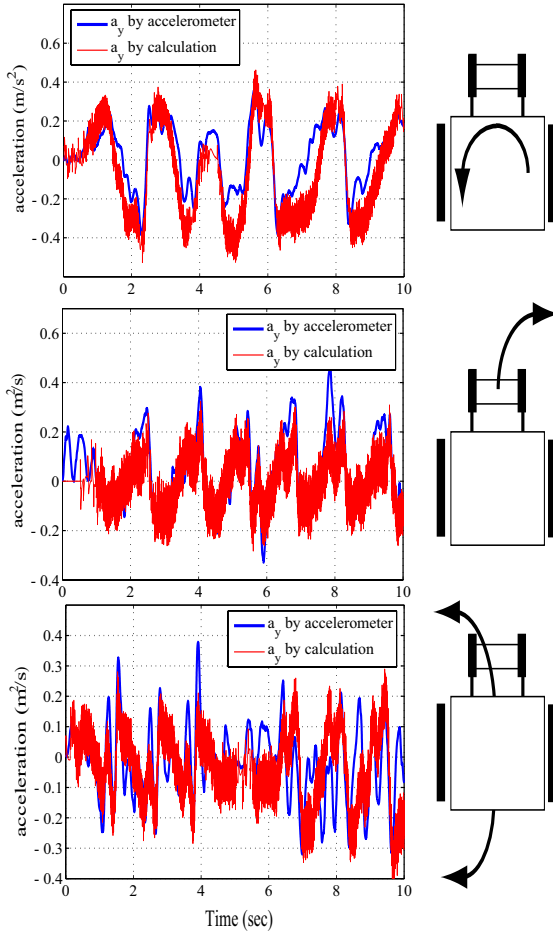


図 6 横加速度の比較

Fig. 6. Comparison of Lateral Acceleration

左方向に回転しながら前進と後進する旋回実験を行った。

その実験結果を図 6 に示す。実線で表示された値が実際の加速度計から測定された横加速度 a_y で、点線で表示された値は式 (5) とエンコーダから計測された v と α の値をもって計算した a_y である。この結果から式 (5) の正しさが実験で確かめられたといえる。

2.2 重力が車椅子に及ぼす影響の分析 オブザーバ設計のために、重力による車椅子の横方向ダイナミクスを分析する。このダイナミクスはモバイルロボットの研究などでも見られる研究である⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。横方向の重力は横力としてタイヤを通し車椅子の運動に影響を及ぼすの

で、自動車工学などで用いられている横滑り β の概念を利用した二次元運動解析を行う。

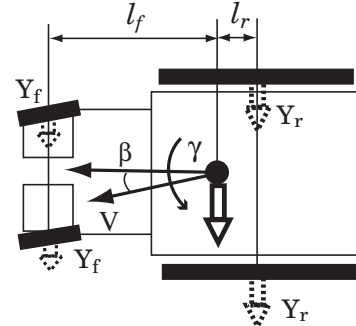


図 7 車椅子の横方向ダイナミクスに必要な物理量の定義

Fig. 7. Physical Values in Lateral Motion of a Wheelchair

図 7 は車体が進む方向と向いている方向をそれぞれ示している。この両方向の違い、すなわち横滑り角 β がまず重力によって変化ようになる。この β の値によってタイヤが変形しコーナリングフォースを発生、それにより車椅子の進行方向が変わるダイナミクスである。 β とヨーレート γ の関係式を式 (11) と式 (12) に示した。

$$mV \left(\frac{d\beta}{dt} + \gamma \right) = Y_f(\beta_f, \gamma) + Y_r(\beta_r, \gamma) + g_{lat} \quad (11)$$

$$I \frac{d\gamma}{dt} = l_f Y_f(\beta_f, \gamma) - l_r Y_r(\beta_r, \gamma), \dots \quad (12)$$

ただし、 Y_f, Y_r はそれぞれ前輪と後輪で発生しているコーナリングフォースを意味し (図 7)、ヨーレート γ はこの論文で用いてきた進行方向の微分 $\dot{\alpha}$ と同じ意味を持つ。

さらに車椅子は操舵系を持つ自動車とは違い前輪が固定されないキャストになっていることから、車体の進行方向 (図 7 の V) に従って前輪は方向が変えられる。このことは前輪の β はきわめて小さく、コーナリングフォースが発生しないと仮定できることを意味する。この仮定からコーナリングフォース Y_f, Y_r は以下の式のように計算できる。

$$Y_f = -K_f \beta_f = 0 \dots \dots \dots (13)$$

$$Y_r = -K_r \beta_r = -K_r \left(\beta - l_r \frac{\gamma}{V} \right) \dots \dots \dots (14)$$

