

キャスタのダイナミクスを考慮した車椅子型移動ロボットモデル

Model of Wheelchair Type Mobile Robot Considering Caster Dynamics

○正 池田 毅 (九大) 松岡 秀昌 (九大) 正 山本 元司 (九大)

Takeshi IKEDA, Masahiro KURODA and Motoji YAMAMOTO,
Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka

Abstract : Wheelchair type robot has the casters. Casters moved freely, and this motion induced friction forces and cornering forces. Cornering forces cause the wobble and restricted forces. For this reason, it is difficult to control the wheelchair as operators directed. In this paper, we focus the effects of casters dynamics. And we propose the dynamical model of mobile robot that includes the dynamics of casters using the friction forces and cornering forces. Further we propose the compensation method using this model.

Key Words : Mobile robot, Caster, Wheelchair

1 緒言

車椅子では駆動輪以外にも、前方または後方に車体を支えるためにキャスタが取り付けられている。このキャスタも走行に影響を及ぼす一因である。走行方向とキャスタの転がり方向が一致していればその影響は小さくなるが、走行方向とキャスタの転がり方向とのなす角が大きくなるとキャスタによる走行を妨げる抵抗が大きくなる。また、左右のキャスタが協調して回転するとは限らないので、キャスタの角度やキャスタ軸にかかる力の影響で転がりやすさやキャスタ軸の回転の仕方が変化する。これらの要因から、旋回のための速度差を意図した通りに作り出すことは困難である。

このような問題に対してこれまでキャスタの運動に着目したモデルが提案されている [1, 2]。しかし、モデル化する際に移動台車におけるすべりは無いものと仮定し、結果として生じるすべり角などの影響については考慮されていない。また、キャスタ軸に動力を取り付けてキャスタ角を意図した角度に調整できる機構を持ち、ステアリングと駆動の両方の機能を兼ね備えた全方向移動アクティブキャスタ [3] が提案されている。また四輪操舵車両に対して滑りや横力を考慮した軌道追従制御 [4, 5] について研究されているが、本報では受動的に動作するキャスタを持った移動ロボットについて考えるので、これらのモデルや制御手法をそのまま適用することができない。

これまでは車両の進行方向と前後方向のなす角で定義される車両重心の横すべり角 [6] と、受動輪である左右キャスタと駆動輪の四輪機構の車椅子型移動ロボットに着目し、キャスタの影響とすべり角の関係を表現したモデルについて考えてきた [7]。しかし、このモデル化の際にキャスタの運動については運動学により導入したため左右キャスタがそれぞれに回転することによって生じる干渉などが考慮されていないモデルであった。そこで、本報ではキャスタの軸に車両本体から伝わる力、キャスタの接地面に作用する摩擦力とコーナリングフォースを考慮することでキャスタのダイナミクスを移動ロボットモデルに組み込む。

2 キャスタのダイナミクスを考慮した車椅子型移動ロボットモデル

2.1 キャスタ輪の運動方程式

右キャスタ輪の力学モデルを Fig.1 に示す。左キャスタ輪に関しても同様に扱えるため、ここでは右キャスタのみについて述べる。ここで、 \mathbf{F}_{fr} は接地面からうけるコー

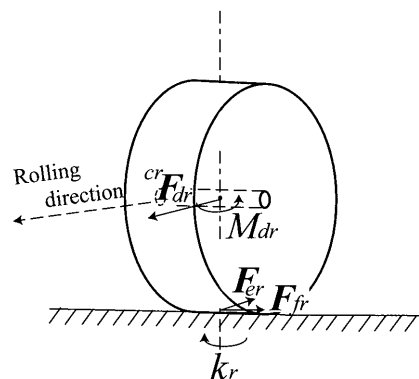


Fig. 1 Model of right caster

ナリングフォース、 \mathbf{F}_{er} は転がり摩擦力、 \mathbf{F}_{dr} 、 M_{dr} はキャスタ取り付け部からうける力とモーメント、 k_r は接地面から受ける摩擦のモーメントである。接地面から受けるモーメントはキャスタの回転に伴って回転方向とは反対向きに抵抗として働くモーメントであり、キャスタの回転角速度に比例した大きさと働くとする。

$$k_r = C_s(\dot{\theta} + \dot{\phi}_r) \quad (1)$$

以上の力とモーメントを考慮して右キャスタ輪に関する運動方程式を求めると、次のようなものとなる。

$$m_3 {}^{cr}\ddot{\mathbf{P}}_{Gcr} = {}^{cr}\mathbf{F}_{dr} - {}^{cr}\mathbf{F}_{fr} - {}^{cr}\mathbf{F}_{er} \quad (2)$$

$$I_{dz}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_r) = M_{dr} - k_r \quad (3)$$

