学術・技術論文

最適力配分を考慮した計算トルク法に基づく 節体幹型移動ロボットの姿勢制御の提案

福島 E. 文彦* 広瀬 茂男*

A Computed Torque Method Based Attitude Control with Optimal Force Distribution for Articulated Body Mobile Robots

Edwardo F. Fukushima* and Shigeo Hirose*

This paper introduces an attitude control scheme based in optimal force distribution using quadratic programming which minimizes joint energy consumption. This method shares similarities with force distribution for multifingered hands, multiple coordinated manipulators and legged walking robots. In particular, an attitude control scheme was introduced inside the force distribution problem, and successfully implemented for control of the articulated body mobile robot KR-II. This is an actual mobile robot composed of cylindrical segments linked in series by prismatic joints and has a long snake-like appearance. These prismatic joints are force controlled so that each segment's vertical motion can automatically follow the terrain irregularities. An attitude control is necessary because this system acts like a system of wheeled inverted pendulum carts connected in series, being unstable by nature. The validity and effectiveness of the proposed method is verified by computer simulation and experiments with the real robot KR-II.

Key Words: Attitude Control, Force Distribution, Computed Torque Method, Quadratic Programming, Articulated Body Mobile Robot

1. はじめに

我々は節体幹型移動ロボット「蛟龍」を開発している。これは、災害現場での偵察、原子炉内での巡回検査や補修、そして森林作業のように危険を伴う作業などを人間に代わって行うための移動能力や積載能力を有する。例えば、複数節を同時に持ち上げて溝やパイプなどの無接触乗り越し、ヘビのように狭隘な通路を移動したり、屋内や屋外環境を自由に移動ができる。節体幹型移動ロボット「蛟龍」に類似した形態のロボットについての研究としては超多自由度システム [4]~[7] や、車輪型移動ロボットの運動解析法 [8]~[10] などがあるが、実際の機械モデルを構築し実験の立場で行った研究は少ない。しかし、最近では [11]~[13] のように蛇型移動ロボットの研究に積極的な取り組みも見受けられ、近い将来には何種類かの蛇型ロボットが完成され上述の環境などで活躍するものと期待できる。

筆者らは Fig 1 に示す 7 節から構成された「蛟龍」第 2 号機モデル KR-II を試作した [2]。KR-II は、Fig 2 (a) (b) に示すように i) 節前部 FP, ii) 節後部 RP, iii) ステアリング・プレート SP, iv) 中間連結プレート IP, v) 車輪部 Wh, そして vi) 節前部連結面 Pf からなる共通の「ユニット節」を複数直列連結して構成される。ただし、各ユニット節の車輪は左右交互

に片輪構成で配置され、また先頭節にはマニピュレータが装備されている。各ユニット節は節前部 FP に対する節前部連結面 Pf の上下並進自由度 (z 軸)、節中心軸回りの節前部 FP と節後部 RP の相対旋回自由度 (θ 軸)、そして各節の能動車輪による推進自由度 (s 軸) の三つの能動自由度を備えている。第 n 節の節前部連結面 Pf は隣前の第 $(n-1)$ 節の節後部 RP に連結固定されるためすべての節の z 軸は同方向を向く。そのため、任意の節の姿勢を測定することで全体の姿勢は推定できる。KR-II では第 3 節の前部に胴体固定の座標系 Σ_B を設定し、重力加速度方向と直交する水平面に対する Σ_B の X_B と Y_B 軸

Fig. 1 Articulated body mobile robot KR-II

原稿受付 1999 年 4 月 8 日

*東京工業大学

*Tokyo Institute of Technology

Fig. 2 KR-II's mechanism and motion variables

Fig. 3 Posture change under simple z-axes force control

回りの角度 ϕ_x , ϕ_y を KR の姿勢として定義する。これらの傾き角度を調整するのが「姿勢制御」の目的である。このような KR が高度な対地適応性を発揮するには、z 軸の力制御が不可欠である。z 軸を力制御し、車輪と路面間の接地力の変化に応じて各節を能動的に上下させれば、各車輪は路面の凹凸に自動的に追従できる。ところが、すべての z 軸力目標値をゼロとする最も基本的な制御法のみでは KR-II の隣接する節同士が自由に滑り、Fig 3 に示すように複数の倒立振子を直列連結したような系と同等に振る舞い、最期には全体が転倒する。そのため、z 軸力制御は姿勢制御と組み合わせる実施しなければならない。

蛟龍の姿勢制御問題は研究の初期から検討され、まずはじめに第 1 次機械モデル KR-I を対象に逆運動学的手法に基づいた姿勢制御法 [1] が考案された。具体的には i) 蛟龍の隣接する節の中心を結ぶ節ベクトル $L_i \in \mathbf{R}^3$ を設定し、ii) 垂直状態から傾いた姿勢での節ベクトルを $L'_i = \mathbf{E}^{j\phi_p} \mathbf{E}^{i\phi_r} L_i$ と求め、iii) 姿勢制御に必要な各関節の制御量 δz , $\delta \theta$ と δs を $dL_i = L'_i - L_i$ の関係式から求めるという制御法であった。ただし、 $\mathbf{E}^{j\phi_p}$ と $\mathbf{E}^{i\phi_r}$ はそれぞれ y 軸と x 軸回りの座標回転行列、 ϕ_r はロール角、 ϕ_p はピッチ角である [14]。本制御法で求められた z 軸の位置変位量 δz は z 軸の力と変位を考慮したイン

