A Null Space Control of Two Wheels Driven Mobile Manipulator Using Passivity Theory

Tsuyoshi Shibata Student Member (Keio University, sbt@sum.sd.keio.ac.jp)

Toshiyuki Murakami Member (Keio University, mura@sd.keio.ac.jp)

Keywords: motion control, null space, passivity, redundant manipulator, mobile manipulator, work space observer

Recently, robot with redundant degree of freedom motion is utilized in various industrial fields. It is called a redundant manipulator. The control system of redundant manipulator can be divided into work space and null space. This paper focuses on null space motion control. Then, in this research, base of manipulator equips with two wheels driven mobile robot. In addition, it contains passive joint. Fig. 1 shows model of experimental two wheels driven mobile manipulator. Then, control strategy is that stabilizing of the robot system applies to work space observer based position control and null space control while keeping end-effector position. A control design of null space uses passivity based stabilizing. The validity of the proposed approach is verified by simulations and experiments of two wheels driven mobile manipulator.

The dynamics of the robot manipulator

$$M(q)\ddot{q} + \frac{1}{2}\dot{M}(q)\dot{q} + S(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

is given by the Lagrange equation, where $q \in R^n$ denotes a joint angle vector.

Using a work space observer, a joint acceleration reference $\ddot{q}^{ref}$ is written as follows.

$$\ddot{q}^{ref} = \ddot{q}_{work}^{ref} + \ddot{q}_{null}^{ref} \quad (2)$$

Eq. (2) means that it is possible to design work space controller and null space controller separately.

The work space carries out work space observer based position control. PD controller is shown in

$$\ddot{x}^{ref} = K_P^{work}(x^{cmd} - x) + K_D^{work}(\dot{x}^{cmd} - \dot{x}) \quad (3)$$

where $x \in R^m$ ($n > m$) denotes a position vector, and K_P^{work} , $K_D^{work} \in R^{m \times m}$ are positive definite diagonal matrix.

A design of control uses passivity based stability scheme. That is to say, it denotes construction of feedback control method such that a closed-loop system of robot dynamics becomes passive. Then, Let's consider a Lyapunov function candidate $V(\dot{q}, x)$, which is defined by

$$V(\dot{q}, x) = \frac{1}{2}\dot{q}^T M(q)\dot{q} + \frac{1}{2}(x^{cmd} - x)^T K_1(x^{cmd} - x). \quad (4)$$

Fig. 1. Model of experimental system

Here, the time differentiation of Eq. (4) along Eq. (1) is calculated as Eq. (5).

$$\dot{V}(\dot{q}, x) = -\dot{q}^T K_2 \dot{q} \leq 0, \quad (5)$$

where

$$\tau = J_{aco}^T K_1(x^{cmd} - x) + g(q) - K_2 \dot{q}. \quad (6)$$

Absolute posture of work space is compensated by work space observer. Null space disturbance is compensated by passivity based controller shown in Eq. (6). In addition, posture of the manipulator is not decided uniquely. Hence, if stability of null space on $\dot{q}$ and x is considered, the manipulator can keep stability of motion. The null space acceleration reference $\ddot{q}_{null}^{ref}$ is decided as follows.

$$\ddot{q}_{null}^{ref} = J_{un}^{-1} \{ J_{aco}^T K_1(x^{cmd} - x) + g(q) - K_2 \dot{q} \} \quad (7)$$

Experimental results of each responses are shown in Figs. 2–4.

In this paper, a control strategy of null space motion of the two wheels driven mobile manipulator was proposed. The validity of the proposed approach was confirmed by simulation and experimental results.

Fig. 2. Position of end-effector

Fig. 3. Theta

Fig. 4. Position of wheels

受動性理論を用いた2輪駆動型移動マニピュレータにおける 零空間制御

学生員 柴田 剛慶* 正員 村上 俊之*

A Null Space Control of Two Wheels Driven Mobile Manipulator Using Passivity Theory

Tsuyoshi Shibata*, Student Member, Toshiyuki Murakami*, Member

This paper describes a control strategy of null space motion of a two wheels driven mobile manipulator. Recently, robot is utilized in various industrial fields and it is preferable for the robot manipulator to have multiple degrees of freedom motion. Several studies of kinematics for null space motion have been proposed. However stability analysis of null space motion is not enough. Furthermore, these approaches apply to stable systems, but they do not apply unstable systems. Then, in this research, base of manipulator equips with two wheels driven mobile robot. This robot is called two wheels driven mobile manipulator, which becomes unstable system. In the proposed approach, a control design of null space uses passivity based stabilizing. A proposed controller is decided so that closed-loop system of robot dynamics satisfies passivity. This is passivity based control. Then, control strategy is that stabilizing of the robot system applies to work space observer based approach and null space control while keeping end-effector position. The validity of the proposed approach is verified by simulations and experiments of two wheels driven mobile manipulator.