この関係式を利用すると重力から車椅子の進行方向 $\alpha = \int \gamma dt$ までのダイナミクスが計算できて、式 (15) のような二次の伝達関数として与えることができる。しかし、システムの簡略化のためそれを一伝達関数として近似する。

$$\frac{\gamma}{g_{lat}} = \frac{\dot{\alpha}}{g_{lat}} = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \rightarrow \frac{K}{s + \omega_o} \dots (15)$$

この近似だと位相の誤差が問題になりそうだが、入力となる重力がそれほど高い周波数で変化するものではないことから妥当な近似と考えられる。

$$\ddot{x}_l = -\frac{D}{M}\dot{x}_l + \frac{1}{M}(u_f - Mgl_r \sin \alpha \sin \xi) \dots\dots\dots (16)$$

$$\ddot{\alpha} = -\frac{B}{I}\dot{\alpha} + \frac{1}{I}(u_\tau - Mgl_r \cos \alpha \sin \xi) \dots\dots\dots (17)$$

この導出されたダイナミクスを確かめるため実験結果との比較を行った．実際の傾斜地に車椅子を横方向に置き，それを重力によって自然に方向を変え坂を下っていくようにし，そのヨーレートをエンコーダから測った．その実測値と実験を行った坂情報 ξ に基づき式 (17) で計算させたヨーレートと比較したのが図 8 である．すべての実線が 5 回実

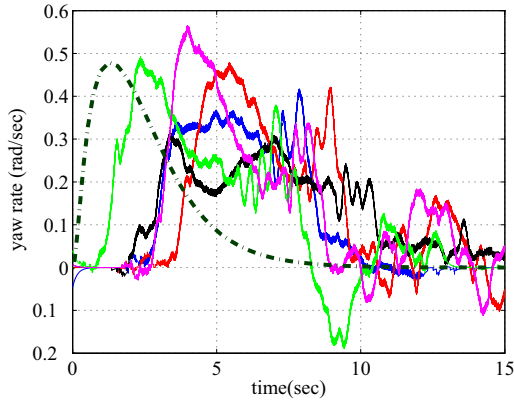


図 8 ヨーレートの実測値と計算値の比較

Fig. 8. Comparison of Yaw-rates in Experiments and Simulation

験を行って得られた実測値，点線がシミュレーションから出た計算値である．実験ではある程度下っていくと車椅子が歩道ブロックに入ってしまうためヨーレートに振動が現れてしまうが，その振動が起きるまでの曲線，特に立ち上がりりのところとピーク値は非常によく算出していることがわかる．これにより提案した車椅子の横方向ダイナミクスの正しさが確かめられたといえる．

2.3 車椅子の二次元ダイナミクスを利用した状態定義 これらのダイナミクスを考慮し，以下のように推定する状態を定義する．

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \left(x_l \quad \alpha \quad \dot{x}_l \quad \dot{\alpha} \quad \xi \quad \dot{\xi} \right)^T \\ &= \left(x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6 \right)^T \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

そして，今まで導いてきたダイナミクスと出力方程式を利用し，式 (19) と式 (20) のようにシステム方程式を書き表す．

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} x_3 \\ x_4 \\ -\frac{D}{M}x_3 - g \sin x_2 \sin x_5 \\ -\frac{B}{I}x_4 - \frac{M}{I}g \cos x_2 \sin x_5 \\ x_6 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{M}u_f \\ \frac{1}{I}u_\tau \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$= \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{u}) \dots\dots\dots (19)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_4 \cos x_2 \sin x_5 + x_6 \sin x_2 \cos x_5 \\ \dot{x}_3 + g \sin x_2 \sin x_5 + m_{acc}d_{accx}x_4^2 \\ Mx_3x_4 + g \cos x_2 \sin x_5 + m_{acc}d_{accy}x_4^2 \\ g \cos x_5 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_4 \cos x_2 \sin x_5 + x_6 \sin x_2 \cos x_5 \\ -\frac{D}{M}x_3 + m_{acc}d_{accx}x_4^2 + \frac{1}{M}u_f \\ Mx_3x_4 + g \cos x_2 \sin x_5 + m_{acc}d_{accy}x_4^2 \\ g \cos x_5 \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

このシステム記述で重要なポイントの一つは ξ とその微分 $\dot{\xi}$ を状態として定義していることである．坂の角度 ξ はまったくランダムであるので，外乱のように入力を持たない状態として定義した．この定義の有効性と適切性を 3・2 節のシミュレーションで確かめる．

