研　究　解　説

非ホロノミック超柔軟マニピュレータ

Nonholonomic Super-Flexible Manipulators

鈴　木　高　宏*

Takahiro SUZUKI

1. 非ホロノミックシステム

非ホロノミックシステムは，ここ数年来，ロボットや制御工学において注目を集めている分野の一つである[1]．「ホロノミック」とは，系の拘束条件が(1.1)式のように一般化座標（位置，姿勢，関節角など）および時間のみで表される等式条件となることを言う．（なお，物理学の教科書においては「ホロノーム」なる訳で載っていることもある．）

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, t) = 0 \quad \cdots\cdots (1.1)$$

「非ホロノミック」とは，「ホロノミックでない」ことを言い，その例としては，器壁で反射する気体分子の運動[2]のように拘束式が不等式で表されるものの他に，拘束式に一般化座標の微係数，すなわち速度や加速度の次元をもつ変数が含まれる系が挙げられる．特にロボットや制御の分野では，移動ロボット[3]や宇宙ロボット[4]の運動，ロボットハンドによる把持物体のあやつり問題[5]などにおいて，拘束条件が速度や加速度を含む不可積分な等式拘束となり，一般的な制御方法が用いることができず，ゆえに非ホロノミック系の制御に関する研究が盛んに行われるようになった．

このような非ホロノミック系に関する研究は，その拘束式の形，また制御の側面からは状態方程式の形から，それぞれ2つのクラスに分けることができる．まず拘束式の形では，(1.2)式のように速度までを含み不可積分な拘束

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}, t) = 0 \quad \cdots\cdots (1.2)$$

を受ける一階非ホロノミック系と，(1.3)式のように加速度までを含む不可積分な拘束

$$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, \dot{\boldsymbol{x}}, \ddot{\boldsymbol{x}}, t) = 0 \quad \cdots\cdots (1.3)$$

を受ける二階非ホロノミック系に分けられる．また，制御の面からは，系の状態方程式表現において

$$\dot{\boldsymbol{z}} = \boldsymbol{G}(\boldsymbol{z})\boldsymbol{u} \quad \cdots\cdots (1.4)$$

のようなドリフト項（入力に直接影響されない項）を持たない対称アフィン形式となる系と，

$$\dot{\boldsymbol{z}} = \boldsymbol{g}_0(\boldsymbol{z}) + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{z})\boldsymbol{u} \quad \cdots\cdots (1.5)$$

のようにドリフト項を持つ非対称アフィン系に分けられる．この両者は密接な関係があり，力学系においては，一階非ホロノミック系は一般的に対称アフィン形式に変換することができ，二階非ホロノミック系は一般的にドリフト項を持つ非対称アフィン系となることが知られている[6]．車両型を始めとして，ユニサイクル（一輪車），ファイアトラック，トレーラなどの平面移動系や，水中や空中などにおける3次元空間内での移動体の運動，自由飛行型宇宙ロボットの姿勢変更を含む運動計画問題，手指による物体のあやつりなど3次元物体と平面，または3次元物体同士の接触問題などは，その拘束は運動学的な拘束式で表され，よって一般に一階非ホロノミックとなる．一方，自由関節を持つマニピュレータアームや，テザー衛星（主衛星もしくはスペースシャトルや宇宙ステーションなどからテザーと呼ばれる「ひも」で結ばれた子衛星）のような動力学的な拘束を受ける系においては，拘束式が二階非ホロノミックとなる．なお，振子系や根元が自由関節で途中の関節が駆動されるマニピュレータアームなどは，動力学的な拘束式（2階の微分方程式で表される）が時間積分を持ち，一階非ホロノミックな系になることが分かっている．