ピーダンス関係を用いて力目標値に変換し用いていた [1]。同様な姿勢制御法は KR-II にも適用した。ところが、運動学手法に基づいた本姿勢制御は、蛟龍のすべての車輪が路面と接地している場合には有効であったが、溝の乗り越えやパイプの跨ぎ越えのように節支持力の著しい変化が発生する運動では十分な姿勢安定性は得られていなかった。そのため、全体の力・モーメントの釣合い式を考慮した最適化問題を定式化し、力のフィードフォワード補償 [19] を上記運動学手法と組み合わせた姿勢制御法を導入しこの問題の解決を試みた。また、バランス式に復帰モーメントを発生する姿勢フィードバック項も導入し、バランス式のみに基づいた姿勢制御の提案も行った [20]。本論文では、[19] [20] で筆者らが行ってきた「蛟龍」の姿勢制御問題を再度概観し、これとロボット工学においてこれまで研究されてきている多指ハンドの最適把持力、複数マニピュレータによる対象物の操りや脚型ロボットの力配分問題との共通点を指摘し、より望ましい制御側を求めることにする。

本論文では、まず第 2 章で多指ハンドなどの最適力配分問題の研究背景について論議し、一般のマルチボディシステムとの定式化の共通性を示す。第 3 章では関節力の最小化を目的関数とした一般的な最適化問題の定式化と解法を説明する。次いで、第 4 章では KR-II に対する最適力配分問題の定式化と、姿勢フィードバック項の導入方法を示す。第 5 章では障害物の跨ぎ越え動作のシミュレーション結果を示し、第 6 章ではその実験結果を示して本論文で提案する制御法の妥当性を検証する。

2. 最適力配分問題の研究背景

路面と複数点で接触して閉ループ連鎖を構成する移動ロボット（特に脚型や節体幹型）では力の不静定問題が生じる。つまり、バランス式の数よりも外部環境との接触力未知数の方が多いため、バランス式を満たす力配分の組み合わせは無数解存在し、一意には定まらない。これは節体幹型移動ロボット特有の問題ではなく、多指ハンド、複数マニピュレータによるあやつり制御や脚型ロボットの力配分問題として従来から研究されてきた [15]~[26]。以下にそれらの基本概念を示す。

2.1 対象物のバランス式

多指ハンド・複数マニピュレータの把持や協調あやつりの対象になる物体や脚型ロボットの胴体部分は Fig 4 (a) に示すように単体の「対象物 (reference member)」としてモデル化でき、その運動は指、マニピュレータや脚を構成するリンク系と独立に扱うことができる。いま、外部と k 個の接触点を有する Fig 4 (a) の対象物に対して、質量 m_0 、対象物重心の加速度と角加速度 $\alpha_0, \omega_0 \in \mathbf{R}^3$ 、重心座標系に対する慣性テンソル $\mathbf{H}_0 \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 、第 i 番目の接触点に加わる力 $\mathbf{F}_i \in \mathbf{R}^3$ とモーメント $\mathbf{M}_i \in \mathbf{R}^3$ 、対象物の重心座標系からみた接触点の位置 $\mathbf{p}_i = [p_{i1} \ p_{i2} \ p_{i3}]^T \in \mathbf{R}^3$ を定義する。外力によって物体に加わる合力と合モーメントは $\mathbf{F}_0 = \sum_{i=1}^k \mathbf{F}_i \in \mathbf{R}^3$ 、そして $\mathbf{M}_0 = \sum_{i=1}^k (\mathbf{M}_i + \mathbf{p}_i \times \mathbf{F}_i) \in \mathbf{R}^3$ として表され、対象物の運動は

$$m_0 (\alpha_0 - \mathbf{g}) = \mathbf{F}_0 \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_0 \dot{\omega}_0 + \omega_0 \times (\mathbf{H}_0 \omega_0) = \mathbf{M}_0 \quad (2)$$

Fig. 4 Comparison of single and multi-body systems

として表される。ただし、本来なら外力として扱うべき重力加速度 g の項は表記の便宜上式 (1) に加えた。慣性力による式 (1) (2) の各項を $Q \in \mathbf{R}^6$ としてまとめ、外力による項を行列 P と接触力ベクトル N を

$$P = \begin{bmatrix} I_3 & 0 & I_3 & 0 & \cdots & I_3 & 0 \\ \tilde{p}_1 & I_3 & \tilde{p}_2 & I_3 & \cdots & \tilde{p}_k & I_3 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{6 \times 6k} \quad (3)$$

$$\tilde{p}_i = \begin{bmatrix} 0 & -p_{i3} & p_{i2} \\ p_{i3} & 0 & -p_{i1} \\ -p_{i2} & p_{i1} & 0 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$$

$I_3 \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$: Identity Matrix

$$N = [F_1^T \ M_1^T \ \cdots \ F_k^T \ M_k^T]^T \in \mathbf{R}^{6k} \quad (4)$$

としてまとめるとバランス式は以下の線形方程式で記述できる。

$$Q = PN \quad (5)$$

2.1.1 一般的な解法

式 (5) で表されるバランス式に対する接触力 N の一般解は

$$N = P^+Q + (I - P^+P)\lambda \quad (6)$$

となる [16] [17]。ただし、 P^+ は一般化疑似逆行列である。

上記の一般解に対して、内力と力配分問題の基礎を示した具体的な最適問題の定式化は Kerr, Roth [15] らによって行われた。基本的な概念としては、i) 一般解は $N = N_e + N_i$ のように二つの直交するベクトルで与えられ、ii) 部分問題 N_e は $N_e = P^+Q$ のように疑似逆行列を用いて求まる。そして、iii) 部分解 N_i は P の零空間に位置するベクトルであるので内力に相当する。iv) $(I - P^+P)$ に対応する行列は P の零空間の正規直交基底ベクトルで構成された行列であり、 λ は内力の大きさを示すベクトルとなる。これらの概念を利用し、彼らは指