3. 拡張運転状況オブザーバの設計とシミュレーション結果

以上求められたシステム方程式に基づき拡張運転状況オブザーバを設計する．

3.1 拡張カルマンフィルタの導入 導出されたシステム方程式 (19) と (20) が非線形システムになっていることから，本研究では拡張カルマンフィルタ (Extended kalman filter; EKF) を導入することにする．拡張カルマンフィルタは以下の式 (21), (22) のような非線形システムの状態を推定するときに有効に使われる手法である⁽²⁾．

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t-1)) + \mathbf{g}(\mathbf{u}(t-1), \mathbf{x}) + \mathbf{v}(t), \dots\dots (21)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{e}(t), \dots\dots\dots (22)$$

ただし， $\mathbf{v}(t)$ と $\mathbf{e}(t)$ はそれぞれ白色のシステム雑音，観測雑音である．このような非線形システムが与えられたら，以下のような予測，更新の手続きにより状態 $\hat{\mathbf{x}}$ を推定することができる．

$$\bar{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t-1)) + \mathbf{g}(\mathbf{u}(t-1)) \dots\dots\dots (23)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{h}(\bar{\mathbf{x}}(t)) \dots\dots\dots (24)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \bar{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}(t)(\mathbf{y}(t) - \hat{\mathbf{y}}(t)) \dots\dots\dots (25)$$

問題はゲイン $\mathbf{K}(t)$ の設計であるが，線形システムに対して計算できるカルマンフィルタゲインのアルゴリズムを近似的にでも非線形システムに適用できるようにしたのが拡張カルマンフィルタ理論である．式 (26) から式 (28) までのテーラー展開による線形化を行うと非線形システムを各時点で線形化することが可能になる．

$$F(t) = \left. \frac{\partial f(t, x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}(t)} \dots\dots\dots (26)$$

$$G(t) = g(x)|_{x=\hat{x}(t)} \dots\dots\dots (27)$$

$$H(t) = \left. \frac{\partial h(t, x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}(t)} \dots\dots\dots (28)$$

この近似行列を利用すると最適ゲイン $K(t)$ とその計算に必要な共分散行列 $P(t+1|t)$ が以下のように計算できる．

$$K(t) = P(t|t-1)H^T(t)(H(t)P(t|t-1)H^T(t)+R)^{-1} \quad (29)$$

$$P(t|t) = P(t|t-1) - K(t)H(t)P(t|t-1) \dots\dots (30)$$

$$P(t+1|t) = F(t)P(t|t)F^T(t) + G(t)V(t)G^T(t) \cdot (31)$$

ただし， R と V はそれぞれシステム雑音 $v(t)$ と観測雑音 $e(t)$ の共分散である．この $K(t)$ はあくまでも近似によって得られている．非線形性がそれほど強くない時にはこの近似でも充分な推定が可能だが，非線形性に起因する推定誤差が大きいと思われるなら文献⁽³⁾などに紹介される無香料フィルタなど，より非線形性に強い最適ゲインを利用することも可能と思われる．

3・2 拡張カルマンフィルタを利用した車椅子運転状況オブザーバの設計 2・3 節で導出した車椅子のダイナミクスを利用して $F(t)$, $G(t)$ と $H(t)$ 行列が導出できる．これらの行列を利用し，拡張運転状況オブザーバを設計，シミュレーションを行った．これから紹介するシミュレーションは二つの目的を持つ．まずは新しく提案した拡張オブザーバの性能確認である．拡張カルマンフィルタを利用することで車椅子の二次元ダイナミクスがもつ非線形性を克服できるのかどうかの確認するためである．もう一つシミュレーションによって実証されるのは式 (18) で導入した状態 ξ と $\hat{\xi}$ の導入適切性である．

以下の三つの状況が想定され，シミュレーションされた．

- (1) 車椅子が水平線と直角をなし坂を登る．
- (2) 車椅子が坂を登るが，水平線と直角をなしてなく任意の角度で坂を登る．
- (3) ユーザが車椅子が進行方向を変える．

まず，垂直に坂を登る車椅子のシミュレーションである．この場合，重力は車椅子の進行方向だけに影響を与え，状態 α はその初期値 $\frac{\pi}{2}$ をそのまま保つ．