キーワード：モーションコントロール, 零空間, 受動性, 冗長マニピュレータ, 移動マニピュレータ, 作業空間オブザーバ

Keywords: motion control, null space, passivity, redundant manipulator, mobile manipulator, work space observer

1. 序 論

近年, 様々な目的で用いられている産業用ロボットには多様な動き, すなわち, より多自由度性を有するものが要求されている。このような多自由度性を持つロボットアームは冗長マニピュレータと呼ばれている。冗長マニピュレータは人間の腕のような動きをすることができる(柔軟性, 融通性)利点があるため, 幅広い応用が期待される。例えば, 冗長性を用いてアームの先端位置を保ちながらマニピュレータの姿勢を変えることができる。これらの冗長システムの特徴を用いた冗長マニピュレータに関する研究は数多く提案されている⁽²⁾⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

冗長マニピュレータの制御系は, 作業空間と零空間に分けてそれぞれ設計することができる。作業空間とはマニピュレータの先端(手先効果器)位置の空間を意味し, 零空間とは先端位置に影響を与えない空間を指す。したがって, 零空間は先端位置の制御に対して非干渉に制御系が設計できる。本論文ではその零空間における運動制御(零空間制御とよ

ぶ)に焦点を当てる。零空間動作における運動学に関する研究は数多く提案されている⁽²⁾⁽⁵⁾。しかし, 零空間の安定解析に焦点を当てた研究は十分なされていない。更に, これらの研究は安定なロボットシステムに用いられており, 不安定要素を含むシステムに適用されているものもない。そこで本論文では, 図1に示すマニピュレータの土台に2輪駆動の移動ロボットを取り付けた2輪駆動型移動冗長マニピュレータを用いる。このロボットの特徴は直接制御できない受動関節を含んでおり, 倒立振子と等価な不安定なシステム(劣駆動システム)となっている。不安定要素を含みつつも, キャスターを要さない同ロボットは, 電動車椅子に代表されるキャスター付き2輪駆動移動車に比べ, 路面の変動に対してロバスタな走行が期待できる。一般的な移動マニピュレータの安定化制御についての研究は数多く報告されているが^{(9)~(12)}, 先端の位置を保ちながら零空間を利用してマニピュレータを安定化させる研究はない。本論文はマニピュレータの先端位置を維持しながら, 作業空間オブザーバに基づいた制御(位置制御)と零空間制御を用いて受動関節の動作を安定化させる制御系を構築する。更に, 車輪運動も零空間として考え, 安定化制御と軌道制御の融合を図る。提案手法では, 作業空間オブザーバにより手先効果器のロバスタな絶対位置制御を実現することがで

* 慶應義塾大学

〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

Keio University

3-14-1, Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223-8522

図1 2輪駆動型移動マニピュレータの実験機

Fig. 1. Experimental two wheels driven mobile manipulator.

きる。また、零空間には受動性理論に基づいた安定化コントローラを設計する。したがって、提案するコントローラは零空間動作が受動性を満たすように決められている。これを受動性に基づく制御という⁽¹⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。以下の2パターンのシミュレーションと実機による実験を通して提案手法の有効性を確認する。

(i) 安定化制御Ⅰ（零空間動作なし）

(ii) 安定化制御Ⅱ（零空間動作あり）

(i) は提案手法の静的安定性を確かめるものであり、(ii) は車輪の移動に対する2輪駆動型移動マニピュレータの安定性を検証するために行う。つまり、受動関節を含む劣駆動システムを冗長性を利用した零空間動作により安定化できることを示す。

本論文の構成を示す。第2章において冗長マニピュレータの動力学と運動学を示す。マニピュレータの動力学は有本の文献⁽¹⁾を参照されたい。同章では、冗長マニピュレータの制御系において作業空間と零空間の制御系を分ける座標変換を説明する。第3章において作業空間と零空間コントローラの設計手順を示す。更に、受動性に基づく零空間コントローラを提案する。第4、5章で提案手法の有効性を確認するために2輪駆動型移動マニピュレータにおいてシミュレーションと実験を行う。最後の第6章で結論を述べる。

2. 冗長マニピュレータの動力学と運動学

〈2・1〉 動力学 n 個のリンクを持つ多関節ロボットマニピュレータを考える。

手先効果器が自由に動くとき、マニピュレータの運動は一般化座標 $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_n)^T$ で記述されるラグランジュ方程式により支配されている。 $\mathbf{q}$ は関節角ベクトルである。このとき、ロボットマニピュレータの動力学方程式はラグランジュ方程式により

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2}\dot{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + S(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