先接触点での摩擦力や関節駆動力を考慮した線形計画法に基づいた定式化を行い、 λ の最適解を求めている。

実際、文献 [23] にも詳しく説明されている通り、グリッパやハンドの最適力配分問題は内力 λ の解を求める問題に帰着している。これまで、最適化対象の目的関数や制約条件などによって色々な解法が提案されてきたが、それらは線形計画法と 2 次計画問題の二つに分類できる。その中で、中村 [16] [18] らの接触力ノルム $\|N\|$ 最小化問題は初めて非線形問題を扱った論文である。彼らはラグランジュ未定係数法に基づいた独自の非線形計画法の解法アルゴリズムを提案している。非線形計画法の実時間制御性や解の不連続性などを指摘し、線形計画法の効率化を目的とした幾つかの研究 [21] [24] もその後発表された。Nahon と Angeles [22] は関節力や内力ノルムの最小化問題は 2 次計画問題として統一的に定式化できることを指摘した。そしてこの問題は Goldfarb と Idnami [27] が提案した効率的な方法で実時間に解くことが可能であることが示された。現在では本研究の基本概念を発展させた 2 次計画問題に基づいた研究が盛んである [25] [26]。ただし、Nahon と Angeles の定式化は概念的には中村らの定式化と同じである。

2.2 マルティボディシステムとの共通性

複雑なリンク系から構成される Fig 4 (b) のようなマルティボディシステムでは、一般的には対象物となり得る共通の部分が存在しない。また、物理的な観点からは Fig 4 (a) (b) のシステムでは接触点での力やモーメント F_i, M_i の発生メカニズムが異なる。つまり、(a) では指、マニピュレータや脚の運動によって外部から対象物に力が加わる。それに対して、外部環境との間に接触点を有する (b) では、一般的には路面などの外部環境からは力は作用されず、重力加速度と内部運動によって接触点での力を発生している。ところが、これらのシステムの数学的モデルは以下のように共通している。

2.2.1 バランス式

Fig 4 (b) のマルティボディシステムにおいて k , F_i, M_i , p_i を Fig 4 (a) と同様に定義し、系全体の重心に発生する外力による合力と合モーメントを求めると単体の物体に対する式 (3) (4) と同じようにまとめられる。一方、慣性力による項はもちろん式 (1) (2) と一致しない。しかし、 q を一般化座標系とし、マルティボディシステムを構成する各質点系に生じる慣性力を考慮すれば系全体の重心に発生する力は一般的に $Q(q, \dot{q}, \ddot{q})$ のように $q, \dot{q}, \ddot{q}$ の関数として求めることが可能であるので、バランス式は一般的に

$$Q(q, \dot{q}, \ddot{q}) = PN \quad (7)$$

のような線形方程式で記述できる。式 (7) と式 (5) は数式的に同じであるため、2.1.1 節で説明した単体の物体に対する従来からの議論はマルティボディシステムにも適用できる。

2.2.2 運動方程式

Fig 4 (a) のシステムでは接触力ベクトル N と各リンク系で発生すべき関節力 τ を求める問題はそれぞれ独立に定式化でき、 k 個のリンク系に対する演算は独立で並列に実施できる利点を有する。しかし、多くの場合には全体の関節力 τ を最適化

するのが望ましく、その目的のためには全体の運動方程式を以下のように整理できる [17].

$$\tau = H\ddot{q} + C + G_g + J^T N \quad (8)$$

ただし、 H は慣性項、 C は遠心力とコリオリ力による項、 G_g は重力項、 J はヤコビ行列である。周知の通り、ロボットマニピュレータやマルチボディシステムに対する運動方程式も一般的に式 (8) のように記述できる。結局、運動方程式に関しても Fig 4 (a) と (b) のシステムは数式的に同じであり、マルチボディシステムと多指ハンドなどの研究は統一的に議論できることがわかる。

3. 関節力最小化問題の定式化

3.1 目的関数

ロボットが低速で高出力運動を行う場合、サーボモータの電機子抵抗での消費パワーから消費エネルギーを見積ることが可能である。そのため、本論文では関節力変数 τ の 2 乗和

$$S(\tau) = \tau^T W \tau \quad (9)$$

を評価関数としてエネルギー最小化問題を考える。ただし、 W は対称正定な重み行列である。いま、 $H_q = H\ddot{q} + C + G_g$ 、 $G = 2JWJ^T$ 、そして $d = 2JWH_q$ のような補助項を定義して式 (8) を式 (9) に代入すると、評価関数は以下のように与えられる。

$$S(\tau) = H_q^T W H_q + d^T N + \frac{1}{2} N^T G N \quad (10)$$

3.2 2 次計画問題の定式化

接触力 N に依存しない右辺第 1 項を目的関数から排除すれば、式 (10) は N を変数とした式 (11) で示される。また、接触力 N についての線形制約条件を式 (12) のように定義すれば、関節力のノルム最小化問題は式 (11) (12) で与えられる一般的な 2 次計画問題に帰着する。

$$\min_N : S(N) = d^T N + \frac{1}{2} N^T G N \quad (11)$$

$$\text{subject to: } \begin{cases} P_e N = Q_e \\ P_i N \geq Q_i \end{cases} \quad (12)$$

式 (12) の等式制約条件は一般には式 (5) や (7) で与えられ、不等式制約条件は摩擦力、接触力や関節力などの最大・最小値条件から得られる。ここで、重み行列 W は正定値であることから問題は凸計画問題となる。このような、等式制約条件と不等式制約条件での効率的な解法はすでに検討されている [27]~[29].