移動ロボットや宇宙ロボットなどにおける問題から，一階非ホロノミック系の制御については既に多くの研究がな

*東京大学生産技術研究所　情報・システム大部門

されている．一階非ホロノミック系については，滑らかで時不変な状態フィードバック則によって安定化することができないというBrockettの法則[7]が知られている．よって，一階非ホロノミック系の制御法としては，それを回避するために，不連続なフィードバック則[8]や時変なフィードバック則[9]，時間軸状態制御系による制御[10]など様々な方法が考えられており，またそれらの方法によって指数安定化が可能であることが示されている[11]．一方，二階非ホロノミック系については，可制御性を議論する事さえ困難であり，未だ多くの課題が山積している．

筆者は二階非ホロノミック系の代表的な一例である，自由関節を持つマニピュレータアームの制御についてこれまで研究を行ってきている．非ホロノミック系の大きな特長の一つに，劣駆動（underactuated）性が挙げられる．これは，系の持つ一般化座標の数に比して，駆動可能な次元が少ないことを意味するが，ロボットで言えば，例えば（独立な）関節の数に比べてモータの数が少ない，という意味である．すなわち，系の全一般化座標$\boldsymbol{x}$を$\boldsymbol{x}=(\boldsymbol{x}_a^T, \boldsymbol{x}_u^T)^T$のように，入力により直接駆動可能な座標$x_a$と直接駆動不可能な座標$\boldsymbol{x}_u$に分ける．非ホロノミック拘束により，$\boldsymbol{x}_a$の空間において始点と終点が同じでも経路が異なると，$\boldsymbol{x}_u$空間においてその積分結果は異なる．よって，$\boldsymbol{x}_a$空間で閉ループとなるような入力に対しては，$\boldsymbol{x}_a$空間では入力前と同じ座標に戻りながら，$\boldsymbol{x}_u$空間でのみ座標を変化させることができる．(1.4)，(1.5)式において$\boldsymbol{G}(z)=(\boldsymbol{g}_1(z),\cdots,\boldsymbol{g}_m(z))$, $\boldsymbol{u}=(u_1,\cdots,u_m)^T$とする．$\boldsymbol{G}(z)$の各列同士によるリー括弧演算（Lie bracket algebra）

$$[\boldsymbol{g}_k(z),\boldsymbol{g}_l(z)] \overset{\text{def}}{=} \frac{\partial \boldsymbol{g}_l(z)}{\partial z}\boldsymbol{g}_k(z)-\frac{\partial \boldsymbol{g}_k(z)}{\partial z}\boldsymbol{g}_l(z) \cdots\cdots (1.6)$$

は$+\delta u_k \to +\delta u_l \to -\delta u_k \to -\delta u_l$なる微小な閉ループ入力によるzの変化を表している．ホロノミック系においては，リー括弧の値は常に0となるが，非ホロノミック系においては値を持つため，閉ループ入力によって$\boldsymbol{u}'=[\boldsymbol{g}_j,\boldsymbol{g}_k]$なる「第三の入力」が与えられ，よって入力の数より多くの次元を駆動することができる．

このような非ホロノミック系の劣駆動系としての性質に注目した応用例として，非ホロノミックマニピュレータ[12]が挙げられる．これは，根元の2つのモータのみで任意の数の関節を制御可能な劣駆動ロボットシステムである．非ホロノミックマニピュレータは，トレーラ型移動ロボットと同型となるチェインドフォーム（chained form）なる力学構造を有するシステムであり，すなわち一階非ホロノミック系である．一階非ホロノミック系の制御には最低2つの駆動入力（モータ）が必要であることが知られている．これは，(1.6)式のリー括弧を形成するには，(1.4)式より$\boldsymbol{G}(z)$の列が2列以上，すなわち$\boldsymbol{u}$が2次元以上必要であることから分かる．

