節体幹型移動ロボットの絶対座標型操舵制御

福島 E. 文彦* 広瀬 茂男*

Inertial Reference Frame Based Steering Control for The Articulated Body Mobile Robot

Edwardo F. Fukushima* and Shigeo Hirose*

This paper presents a new computationally efficient method for calculating steering control commands for the articulated body mobile robot "Koryu-II (KR-II)". KR-II is composed of six cylindrical segments linked in series and has a long snake-like appearance. The introduced method considers that each segment center travels over a given desired trajectory, so that, knowing the position of the foremost segment, the position of the following segments can be calculated using geometrical relationships, and therefore the bending angle θ_{seg} of these segments, which are to be controlled, can be derived. This method is based on a trajectory planning scheme in the inertial reference frame, and tracks the segment center positions using a simple and effective numerical searching algorithm, making it feasible for real time computation. The extension of this method for the "W-Shaped Configuration" (a configuration that augments the lateral stability of the robot) steering control is also addressed, and the validity of these methods is verified by experiments on the mechanical model KR-II.

Key Words: Articulated Body Mobile Robot, Snake Like Robot, Steering Control, W-Shaped Configuration

1. はじめに

筆者らは、不整地で高度の対地適応的移動性を発揮するロボットの実現を目的とし、ヘビの推進運動に関するバイオメカニカルな研究を基にした、ヘビ型の節体幹移動ロボット「蛟龍 (KR)」の開発を行っている。KR は複数のユニット化された節をアクティブなジョイントで直列に連結した列車のような形態をなす移動体であり、1) 階段や山道また狭隘な屈曲路などでも、能動的に地形に適応する対地適応推進ができる。2) 溝があっても、自分自身の体幹を橋のようにして乗り越えられる。3) 多関節構造の体幹をロボットアームとしても利用できハンドリング作業ができる。4) 各節の機構が単純であり、また物資を各節に分散して積載できるため、物資積載性能が高い。5) ユニット化された構造であるためメンテナンス性、運搬性が良い、などの特徴を有するものである。このような節体幹型移動ロボット KR を実際に応用可能としていくため、筆者らはこれまで KR の機械モデルを実際に試作しその制御問題を検討してきた [2][4][5]。Fig.1 は現在研究対象としている第 2 次の機械モデル KR-II である。この KR-II の試作の目的は、原子炉内での巡回検査や簡単な補修作業、また危険な災害現場での偵察作業などを、安全な所にいる人間の遠隔操縦によって実施することである。

さて、節体幹型移動ロボット KR の特徴は、なにしろ体幹が長いことである。そのため KR を遠隔操縦型ロボットとして利用するためには、遠隔地の操縦者から与えられる操舵指令を解釈し KR の長い体幹全体を統括的に制御する KR 独特の操舵制御手法が必要である。KR 特有の操舵制御法について、筆者らはこれまで一連の研究を行い「絶対座標型操舵制御法」と呼ぶ操舵制御法を見出し、その有効性を KR-II による実機走行試験

Fig.1 Articulated Body Mobile Robot KR-II

原稿受付 1995 年 2 月 1 日

*東京工業大学工学部

*Tokyo Institute of Technology

で検証した。この操舵制御手法の有効性は高く、現在では初心者でも簡単に KR-II が操舵できるようになっている。

本論文ではこの「絶対座標型操舵制御法」の詳細を明確化することを目的とし、まず第 2 章で準備として対象とする KR の機械モデルである KR-II の機構と解析モデルを示す。第 3 章で絶対座標型操舵制御法の概念と実時間制御のための具体的なプログラミング法を示す。第 4 章で KR-II 特有の W 字型操舵への拡張法を論ずる。そして最後に第 5 章でこれらの考察の有効性を検証する KR-II による操舵実験の結果を報告する。

2. KR-II の機構とそのモデル

2.1 基本構成

KR の操舵制御系を検討するため、対象とする節体幹移動ロボットの第 2 次機械モデル KR-II (Fig. 1) の基本構成を示す。KR-II は全長 3.3[m]、高さ 1[m]、全重量 320[kg] である。KR-II は先頭を除く 6 節 (第 1 節～第 6 節) はすべてユニット化され、Fig. 2 に示す「基本ユニット節」から構成されている。先頭の第 0 節は他の節と異なる機構構成でありマニピュレータが装備されている。

基本ユニット節内にはバッテリーが搭載されて自立走行が可能である。また制御用計算機も搭載されている。この搭載計算機では、i) オペレータからの操舵指令を解釈して全体の節への操舵指令を生成する制御、ii) 姿勢安定や障害物回避のための反射的制御、そして、iii) サーボシステムの駆動制御、などが実施されている。KR-II の「基本ユニット節」は節前部連結面 P_f と節後部連結面 P_r で次の節と連結される。この連結面には駆動電源用と信号配線用のコネクタも設けられ電気的にも同時に接続されるようになっている。このようなユニット化構造は、KR-II を節単位に分解して作業現場へ簡単に持ち運べるようにするためである。