3.3 等式制約条件のみを考慮した一般解

上記問題に対して等式制約条件のみを考慮した部分最適解は一般疑似逆行列 P_e^+ を

$$P_e^+ = G^{-1} P_e^T (P_e G^{-1} P_e^T)^{-1} \quad (13)$$

とし、補助行列 H_e を

$$H_e = (I - P_e^+ P_e) G^{-1} \quad (14)$$

と定義すれば

$$N_e = P_e^+ Q_e - H_e d \quad (15)$$

のように求まる。

ここで、式 (15) の右辺第 1 項は接触力 N のノルム、つまり目的関数 $N^T G N$ を最小にする特殊解に相当する。このことに注目すれば、右辺第 2 項は関節力 τ のノルム最小化を目的関数に含めた分の特殊解であると解釈できる。この解は P_e の零空間内に存在するが、解析的な数式解として求まることが特徴的である。

3.4 不等式制約条件付問題の解法

不等式制約条件を考慮した問題の場合には一般的には解析解は存在せず、解法は収束条件を評価しながら探索的に求められる。この探索の出発点としては式 (15) のような等式制約条件部分問題の解を用いることが有効である。完全な解法については例えば文献 [16] [22] [27]~[29] など論じられている。

本論文では、筆者らが従来から提案してきた実時間制御に適した効率的な解法アルゴリズムを使用することにする [20]. これは、指、ハンド、脚や車輪などは構造的に対象物を押すことはできるが、引くことはできないことに着目し、負の接触力の発生を制限する不等式制約条件のみを考慮したものである。具体的には、式 (12) の等式制約条件項に対してバランス式の項 $P N = Q$ 以外に目標接触力を直接指示するための $P_d N = Q_d \in R^d$ 項を新たに導入し、

$$P_e = [P^T \quad P_d^T]^T \quad (16)$$

$$Q_e = [Q^T \quad Q_d^T]^T \quad (17)$$

として、負の接触力が生成された点の接触力を強制的にゼロになるように設定して解くものである。ただし、 d は目標値を強制的に設定する接触力の数を表す変数である。以下に具体的なアルゴリズムを示す。

Step 0. 初期化: d_0 個の目標接触力が $P_d N = Q_d \in R^{d_0}$ で与えられた場合には式 (16) (17) に考慮し、 $d = d_0$ とする。 $d_0 = 0$ の場合には $d = 0$ 、 $P_e = P$ 、 $Q_e = Q$ と初期化する。

Step 1. 等式制約条件のみを考慮した部分最適化問題の解 N_e を式 (15) から求める。

Step 2. N_e に負の接触力が生成されたならば、その数を d_n とし、次に進む。生成されなければ式 (18) から関節力を求め終了する。

$$\tau_e = H_q + J^T N_e \quad (18)$$

Step 3. $d = d + d_n$ と更新し、 $d \leq$ (自由変数の数 - バランス式の数) であれば次に進む。そうでなければ終了する (問題は解けない)。

Step 4. 負の接触力が生成された接触点に対して目標接触力をゼロに設定して等式制約条件 $P_d N = Q_d$ に加え、*Step 1.* に戻る。

本アルゴリズムは実時間制御に適している反面、完全な解法ではないので必ずしも解が得られることは保証されない。それ

は、本アルゴリズムではすべての接触力の組み合わせを探索しないため、実際には解が存在するにもかかわらず *Step 3.* で終了する場合も存在し得ることを意味する。しかし、全体のバランスがとれない場合には確実に *Step 3.* で問題は終了することは保証され、本アルゴリズムは安全方向に働く。

実際、KR-II では先頭の三節を同時に持ち上げるような明らかにバランスが保てない動作では問題は有限回の反復計算の後、*Step 3.* で終了する。しかし、KR-II の操舵運動、溝の乗り越えやパイプの跨ぎ越え、そして姿勢制御の通常の運動計画では、必ず有限回の反復によって実現可能な解が得られる。その様子を第 5 章のパイプ跨ぎ越え動作のシミュレーションで示す。

4. KR-II の姿勢制御の定式化

4.1 全体のモデル化

マニピュレータ部を除いた KR-II 全体の一般化座標系 $\mathbf{q}$ は z 軸の並進量 $\mathbf{z} = [z_1 \ z_2 \ \cdots \ z_6]^T \in \mathbf{R}^6$, θ 軸の旋回角度 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_0 \ \theta_1 \ \cdots \ \theta_6]^T \in \mathbf{R}^7$, 車輪の回転量 $\mathbf{s} = [s_0 \ s_1 \ \cdots \ s_6]^T \in \mathbf{R}^7$, そして慣性座標系に対する胴体座標系の位置 $\mathbf{c}_0 = [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ と姿勢角度 $\boldsymbol{\phi} = [\phi_x \ \phi_y \ \phi_z]^T$ の計 26 自由度で記述できる。また、実機に対する各部の質量、慣性モーメントと質量中心は **Table 1** に示す通りである。ただし、第 n 節の節前部連結面 Pf は隣前の第 $(n-1)$ 節の節後部 RP に連結固定されているため RP の特性に加えた。また各節別に増設された装置類 (Extra loads) はそれぞれの節前部 FP の慣性情報に加えて考慮した。