と記述することができる。ただしラグランジアンは $L = K - U$ であり、 $K(\mathbf{q}) = \frac{1}{2}\dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$ は運動エネルギー、 $U(\mathbf{q})$ はポテンシャルエネルギーである。 $M(\mathbf{q})$ は慣性行列で対

称な正定行列である。更に、 $M(\mathbf{q})$ のそれぞれの項が定数、もしくは $\mathbf{q}$ の構成要素である三角関数なので、正の定数 γ_m と γ_M を用いて

$$\gamma_m I \leq M(\mathbf{q}) \leq \gamma_M I \quad (2)$$

と表すことができる。ただし、 I は $n \times n$ の単位行列である。 $\boldsymbol{\tau} \in R^n$ は関節部のアクチュエータにおいて発生する入力トルクのベクトルである。 $S(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ は歪対称行列で

$$S(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \left[\dot{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} - \left\{ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}}^T M(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \right\}^T \right] \quad (3)$$

である。また、 $S(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ は

$$\dot{\mathbf{q}}^T S(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (4)$$

を満足している。 $\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \frac{\partial U(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}}$ は重力ベクトルである。

最後に、ロボットマニピュレータは関節のトルク入力 $\boldsymbol{\tau}$ と角速度出力 $\dot{\mathbf{q}}$ との間で受動的である。この受動性関係はこのシステム理論における力学的エネルギー保存の法則と入出力関係の操作との橋渡しにおいて重要な役割を果たしている⁽¹⁾。

〈2・2〉 運動学 n 個のリンクを持つマニピュレータにおいて、作業空間の位置ベクトルを $\mathbf{x} \in R^m$ ($n > m$) とすると、キネマティクスは(5)~(7)式のように書ける。

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) \quad (5)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = J_{aco}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (6)$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = J_{aco}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \dot{J}_{aco}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (7)$$

ここで $J_{aco} \in R^{m \times n}$ はヤコビ行列であり、(8)式で表される。

$$J_{aco}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad (8)$$

(7) 式の逆運動学は

$$\ddot{\mathbf{q}} = J_{aco}^+(\ddot{\mathbf{x}} - \dot{J}_{aco}\dot{\mathbf{q}}) + (I - J_{aco}^+ J_{aco})\ddot{\boldsymbol{\phi}} \quad (9)$$

となる。 J_{aco}^+ はヤコビ行列の擬似逆行列であり、以下のよう定義されている。

$$J_{aco}^+ = J_{aco}^T (J_{aco} J_{aco}^T)^{-1} \quad (10)$$

(9) 式の右辺において、 $\ddot{\boldsymbol{\phi}}$ は零空間の入力ベクトルである。(9) 式を用いることで、関節空間と作業空間の加速度参照値は冗長マニピュレータの関節空間に分解される。

〈2・3〉 零空間における関節空間の加速度参照値 静力学と運動学で関節空間におけるマニピュレータの動力学を考えると、等価な運動方程式を作業空間において導き出すことができる。

提案手法において、関節の加速度参照値は

$$\ddot{\mathbf{q}}^{ref} = J_{aco}^+ \ddot{\mathbf{x}}^{ref} \quad (11)$$

で与える。ここで、上付文字 ref は運動指令値を意味する。関節の加速度参照値に基づいた零空間指令を考えるため

図2 作業空間オブザーバ

Fig. 2. Work space observer.

に、任意の関節加速度 $\ddot{q}_{null}^{ref}$ を (11) 式に加える。そのとき、関節加速度参照値 $\ddot{q}^{ref}$ は以下のように再定義される。

$$\ddot{q}^{ref} = J_{aco}^+ \ddot{x}^{ref} + \ddot{q}_{null}^{ref} \quad (12)$$

(7) 式において $\ddot{q} = \ddot{q}^{ref}$ とし、(7) 式と (12) 式を用いると、作業空間における加速度偏差 $\ddot{e}_{work}$ は以下のように与えられる。

$$\begin{aligned} \ddot{e}_{work} &= \ddot{x}^{ref} - \ddot{x} \\ &= -J_{aco} \ddot{q}_{null}^{ref} - J_{aco} \ddot{q} \end{aligned} \quad (13)$$

加速度偏差 $\ddot{e}_{work}$ が既知、もしくは $\hat{\ddot{x}}^{dis} = \ddot{e}_{work}$ として推定される場合、加速度偏差を作業空間において補償するため、推定加速度偏差をフィードバックする。そのとき、(12) 式は以下のように書き換えられる。実際、 $\ddot{e}_{work}$ は図2に示される作業空間オブザーバによって推定される。

$$\ddot{q}^{ref} = J_{aco}^+ (\ddot{x}^{ref} + \hat{\ddot{x}}^{dis}) + \ddot{q}_{null}^{ref} \quad (14)$$