ただし、 m_3 はキャスタ輪の質量、 I_{dz} はキャスタ輪の z 軸回りの慣性モーメントである。コーナリングフォースはタイヤが横向きに受ける力であり、転がり摩擦は転がり方向、すなわち x 方向に働く力なので、

$${}^{cr}\mathbf{F}_{fr} = [0 \ f_{fr} \ 0]^T, {}^{cr}\mathbf{F}_{er} = [f_{er} \ 0 \ 0]^T \quad (4)$$

となる。コーナリングフォース f_{fr} は Fiala の理論式により求め、 f_{er} は転がり摩擦係数 μ_{cr} 、キャスタ輪に働く垂直抗力 W_f を用いて以下のように求める。

$$f_{er} = \mu_{cr} W_f \quad (5)$$

キャスタ輪の運動方程式を x 方向、 y 方向、回転の各成分で表すと、以下のように表される。

$$m_3 {}^{cr}\ddot{p}_{Gcrx} = {}^{cr}f_{drx} - f_{er} \quad (6)$$

$$m_3 \ddot{p}_{Gcry} = {}^{cr}f_{dry} - f_{fr} \quad (7)$$

$$I_{dz}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}_r) = M_{dr} - k_r \quad (8)$$

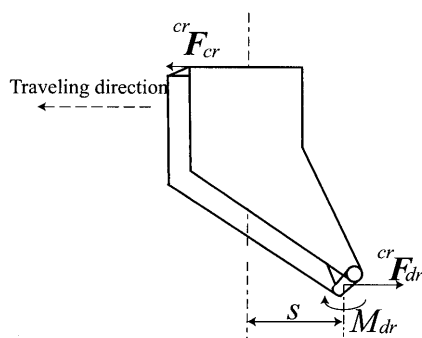


Fig. 2 Model of attaching part

上式からキャスト取り付け部からキャスト輪にかかる力とモーメントはキャスト輪の加速度、角加速度を用いて以下のように表される。

$${}^{cr}\mathbf{F}_{dr} = \begin{bmatrix} m_3 {}^{cr}\ddot{p}_{Gcrx} + f_{er} \\ m_3 {}^{cr}\ddot{p}_{Gcry} + f_{fr} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$M_{dr} = I_{dz}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}'_r) + k_r \quad (10)$$

左キャスト輪に関しても同様に表すことができる。

2.2 キャスタ取り付け部の運動方程式

右キャスト取り付け部の力学モデルを Fig.2 に示す。キャスト取り付け部に関しても左右同様に扱えるため、左キャスト取り付け部については省略する。ここで、 \mathbf{F}_{cr} は本体部からキャスト取り付け部に伝わる力であり、右キャスト取り付け部の運動方程式は以下の式で表される。

$$m_2 {}^{cr}\ddot{\mathbf{p}}_{ccr} = {}^{cr}\mathbf{F}_{cr} - {}^{cr}\mathbf{F}_{dr} - {}^{cr}\mathbf{F}_{Mr} \quad (11)$$

$$I_{cz}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}'_r) = -M_{dr} + s f_{dry} \quad (12)$$

ここで、 m_2 はキャスト取り付け部の質量、 I_{cz} はキャスト取り付け部の z 軸周りの慣性モーメント、 s はキャストオフセット、 \mathbf{F}_{Mr} はモーメントによりキャスト取り付け位置にかかる力であり、以下のように表される。

$${}^{cr}\mathbf{F}_{Mr} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{M_{dr}}{s} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

キャスト取り付け部の運動方程式を各成分で表すと以下の式となる。

$$m_2 {}^{cr}\ddot{p}_{ccrx} = {}^{cr}f_{crx} - {}^{cr}f_{drx} \quad (14)$$

$$m_2 {}^{cr}\ddot{p}_{ccry} = {}^{cr}f_{cry} - {}^{cr}f_{dry} - \frac{M_{dr}}{s} \quad (15)$$

$$I_{cz}(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}'_r) = -M_{dr} + s {}^{cr}f_{dry} \quad (16)$$