このような KR-II に対して式 (7) (8) で与えられるバランス式と運動方程式の各項はニュートン・オイラー法、ラグランジュ法、または仮想パワーに基づいた方法 [10] などによって求められる。本研究では以下に示す車輪部のモデル化と諸簡略化条件の下で全体の解析解をニュートン・オイラー法によって求

めた。

4.2 簡略化のための設定条件

4.2.1 車輪部のモデル化

KR-II が走行する際にはタイヤと路面が複数点で同時に接触するが、凹凸面走行の際の接触状態はタイヤの種類や地形に大きく依存する。また、このような状態を正確に測定するためのセンサ系や、地形データを探るような計測系を各車輪に装備し、実時間制御に用いることは非常に困難である。そのため、本論文ではタイヤ部に関して

- (1) 厚さのない一定半径の円板とする
- (2) 凹凸面においてもタイヤは水平な路面と接する

という条件を設定する。ただし、上記条件は各車輪に独立で考えるので、凹凸路面を走行する場合には各車輪が接する水平面は同一ではないことに注意されたい。

4.2.2 その他の簡略化

- (1) 外部接触力：蛟龍の操舵運動では車輪横力は小さく抑えられている。また、推進方向の加減速も緩やかに行うことにより姿勢安定性への影響は小さい。さらに、車輪と路面間に働くモーメントも小さいため、それらの影響は無視でき、車輪路面間に働く垂直方向の力 F_{z_i} のみを外部接触力として考慮することは妥当だと考えられる。よって、

$$\mathbf{N} = [F_{z_0} \ F_{z_1} \ \cdots \ F_{z_6}]^T \in \mathbf{R}^7 \quad (19)$$

のように接触力ベクトルを定義する。

- (2) 関節力変数：蛟龍では z 軸が常時重力加速度方向に向くように姿勢制御されるため、 θ 軸の運動は z 軸の運動と分離して独立に計画できる特徴を有する。KR-II では θ 軸は位置制御され、その目標旋回角度指令は [3] の操舵制御法によって求める。一方、 s 軸のトルク制御による車輪の加減速運動は姿勢制御に考慮できるが、全体の推進運動に加減速が加わるのは望ましくない。そのため、KR-II では車輪の目標駆動トルク指令値を胴体速度制御法 [3] によって求め、姿勢制御とは独立に実施する。このような理由から z 軸関節力のみを最適化対象に設定する。

$$\boldsymbol{\tau} = [f_{z_0} \ f_{z_1} \ \cdots \ f_{z_6}]^T \in \mathbf{R}^7 \quad (20)$$

ただし、 f_{z_0} は演算上の特異点を回避するために導入されており、演算結果としては常に $f_{z_0} = 0$ となる。

- (3) バランス式： z 軸方向の力の釣合いと x と y 軸回りのモーメントの釣合い式のみを考慮する。よって、バランス式 $\mathbf{P}\mathbf{N} = \mathbf{Q}$ において $\mathbf{Q} \in \mathbf{R}^3$, そして $\mathbf{P} \in \mathbf{R}^{3 \times 7}$ となる。
- (4) 一般化加速度：運動方程式とバランス式を求める際、KR-II の 26 自由度の一般化座標系の一部のみ、 $\mathbf{q}_s = [z^T \ \boldsymbol{\theta}^T \ \boldsymbol{\phi}_x \ \boldsymbol{\phi}_y]^T$ とその時間微分 $\dot{\mathbf{q}}_s = [\dot{z}^T \ \dot{\boldsymbol{\theta}}^T \ \dot{\boldsymbol{\phi}}_x \ \dot{\boldsymbol{\phi}}_y]^T$ を考慮する。また、加速度は

$$\ddot{\mathbf{q}}_a = [\ddot{x}_0 \ \ddot{y}_0 \ \ddot{z}_0 \ \ddot{\phi}_x \ \ddot{\phi}_y]^T \quad (21)$$

と簡略化し、 $\ddot{\mathbf{q}} \equiv \ddot{\mathbf{q}}_a$ としてバランス式や運動方程式に考慮する。

- (5) その他のパラメータ：導出した運動方程式の細部は紙面の

Table 1 KR-II's inertial parameters

Seg	Part	mass [kg]	Inertia[kg m ²]			mass center [mm]		
			I_x	I_y	I_z	p_x	p_y	$-p_z$
0	FP	5.0	0.04	0.04	0.01	120	0	300
	SP	28.0	0.24	0.24	0.07	0	0	570
	RP	10.8	0.40	0.30	0.08	-100	0	270
	Wh	3.6	0.12	0.06	0.12	0	0	778
1	FP	35.4	1.27	1.27	0.42	64	9	273
2	FP	41.7	1.73	1.71	0.45	54	17	227
3	FP	32.1	1.27	1.28	0.35	70	0	278
4	FP	45.6	1.64	1.71	0.45	46	17	229
5	FP	31.6	1.11	1.13	0.35	70	0	291
6	FP	40.2	1.60	1.60	0.46	56	0	241
1~5	RP	9.5	0.24	0.19	0.05	-230	0	170
6	RP	4.2	0.11	0.09	0.02	-225	0	186
1~6	IP	4.5	0.04	0.01	0.03	218	0	150
	SP	7.2	0.03	0.04	0.03	0	80	744
	Wh	3.6	0.12	0.06	0.12	0	240	778