$\hat{\ddot{x}}^{dis} = \ddot{e}_{work}$ とし、(13) 式を (14) 式に代入すると、

$$\begin{aligned} \ddot{q}^{ref} &= J_{aco}^+ (\ddot{x}^{ref} - J_{aco} \ddot{q}) + (I - J_{aco}^+ J_{aco}) \ddot{q}_{null}^{ref} \\ &\dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

を得ることができる。(15) 式は作業空間で推定された加速度偏差のフィードバックにより行列 $(I - J_{aco}^+ J_{aco})$ を計算することなく零空間動作を実現できることを示している。 $J_{aco}^+ (\ddot{x}^{ref} + \hat{\ddot{x}}^{dis})$ を $\ddot{q}_{work}^{ref}$ とすると、(14) 式は

$$\ddot{q}^{ref} = \ddot{q}_{work}^{ref} + \ddot{q}_{null}^{ref} \quad (16)$$

と書ける。(16) 式は作業空間コントローラと零空間コントローラを分けて設計することができることを意味している。したがって、作業空間オブザーバは作業空間における加速度偏差を補償し、零空間動作を理想的に実現するために用いられる。加速度偏差 $\hat{\ddot{x}}^{dis}$ が作業空間オブザーバによって推定されることは既に確かめられている⁽³⁾。

3. 作業空間と零空間のコントローラ設計

本章では、作業空間コントローラと零空間コントローラ

の設計手順を説明する。作業空間では、作業空間オブザーバに基づいた PD コントローラを用いる。作業空間オブザーバは作業空間における外乱 $\hat{\ddot{x}}^{dis}$ を抑制できる。したがって、作業空間と零空間は (16) 式で示される関節空間でそれぞれ分離されたコントローラ設計が可能となる。

〈3・1〉 作業空間コントローラ 作業空間は加速度制御系に基づいた位置制御を行う。その際、加速度指令値は

$$\begin{aligned} \ddot{x}^{ref} &= K_P^{work} (\mathbf{x}^{cmd} - \mathbf{x}) + K_D^{work} (\dot{\mathbf{x}}^{cmd} - \dot{\mathbf{x}}) \\ &\dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

で示される。ただし $\mathbf{x}^{cmd} \in R^m$ は位置指令値のベクトルであり、 K_P^{work} , $K_D^{work} \in R^{m \times m}$ は正定対角行列である。さらに作業空間オブザーバを用い、推定された外乱加速度 $\hat{\ddot{x}}^{dis}$ は図2に示すようにフィードバックされる。図2は作業空間オブザーバのブロック線図である⁽³⁾⁽⁴⁾。

〈3・2〉 零空間動作の安定解析 本節では、零空間コントローラ設計のための安定解析について述べる。作業空間における外乱は作業空間オブザーバによって補償でき安定性の向上が行えるが、零空間制御に対する外乱については補償されているとは限らない。ここで、(1) 式のダイナミクスを零空間における外乱と仮定し、受動性に基づいた安定化手法を用いてコントローラの設計を行う。つまり、ロボットのダイナミクス (1) 式を含めた閉ループ構造が受動性を満たすようなフィードバックコントローラを構築し、零空間の加速度参照値 $\ddot{q}_{null}^{ref}$ として適用する。受動性を満たしたコントローラは外乱抑制特性をもつので⁽⁷⁾⁽⁸⁾、零空間における外乱を補償することができる。ここで、以下に示す蓄積関数 $V(\dot{q}, \mathbf{x})$ を考える。

$$\begin{aligned} V(\dot{q}, \mathbf{x}) &= \frac{1}{2} \dot{q}^T M(\mathbf{q}) \dot{q} \\ &+ \frac{1}{2} (\mathbf{x}^{cmd} - \mathbf{x})^T K_1 (\mathbf{x}^{cmd} - \mathbf{x}) \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

ただし $K_1 \in R^{m \times m}$ は正定行列もしくは準正定行列で、任意に決めることができる。したがって、(18) 式は $\dot{q}$ と $\mathbf{x}$ に関して正定もしくは準正定な関数となる。ここで、(1) 式と (6) 式に沿った (18) 式の時間微分は (19) 式のように計算される。

$$\dot{V}(\dot{q}, \mathbf{x}) = \dot{q}^T \left\{ \tau - J_{aco}^T K_1 (\mathbf{x}^{cmd} - \mathbf{x}) - \mathbf{g}(\mathbf{q}) \right\} \dots\dots (19)$$

そこで、 τ を

$$\tau = J_{aco}^T K_1 (\mathbf{x}^{cmd} - \mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{v} \dots\dots\dots (20)$$