式(16)に式(7)、(10)を代入し、 M_{dr} 、 f_{dry} を消去すると、右キャスト輪の回転に関する式が得られる。

$$(I_{cz} + I_{dz})(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}'_r) = s(m_3 {}^{cr}\ddot{p}_{Gcry} + f_{fr}) - k_r \quad (17)$$

また、式(14)、(15)に式(6)、(7)を代入することで、本体部から右キャスト取り付け部に働く力は以下のように表される。

$${}^{cr}\mathbf{F}_{cr} = \begin{bmatrix} (m_2 + m_3) {}^{cr}\ddot{p}_{ccrx} - m_2 s (\dot{\theta} + \dot{\phi}'_r)^2 + f_{er} \\ (m_2 + m_3) {}^{cr}\ddot{p}_{ccry} + (m_2 s + \frac{I_{dz}}{s})(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}'_r) + f_{fr} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

左キャスト取り付け部に関しても同様に求められる。

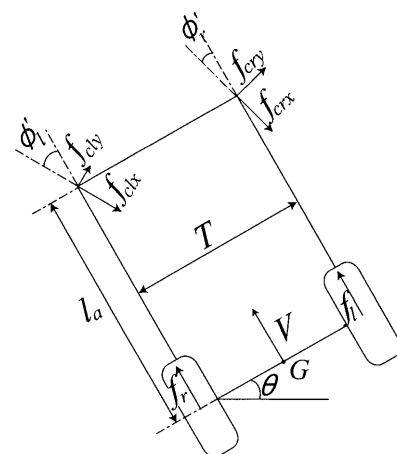


Fig. 3 Model of body

2.3 本体部の運動方程式

本体部の力学モデルを Fig.3 に示す。ここで、 f_r 、 f_l は左右の駆動力である。本体部では駆動輪のすべり角はないものと仮定する。車椅子は非ホロノーム性によって、その y 方向の速度は駆動輪によって拘束される。さらに、このモデルでは重心位置を後輪軸上としているため本体重心位置での y 方向速度は本体の回転角速度に依存せず、常に 0 となる。よって本体部の並進に関する運動方程式は x 方向のみ考えればよく、本体部の x 方向の並進の運動方程式は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} m_1 {}^o\ddot{p}_G &= f_r + f_l - {}^o f_{crx} - {}^o f_{clx} \\ m_1 \dot{V} &= f_r + f_l - {}^{cr}f_{crx} \cos \phi'_r + {}^{cr}f_{cry} \sin \phi'_r \\ &\quad - {}^{cl}f_{clx} \cos \phi'_l + {}^{cl}f_{cly} \sin \phi'_l \end{aligned} \quad (19)$$

本体部の回転の運動方程式は

$$\begin{aligned} I_{Gz}\ddot{\theta} &= \frac{T}{2}(f_r - {}^o f_{crx} - f_l + {}^o f_{clx}) - l_a({}^o f_{cry} + {}^o f_{cly}) \\ I_{Gz}\ddot{\theta} &= \frac{T}{2}(f_r - {}^{cr}f_{crx} \cos \phi'_r + {}^{cr}f_{cry} \sin \phi'_r - f_l \\ &\quad + {}^{cl}f_{clx} \cos \phi'_l - {}^{cl}f_{cly} \sin \phi'_l) \\ &\quad - l_a({}^{cr}f_{crx} \sin \phi'_r + {}^{cr}f_{cry} \cos \phi'_r \\ &\quad + {}^{cl}f_{clx} \sin \phi'_l + {}^{cl}f_{cly} \cos \phi'_l) \end{aligned} \quad (20)$$