KR-II の各節 ($n = 0 \sim 6$) は以下の三つの能動自由度を有する：

- z 軸：節前部連結面 P_f で前節を上下に並進する自由度。
- θ 軸：節中心軸回りの節前部と後部の相対旋回自由度。
- s 軸：各節の能動車輪による推進自由度。

Fig. 2 KR-II's unit "segment"

各節には片側に 1 輪が装備されている。偶数節の車輪は進行方向左側に、奇数節の車輪は右側に配置される。第 0 節には Fig. 3 に示すように能動車輪が節中心部に取り付けられている。各節に 1 輪しか装備しなかったのは、凹凸面への適応を節相互の上下推進自由度で行えるようにし、余分なアクチュエータの装備をせずに軽量化するためである。

KR-II の第 1 節～第 6 節の基本ユニット節の車輪の向きは、Fig. 4 に示すように「1/2 角機構」と呼ぶ機構によって駆動され、節間の屈曲角のちょうど中間の方向を常時向くようにしている。車輪の向きが独立に駆動できれば、もちろん操舵性は良いがアクチュエータが増え車体重量が増大する。「1/2 角機構」はこのような重量増を防ぐために導入している。これにより車輪の方向は KR-II が進むべき軌跡に常時ほぼ一致するが、完全には一致しない。指令された軌道によっては、進行方向と車輪の向きが異なり横滑りが発生する。このことから、KR-II の操舵制御には「1/2 角機構」が生成するスリップの効果の考察が不可欠である。

ただし、KR-II の第 1 節～第 6 節の基本ユニット節のうち、第 6 節の車輪の向きだけは第 1 節～第 5 節までと異なり常に進行方向に向けられる。なぜなら、この第 6 節の車輪の方向は「1/2 角機構」によって決められるものの、後続節がないことから車輪の向きを進行方向に向けるような関節角を指令することができるためである。

2.2 第 0 節の機構

KR-II の各節は z 軸と θ 軸の運動自由度を有する。そのため、KR-II の基本ユニット節を順に連結していくと第 1 節の前部連結面にはこれらの運動自由度が残される。そのため KR-II では第 1 節の前方にさらに節上部にマニピュレータを装備した第 0

Fig. 3 KR-II's foremost segment mechanism

Fig. 4 KR-II's "half angle mechanism"

節と呼ぶ特別な節を連結している。マニピュレータは節下部の能動車輪（s 軸）と連動して動き、第 0 節の車輪と同一方向を向くようになっている。つまり、第 0 節ではマニピュレータ・アーム部が第 1～6 節を構成する基本ユニット節の節前部に相当する。

このように KR-II の七つの車輪の推進方向は、第 0 節と第 6 節の車輪は推進すべき軌道に常時一致するように制御されるが、その他の節（第 1 節～第 5 節）は「1/2 角機構」で拘束され推進すべき軌道からは若干誤差を残しつつ追従するようになっている。

2.3 KR-II のモデル化

KR-II の走行運動においては、各節の z 軸の方向は常時重力加速度の方向を向くように姿勢制御される。そのため、例えば凹凸面上での操舵であっても、KR-II の操舵制御は基本的には xy 平面上で記述できる。よって以降の KR-II についての操舵制御の考察は Fig. 5 のように二次元平面上で行う。モデル化に用いる変数は以下の通りである。

- θ_n θ 軸旋回角度：第 n 節の節後部に対する節前部の相対旋回角度。
 - Θ_n 節ベクトルの向き：絶対座標系での第 n 節の節前部の向き。これは絶対座標系での第 $n-1$ 節の節後部の向きと一致する。 Θ_7 は第 6 節の後部の向き。
 - Φ_n 車輪ベクトルの向き：絶対座標系での第 n 節の車輪の向き。ただし、2.2 節の条件から $\Phi_0 = \Theta_0$ 。
 - L 節間距離：隣節同士の節中心から節中心までの距離。KR-II ではすべての節間で $L = 0.48$ [m]。
 - B 節中心-車輪距離：水平面上で節中心から車輪接地点までの距離。KR-II の基本ユニット節では $B = 0.23$ [m]。第 0 節では $B = 0$ 。
- ここで、 θ_n の定義から

$$\theta_n = \Theta_n - \Theta_{n+1} \quad n = 0 \sim 6 \quad (1)$$

であり、「1/2 角機構」の拘束から

$$\Phi_n = \Theta_n - \frac{\theta_n}{2} = \frac{\Theta_n + \Theta_{n+1}}{2} \quad n = 1 \sim 6 \quad (2)$$

