

## 抗力規範による移動マニピュレータの転倒安定性判別と 安定化運動の実機による検討\*

羽多野 正俊\*<sup>1</sup>, 小原 治 樹\*<sup>1</sup>

### Experiments of Stability Evaluation for Mobile Manipulators Using Criteria Based on Reaction and Stabilization Motion

Masatoshi HATANO\*<sup>2</sup> and Haruki OBARA

\*<sup>2</sup> Department of Mechanical and Intellectual Systems Engineering, Toyama University,  
3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama, 930-8555 Japan

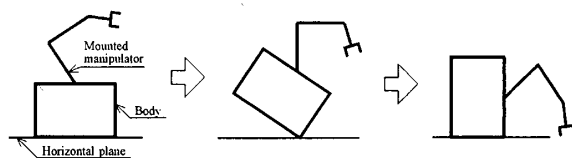
This research presents experiments of stability evaluation using criteria based on reaction and stabilization motion for the dynamic motion control of a mobile manipulator. Previous research have not discussed tipover motion dynamically. Then, we proposed the model of the dynamic mobile manipulator which can express a stable state and an unstable transient state during tipping over. In this paper we constructed experiment equipments to classify the validity of the proposed model and confirmed that the real mobile manipulator can return from an unstable state to a stable state by performing a stabilization motion. First, the experiment equipments of the mobile manipulator are constructed. Second, a model of the manipulator including characteristics of the constructed hardware system is formulated. Third, it is clarified that the formulated model can express the motion of the hardware by performing experiments and simulations. Finally, it is shown that the real mobile manipulator can return from an unstable transient state to a stable state by performing a stabilization motion.

**Key Words:** Mobile Manipulator, Experiment, Stability Evaluation, Reaction

#### 1. 緒 言

本論文は、路面からの抗力を規範とした移動マニピュレータの転倒安定評価法及び安定化制御法を提案するために、抗力規範による転倒安定性判別と基本的な安定化運動の効果を実機により検討したものである。

近年、ロボットには、ある決められた位置で作業するだけでなく、自ら動き回り作業を行う能力が必要とされてきている。そのため、作業を行うマニピュレータ機構部と走行を行う移動機構部から成る移動マニピュレータ<sup>(1)~(8)</sup>について研究が行われており、実用化され始めている<sup>(10)</sup>。移動マニピュレータは自ら動き回り作業が行える反面、ロボット本体が床面等に固定されていないため、作業時及び走行時の転倒安定性について考える必要がある。特に、工場等の限られた環境だけでなく、家庭や屋外などの未知の環境で作業を行うためには自己姿勢認識及び姿勢制御は必要不可欠であると考えられるが、転倒安定性について議論した研究<sup>(8),(9)</sup>は少ないように思われる。しかもこれらの



(a) Stable state (b) Transitional state (c) Tip over state  
Fig. 1 Process of tip over of a mobile manipulator

研究は制御対象を質点系として取り扱っており、剛体リンク構造である移動マニピュレータの問題を考えるには十分ではない。従来の安定性評価には ZMP (Zero Moment Point) を規範とした手法が主であり、運動時に不安定な状態にならないように、つまりロボットの支持輪と床が形成する支持多角形外に ZMP が出ないようにする制御系が構築されている。しかし ZMP がロボットと床との接地範囲外に位置した時、転倒モーメントは発生するが、その瞬間に転倒するわけではない。

転倒運動について考えると、図 1 のように (a) の安定状態から (c) の転倒するまでの間に (b) の過渡状態が存在する。ここで、移動マニピュレータの車載マニピュレータ部や移動ロボット部を動作させ不安定状態から安定状態へ復帰させる運動を安定化運動と呼ぶと、

\* 原稿受付 2003 年 11 月 28 日。

\*<sup>1</sup> 正員, 富山大学工学部機械知能システム工学科(☎930-8555  
富山市五福 3190)。

E-mail: masatosi@eng.toyama-u.ac.jp

(b) の不安定な状態になっても、安定化運動を行い (a) の安定状態に復帰することができれば、それは移動マニピュレータが運動できる範囲であったと言え、従来の手法により規定した作業可能範囲を広げることができる可能性があると考えられる。ただし転倒過渡状態にも、(1) 安定化運動により安定状態に復帰できる場合と、(2) 転倒の運動が急激で安定化運動が間に合わず転倒してしまう場合、の2つが存在する。これらの点について議論するためには、まず転倒の過渡状態を解析する必要があるが、これまで移動マニピュレータの転倒過渡状態について議論した研究はない。そのため我々は、垂直2次元平面内を運動し転倒過渡状態を表現できるモデルを提案し、シミュレーションにより安定化運動の効果について報告した<sup>(14)</sup>。提案した手法は、剛体リンク構造の移動マニピュレータの運動方程式と拘束条件の解析に基づいており、質点系を仮定した従来の研究の安定判定条件をより正確に規定することができた。

本報では提案した数学モデルの妥当性と転倒安定性判別法を検証するために実機を製作し実験を行った。実験結果とシミュレーション結果を比較検討し、提案したモデルが実機の運動を表現できることを示し、さらに実機でも安定化運動により不安定状態から安定状態へ復帰できることを確認する。

## 2. 製作した実機の概要

図2に製作した1リンク移動マニピュレータの概観、図3にその3面図を示す。モータとアンプはDCサーボドライブを用いた。リンク1はモータギアボックスの出力軸に取り付けられ、その先端には手先負荷を想定したおもりが取り付けられている。一方、リンク0と支持輪の間には床からの抗力を測定するためにひずみゲージを利用して製作したセンサが取り付けられている。このセンサへの影響を少なくするために本実験装置ではリンク0の駆動用モータは図に示すように外部に設置しワイヤを介してリンク0に走行駆動力を与えるようにした。