(Parts abbreviations)

FP: front part
RP: rear part
IP: intermediate plate
SP: steering plate
Wh: wheel part

(Extra internal loads [kg])

Seg1: extra servo-amp (5.8)
Seg2: on-board computer (12.1)
Seg3: attitude sensor (2.5)
Seg4: battery-pack (16.0)
Seg5: DC-DC converter (2.0)
Seg6: AC-DC converter (10.6)

Fig. 5 Obstacle passing over simulation

都合上本文で示すことができないが、上記の簡略化を適用した結果、その他の諸パラメータの次元は、 $\mathbf{H} \in \mathbf{R}^{7 \times 5}$ 、 $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^7$ 、 $\mathbf{G}_g \in \mathbf{R}^7$ 、 $\mathbf{J} \in \mathbf{R}^{7 \times 7}$ 、 $\mathbf{P}_d \in \mathbf{R}^{d \times 7}$ 、 $\mathbf{Q}_d \in \mathbf{R}^d$ となる。

4.3 姿勢フィードバック項の導入

前章の最適化問題は基本的には逆力学演算法であり、任意姿勢でバランスするための各関節の目標力を算出している。ところが、実際の蛇龍の制御においてはモデル化誤差や外乱などの影響によって目標姿勢に完全に追従できない。そのため、実際の制御では胴体を目標姿勢に戻す復帰モーメントを生成させるため、胴体固定の基準座標系に対する姿勢角加速度フィードバック則を式(21)に導入し、以下のように与えることにする。

$$\ddot{\phi}_X = \ddot{\phi}_{X_d} + K_{PX}(\phi_{X_d} - \phi_{X_m}) - K_{DX}\dot{\phi}_{X_m} \quad (22)$$

$$\ddot{\phi}_Y = \ddot{\phi}_{Y_d} + K_{PY}(\phi_{Y_d} - \phi_{Y_m}) - K_{DY}\dot{\phi}_{Y_m} \quad (23)$$

ただし、 K_P 、 K_D はそれぞれ比例ゲインと微分ゲイン、添え字 d は目標値、添え字 m は測定値を意味する。本手法は計算トルク法 (Computed Torque Method) [30] の概念に従うものであり、制御安定性などに関する考察は同様に導くことが可能である。

5. シミュレーション

上述の定式化を用いて KR-II の障害物乗り越え動作を実現するための指令生成をシミュレーションした。障害物の形状は幅 300 [mm]、高さ 150 [mm] の箱形を想定し、進行速度を 100 [mm/s] の一定速度として Fig 5 (a) に示す節の鉛直方向変位の目標軌道を計画した。ただし、変位量が 160 [mm] となっているのは障害物から 10 [mm] の余裕を持たせるためである。

5.1 力目標値の連続性

最適力配分問題では、車輪や脚を路面から浮かしたり着地させたり、または指を対象物から離したり接触させたりするトポロジーの変化が起きる場合に解が不連続になる。そのため、本研究では乗り越えを行う節の目標接地力を、車輪が地面から離れる際には

$$F_{dn} = F_{Upn} \frac{(50 - Z_n)}{50} \quad (24)$$

とし、節が浮上状態から接地する際は

$$F_{dn} = F_{Downn} \frac{(50 - Z_n)}{50} \quad (25)$$

と変化させ、3.4 節のアルゴリズム Step 0. で $\mathbf{P}_d \mathbf{N} = \mathbf{Q}_d$ の条件式に考慮する。ここで、 F_{Upn} は節を浮かす直前の最適解、 F_{Downn} は節が地面に接地した状態を仮定した最適

解, Z_n は Fig 5 (a) に示す節の上下量であり, これらの式は $Z_n = 0 \sim 50$ [mm] の区間に適用する. 定数 50 は KR-II の車輪部のサスペンション機構のストロークを考慮して定めた値である. 50 以上の高さでは節支持力は零に設定した. 推進速度を等速とした場合には本手法は効果的であるが, 他にも節支持力を変化させる期間だけ推進動作を停止させる方法なども考えられる. 本手法によって, Fig 5 (b)~(c) に示すように車輪接地力や z 軸力指令値は連続的に計画できた.

5.2 同時持ち上げ節の数と最大関節力

Fig 5 (d) に消費パワーに相当する z 軸の力の 2 乗和を示すが, 図中 10 秒から 28 秒の区間内で消費パワーが上に突き出ている部分では 2 節同時浮上, 凹んだ部分は 1 節浮上状態を表している. KR-II では隣接した節を同時に 2 節以上持ち上げると静的バランスを維持し難い. ところが, Fig 5 (b) で確認できるように第 0 節と第 1 節が同時に持ち上げられる 7.5 秒付近では第 6 節の節支持力 F_{z6} も零に計画される. また, 第 5 節と第 6 節を同時に持ち上げる 32 秒付近では第 0 節と第 2 節の節支持力 F_{z0} と F_{z2} も零に計画されている. このように, 全体のバランスを維持するためには最大で 4 節まで接地力零状態になることが 3.4 節で導入したアルゴリズムでは行われている. 端部 2 節を同時に持ち上げる運動に関しては, 実際には先頭部では 3 節, 後部では 4 節が同時に接地力零になるため, それに比例した大きな関節力とパワーが要求される. その様子が Fig 5 (c) (d) で確認できる. 本最適化問題では関節力の上限を制約条件に考慮しなかったが, 実際の KR-II では最大 2,000N 程度の出力を許容する設計になっているため, Fig 5 (c) で計算された関節力は実機で実現可能である.