一方，自由関節マニピュレータ等の二階非ホロノミック系は，1つのモータでも多くの次元を制御できる可能性を持ち，より高い（低い，と言うべきか）劣駆動性を有している．これは，(1.5)式からuが1次元であっても，ドリフト項$\boldsymbol{g}_0(z)$を用いてリー括弧を作ることが可能なためである．しかし，入力は正負両方の値を取ることができるのに対し，ドリフト項は時間方向のみにしか作用させられないため，入力の組み合わせによって動き得る空間（distribution space）は全方向を張ることができず，そのために可制御性を証明することができない．二階非ホロノミック系の可制御性の証明については，リー括弧による局所可到達条件と，Sussmannによる局所可制御性の十分条件[13]が挙げられるが，自由関節マニピュレータなどの系においては，前者は満たされても後者は満たされない例が多い．ただし，後者はあくまで十分条件であり，条件が満たされないからと言って可制御でないとは言えない．事実，水平2軸自由関節マニピュレータについて任意の2点間の位置決め制御が実現されており[14]，また駆動関節を2つ持つ水平3軸自由関節マニピュレータについては構成的手法により可制御性も証明されている[15]．さらには，駆動関節を2つ，自由関節を2つ持つマニピュレータ[16]や，一つの自由関節を持つ任意関節数の劣駆動マニピュレータ[17]の可制御性についても議論がなされている．

2．超柔軟ロボットシステム

宇宙構造物や宇宙ロボットなどは，その打ち上げにかかるコストの低減化のために，剛性よりも軽量化が優先され，そのため外乱等により弾性振動が発生する．柔軟多体系の制御に関する研究は，そうした要求から行われてきた．柔軟系は，そのモデル化において本来は無限次元を有する分布定数系とされるべきだが，しかしそれに対する制御器の設計や実装が困難であり，系や制御器の有限次元近似を行うなどの方法が取られてきた．しかし両者共に制御器の次元が大きくなるなどの困難さがある．ロボットの分野においては，柔軟マニピュレータの制御は基本的にそのアームの先端の位置・姿勢のみが注目対象となるため，そのような大きな次元の制御器を構成する必要性は少なく，よってリンクや関節に弾性・粘性を仮定してモデル化を行う方法が取られ，十分な成果を上げている[18]．

柔軟マニピュレータに関する研究は，リンクに弾性を仮定したものと，関節に弾性を仮定したものとの二つに大別されるが，どちらもその弾性による復元力の存在が欠かせない．一方，「柔軟」という言葉は必ずしも弾性（バネ）のみを意味する訳ではなく，紙，布，生体組織など柔らかく変形しやすいものを指すのが日常的である．特に，将来ロボットがより身近な存在となり，家庭環境など人間との

共存度が高い環境における使用が考えられた場合，柔軟物を取扱うことは必要不可欠であり，またロボット自体も根本的に「柔らかさ」を求められるのは必然である．そのため，近年ロボットにおける「柔軟性」に関連した研究は非常に盛んになってきている[19) 20)]．ロボットにおいて柔軟さを扱った研究は，剛なロボットで紙，布，食品，生体もしくは生体組織などの柔軟な対象物を扱うもの[21)]，生物などの柔軟な動きを多関節機構で模倣しようというもの[22)]，アクチュエータ自体を柔軟材料で構築しようというもの[23)]，など様々な形があるが，ここではロボットの力学構造自体に柔軟性を導入し，柔軟性を考慮し，また利用した制御を行っている研究を紹介する．「柔軟」を表す言葉として，“soft”，“flexible”，“deformable” などが挙げられるが，上記に挙げたような広範な意味においては，しばしば “soft” が用いられるのに対し，特に力学構造として柔軟なロボットシステムを表すには “flexible” を用いるのが適切である．(なお，“deformable”＝「変形」であるのでロボット自体に用いると異なった意味となりうる.）しかし，上記のように従来の柔軟マニピュレータ研究における文脈では，「柔軟（flexible)」＝「弾性を有する」であることから，ここでは必ずしも弾性を仮定しない柔軟力学構造を持つロボット（マニピュレータ）については，「超柔軟（super-flexible)」と呼ぶことにする．