実験装置の信号流れのブロック図を図4に示す。リンク0、1のサーボシステムは独立であり、コンピュータからの指示電圧がD/Aボードを介してサーボアンプに入力されモータが動作し、そのモータの回転数がロータリーエンコーダにより検出され、カウンターボードによりコンピュータに取り込まれる。リンク0については、コンピュータ内でモータの回転数が走行距離に変換される。

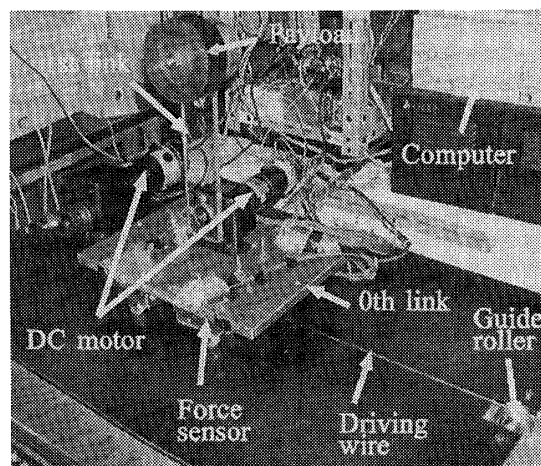


Fig. 2 Overview of experiment equipment

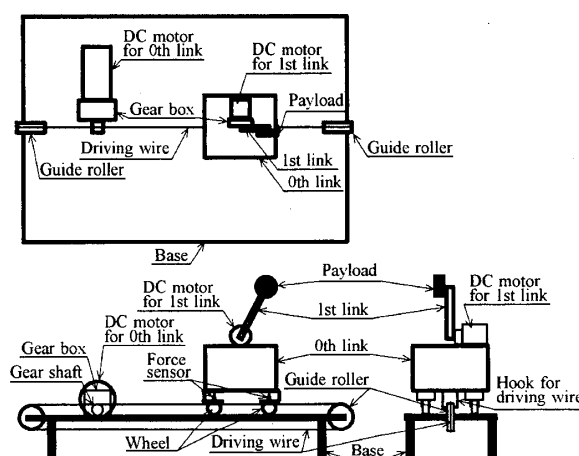


Fig. 3 Experiment equipment

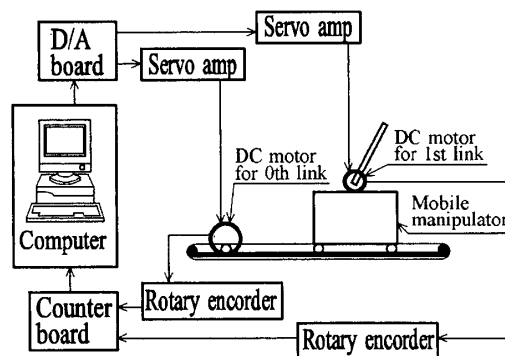


Fig. 4. Block diagram of the hardware system

## 3. モデリング

**3.1 変数の定義** 移動マニピュレータが両端で接地している状態を安定、前端または後端で接地及び非接地状態を不安定とすると、移動マニピュレータの運動状態はこれら安定/不安定の2つに大別することができ、これらのモデルの定式化を行った<sup>(14)</sup>。本論文で取り扱う移動マニピュレータは、垂直2次元平面内を走行運動するものとする。ここでは本報での議論

に必要な図5に示す両端接地と図6に示す前端接地についてのみ示す。基準座標系を  $W_x - W_y$  平面が水平面と一致している  $\Sigma_W$  とする。図5では後述の変数  $x$  及び  $z$  を表現しやすくするため便宜上  $\Sigma_W$  を路面の下方に表してあるが、実際は  $\Sigma_W$  の原点と路面の表面の位置は一致している。移動機構部である移動ロボットをリンク0、マニピュレータ部を車載マニピュレータと呼ぶ。  $\Sigma_i (i = 0, \dots, n)$  は第  $i$  リンクに取り付けられたリンク座標系、  $x$  及び  $z$  はそれぞれ  $\Sigma_W$  の原点から  $W_x$  軸及び  $W_z$  軸方向の  $\Sigma_0$  の原点の位置、  $\alpha$  はリンク0のピッチ角、  $l_i$  はリンク  $i$  の長さ、  $l_{gi}$  はリンク  $i$  のリンク下端から重心までの長さ、  $m_i$  はリンク  $i$  の質量、  $I_i$  はリンク  $i$  の重心回りの慣性モーメント、  $\theta_k (k = 1, \dots, n)$  は車載マニピュレータの関節  $k$  の回転角、  $m_p$  は手先負荷の質量、  $f(x)$  は路面形状、  $f_t$  は走行駆動力、  $f_F$  及び  $f_R$  は前端及び後端に路面から加わる抗力、  $l_d$  はリンク0の重心位置から前端または後端までの距離、を表す。また、図には示していないが車載マニピュレータの関節  $k$  への入力トルクを  $\tau_R$  で表す。

**3.2 駆動系のモデリング** 前章で示した実機の摩擦等の特性を考慮したモデリングを行う。このモデリングは  $n$  リンク移動マニピュレータとして行い、2 ~  $n$  リンクの駆動系は今回製作したリンク1の駆動系と同じと仮定する。各リンクの駆動系を図7のように考える。第  $i$  リンクのモータ軸出力トルク  $\tilde{\tau}_i$  には次式に示す関係がある。

$$\tilde{\tau}_i = L_i \ddot{q}_i - J_i \dot{q}_i - \bar{D}_i \dot{q}_i \quad (1)$$