図 9 はこの場合のシミュレーション結果である．2 秒から 6 秒までの ξ の変化が車椅子が 0.08rad の坂に登ったことを示している．車椅子を直進するためのトルクがかかったため (このトルクの入力パターンは図 10 の (f) に示されている) 車椅子は前進し，状態 x_l がある程度進んでいく．しかし，車椅子が坂に上ってからは x_l と $\dot{x}_l$ が減少し始める．このシミュレーションの結果から，提案したオブザーバがそれぞれの状態を正しく推定していることがわかる．

図 10 は車椅子が水平線と $\frac{\pi}{3}$ の角度を持って坂を登り始めたときのシミュレーション結果である．水平線との角度と

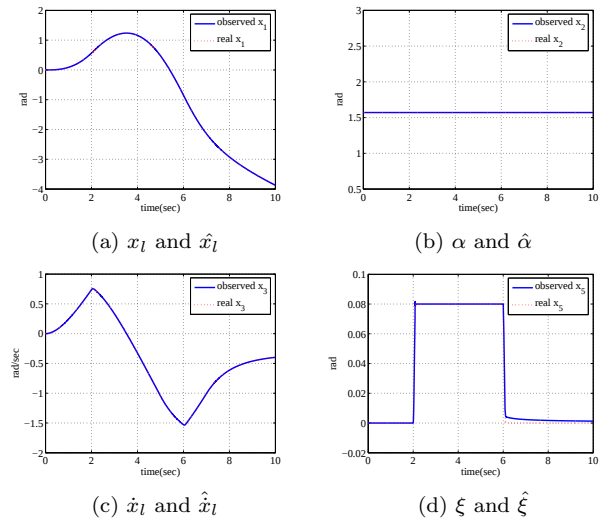


図 9 シミュレーション I) 水平面に垂直に坂を登る時

Fig. 9. Simulation 1) Perpendicular Climbing

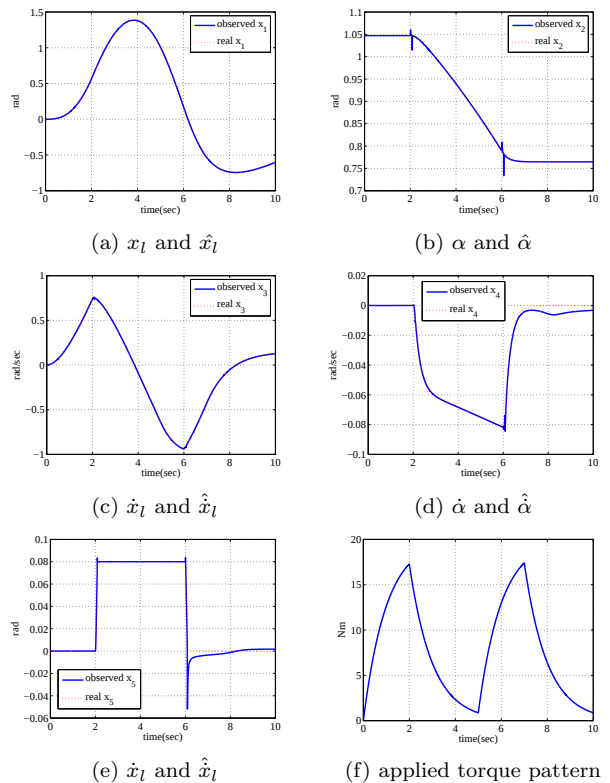


図 10 シミュレーション II) 水平面と $\frac{\pi}{3}$ の角度を持って坂を登る時

Fig. 10. Simulation 2) Climbing with the Heading Angle $\frac{\pi}{3}$

は図3の α を意味する．車椅子の進行方向が水平線と直角を成さないため、重力が車椅子の進行方向に影響を及ぼして回転してしまう．この動きがシミュレーション上にもよく現れている．図10の(b)で α が重力により $-\frac{\pi}{2}$ に回転させられてしまっている．このような状況でも提案オブザーバは正しく状態を推定しているが、図10の(e)に現れる $\hat{\xi}$ に推定誤差が変化の前後大きく現れることがわかる．これは ξ の動きに特にモデルを利用しておらず、入力を持たない状態として推定しているので生じる問題であるが、実用上にそれほど問題にはならない．

図11は車椅子のユーザが1.5秒の時点と6.5秒の時点で左右の車輪に違う大きさの力を入れ、車椅子の進行方向を変えようとした時のシミュレーションである．図11の(f)にユーザが入れたヨーモーメントを示した．