と置き換えると、(19) 式は

$$\dot{V}(\dot{q}, \mathbf{x}) = \dot{q}^T \mathbf{v} \dots\dots\dots (21)$$

となる。ここで、この $\mathbf{v} \in R^n$ は受動性を証明するための新しい入力ベクトルを意味する。したがって、出力を $\dot{q}$ 、入力を $\mathbf{v}$ とすると、(20) 式より (1) 式は受動的であることがわかる。ここで更に、 $\mathbf{v}$ を

$$v = -K_2 \dot{q} \dots \dots \dots (22)$$

と置くと、(21) 式は以下のように書き換えられる。

$$\dot{V}(\dot{q}, x) = -\dot{q}^T K_2 \dot{q} \leq 0 \dots \dots \dots (23)$$

ただし $K_2 \in R^{n \times n}$ は正定対角行列であり、任意に決めることができる。したがって、システムの平衡点 $(\dot{q}, x) = (0, x^{cmd})$ は入力

$$\tau = J_{aco}^T K_1 (x^{cmd} - x) + g(q) - K_2 \dot{q} \dots \dots \dots (24)$$

によって安定になることがわかる。しかし、蓄積関数(18)は $\dot{q}$ と q もしくは q と x については正定もしくは準正定ではない。 x と q の次元が等しいときの漸近安定性については証明されているが⁽¹⁾、マニピュレータは冗長性を持っているため姿勢は一意に決めることができない。したがって、 q について正定もしくは準正定とすることが難しい。このとき、加速度制御系が構成されているため、通常(24)式の右辺第3項の零空間ダンピングにより姿勢を安定化させることができるが、受動関節を含んでいる劣駆動システムのため、単純な零空間ダンピングのみでは作業空間をも安定化することができない。しかし、(24)式の右辺第1項を用いることにより、受動関節に起因する作業空間と零空間への影響を零空間で制御することができる。よって、零空間における $\dot{q}$ と x についての安定性さえ考慮されていれば、マニピュレータは安定性を保つことができると考えられる。このことは、蓄積関数(18)が準正定行列でも十分であることを示している。

〈3・3〉 零空間コントローラ 〈3・2〉節より零空間における加速度参照値、つまり零空間コントローラ $\ddot{q}_{null}^{ref}$ は以下の(25)式と決める。

$$\ddot{q}_{null}^{ref} = J_{vn}^{-1} \{ J_{aco}^T K_1 (x^{cmd} - x) + g(q) - K_2 \dot{q} \} \dots \dots (25)$$

ただし、 $J_{vn} = I \in R^{n \times n}$ は仮想慣性行列である。(25)式は作業空間における位置指令と零空間における安定性を考慮している。図3に提案手法全体のブロック線図を示す。

図3 提案手法の全体のブロック線図
Fig.3. Whole block diagram of proposed method.

4. シミュレーション

〈4・1〉 シミュレーション設定 本章では、提案する手法を確認するためにシミュレーションを行う。図4に2輪駆動型移動マニピュレータの実機のモデルを、表1に物理パラメータを示す。この物理パラメータは実機に則したものとなっている。車輪の回転角 q_0 を含んだ関節角ベクトルを $q = (q_0, q_1, q_2, q_3, q_4)^T$ と定義する。また $x = (x, y, x')^T$ は位置ベクトルで、 x' は車輪の移動距離を意味している。つまり、車輪の移動を零空間動作に含めて考える。ここで q_1 (リンク1)は受動関節であり、 R は車輪の半径である。図4に示す2輪駆動型移動マニピュレータのダイナミクスについては、ラグランジュ方程式を用いることにより、容易に計算することができる。

以下に示す2つのパターンのシミュレーションを行う。

- (i) 安定化制御Ⅰ(零空間動作なし)
- (ii) 安定化制御Ⅱ(零空間動作あり)

最初に特異姿勢を回避するため角度制御を行い、先端位置の位置制御により初期姿勢に移行する。その結果、マニピュレータの先端と移動ロボットの初期位置は以下のようになる。

$$x(0) = \begin{bmatrix} 0.14 & 0.86 & G_x \end{bmatrix}^T$$

G_x はマニピュレータの重心位置の x 座標であり、以下のよう計算される。

表1 移動マニピュレータに関するパラメータ

Table 1. Parameters of mobile manipulator.

	length [m]		mass [kg]
R	0.20	m_0	8.4
l_1	0.11	m_1	12.7
l_2	0.20	m_2	1.02
l_3	0.20	m_3	0.72
l_4	0.18	m_4	0.22

図4 2輪駆動型移動マニピュレータのモデル
Fig.4. Model of two wheels driven mobile manipulator.

$$G_x = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \dots\dots\dots (26)$$

$$a_1 = m_1 l_1 \sin q_1, \quad a_2 = m_2 l_2 \sin(q_1 + q_2),$$

$$a_3 = m_3 l_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3),$$

$$a_4 = m_4 l_4 \sin(q_1 + q_2 + q_3 + q_4)$$

このとき提案手法を投入するまで、作業空間オブザーバ、零空間の速度フィードバックと移動ロボットの重心位置への移動によりマニピュレータの初期姿勢を安定化する。時間ごとのシミュレーション手順は以下の通りである。