$\ddot{q}_i$  及び  $\dot{q}_i$  はモータ軸の回転角加速度及び角速度、  $\tilde{i}_i$  は電機子電流、  $L_i$  はトルク定数、  $J_i$  はローターイナーシャ、  $\bar{D}_i$  はモータ軸受の粘性抵抗係数である。また減速機出力軸角度  $\theta_i$  は  $q_i$  を減速比  $A_i (< 1.0)$  で減速した角度であるため(2)式となり、モータ軸出力トルク  $\tilde{\tau}_i$  と減速機軸出力  $\tau_i$  の関係は(3)式となる。

$$\theta_i = A_i q_i \quad (2)$$

$$\tau_i = (1/A_i) \tilde{\tau}_i - D_{gi} \dot{q}_i - D_{gi} \dot{\theta}_i \quad (3)$$

$D_{gi}$  はギア軸受の粘性抵抗である。

ここでリンク0について考える。図3に示すように走行駆動力伝達ワイヤのために2つのガイドローラーが設置されており、その影響を考慮すると減速機軸出力トルク  $\tau_0$  と走行駆動力  $f_t$  の関係は(4)式となる。

$$f_t = \frac{1}{d_0} (\tau_0 - J_{w0} \ddot{\theta}_0 - D_{w0} \dot{\theta}_0) - \frac{2}{d_0} (J_{p0} \ddot{\theta}_0 + D_{p0} \dot{\theta}_0) \quad (4)$$

図には示していないが、  $J_{w0}$ 、  $D_{w0}$ 、  $d_0$  はそれぞれリンク0用DCモータのギア出力軸に取り付けられた

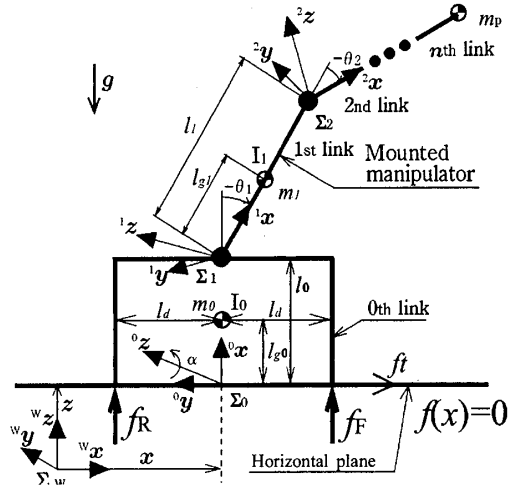


Fig. 5 Both edge contact

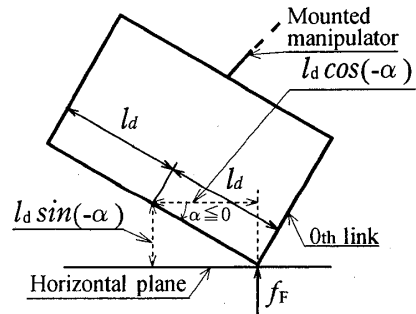


Fig. 6 Front edge contact

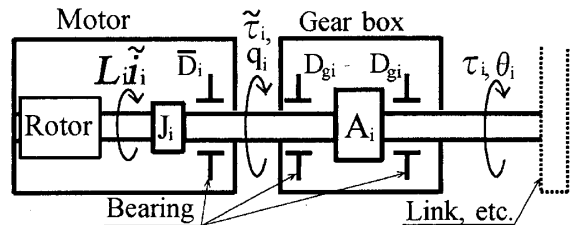


Fig. 7 Model of driving system

ワイヤ駆動用プーリーの慣性モーメント、粘性抵抗、プーリーの半径であり、  $J_{p0}$ 、  $D_{p0}$ 、  $\theta_0$  はそれぞれガイドローラーの慣性モーメント、粘性抵抗、回転角である。また図3に示すようにガイドローラーは装置台の前後2箇所に取り付けられており、その影響の大きさは等しいと考え(4)式の右辺第4項において2倍にしている。ただしワイヤの伸縮、エネルギー損失は微小と考え無視した。

アンプについては、リンク0及び車載マニピュレータ共にトルク制御型のサーボアンプを使用しているため、第  $i$  リンク用アンプへの指示電圧  $v_{ref,i}$  とモータへの印加電流  $\tilde{i}_i$  の関係は、

$$\tilde{i}_i = K_{Ai} v_{ref,i} \quad (5)$$

となる。\$K\_{Ai}\$ はアンプの増幅ゲインである。(1)~(5)式より、リンク \$i\$ に対する指示電圧 \$v\_{ref,i}\$ と走行駆動力及び駆動トルク \$f\_t, \tau\_k (k = 1, \dots, n)\$ の関係は(6)、(7)式となる。

$$f_t = \frac{1}{d_0} \left\{ \frac{L_0 K_{A0}}{A_0} v_{ref,0} - \left( \frac{J_0}{A_0^2} + J_{w0} + 2 \frac{J_{p0} d_0}{d_0} \right) \ddot{\theta}_0 - \left( \frac{\bar{D}_0}{A_0^2} + D_{w0} + 2 \frac{D_{p0} d_0}{d_0} + \frac{D_{g0}}{A_0} + D_{g0} \right) \dot{\theta}_0 \right\} \quad (6)$$

$$\tau_k = \frac{L_k K_{Ak}}{A_k} v_{ref,k} - \frac{J_k}{A_k^2} \ddot{\theta}_k - \left( \frac{\bar{D}_k}{A_k^2} + \frac{D_{gk}}{A_k} + D_{gk} \right) \dot{\theta}_k \quad (7)$$

ギア軸出力が駆動する負荷に対し、\$J\_i, J\_{w0}, J\_{p0}, D\_i, D\_{w0}, D\_{p0}\$ は微小であり無視できることから、(6)、(7)式は(8)、(9)式で近似できる。

$$f_t = \frac{1}{d_0} \left\{ \frac{L_0 K_{A0}}{A_0} v_{ref,0} - \left( \frac{D_{g0}}{A_0} + D_{g0} \right) \dot{\theta}_0 \right\} \quad (8)$$

$$\tau_k = \frac{L_k K_{Ak}}{A_k} v_{ref,k} - \left( \frac{D_{gk}}{A_k} + D_{gk} \right) \dot{\theta}_k \quad (9)$$