超柔軟なロボットシステムの一つの例として，ロボットの一部に紐状の可変長な要素を持ち，エンドエフェクタ（ハンド）の到達領域を飛躍的に拡大させる，キャスティングマニピュレータが提案されている[24)]．紐（string）という柔軟要素を用い，釣りにおけるキャスティングのように紐の先のグリッパを投射することで，遠くの目標物体の捕獲を可能としている．ただし，力学的には紐の質量・慣性を十分小さいと見なし，紐の張力が0の時にはグリッパが自由運動するとして，張力が存在する時には紐を剛体として考えているため，両者の切替えがある他は柔軟系としての力学的考察には踏み入っていないが，コンパクトな機構で大きな捕獲可能領域を持つマニピュレータ機構を提案した点において，超柔軟ロボットシステムの大きな応用可能性の一つを示していると言える．これに関連した研究としては，宇宙ロボット研究におけるテザー衛星に関する研究[25)]が挙げられる．第1章で説明したように，宇宙ロボットやテザー衛星は非ホロノミックシステムの代表的な一例であり，また，冗長マニピュレータ，柔軟マニピュレータ，自由関節マニピュレータ，宇宙ロボット，作業移動ロボットなどを柔軟ベースロボットとして統一的に扱える[26)]ことからも，超柔軟ロボットシステムと非ホロノミック系の研究の関連性は高いことが分かる．

次章では，超柔軟ロボットシステムの一例として，筆者が行っている研究を紹介する．

3．非ホロノミック超柔軟マニピュレータ

3.1 超柔軟系と自由関節系

前章で述べたように，従来柔軟マニピュレータにおいてはリンクや関節に弾性を仮定しているが，筆者はその弾性が0もしくは非常に小さいものとした「超」柔軟マニピュレータを提案している[27)]．非弾性的なリンクをモデル化することは困難だが，関節が非弾性的な構造は，自由関節もしくは摩擦を有する受動関節により連結される多リンク系をそのモデルと考えることができる．通常の柔軟系はその弾性ポテンシャルが最小となる点が平衡点であり，そこへの安定化が目的となる．言い換えれば，その唯一の平衡点にしか制御できない．一方，超柔軟系ではそのように平衡点が限定されず，様々なconfigurationへの制御の可能性があるのが利点である．つまりアクチュエータの数より多くの多自由度性・劣駆動（underactuated）性を持つと言ってよいだろう．

第1章でも述べたが，自由関節で連結された多リンク系は，その拘束条件が2階非ホロノミックとなり，少ない数のモータで多くの関節を制御できる可能性を持つ劣駆動系であることが知られている[28)]．筆者はこれまでに自由関節系の制御について，特に根元の駆動関節一つのみで多関節を制御することに主眼を置いて研究を行ってきた[29), 30), 31), 32)]．本研究では，そのような自由関節系の制御について考察することにより，超柔軟系の制御戦略の提案を行うことを目的とする．なお，「自由関節（free joint)」は弾性のみならず摩擦も全くない関節として，文献によっては摩擦のあるものは「受動関節（passive joint)」または「非駆動関節（unactuated joint)」として区別していることが多いが，完全に無摩擦な自由関節は理想的にしか存在しなく，微小でも常に摩擦は存在する．よって，ここでは無摩擦な自由関節も摩擦を有する受動関節も共に「自由関節」と呼んでいる．

3.2 摩擦を有する自由関節多リンク系

摩擦を有する自由関節により連結された多関節リンク系の動力学方程式は以下のように書き表される．

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{c}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\mu}(\dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.1)$$

ここで，$\boldsymbol{\mu}$は摩擦項を表し，またその摩擦は粘性的であるとする．第1関節のみ駆動され他は全て自由関節とする．部分線形化[33)]により(3.1)式は次式のように直せる．