と表される。式(19)、(20)に式(18)と左キャスト取り付け部の式を代入することで本体の並進、回転に関する方程式がそれぞれ求められる。

2.4 車椅子の運動方程式

左右キャスト輪の回転に関する方程式、本体の並進と回転に関する方程式を以下にまとめて示す。

$$(I_{cz} + I_{dz})(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}'_r) = s(m_3 {}^{cr}\ddot{p}_{Gcry} + f_{fr}) - k_r \quad (21)$$

$$(I_{cz} + I_{dz})(\ddot{\theta} + \ddot{\phi}'_l) = s(m_3 {}^{cl}\ddot{p}_{Gcly} + f_{fl}) - k_l \quad (22)$$

$$\begin{aligned} m_1 \dot{V} &= f_r + f_l - {}^{cr}f_{crx} \cos \phi'_r + {}^{cr}f_{cry} \sin \phi'_r \\ &\quad - {}^{cl}f_{clx} \cos \phi'_l + {}^{cl}f_{cly} \sin \phi'_l \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} I_{Gz}\ddot{\theta} &= \frac{T}{2}(f_r - {}^{cr}f_{crx} \cos \phi'_r + {}^{cr}f_{cry} \sin \phi'_r - f_l \\ &\quad + {}^{cl}f_{clx} \cos \phi'_l - {}^{cl}f_{cly} \sin \phi'_l) \end{aligned}$$

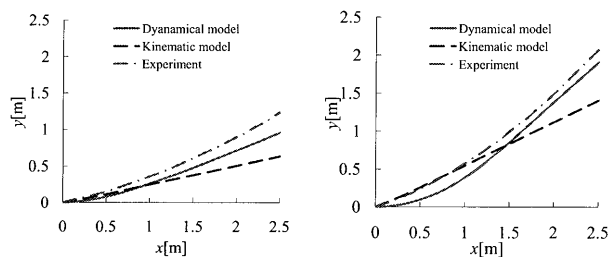


Fig. 4 Compare trajectory of experiment with simulating trajectory on $(\phi_{l0}, \phi_{r0})=(30,30)$

Fig. 5 Compare trajectory of experiment with simulating trajectory on $(\phi_{l0}, \phi_{r0})=(60,60)$

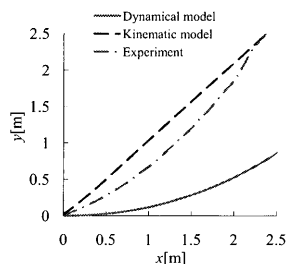


Fig. 6 Compare trajectory of experiment with simulating trajectory on $(\phi_{l0}, \phi_{r0})=(90,90)$

$$-l_a({}^{cr}f_{crx}\sin\phi'_r + {}^{cr}f_{cry}\cos\phi'_r + {}^{cl}f_{clx}\sin\phi'_l + {}^{cl}f_{cly}\cos\phi'_l) \quad (24)$$

これらの式より, f_{crx} , f_{cry} , f_{clx} , f_{cly} を消去すると, \dot{V} , $\ddot{\theta}$, $\ddot{\phi}'_r$, $\ddot{\phi}'_l$ を変数とする式になる. 得られた式は, 質量行列 M , 加速度ベクトル a , 速度項ベクトル B , 外力ベクトル F を用いて行列とベクトルを用いた表現の式にまとめることができる.

$$Ma + B = F \quad (25)$$

ただし, $a = [\dot{V} \ \ddot{\theta} \ \ddot{\phi}'_r \ \ddot{\phi}'_l]^T$, $F = F_t + F_a$ であり, F_t は駆動力によるベクトル, F_a その他の力による外力ベクトルである.

3 提案モデルの妥当性の考察

提案モデルの妥当性を考察するために, 提案モデルと, キャスタの運動を運動学から求めたモデルのシミュレーション結果及び走行実験の軌跡 [7] との比較を行った. $\phi_{r0} = \phi_{l0} = 30[\text{deg}]$ における結果を Fig.4, $\phi_{r0} = \phi_{l0} = 60[\text{deg}]$ における結果を Fig.5, $\phi_{r0} = \phi_{l0} = 90[\text{deg}]$ における結果を Fig.6 に示す. まず, $\phi_{r0} = \phi_{l0} = 30[\text{deg}]$ と $\phi_{r0} = \phi_{l0} = 60[\text{deg}]$ における結果より, 提案モデルによるシミュレーション結果は実験データと差異はあるものの実験データに沿った形となっており, キャスタの運動を運動学から求めたモデルでは表現できていなかったキャスタの回転に伴う本体の姿勢角の変化を表現している. $30[\text{deg}]$, $60[\text{deg}]$ どちらのデータにおいても提案モデルによるシミュレーション結果と実機のデータの差異は動き始めに生じ, その後は, 一定の差異を保っている. これは, キャスタが車椅子の運動に及ぼす影響に注目するために本研究では無視できるものと仮定した駆動輪の横すべりが原因であると考えられる. 駆動輪の横すべりは重心位置が後輪軸上に近い場所にあるため, 車椅子の回