**3.3 数学モデル** (8)、(9)式とモータ軸受等の静止摩擦力を考慮すると、実験機の特性を考慮した \$n\$ リンク移動マニピュレータの運動方程式は(10)式で表される。なお本来は、(10)下式の \$\gamma\$ を上式の \$\gamma\$ に代入し1つの運動方程式で表すが、後述のシミュレーションで路面抗力の算出法を分かり易くするために2式に分けて記述する。

$$M\ddot{p} + h + g + D\dot{p} + S = v_M + U_t \frac{L_0 K_{A0}}{A_0} v_{ref,0} + U_n U_m \gamma$$

$$\gamma = R^{-1} \left[ -\frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\partial C}{\partial p} \dot{p} \right) \dot{p} + \frac{\partial C}{\partial p} M^{-1} \{ h + g + D\dot{p} + S - v_M - U_t \frac{L_0 K_{A0}}{A_0} v_{ref,0} \} \right] \quad (10)$$

\$R = (\partial C / \partial p) M^{-1} U\_n U\_m\$, \$p = [x, z, \alpha, \theta^T]^T\$ は一般化座標ベクトル、\$\theta = [\theta\_1, \dots, \theta\_n]^T\$ は車載マニピュレータの関節角ベクトル、\$C = [C\_r(r), C\_\alpha(\alpha)]^T = [z - f(x), \alpha]^T = [0, 0]^T\$ は拘束条件、\$C\_r(r), C\_\alpha(\alpha)\$ はそれぞれ \$W\_x, W\_z\$ 軸方向の並進の拘束条件と \$W\_y\$ 軸回りの回転の拘束条件、\$\gamma\$ は路面からの拘束力ベクトル \$\gamma = [f\_F, f\_R]^T\$ である。ここで(10)式下式の \$\gamma\$ の導出方法について概略を以下に示す。詳細は文献<sup>(15)</sup>に示す。移動マニピュレータが路面に拘束されて運動する際の拘束条件 \$C\$ を時間で2回微分し、\$p\$ が \$C\$ を満たすための \$p, \dot{p}, \ddot{p}\$ の関係を求めると、

$$\frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\partial C}{\partial p} \dot{p} \right) \dot{p} + \frac{\partial C}{\partial p} \ddot{p} = 0 \quad (11)$$

となる。(10)式上式の解である一般化座標 \$p\$ と \$\dot{p}\$ 及び加速度 \$\ddot{p}\$ が(11)式を満たしつつ運動するとき拘束条件 \$C\$ は時間に関係なく満たされる。初期条件として \$p(0)\$ と \$\dot{p}(0)\$ が拘束条件 \$C\$ 及びその時間微分を満たすように与えられるとき、(11)式が成り立つ \$\ddot{p}\$ を与える拘束力ベクトル \$\gamma\$ は、(10)式上式と(11)式の \$\ddot{p}\$ と \$\gamma\$ に関する連立代数方程式の解として与えられ、\$\ddot{p}\$ を消去することにより(10)式下式の \$\gamma\$ が得られる。なお、シミュレーションは(10)式において下式を上式に代入し \$\ddot{p}\$ について解くことにより行うが、同時にその計算過程において \$\gamma\$ の値を得る。また、

$$U_t = \begin{bmatrix} u_t \\ 0 \end{bmatrix}, U_n = \begin{bmatrix} u_n & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, U_m = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ l_d & -l_d \end{bmatrix} \quad (12)$$

であり、\$u\_t, u\_n\$ はそれぞれ路面 \$f(x)\$ の接線方向、法線方向の単位ベクトルを表す。\$U\_m\$ は、接地点からリンク 0 の重心位置までの水平方向の距離を表す行列である。\$D\$ は動摩擦係数、\$S\$ は静止摩擦力、\$v\_M\$ は車載マニピュレータの関節への入力電圧ベクトルであり各要素は以下のようなものである。

$$v_M = [0, 0, 0, \frac{L_1 K_{A1}}{A_1} v_{ref,1}, \dots, \frac{L_n K_{An}}{A_n} v_{ref,n}]^T, \\ D = \text{diag} \left[ \frac{1}{d_0} \left( \frac{D_{g0}}{A_0} + D_{g0} \right) \cos \alpha, \frac{1}{d_0} \left( \frac{D_{g0}}{A_0} + D_{g0} \right) \sin \alpha, \right. \\ \left. 0, \frac{D_{g1}}{A_1} + D_{g1}, \dots, \frac{D_{gn}}{A_n} + D_{gn} \right], \\ S = [sgn(\dot{x}) \frac{s_x}{d_0} e^{-\Phi_x \dot{x}} \cos \alpha, sgn(\dot{x}) \frac{s_x}{d_0} e^{-\Phi_x \dot{x}} \sin \alpha, \\ 0, sgn(\dot{\theta}_1) s_1 e^{-\Phi_1 \dot{\theta}_1}, \dots, sgn(\dot{\theta}_n) s_n e^{-\Phi_n \dot{\theta}_n}]^T.$$

次に、図6の前端接地状態の場合はリンク 0 への路面からの抗力は \$f\_F\$ だけであり、運動方程式は(13)式で表される。(12)式において走行駆動力 \$f\_t\$ は \$\Sigma\_0\$ の原点に働くが、前端接地の場合はこの接地点に \$f\_t\$ が働くため力の変換を行い、\$U\_{mF}\$ を用いて表現する。

$$M\ddot{p} + h + g + D\dot{p} + S = v_M + U_{tF} \frac{L_0 K_{A0}}{A_0} v_{ref,0} + U_n U_{mF} f_F \\ f_F = R^{-1} \left[ -\frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\partial C_{rF}}{\partial p} \dot{p} \right) \dot{p} + \frac{\partial C_{rF}}{\partial p} M^{-1} \{ h + g - v_M - U_{tF} \frac{L_0 K_{A0}}{A_0} v_{ref,0} \} \right] \quad (13)$$