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_u = \boldsymbol{M}_u^{-1}(-\boldsymbol{\mu}_u(\dot{\boldsymbol{\theta}}) - \boldsymbol{c}_{uu}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}_u) - \boldsymbol{c}_{ua}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}_a) - \boldsymbol{M}_{ua}\ddot{\boldsymbol{\theta}}_a) \quad \cdots\cdots\cdots (3.2)$$

ここで，添字uは(3.2)式の各要素を駆動関節および非駆

動な自由関節について区分した際の自由関節に関する項を表す．

ここで簡単のためFig. 1のような1駆動2自由の3R自由関節マニピュレータについて考察する．無摩擦を仮定した自由関節系に第1関節が周期的となるような入力を施すと，その挙動が保存的となることはその平均化系[34]から定義される次式のエネルギ的量Eから示される[31]．

$$E = E_k(\boldsymbol{\theta}_u, \dot{\boldsymbol{\theta}}_u) + E_p(\boldsymbol{\theta}_u) \cdots\cdots\cdots\cdots (3.3)$$

ここで，

$$E_k = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\theta}}_u^T \boldsymbol{M}_u \dot{\boldsymbol{\theta}}_u, \quad E_p = \frac{1}{2}\varepsilon^2 \boldsymbol{\zeta}^T(\boldsymbol{\theta}_u)\boldsymbol{M}_u \boldsymbol{\zeta}(\boldsymbol{\theta}_u)$$

はそれぞれ運動エネルギ的項，ポテンシャル的項である．ここではEを単にエネルギと呼ぶが，通常の意味でのエネルギとは異なる点に注意されたい．自由関節の摩擦を考慮すると，エネルギEはもはや保存されず散逸的となり，周期入力に対する挙動も$\theta = \pm\pi/2$へ収束する挙動を示す．よって，自由関節系に対して可能な制御の一つとして，第1関節への周期入力による$\theta = \pm\pi/2$への収束制御が考えられる．以下ではその収束制御について上記のエネルギ量を用いた方法について述べる．

3.3　平均化エネルギによる収束制御

自由関節系の最も簡単な例である2R自由関節マニピュレータの制御において，筆者は数々の方法を提案してきた[29), 30), 32)]が，それらの方法はより多関節の場合にも拡張可能かどうかという点で吟味の必要がある．29)のヒューリスティックな方法は，シミュレーションから系の挙動の性質を明らかにする点では有効だが，3関節以上では位相図を描くのは困難であり，よって制御法の構築を行うことができない．また無摩擦を仮定している点でも有効でない．32)の摩擦直線への安定化法は，無入力下での摩擦挙動が3関節以上では複雑になることから，多関節への拡張は困難である．30)の平均化法による方法は，多関節になるにつれ式が複雑になり詳細な解析が困難となる点で問題がある．しかし，平均化エネルギについては多関節に拡張可能であり，よってこれを利用した振幅変調制御を考えることができる．

(3.3)式のエネルギは振幅を変えるとその定義が変わるため，$\varepsilon = 0.1$を基準振幅としたエネルギを用いる．振幅変調のアルゴリズムとしては以下のようなものを考える．まず，現在の状態からその前の周期と同じ振幅εでの周期入力下での1周期後のエネルギE_1を計算する．また$\varepsilon \pm \delta\varepsilon$での1周期後のエネルギ$E_+$，$E_-$，および無入力下での1周期後のエネルギ$E_0$を計算する．これらのエネルギを比較し，1周期後に最もエネルギが小さくなるものを選択する．なお，前周期で無入力$\varepsilon = 0$だった場合は，標準振幅（$\varepsilon = 0.05$とした）で計算する．本方法は，各周期で先の状態のシミュレーション計算が必要となるため計算速度によってはリアルタイム制御が困難な場合が考えられるのが問題点ではあるが，非常に単純なアルゴリズムであるがゆえ