- 0～1.0 s：特異姿勢を回避するための角度制御
- 1.0～5.0 s：移動ロボットと手先位置の位置制御（初期姿勢 $\mathbf{x}(0)$ ）
- 5.0 s～：提案手法

ただし、シミュレーションにおいて、受動関節と車輪間の粘性摩擦は考えていない。

〈4・2〉 シミュレーション 1：安定化制御 I シミュレーション 1 は提案手法の静的安定性を確認するために行う。先端位置と移動ロボットの位置指令は

$$\mathbf{x}^{cmd} = \begin{bmatrix} 0.14 & 0.86 & G_x \end{bmatrix}^T, \\ \dot{\mathbf{x}}^{cmd} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}^T$$

である。作業空間コントローラは PD コントローラ (17) を用いる。 K_P^{work} と K_D^{work} は以下ように決める。

$$K_P^{work} = \text{diag}(900, 900, 0), \quad K_D^{work} = \text{diag}(60, 60, 0)$$

作業空間オブザーバゲイン g_w は 50 rad/s とする。上記の PD コントローラゲインは車輪への入力を受動性に基づく零空間コントローラのみであることを意味している。零空間コントローラ (25) 式において、受動関節であるリンク 1 は制御することができないのでゲイン行列 K_1 と K_2 は

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad K_2 = \text{diag}(60, 0, 60, 60, 60)$$

とする。図 5 と図 6 にそれぞれ先端位置と角度の応答を示す。

〈4・3〉 シミュレーション 2：安定化制御 II シミュレーション 2 は車輪の移動に対する移動マニピュレータの安定性を確認するために行う。先端位置と移動ロボットの位置指令は

$$\mathbf{x}^{cmd} = \begin{bmatrix} 0.14 & 0.86 & x^{cmd} \end{bmatrix}^T, \\ \dot{\mathbf{x}}^{cmd} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}^T$$

である。このとき、移動ロボットの移動距離指令 x^{cmd} を 0.050 m としてシミュレーションを行う。作業空間コントローラは PD コントローラ (17) を用いる。 K_P^{work} と K_D^{work} は以下ように決める。

$$K_P^{work} = \text{diag}(900, 900, 200), \quad K_D^{work} = \text{diag}(60, 60, 60)$$

図 5 位置応答

Fig. 5. Position responses.

図 6 角度応答

Fig. 6. Theta responses.

図 7 先端の位置応答

Fig. 7. Position responses of end-effector.

図 8 角度応答

Fig. 8. Theta response.

作業空間オブザーバゲイン g_w は 50 rad/s とする。零空間コントローラ (25) において、受動関節であるリンク 1 は制御することができないのでゲイン行列 K_1 と K_2 は

図 9 車輪の位置応答

Fig. 9. Position response of wheels.

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad K_2 = \text{diag}(60, 0, 60, 60, 60, 60)$$

とする。図 7 と図 8 はそれぞれ先端位置と角度の応答を示している。また、車輪の位置応答を図 9 に示す。

〈4・4〉 シミュレーション結果と考察 すべてのシミュレーション結果から、受動関節を含んだ移動マニピュレータは倒れることなく安定化することができ、先端位置はそれぞれの指令値に収束した。また、シミュレーション 2 においても車輪の移動に対する安定性を示すことができた。これらの結果から、提案手法の有効性が確認された。

5. 実験

〈5・1〉 実験内容 本章では、シミュレーションと同様の条件で実機による実験を行う。制御することのできない受動関節 q_1 の角度は傾斜センサによって測定する。

最初に特異姿勢を回避するため角度制御を行い、先端位置の位置制御により初期姿勢に移行する。その結果、マニピュレータの先端と移動ロボットの初期位置は以下のようになる。

$$\mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} 0.14 & 0.86 & G_x \end{bmatrix}^T$$

重心の x 座標 G_x は (26) 式により計算される。このとき提案手法を投入するまで、作業空間オブザーバ、零空間の速度フィードバックと移動ロボットの重心位置への移動によりマニピュレータの初期姿勢を安定化する。また、実験結果のグラフの横軸は初期姿勢に移行してから時間経過を表示している。

〈5・2〉 実験 1: 安定化制御 I 実験 1 はシミュレーション 1 と同様に提案手法の静的安定性を確認するために行う。先端位置と移動ロボットの位置指令は

$$\mathbf{x}^{cmd} = \begin{bmatrix} 0.14 & 0.86 & G_x \end{bmatrix}^T, \\ \dot{\mathbf{x}}^{cmd} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}^T$$

である。作業空間コントローラ (17) の PD ゲイン、作業空間オブザーバゲイン g_w 、零空間コントローラ (25) のゲイン K_1 , K_2 はシミュレーション 1 と同じ値を用いた。

図 10 位置応答

Fig. 10. Position responses.