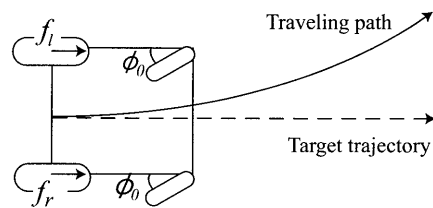


Fig. 7 Trajectory of wheelchair

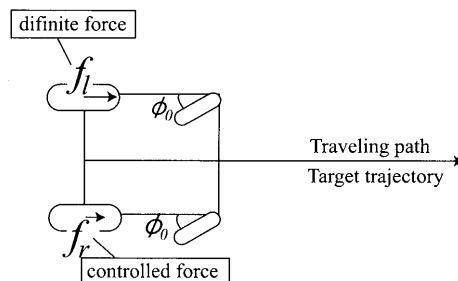


Fig. 8 Trajectory of wheelchair with drive force compensation

転運動には大きな影響は及ぼさず, 主に駆動輪が変形することによる駆動力の方向の変化が起こる. その駆動力の方向の変化によって初期において差異が生じ, その後はほぼ一定の差異を保っていると考えられる. このことは駆動輪の横すべりを考慮している運動学によるシミュレーション結果が走り始めにおいて実験結果と一致していることから分かる.

次に $90[\text{deg}]$ におけるグラフを見てみると, 提案モデル, 運動学によるモデル, 実験データのそれぞれが大きく異なっている. これは本研究において, $\psi \geq 3$ のときは常にキャスタと接地面の間には全面に対してすべりが生じることになっているためである. 実際の車椅子の運動を考えてみると, 駆動輪のトルクによって車椅子がキャスタを押し切り, キャスタが引きづられながら進むという現象は特に初期キャスタ角 $90[\text{deg}]$ に近いような状態では考えにくい. これはキャスタにはキャスタオフセット s だけでなく, z 方向すなわち鉛直方向にもオフセットがあり, 駆動力によるモーメントの影響で垂直抗力が増加し, キャスタ輪にかかる摩擦力が増加するためであると考えられる.

4 キャスタ角による角加速度の推定と駆動力の補正

キャスタの初期角度が傾いた状態で目標軌道を直線とする場合には, 駆動輪に左右同じトルクを与えても Fig.7 のように車椅子は旋回運動を行う. そこで, 本報告ではキャスタの影響による意図しない車椅子の旋回運動やそれに伴うふらつきを軽減するための方法として, モデルから求めた車椅子の角加速度を打ち消すように駆動輪のトルクを補正する方法を提案する. 各ステップにおいて, モデルを用いて推定した車椅子の角加速度を打ち消すように, Fig.8 のように左右の駆動力に次式のように差を与えた.

$$f_r = f_r - \frac{2}{T} I_G \ddot{\theta} \quad (26)$$

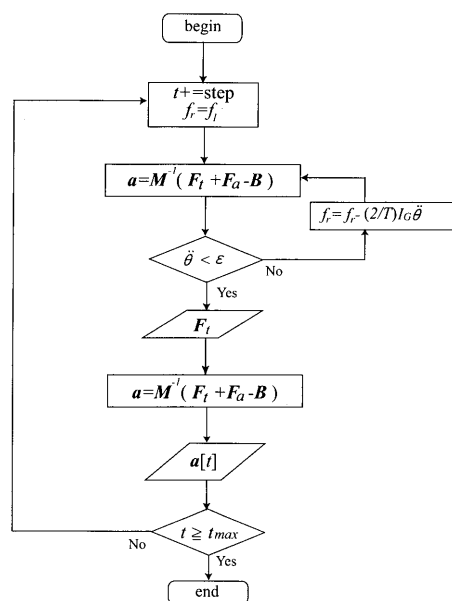


Fig. 9 Flow chart

このように補正した駆動力をモデルに入力し、車椅子の角加速度を再計算し、角加速度が $\ddot{\theta} \leq \varepsilon$ となるまで繰り返すことで、キャストの影響を考慮し、キャストが傾いている場合にも直線走行をするために必要な左右駆動力の値を求める。シミュレーションにおけるフローチャートを Fig.9 に示す。