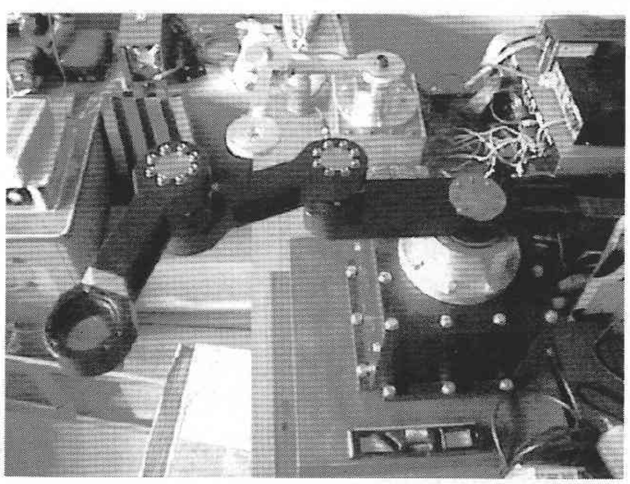

Fig. 1　3 R Free-Joint Manipulator with 1 Actuator

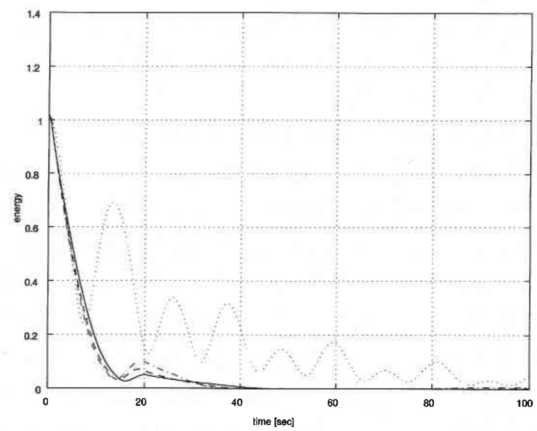

Fig. 2　Control of 3 R-FJM to equilibrium: energy

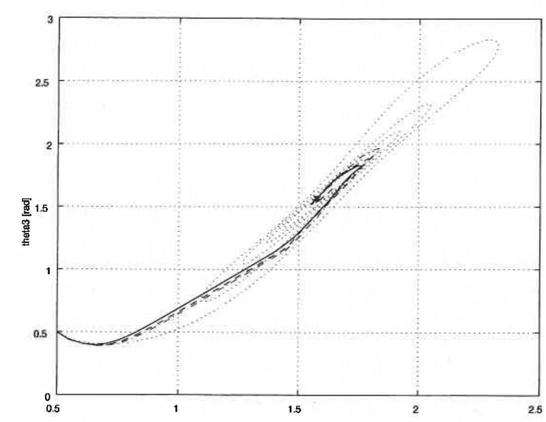

Fig. 3　Control of 3 R-FJM to equilibrium: θ_2-θ_3

に，平均化エネルギの式の導出を行えれば多関節への拡張も容易である．

Fig. 2およびFig. 3はそれぞれこの振幅変調制御によるエネルギの変遷，および関節平面における挙動の様子を表している．図において破線および実線がそれぞれ $\delta\varepsilon = 0.1\varepsilon$，$0.5\varepsilon$ とした場合を表す．なお，制御効果の比較のため，点線は一定振幅 $\varepsilon = 0.05$ の周期入力を加えた場合を表し，一点鎖線は E_1，E_+，E_- から得られるエネルギ勾配によりエネルギの極小点を求めるアルゴリズムを用いた場合を表している．図より，この振幅変調制御によりエネルギのより早い収束が行われ，その結果平衡点へのより早い収束が実現されていることが分かる．

本研究では，非弾性的な柔軟系（超柔軟系）のモデルの一つとして自由関節系の制御を考察し，1駆動2自由関節を持つ3Rマニピュレータの制御として，周期摂動に対する平衡点 $\theta_{2,3} = \pm\pi/2$ への収束制御を考え，平均化エネルギを用いた振幅変調制御の有効性を示した．しかし，超柔軟系の利点として挙げた多自由度性の観点からは，周期摂動による平衡点への収束だけでなく，様々なconfigurationへの制御を考える必要があり，それが今後の課題である．