ここで、

$$U_{tF} = [1, 0, l_d \sin \alpha]^T, U_{mF} = [1, l_d \cos(-\alpha)]^T \quad (14)$$

であり、拘束条件については回転 \$\alpha\$ に関する拘束条件はなく並進の拘束条件 \$C\_{rF}(r)\$ のみであるため、次式で表される。

$$C_{rF}(r) = z - l_d \sin(-\alpha) = 0 \quad (15)$$

#### 4. 抗力規範による転倒安定評価

転倒の過程は、両端接地の安定状態から片端接地の不安定状態になった後、転倒、である。路面は移動マニピュレータを引き寄せる力を作用させることはないため、抗力は負の値にはならない。図5の両端接地状態では、路面からの抗力は移動マニピュレータを地面にめり込ませないように働くため、 $f_R > 0$ かつ $f_F > 0$ であり、ある運動の結果、抗力センサの値が徐々に減少していき、 $f_R = 0$ となったとき後端は浮き上がり前端のみで接地し片端接地状態になる。一方、前端が浮き上がる時は $f_F = 0$ である。この時、リンク0が路面から浮き上がった後は再び接地しない限り抗力は0を示し続けるため、不安定状態は抗力が0を示し続けている間中と考えられる。よって、移動マニピュレータの安定状態及び不安定状態を(16)式で定義する<sup>(14)</sup>。

$$f_F > 0 \text{ and } f_R > 0 : \text{ stable state}$$

$$f_F = 0 \text{ or } f_R = 0 : \text{ unstable state} \quad (16)$$

#### 5. 実験とシミュレーションの比較

##### 5.1 概要

製作した実機及び実機の特性を考慮したモデルの運動結果及び抗力の関係を比較検討し、モデルの妥当性を検証する。さらに、不安定状態から安定状態へ復帰させる運動である安定化運動が無い場合とある場合の運動について検討する。前述のように、製作した実機は1リンク移動マニピュレータであるため、シミュレーションモデルにも1リンク移動マニピュレータを用いた。モデルのパラメータはそれぞれ、 $m_0=5.8(\text{kg})$ ,  $m_1=0.05(\text{kg})$ ,  $m_p=4.3(\text{kg})$ ,  $l_0=0.3(\text{m})$ ,  $l_1=0.24(\text{m})$ ,  $I_0=0.0435(\text{Kg}\cdot\text{m}^2)$ ,  $I_1=0.00024(\text{Kg}\cdot\text{m}^2)$ ,  $l_f=0.075(\text{m})$ ,  $d_0=25.5(\text{mm})$ ,  $L_0=0.23(\text{Nm}/\text{A})$ ,  $L_1=0.21(\text{Nm}/\text{A})$ ,  $K_{A0}=0.012(\text{A}/\text{V})$ ,  $K_{A1}=1(\text{A}/\text{V})$ ,  $A_0=A_1=1/60$ , とした。さらにリンク0及び1について、制御力を入力しない $v_{ref,i}=0$ で自由運動を行わせる予備実験を行い、 $D_{g0}=0.014(\text{N})$ ,  $D_{g1}=0.015(\text{N})$ ,  $s_0=0.102(\text{N})$ ,  $s_1=0.3(\text{N})$ ,  $\Phi_x=30$ ,  $\Phi_1=0.21$ , を得た。

リンク1への入力トルク $\tau_1$ は次式により計算した。

$$\tau_1 = k_{p1}(\theta_{1d} - \theta_1) - k_{d1}\dot{\theta}_1 + k_{s1} \int (\theta_{1d} - \theta_1) \quad (17)$$

$k_{p1}$ ,  $k_{d1}$ ,  $k_{s1}$  はそれぞれ比例ゲイン、微分ゲイン、積分ゲイン、 $\theta_{1d}$  はリンク1の目標角度、 $\dot{\theta}_1$  はリンク1の角速度である。この $\tau_1$ をリンク1に与えたときの移動マニピュレータの運動について以下に検討する。実機には(9)式によりアンプへの指示電圧に

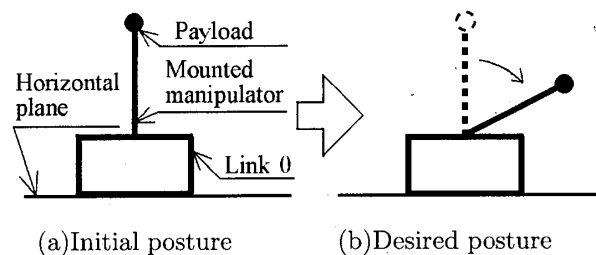


Fig. 8 Desired motion for simulation

変換して入力した。各ゲインは誤差に対し過敏にならないように $k_{p1}=200(\text{Nm}/\text{rad})$ ,  $k_{d1}=4(\text{Nms}/\text{rad})$ ,  $k_{s1}=0.2(\text{Nm}/\text{rad})$ とした。シミュレーションはルンゲクッタギル法を用いて0.1(ms)毎に運動方程式を解くことにより行った。一方、図4に示した信号流れ図においてコンピュータから指示電圧を出力しロボットの動作結果を再びコンピュータに取り込むまでの時間を制御周期と呼ぶと、本実験の場合、実機の制御周期は23(ms)であったため、シミュレーションの制御周期も23(ms)とした。