6. 実験結果

前節の障害物跨ぎ越え動作シミュレーションに対する Fig 5 (c) の力フィードフォワード指令に, 式 (22) と式 (23) から計算されるフィードバック指令を合わせて z 軸力サーボ系に与えた. ただし, 姿勢フィードバックゲインは $K_{Px} = 65$, $K_{Dx} = 18$, $K_{Py} = 95$, $K_{Dy} = 16$ と設定し, すべての演算は KR-II に搭載されている 486DX2-50MHz 仕様の計算機によってサンプリング時間 20 [ms] で実時間に行った.

その結果, 計画された節接地力や関節力はシミュレーションされた通りに再現された. 例えば, 接地力がゼロになった第 5 節が路面から浮上していることが Fig 6 の例から確認できる. また, Fig 7 (b) には実測した z 軸力の 2 乗和を示すが, 力の変化履歴はシミュレーション結果 Fig 5 (d) と傾向が一致していることがわかる. さらに, Fig 7 (a) で示すように複数の節支持力が同時に零となる区間では大きな姿勢変化が起きているが, 全体としては $\pm 4^\circ$ 以内の偏差で安定な姿勢制御が実施されている. このように, 接地力 F_{zi} や関節力 f_{zi} に関する Fig 5 のシミュレーションや Fig 7 の実験結果から, 提案した動的手法に基づく姿勢制御法の妥当性は確認できた.

ところで, z 軸力制御のみでは節を目的高さに自動的に調整できず, 浮上する節に対しては $z_{di} = Z_i - Z_{i-1}$ ($i = 1 \sim 6$) を目標指令とした z 軸位置制御系を導入する必要がある. ところが, これまで KR-II で試みた位置制御系では安定な高さ調整

Fig. 6 Experiment overview

(a) Attitude displacements

(b) Sum of squares of z -axes joint forces

Fig. 7 Obstacle passing over experiment results

が得られず, z 軸位置制御の振動が全体の姿勢制御に悪影響を及ぼした. そのため, Fig 7 の実験では位置制御を実施しなかった. しかし, 前述の通り本論文でシミュレーションした障害物跨ぎ越え動作では 50 [mm] 以上の高さでは節支持力は零に設定してあるため, Fig 5 (a) の節高さを実現できなくても Fig 5 (b) (c) に示す節支持力や関節力は変わらない. そのため, z 軸位置制御なしでも本論文で議論した最適配分を考慮した計算トルク法に基づく姿勢制御の有効性は上述のシミュレーションや実験によって検証できたと結論づけられる. ただし, 今後は節が浮上した後に z 軸サーボをアナログ位置制御系に切り替える方法を導入し, 安定な節高さ制御によって完全な障害物や溝の乗越え動作の実現を試みる.

7. ま と め

節体幹型移動ロボットは溝の乗り越えやパイプの跨ぎ越え動作を可能にする機構構成を成しているが, 車輪を路面から浮上させた場合でも安定した運動を実現する姿勢制御法が未だ実

現されていなかった。そこで、本論文ではロボット全体の力とモーメントの動的釣合式を考慮し逆動力学的手法に基づいた姿勢制御法を新しく導入した。提案した姿勢制御法とは、胴体の内部力（ z 軸力）の能動的な制御によって複数の車輪—路面間の節支持力を変化させて胴体を任意姿勢にあやつる制御法であると解釈できる。具体的には関節力のノルム最小化問題を節支持力配分（内力）を変数とした一般的な2次計画問題に帰着させ、不等式制約条件も含めた効率的な解法を提案した。本手法の妥当性はシミュレーションと実機実験によって検証した。

今後の課題としては慣性パラメータなどをより正確に求めるための同定法の導入、そして同定後にも存在するであろうモデルの不確かさに対応するためのロバスト制御手法の適用、そして実験を用いた総合的な対地適応走行実験の実施などであり、それらの点は今後引き続き検討していく予定である。