図 11 角度応答

Fig. 11. Theta responses.

ここで、人間による外乱入力を与えたときの実験結果を示す。外乱入力はリンク 1 (受動関節) を押すことにより加えた。このとき、10.4s のときに提案手法を適用し、人の入力による外乱を 33.0s のときに加えた。図 10 と図 11 にそれぞれの先端位置と角度の応答を示す。

〈5・3〉 実験 2: 安定化制御 II 実験 2 はシミュレーション 2 と同様に車輪の移動に対する移動マニピュレータの安定性を確認するために行う。先端位置と移動ロボットの位置指令は

$$\mathbf{x}^{cmd} = \begin{bmatrix} 0.14 & 0.86 & x^{cmd} \end{bmatrix}^T, \\ \dot{\mathbf{x}}^{cmd} = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}^T$$

である。このとき、3 パターンの移動ロボットの移動距離指令 x^{cmd} に対して実験を行う。

(Case 2-1) $x^{cmd} = 0.010$ [m]

(Case 2-2) $x^{cmd} = 0.015$ [m]

(Case 2-3) $x^{cmd} = 0.020$ [m]

x^{cmd} は先端位置を維持したまま零空間動作として可能な範囲で決定している。作業空間コントローラは PD コントローラ (17) を用いる。 K_P^{work} と K_D^{work} は以下のように与える。

$$K_P^{work} = \text{diag}(900, 900, k_p^{mobile}), \\ K_D^{work} = \text{diag}(60, 60, 60)$$

ここで Case 2-1 のときは $k_p^{mobile} = 200$, Case 2-2 のときは $k_p^{mobile} = 100$, Case 2-3 のときは $k_p^{mobile} = 20$ とした。作業空間オブザーバゲイン g_w 、零空間コントローラ (25) のゲイン K_1 , K_2 はシミュレーション 2 と同じ値を用いた。

図 12 先端の位置応答 (Case 2-1)

Fig. 12. Position responses of end-effector (Case 2-1).

図 16 角度応答 (Case 2-2)

Fig. 16. Theta responses (Case 2-2).

図 13 角度応答 (Case 2-1)

Fig. 13. Theta responses (Case 2-1).

図 17 車輪の位置応答 (Case 2-2)

Fig. 17. Position response of wheels (Case 2-2).

図 14 車輪の位置応答 (Case 2-1)

Fig. 14. Position response of wheels (Case 2-1).

図 18 先端の位置応答 (Case 2-3)

Fig. 18. Position responses of end-effector (Case 2-3).

図 15 先端の位置応答 (Case 2-2)

Fig. 15. Position responses of end-effector (Case 2-2).

Case 2-1 は, 7.1 s のときに提案手法を適用した。図 12～図 14 に Case 2-1 のときのそれぞれの先端位置, 角度, 車輪の応答を示す。Case 2-2 は, 9.9 s のときに提案手法を適用した。図 15～図 17 に Case 2-2 のときのそれぞれの先端位置, 角度, 車輪の応答を示す。Case 2-3 は, 18.4 s のと

きに提案手法を適用した。図 18～図 20 に Case 2-3 のときのそれぞれの先端位置, 角度, 車輪の応答を示す。

〈5・4〉 実験結果と検討 すべての実験結果から, 受動関節を含んだ移動マニピュレータは倒れることなく安定化することができ, 先端位置はそれぞれの指令値に収束した。実験 1 から外乱による影響を受けなかったことより, 提案手法は外乱抑制に効果的であることがわかった。また, 実験 2 においても車輪の移動に対する安定性を示すことができた。これらの結果から, 提案手法の有効性を示すことができた。しかし, 図 14, 図 17, 図 20 からわかるように実験 2 では車輪の移動について予想外の過渡応答がみられた。これは, 車輪の移動を零空間動作で実現しているためであり, 零空間制御では粘性摩擦に関係する過渡応答を十分に抑制することができないからである。同点は, 車輪のなめらかな移動を達成するためには解決すべき問題であり, 将来的な課題の 1 つとしたい。

図 19 角度応答 (Case 2-3)

Fig. 19. Theta responses (Case 2-3).

図 20 車輪の位置応答 (Case 2-3)

Fig. 20. Position response of wheels (Case 2-3).