**5.2 安定化運動を行わなかった場合** まず、安定化運動を行わなかった場合の運動結果を示す。図8(a)に示すように $z=0$ ,  $\alpha=0$ でリンク0が静止しており、リンク1は初期角度 $\theta_1=0(\text{rad})$ の垂直状態で静止している状態を初期状態とした。この初期状態からリンク1に(18)式で表される目標軌道を与えた。(18)式中の数字の単位は(deg/s)であり、 $t$ は時間である。

$$\theta_{1d} = -24t \quad (18)$$

リンク0への駆動力 $f_t=0$ とし、(17)式により計算される制御電圧をリンク1にのみ与え運動させた。またシミュレーションでは、3章で述べたように初期の安定状態では(10)式を解き、 $f_R=0$ となった時には片端接地状態の運動方程式に切り替えて計算した。

シミュレーションによる運動の結果を図9に模式図で表す。図9の(a)~(d)はそれぞれ、0(s), 1.74(s), 2(s), 2.4(s)の時の移動マニピュレータの姿勢を示す。リンク1の運動結果を図10、路面から移動マニピュレータに加わる抗力 $f_F$ ,  $f_R$ を図11、 $\Sigma_0$ の原点の位置 $z$ と角度 $\alpha$ を図12, 13にそれぞれ示す。各図中の実線は実機より得られた計測データであり、点線はシミュレーションによる計算結果を表す。なお、図11~13の各図において横軸は時間を表す。

図9の(a)から(b)へ変化する0(s)~1.74(s)までは図10に示すリンク1の $-\theta_1$ 方向への運動に伴い $f_R$ が減少し $f_F$ が増大していることが図11より分かる。この時、両端接地状態であるため、 $z=0$ ,  $\alpha=0$ であることが図12, 13より分かる。図11において、実験では1.7(s)、シミュレーションでは1.74(s)を越え

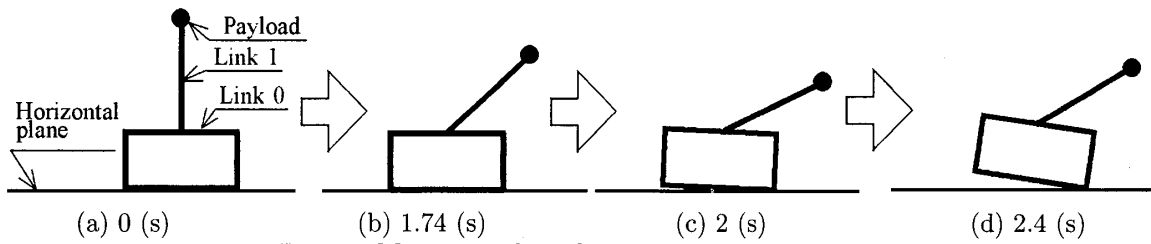


Fig. 9 Motion result without compensation motion

ると  $f_R = 0$  となり転倒過渡状態に移行する. すると移動マニピュレータはリンク0の前端部で路面と接触しながら転倒過渡状態になることが図9の(c),(d)より分かる. その時, リンク0の位置  $z$  は正方向に, 角度  $\alpha$  は負方向に増大することが図12, 13よりそれぞれ分かる. これらの図において, 実線と点線はほぼ一致しておりシミュレーションによる計算結果が実機の運動を表現できていることが分かる.

以上により, 安定化運動を行っていない場合, 車載マニピュレータの運動により移動マニピュレータは両端接地の安定状態から片端接地の転倒過渡状態になることを実験及びシミュレーションにより示した. また, 導出したモデルにより両端接地の安定状態から片端接地の転倒過渡状態になるまでを連続的にコンピュータ上で表現でき, かつその結果が実機の結果を良く表現できており, モデリングが妥当であることを示した. また図には示していないが, 2.4(s)以降, 安定化運動を行っていないため図1の(c)の状態になった.

5.3 安定化運動を行った場合

次に転倒過渡状態になった時に, 図14に示すように車載マニピュレータ及びリンク0の運動により両端接地の安定状態に復帰できるかどうかについて検討する. まず前節同様に(18)式で計算される目標軌道を与え運動させる. この時, リンク0への入力  $v_{ref,0} = 0$  である. その後, 不安定状態である  $f_R = 0$  となったときに,

$$v_{ref,0} = 0.5 \text{ (V)} \tag{19}$$

を入力した. またリンク1について,  $f_R = 0$  となったときの目標値を  $\theta_{1d}$ , その時の時間を  $t_s$  とし, 目標値を新たに,

$$\theta_1 = \theta_{1d} - \theta_{1d}(t - t_s) \tag{20}$$

とした. 本論文では転倒過渡状態から安定状態に復帰できるかどうかについてのみ検討するために(19)及び(20)式は試行錯誤により決定した.

シミュレーションによる運動結果の模式図を図15に示す. また, リンク1の角度  $\theta_1$  を図16, 抗力  $f_F, f_R$  を図17, 補償運動のためのリンク0及び1への入力電圧をそれぞれ図18,19, 移動マニピュレータの位置  $z$  を図20, リンク0の傾き角  $\alpha$  を図21, に示す. 前