参考文献

- [1] 広瀬茂男, 森島昭男: “節体幹型移動ロボット「蛟龍」の基本的運動調整”, 計測自動制御学会論文集, vol.25, no.12, pp.1331-1338, 1989.
- [2] 広瀬茂男, 森島昭男, 塚越真一, 妻木俊道, 物部宏之: “節体幹型移動ロボット KR11 の開発”, 日本ロボット学会誌, vol.9, no.5, pp.551-559, 1991.
- [3] 福島 E. 文彦, 広瀬茂男: “節体幹型移動ロボットの絶対座標型操舵制御”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.4, pp.523-531, 1996.
- [4] K.J. Waldron, V. Kumar and A. Burkat: “An actively coordinated mobility system for a planetary rover,” Proc. 1987 ICAR, pp.77-86, 1987.
- [5] Commissariat A l'Energie Atomique: “Rapport d'activite 1987,” Unité de Génie Robotique Avancé, France, 1987.
- [6] J.W. Burdick, J. Radford and G.S. Chirikjian: “Hyper-redundant robots: kinematics and experiments,” International Symposium on Robotics Research, pp.1-16, 1993.
- [7] D. Tilbury, O.J. Sordalen and L. Bushnell: “A Multisteering Trailer System: Conversion into Chained Form Using Dynamic Feedback,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.11, no.6, pp.807-818, 1995.
- [8] 築島隆尊, 高野政晴, 佐々木健, 井上健司: “車輪式移動ロボットの運動学および動力学的一般理論に関する研究”, 日本ロボット学会誌, vol.8, no.6, pp.699-711, 1990.
- [9] 酒井秀男: “車輪移動機構の ABC—タイヤの力学”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.1, pp.113-118, 1995.
- [10] K. Thanjavur and R. Rajagopalan: “Ease of Dynamic Modelling of Wheeled Mobile Robots (WMRS) using Kane's Approach,” Proc. of IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation, pp.2926-2931, 1997.
- [11] Y. Shan and Y. Koren: “Design and Motion Planning of a Mechanical Snake,” IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, vol.23, no.4, pp.1091-1100, 1993.
- [12] M. Nilsson: “Snake Robot Free Climbing,” Proc. IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation, pp.3415-3420, 1997.
- [13] G. Migads and J. Kyriakopoulos: “Design and Forward Kinematic Analysis of a Robotic Snake,” Proc. IEEE Intl. Conference on Robotics and Automation, pp.3493-3497, 1997.
- [14] 広瀬茂男: ロボット工学—機械システムのベクトル解析—, pp.22-26, 裳華房, 1987.
- [15] J. Kerr and B. Roth: “Analysis of Multifingered Hands,” The Intl. Journal of Robotics Research, vol.4, no.4, pp.3-17, 1986.
- [16] 中村仁彦, 永井清, 吉川恒夫: “複数のロボット機構による協調あやつりの力学”, 日本ロボット学会誌, vol.4, no.5, pp.489-498, 1986.
- [17] I.D. Walker, R.A. Freeman and S.I. Marcus: “Dynamic Task Distribution for Multiple Cooperating Robot Manipulators,” Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.1288-1290, 1988.
- [18] Y. Nakamura, K. Nagai, T. Yoshikawa: “Dynamics and Stability in Coordination of Multiple Robotic Mechanisms,” The Intl. Journal of Robotics Research, vol.8, no.2, pp.44-61, 1989.
- [19] 広瀬茂男, 福島 E. 文彦, 森島昭男: “節体幹型移動ロボット「蛟龍」の研究, 第 11 報基本的運動調整系の実現”, 第 9 回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.311-314, 1991.
- [20] 福島 E. 文彦, 広瀬茂男, 林文雄: “節体幹型移動ロボット「蛟龍」の研究, 第 15 報バランス式に基づく姿勢制御の提案”, 第 14 回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.609-610, 1996.
- [21] F.T. Cheng and D.E. Orin: “Optimal Force Distribution in Multiple-Chain Robotic Systems,” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol.21, no.1, pp.13-24, 1991.
- [22] M.A. Nahon and J. Angeles: “Real-Time Force Optimization in Parallel Kinematic Chains under Inequality Constraints,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.8, no.4, pp.439-450, Aug. 1992.
- [23] 吉川恒夫: “把持と操りの基礎理論”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.48-54, 1996.
- [24] M. Buss, H. Hashimoto and J. Moore: “Dextrous Hand Grasping Force Distribution,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.12, no.3, pp.406-418, 1996.
- [25] J.-S. Chen, F.-T. Cheng, K.-T. Yang, F.-C. Kung and Y.-Y. Sun: “Solving the Optimal Force Distribution Problem in Multilegged Vehicles,” Proc. of the 1998 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.471-476, Belgium, May 1998.
- [26] D.W. Markefka and D.E. Orin: “Quadratic Optimization of Force Distribution in Walking Machines,” Proc. of the 1998 IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation, pp.477-483, Belgium, May 1998.
- [27] D. Goldfarb, A. Idnani: “A numerically stable dual method for solving strictly convex quadratic programs,” Math. Programming, vol.27, pp.1-33, 1983.
- [28] 茨木俊秀, 福島雅夫: FORTRAN77 最適化プログラミング. 岩波書店, pp.87-132, 1991.
- [29] ASNOP 研究会編: パソコン FORTRAN 版非線形最適化プログラミング. 日刊工業新聞社, pp.41-56, 1991.
- [30] B.R. Markiewicz: “Analysis of the Computer Torque Drive Method and Comparison with Conventional Position Servo for a Computer-Controlled Manipulator,” Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, TM 33-601, Mar. 1973.

福島 E. 文彦 (Edwardo F. Fukushima)

1967 年 4 月 14 日生。1993 年東京工業大学機械物理工学専攻修士課程卒業。同年同大学博士課程入学。1994 年 8 月から東京工業大学工学部機械宇宙学科助手。現在に至る。移動ロボットの制御, DC モータ駆動装置, テザーを用いた連結機構の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)

広瀬茂男 (Shigeo Hirose)

1947 年 12 月 6 日生。1976 年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了。工学博士。同年同大学機械物理工学科助手, 1979 年同大学助教授, 1992 年同大学教授。現在に至る。ロボットの機構, センサ, 制御の研究に従事。(日本ロボット学会正会員)