4．おわりに

超柔軟マニピュレータを題材に，柔軟な力学構造を持つロボットシステムと非ホロノミック研究の強い関連性について述べた．また，超柔軟系の一例として，筆者の最近行っている研究の一部を紹介した．ここで紹介した超柔軟ロボットシステムに関する研究は，将来のロボット研究において，特に人間を始めとする生体と共存し，より高度な作業を人間に代り，また人間と共に行っていくためには不可欠な要素技術となってくると考えている．今後，その応用可能性について，更なる研究を進めていきたいと考えている．

本稿の事例紹介において紹介した研究においては，東京大学大学院工学系研究科の中村仁彦教授，および吉本堅一教授，東京大学生産技術研究所の藤田隆史教授より多大な助言を頂いた．またこれらの研究は，㈶服部報公会および㈶マツダ財団，平成11年度東京大学生産技術研究所特別研究選定研究費により援助を受けて行った研究の一部である．

（2000年3月31日受理）

参考文献

1) 中村仁彦：「非ホロノミックロボットシステム（全5回）」，日本ロボット学会誌，Vol. 11，No. 4，1993～Vol. 12，No. 2，1994.
2) H. Goldstein, “Classical Mechanics”, 2 nd Ed., Addison-Wesley, pp. 11-16, 1980.
3) J.-P. Laumond, “Feasible Trajectories for Mobile Robots with Kinematic and Environment Constraints, Intelligent Autonomous Systems (O. L. Hertzberger and F. C. A. Groen Eds.), pp. 346-354, 1987.
4) Z. Vafa and S. Dubowsky, “On the Dynamics of Space Manipulators Using the Virtual Manipulator, with Applications to Path Planning”, Journal of the Astronautical Sciences, Vol. 38, No. 4, pp. 441-472, 1990.
5) J. K. Salisbury, “Kinematic and force analysis of articulated hands”, Ph.D thesis in Dept. of Mechanical Engineering, Stanford Univ., 1982.
6) 荒井裕彦：「2階の非ホロノミック系の制御」，計測と制御，Vol. 36, No. 6, pp. 404-410, 1997.
7) R. W. Brockett, “Asymptotic stability and feedback stabilization”, Differential Geometric Control Theory (R. W. Brockett, R. S. Millman and H. J. Sussmann Eds.), Birkhäuser, Boston, Progress in Mathematics, Vol. 27, pp. 181-208, 1983.
8) I. V. Kolmanovsky, M. Reyhanoglu and N. H. McClamroch, “Discontinuous feedback stabilization of nonholonomic systems in extended power form”, 33 rd IEEE Conf. on Decision and Control, Lake Buena Vista, FL, pp. 3469-3474, 1994.
9) C. Samson, “Time-varying feedback stabilization of nonholonomic car-like mobile robots”, Tech. Rep. of INRIA Sophia-Antipolis, No. 151, 1991.
10) M. Sampei, H. Kiyota and M. Ishikawa, “Time-State Control Form and its Application to a Non-Holonomic Space Robot”, NOLCOS'95, 1995.
11) Canudas de Wit, C. and O. J. Sørdalen, “Exponential Stabilization of Mobile Robots with Nonholonomic Constraints”, IEEE Trans. on Automatic Control, pp. 1791-1797, 1992.
12) 中村，O. J. Sørdalen，鄭：「非ホロノミック・マニピュレータの理論的設計と非線形制御」，日本ロボット学会誌，Vol. 13，No. 5，pp. 674-682，1995.
13) H. J. Sussmann, “A General theorem on Local Controllability”, SIAM J. Control and Optimization, Vol. 25, No.1, 1987.
14) 中村，濃沼，鈴木：「自由関節を持つ平面アームのカオス的挙動と非線形制御 —ドリフトを持つ非ホロノミック機械の制御—」，日本ロボット学会誌，Vol. 14，No. 4，pp. 602-611，1996.
15) 荒井裕彦：「非駆動関節を有する3自由度マニピュレータの非ホロノミック拘束下における可制御性」，日本ロボット学会誌，Vol. 14，No. 5，pp. 751-758，1996.
16) 小林，井村，吉川：「二つの非駆動関節を持つ平面4自由度マニピュレータの可制御性」，日本ロボット学会誌，Vol. 17，No. 6，pp. 811-817，1999.
17) 小林，井村，吉川：「一つの非駆動関節を持つ平面劣駆動マニピュレータの可制御性」，日本ロボット学会誌，Vol. 17，No. 8，pp. 1167-1172，1999.
18) 坂和，松野：「フレキシブルアームのモデリングと制御」，計測と制御，Vol. 25，No. 1，pp. 64-70，1986.
19) 平井，横田，岩城（編）：「特集「柔軟物操作」」，日本ロボット学会誌，Vol. 16，No. 2，1998.
20) D. N. Nenchev（編）：「特集「ソフトロボティクス」」，日本ロボット学会誌，Vol. 17，No. 6，1999.
21) 濱島，柿倉：「布地物体展開手順のプラニング －布地物体の縁の二点把持による展開作業－」，日本機械学会ロボティ