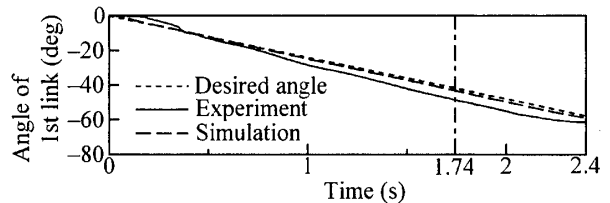


Fig. 10 Angle  $\theta_1$  of 1st link

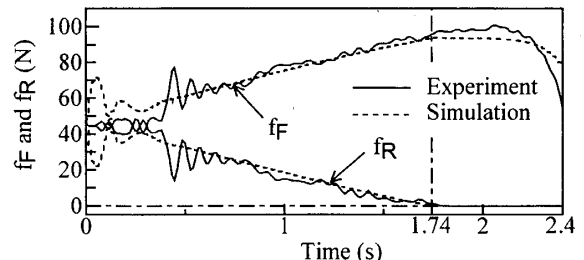


Fig. 11 Reaction  $f_R$  and  $f_F$

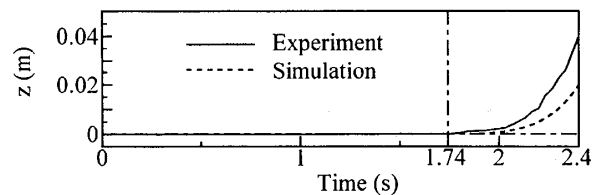


Fig. 12 Position  $z$  of origin of  $\Sigma_0$

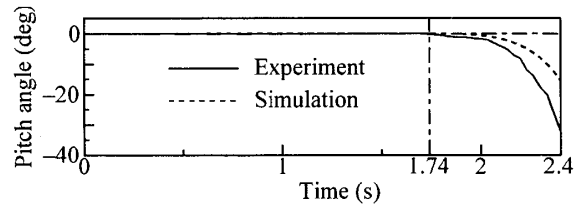


Fig. 13 Pitch angle  $\alpha$

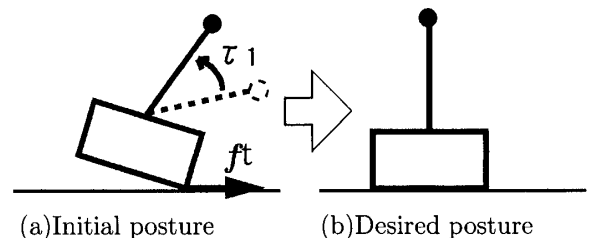


Fig. 14 Desired motion for stabilization

節同様, 各図中の実線は実機の運動結果であり, 点線はシミュレーションによる計算結果を表す.

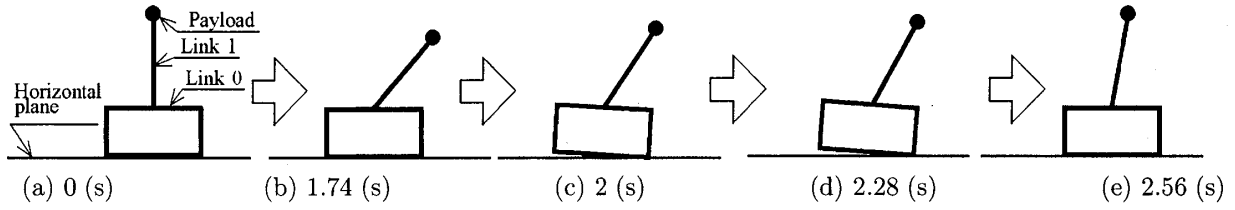


Fig. 15 Motion result with compensation motion

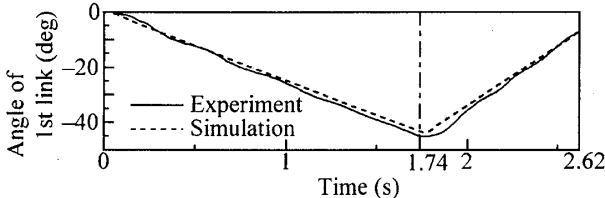


Fig. 16 Angle of the 1st link for compensation

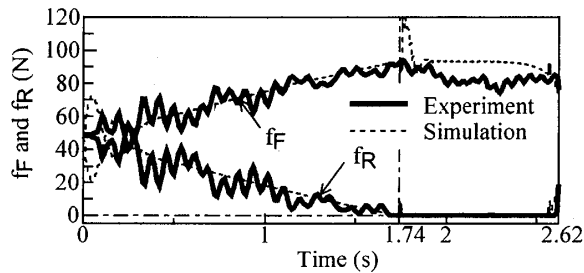
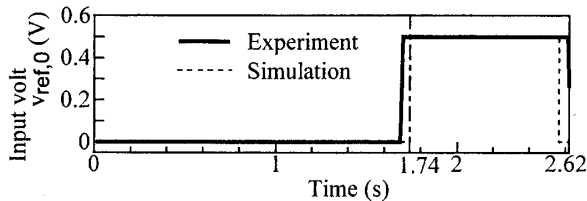
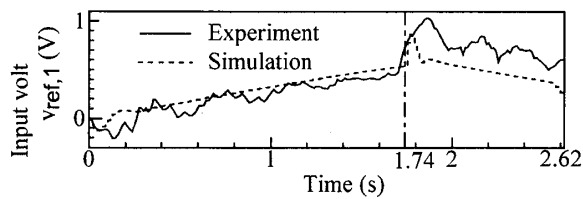
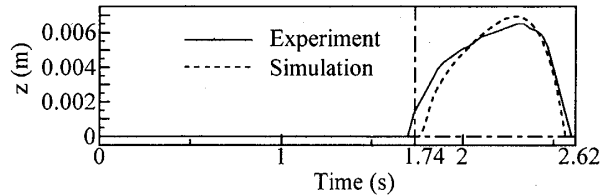
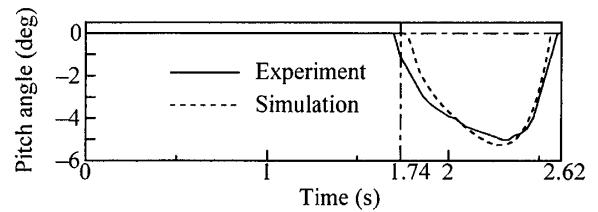