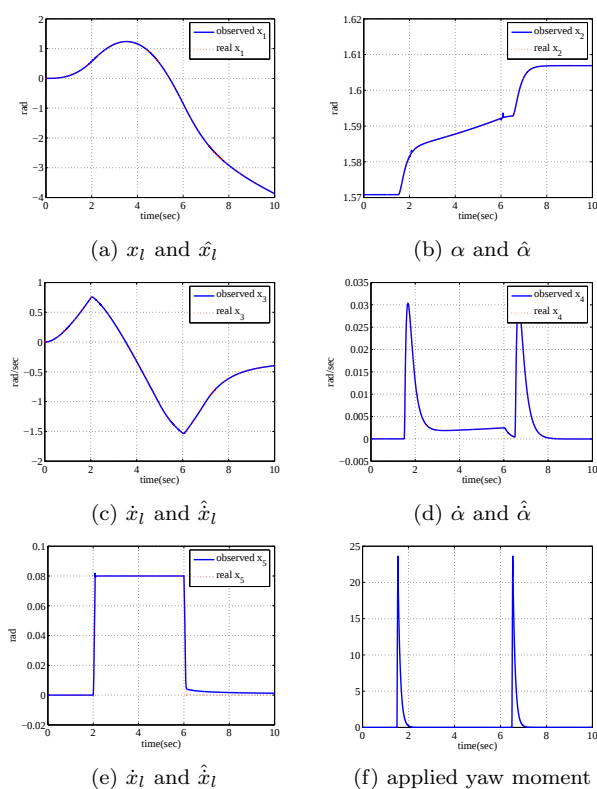


図11 シミュレーション III) ユーザがモーメントを加え α が変えた時

Fig. 11. Simulation 3) Attempts to Change α

1.5秒付近で加わったヨーモーメントにより α が $\frac{\pi}{2}$ から増加し始める．2秒になった時車椅子が坂に登り重力が α に影響を及ぼすようになる．よって2秒から車椅子が坂から抜ける6秒まで α が重力により増加する．6秒を過ぎてから車椅子は平地に置かれ α は固定となり、最後に6.5秒に与えられたヨーモーメントにより若干変化するようになる．この場合にも提案したオブザーバが正しい推定結果を示していることがわかる．

4. 結 論

以上、本稿では車椅子が置かれる坂の二次元的な特徴を分析、その時の重力が加速度計に及ぼす影響を分析した．そして、同時に車椅子自体の運動が加速度計、エンコーダ、ジャイロスコープに及ぼす影響を分析、それらに基づき拡張運転状況オブザーバを設計した．その結果、車椅子の二次元的な運動情報のみならず坂などでの斜め傾斜も推定できるオブザーバを設計することができた．

特に三つのセンサーに表れる車椅子の運転状況と坂情報を正しく分解することができ、実験を持ってその正しさを実証した．また車椅子の二次元ダイナミクスが解析、簡略化した伝達関数を提案、オブザーバ設計に使用している．その提案した車椅子の二次元ダイナミクスも実験を持ってその正しさを実証した．最後にそのダイナミクスやセンサーに現れる運転状態、坂情報の非線形性に注目、拡張カルマンフィルタを利用することで、非線形性にもかかわらず正しい状態推定ができるオブザーバを設計し、その有効性をシミュレーションを持って確かめた．今後、最終的に設計してシミュレーションで確かめたオブザーバの有効性を実験を持って確かめる計画である．

参考文献

- (1) Sehoon Oh and Yoichi Hori, "Development of a Driving State Observer for the Advanced Control of a Wheelchair and its Applications", *Annual Conference of IEEE Industry Applications Society*, 2005.
呉 世訓, 堀 洋一, "環境適用を目指した車椅子の運転状況オブザーバの設計と応用", 平成17年電気学会産業応用部門大会, 2005.
- (2) T. Söderström, *Discrete-time Stochastic Systems*, 2002.
- (3) Simon J. Julier and Jeffrey K. Uhlmann, "Unscented Filtering and Nonlinear Estimation," *Proceedings of the IEEE*, pp. 401-422, Vol.92, No.3, 2004.
- (4) Luca Caracciolo, Alessandro De Luca, Stefano Iannitti, "Trajectory Tracking Control of a Four-Wheel Differentially Driven Mobile Robot", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2632-2638, 1999.
- (5) Guy Campion, Georges Bastin, and Brigitte D'Andrea-Novel, "Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 12, No.1, pp. 47-62, 1996.
- (6) Dang Ding, Rory A. Cooper, Songfeng Guo, and Thomas A. Corfman, "Analysis of Driving Backward in an Electric-Powered Wheelchair", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol.12, No.6, pp. 934-943, 2004.