5 駆動力を補正した走行シミュレーションの結果

提案した制御方法を用いた場合のシミュレーション結果を $\phi_{r0} = \phi_{l0} = 30[\text{deg}]$ の場合の軌跡と各角度変化、左右駆動力の差とキャスト角の変化を Fig.10, Fig.11 に示す。Fig.10 における車椅子の姿勢角がほぼ $0[\text{deg}]$ となっていることから分かるようにモデルから求めたキャスト角の影響による車椅子の旋回の角加速度を打ち消すような左右の駆動力差を計算し、駆動力を調整することによってキャストの影響による車椅子の旋回運動をおさえることができる。Fig.11 は車椅子の旋回を発生させないためにはどの程度の駆動力差を与えればよいかを示したものである。またキャスト角の変化と駆動力差の変化が相互に対応していることもこの結果よりわかる。

6 結言

本研究ではキャストの動力学と横すべりを考慮した電動車椅子型ロボットの動力学モデルを提案し、提案モデルによるシミュレーション結果とキャストの運動を運動学から求めたモデルのシミュレーション結果、実験データを比較することによって妥当性を検討した。

さらに提案したモデルを用いて初期オフセットのキャスト角がある場合に生じる車椅子の回転角加速度を見積もり、それに基づいて左右の駆動力の割合を変更する制御方法の提案と検証を行った。走行シミュレーションの結果より車椅子の角加速度が 0 となるような左右の駆動力の割合をモデルを用いて計算し、入力とすることで

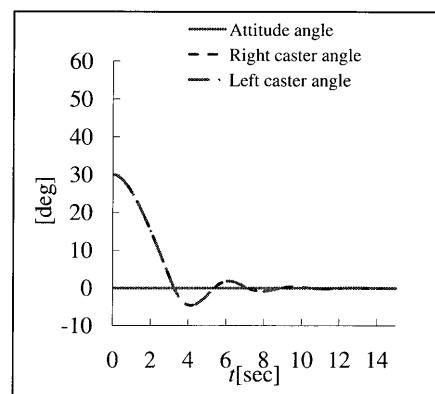
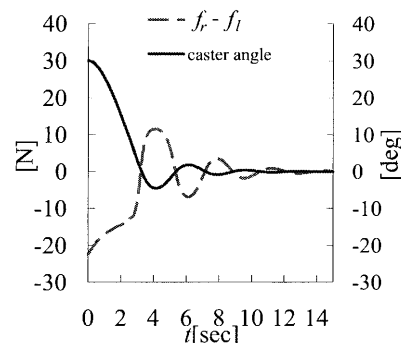
Fig. 10 Simulation on caster angle $30[\text{deg}]$ with drive force compensation

Fig. 11 Compare the caster angle with input driving force

キャストの影響による旋回運動を抑えることができることをシミュレーション結果から示した。

文 献

- [1] 鈴木曠二, 小山美樹, 木村茂雄, 沖川悦三, 田中理 “路面傾斜の影響とキャストの運動を組み込んだ車椅子のモデル”, 機論 C, Vol.68, No.675, pp.3343-3348, 2002.
- [2] 竹内亨, 白石昌武 “車椅子の走行制御に関する研究”, 精密工学会誌, Vol.65, No.7, pp.1030-1034, 1999.
- [3] 和田正義 “アクティブキャストを用いた全方向移動ロボットのモデル化と制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.7, pp.1100-1107, 2007.
- [4] 中山元, 野中謙一郎: “滑りを有する四輪独立操舵車両に対するロボスト軌道追従制御”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会, 1D36, 2005.
- [5] 中山元, 野中謙一郎 “横力配分を考慮した四輪操舵車両のロボスト軌道追従制御”, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, 3B33, 2006.
- [6] 安部正人 “自動車の運動と制御 [第二版]”, 山海堂, pp.50-61, 2003.
- [7] 池田毅, 黒田真弘, 山本元司 “車椅子型移動ロボットにおけるキャストとすべり角によるコーナリングフォースの影響”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 2P2-D17, 2008.