クス・メカトロニクス講演会'98（ROBOMEC'98），1 CI 3-3, 1998.

22) 広瀬茂男：「生物機械工学」，工学調査会，1987.

23) 大武，中井，稲葉，井上：「電気応答性ゲル PAMPS を用いたゲルロボットの設計」，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99（ROBOMEC'99），2 P 2-62-071，1999.

24) H. Arisumi, T. Kotoku and K. Komoriya, "A study of Casting Manipulation (Swing Motion Control and Planning of Throwing Motion)", Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'97), pp. 168-174, 1997.

25) M. Nohmi, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, "Path Planning for a Tethered Space Robot", Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'97), pp. 3062-3067, 1997.

26) 吉田和哉：「Under Actuated Manipulators の一般的な定式化とそのスキルに関する考察」，平成9年度重点領域研究「知能ロボット」研究成果報告書，pp. 60-63, 1998.

27) 鈴木，中村：「摩擦のある非ホロノミック自由関節マニピュレータ」，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99（ROBOMEC'99），2 A 1-55-105, 1999.

28) G. Oriolo and Y. Nakamura, "Free-Joint Manipulators: Motion Control under Second-Order Nonholonomic Constraints", IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS'91), pp. 1248-1253, 1991.

29) Y. Nakamura, T. Suzuki and M. Koinuma, "Nonlinear Behavior and Control of A Nonholonomic Free-Joint Manipulator", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 13, No. 6, pp. 853-862, 1997.

30) 中村，鈴木：「非ホロノミック機械系の平均化法による挙動解析と振幅変調制御 －平面2R自由関節マニピュレータの位置制御－」，日本ロボット学会誌，Vol. 16，No. 3，pp. 407-416，1998.

31) 鈴木，中村：「1駆動関節2自由関節マニピュレータの制御実験」，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'98（ROBOMEC'98），2 AIII 2-3，1998.

32) T. Suzuki, W. Miyoshi and Y. Nakamura, "Control of 2R Underactuated Manipulators with Friction", 37 th IEEE Conf. on Decision and Control (CDC'98), pp.2007-2012, 1998.

33) A. De Luca, R. Mattone and G. Oriolo, "Control of Underactuated Mechanical Systems: Application to the Planar 2R Robot", 35 th IEEE Conf. on Decision and Control (CDC'96), pp. 1455-1460, 1996.

34) J. Baillieul, "Stable Average Motions of Mechanical Systems Subject to Periodic Forcing", Dynamics and Control of Mechanical Systems: The Falling Cat and Related Problems: Fields Institute Communications, American Mathematical Society, Vol.1, 1993.