Fig. 17 Reaction with compensation

Fig. 18  $v_{ref,0}$  for compensationFig. 19  $v_{ref,1}$  for compensation

リンク 1 を図 16 に示すように運動させていくと、前節で示したように、図 17 より抗力  $f_R$  が零に近づいていることがわかる。その後、図 17 で  $f_R = 0$  となったときにリンク 1 が (20) 式に示す安定化動作のための運動を行っていることが図 16 より分かる。またそれと同時にリンク 0 にも安定化運動のための電圧  $v_{ref,0}$  が入力されていることが図 18 より分かる。なお、 $f_R = 0$  となったのは前節と同じ、実験では 1.7(s)、シミュレーションでは 1.74(s) であった。リンク 1 の回転方向を変化させるために入力トルクが急変していることが図 19 より分かり、リンク 0 とリンク 1 の動

Fig. 20 Position  $z$  with compensationFig. 21 Pitch angle  $\alpha$  with compensation

的干渉によって、シミュレーションでは抗力  $f_R$  が急変していることが図 17 より分かる。しかし実験結果ではその影響は表れていない。これは、図 19 に示すように実機ではモータがシミュレーションほど急激に回転方向を変化させることができないため、その動的影響が  $f_R$  の急激な変化として表れていないと考えられる。シミュレーションにおいても、図 19 の 1.8(s) 付近に見られるトルク変化の山が元の滑らかな変化に戻ったときに、図 17 の  $f_R$  も滑らかな変化に戻っている。その後、リンク 0 及び 1 を用いた安定化運動により、シミュレーションでは 2.56(s)、実機では 2.62(s) で再び両端接地の安定状態に復帰していることが図 17 の  $f_R$  が零から正になっていることよりわかり、このことが図 15 の (e) に示されている。さらに図 20、21 に示されるように、実験では 2.33(s)、シミュレーションでは 2.28(s) の時にリンク 0 の  $z$  の位置及び傾き角  $\alpha$  が最大になっており、この様子は図 15 の (d) に示されている。また各図において、実線と点線の結果は良く一致していることが分かる。

以上により、シミュレーション結果が実機の結果を表現できており、実機の特徴を考慮したモデリングの妥当性が示された。また、抗力を規範として転倒安定性判別が可能であることを示した。さらに、実験においても安定化運動により、ある不安定状態から安定状態へ復帰できることが示された。

## 6. 結 言

本論文では、路面からの抗力を規範とした移動マニピュレータの転倒問題に関する安定評価法及び安定化制御法を提案するために、抗力規範による移動マニピュレータの転倒安定判別と安定化運動の効果を実機により検討した。その結果、

- (1) 実験とシミュレーションの運動結果の比較を行い、シミュレーションが実機の運動を表現できていることを示し、モデリングの妥当性を示した。
  - (2) 抗力を規範とした転倒安定性判別が可能であることを実機でも示した。
  - (3) 実機においても安定化運動により、不安定状態から安定状態に復帰することができることを示した。
- 今後、抗力とモデルの動力学情報を用いて安定化運動のための各リンクの目標軌道を自動的に生成する手法について研究を行う予定である。

## References

- (1) Y.Yamamoto・X.Yun, "Modeling and Compensation of the Dynamic Interaction of a Mobile Manipulator", Proc. of Conf. on Robotics and Automation, (1994), 2187-2192.
- (2) 見浪・朝倉・藤原・神原, "PWS型移動マニピュレータの逆動力学補償法の提案", 機論 C, **61**-591 (1995), 4351-4358.
- (3) 栗栖・吉川, "移動マニピュレータの軌道計画と動的制御", 機論 C, **62**-596 (1996), 1488-1494.
- (4) 原・安井・有竹, "2移動体の協調走行の運動学的解析(第2報)", 日本ロボット学会誌, **14**-1(1996), 96-104.
- (5) K. Nagatani, S. Yuta, "Designing a behavior of a mobile robot equipped with a manipulaor to open and pass through a door", J. of Robotics and Autonomous Systems, (1996), 53-64.
- (6) O.Khatib, K.Yokoi, K.Chang, D.Ruspini, R.Holmberg, A.Casal, "Vehicle/Arm Coordination and Multiple Mobile Manipulator Decentralized Cooperation", Proceedings of IROS96, (1996), 546-553.
- (7) H.K. Lee, T. Takubo, H. Arai K.Tanie, "Control of Mobile Manipulators for Power Assist System", J. of Robotic Systems, (2000), 469-477.
- (8) 福田, 藤澤, 小菅, 新井, 室, 星野, 宮崎, 大坪, 上原, "マン・ロボット協調作業型マニピュレータ

の基礎的研究(第3報)", 機論 C, **58**-551(1992), 2152-2158.

- (9) 黄, 菅野, 加藤, "ヴィークル搭載型マニピュレータの安定化制御-安定規範とマニピュレータによる補償運動-", 計測自動制御学会論文集, **31**-7(1995), 861-870.
- (10) 日経メカニカル, 2000.6, No.549 (2000), 22-28.
- (11) 高西, "上体の運動によりモーメントを補償する2足歩行ロボット", 日本ロボット学会論文集, **11**-3(1993), 348-353.
- (12) 米田, 広瀬, "歩行機械の転倒安定性", 日本ロボット学会論文集, **14**-4(1996), 517-522.
- (13) M. Vukobratovic(加藤, 山下訳), "歩行ロボットと人工の足", 日刊工業新聞社, (1997).
- (14) 羽多野, 大住, 小原, 見浪, "抗力規範による移動マニピュレータの安定化制御に関する研究-第1報, モデルの導出とZMP規範との比較及び安定化運動の効果-", 日本ロボット学会論文集, **21**-1(2003), 63-71.
- (15) 見浪, 羽多野, 朝倉, "凹凸路面を走行する移動マニピュレータの研究-第1報, 拘束運動モデルの導出とシミュレーション-", 機論 C, **63**-615(1997), 265-272.