6. 結 論

本論文では、受動関節を含む 2 輪駆動型移動マニピュレータの零空間動作における制御系設計を提案した。本研究の目的は移動マニピュレータの先端位置を保ちながら安定化させることと、先端位置を保ちながら車輪を目標位置まで移動することである。この不安定なシステムの安定化には作業空間オブザーバに基づく手法（位置制御）と零空間制御を適用した。零空間の制御系は受動性に基づいたコントローラを設計し、シミュレーションと実験により提案手法の有効性を確認した。本論文は、受動性に基づく手法の零空間の制御系設計への実現可能性を示しており、更に構造的に不安定要素を含む冗長システムに対しても有効であることを示している。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省平成 15 年度 21 世紀 COE プログラム「知能化から生命化へのシステムデザイン」によるものであることを記し、謝意を表す。

最後に、本論文を構成するに当たって慶應義塾大学・志水清孝名誉教授に貴重な御助言をいただいたことに深く感謝の意を述べる。

(平成 18 年 11 月 6 日受付, 平成 19 年 6 月 6 日再受付)

文 献

- (1) S. Arimoto: "Control Theory of Non-linear Mechanical Systems", *Oxford Science Publications* (1996)
- (2) O. Khatib: "A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot

Manipulators: The Operational Space Formulation", *IEEE Trans. Robot Automat.*, Vol. RA-3, pp.43–53 (1987)

- (3) T. Murakami, K. Kahlen, and R.W. De Doncker: "Robust Motion Control Based on Projection Plane in Redundant Manipulator", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.49, No.1, pp.248–255 (2002)
- (4) T. Murakami and K. Ohnishi: "A Study of Stability and Workspace Decoupling Control Based on Robust Control in Multi-Degrees-of-Freedom Robot", *IEEJ Trans. IA*, Vol.113-D, No.5, pp.639–646 (1993-5) (in Japanese)
村上俊之・大西公平:「ロボast制御に基づいた多自由度ロボットの安定性および作業空間での非干渉制御に関する一考察」, 電学論 D, **113**, 5, pp.639–646 (1993-5)
- (5) N. Oda, T. Murakami, and K. Ohnishi: "A Robust Control Strategy of Redundant Manipulator by Workspace Observer", *IEEJ Trans. IA*, Vol.115-D, No.8, pp.991–998 (1995-8) (in Japanese)
小田尚樹・村上俊之・大西公平:「作業空間オブザーバに基づく冗長マニピュレータのロボast制御」, 電学論 D, **115**, 8, pp.991–998 (1995-8)
- (6) M.W. Spong, F.L. Lewis, and C.T. Abdallah: "Robot Control -Dynamics, Motion Planning, and Analysis", *IEEE PRESS* (1992)
- (7) T. Shen and C. Ishii: "Robust Control Theory for Nonlinear Systems Based on Dissipativity", *Advanced Academic Series*, No.1, SICE (2002) (in Japanese)
申 鉄龍・石井千春:「消散性に基づく非線形系のロボast制御—安定性と外乱抑制—」, 先端学術シリーズ No.1, 計測自動制御学会 (2002)
- (8) A. Van der Schaft: " L_2 -Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control", *Springer* (1996)
- (9) Q. Huang, S. Sugano, and I. Kato: "Stability Control for A Mobile Manipulator Using A Potential Method", *Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference*, Vol.2, pp.839–846 (1994)
- (10) Q. Huang, S. Sugano, and I. Kato: "Stability Control for A Vehicle-Mounted Manipulator—Stability Evaluation Criteria and Manipulator Compensatory Motion—", *Trans of SICE*, Vol.31, No.7, pp.861–870 (1995-7) (in Japanese)
黄 強・菅野重樹・加藤一郎:「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, pp.861–870 (1995-7)
- (11) M. Hatano, T. Ohsumi, H. Obara, and M. Minami: "Stability Control for Mobile Manipulators Using Criteria Based on Reaction—1st Report, Modeling, Comparison with ZMP Criteria and Effects of Stability Compensation—", *Trans. of RSJ*, Vol.21, No.1, pp.63–71 (2003-1) (in Japanese)
羽多野正俊・大住 剛・小原治樹・見浪 護:「抗力規範による移動マニピュレータの安定化制御—第 1 報, モデルの導出, ZMP 規範との比較および安定化運度の効果—」, 日本ロボット学会誌, **21**, 1, pp.63–71 (2003-1)
- (12) T. Shiozaki and T. Murakami: "Posture Control of Mobile Robot by Hand-Eye System Considering Nonholonomic Constraints", in *Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications*, pp.215–220 (2005)

柴 田 剛 慶 (学生員) 1980 年 8 月 5 日生。2003 年 3 月慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科卒業。2005 年 3 月同大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻修士課程修了。同年 4 月同大学大学院同専攻後期博士課程入学。現在, ロボティクス, モーションコントロール, 受動性理論の研究に従事。

村 上 俊 之 (正員) 1965 年 10 月 5 日生。1993 年 3 月慶應義塾大学大学院電気工学専攻博士課程修了。現在, 同大学理工学部システムデザイン工学科教授。工学博士。