である。

Fig. 5 KR-II's main variables

3. 節体幹型移動ロボット KR の操舵制御

節体幹型移動ロボット KR の操舵制御系は、大別すると二つの部分に分けられる。第 1 の部分は、Fig. 6 に示すように人間オペレータが KR 本体に搭載されたカメラなどで移動すべき環境をモニタし、「先頭節」に対してその移動方向と推進速度を指令する制御系である。この指令は、KR があたかも先頭節だけからなる移動体とみなして与えられるものである。そして第 2 の部分は、先頭節に与えられた操舵指令（具体的には Fig. 6 に示す θ_0 と v_0 ）を解釈し、KR 全体の運動計画を生成する制御系である。この第 2 の制御系は、先頭の軌跡をすべての節ができるだけ滑らかにかつ効率よく追従するような操舵指令を与えるものである。KR-II の場合には、この第 2 の制御は搭載した計算機が実施する。この第 2 の制御系は節体幹形状をなす KR に特有のものであり、従来からの移動機械や移動ロボットでは考えられなかったものである。

KR の操舵制御系はこのように構成されているため、筆者らは KR の操舵制御の核心はこの第 2 の制御系であると考え、その具体的構成法をこれまで検討してきた [1][7]～[9]。特に前報 [7][9] での考察では、1) 消費エネルギーからの評価、2) 車輪の横方向の滑り量（車輪と路面との摩擦によるエネルギー損失量）からの評価、3) 軌道追従性（先頭節が通過した後を後続節がどれだけ正確にたどるかの特性）を判断基準とする評価、などの側面から KR の操舵制御を総合的に検討した。その結果、軌道追従性と消費エネルギーを重視すると節垂直軸回りの旋回軸（ θ 軸）には「幾何学的軌道追従法： θ_3 」、そして車輪の推進軸（s 軸）には各車輪にトルクを一樣に配分する「トルク型車輪速度制御法」が最も望ましいという結論を得た。ここでいう「幾何学的軌道追従法： θ_3 」とは、KR の目標軌道を直線や円弧の式の組み合わせで絶対座標上に表記し、その軌道を KR が追従する操舵指令を厳密に誘導し操舵するものである。

この「幾何学的軌道追従法： θ_3 」は、しかしながら幾何学演算に長時間の演算を必要とし実時間制御には適さなかった。またあらかじめ与える幾何学的軌道への追従制御だけを考慮するものであったため、操縦者からの任意の操舵指令に追従する操舵にも不適であった。そのためこれまで KR-II の操舵制御においては、「幾何学的軌道追従法： θ_3 」よりも操舵性能が若干劣るものの、演算が単純で任意の操舵指令軌道に追従でき実時間制御が可能な「移動平均シフト法： θ_2 」を採用していた。しかし

Fig. 6 KR-II's remote operation scheme

ながら、その後も引き続き節体幹型移動ロボットの第2次モデルである KR-II について操舵制御実験を繰り返し、その制御法の最適化を筆者らは図ってきた。その結果、以下に示す「絶対座標型操舵制御法」と呼ぶ、より望ましい操舵法を見出すことができた。

3.1 絶対座標型操舵制御法の導入

新たに提案する「絶対座標型操舵制御法」とは、i) KR が移動する環境を表現する「絶対座標系」をまず定義しておき、オペレータから第0節に与えられた操舵制御指令によって KR がたどるべき目標軌道をその「絶対座標系」に記述する。そして、ii) その記述した軌道に KR のすべての節の中心が常にたどるように全節の関節指令値を求める、という手順で操舵を行うものである。本手法を「絶対座標型操舵制御法」と呼ぶのはこのように絶対座標系に操舵軌道を記述するという特徴を有するためである。この「絶対座標型操舵制御法」の基本概念は、絶対座標系での軌道と KR の形状の幾何学的関係から操舵指令値を出すものであり、その意味では「幾何学的軌道追従法： θ_3 」と同じである。

しかし、新しく提案する操舵制御法では Fig. 7 に示すように、目標軌道 $Traj(s)$ の記述に軌道に沿った移動距離 s を助変数とした媒介変数表示を導入している。これによって「幾何学的軌道追従法： θ_3 」で問題であった点を解決し、i) 運動計画の算出が高速にできる、ii) 固定した軌道を追従するだけでなく、オペレータから与えられる任意の操舵制御指令を追従できる、などの新たな特性を示す実時間の操舵制御に使用できるようになっている。また、iii) KR-II 特有の体幹を W 字形にして車幅を広げ左右の安定性を向上させる「W 字型体形」の走行を実現するにも使用できる。という機能性も持つ。これらのことから本操舵法は、KR-II に特に有効な手法であると考えられる。

なお、絶対座標系に関する演算から操舵指令値を生成するという考え方は、筆者らにとっては実はかなり受け入れ難いものであった。なぜなら、筆者らの KR についての研究はヘビの推進運動に関するバイオメカニカルな研究から出発したものであるが、実際のヘビの蛇行運動の生成機構には自分が絶対平面でどのような姿勢をなしているかを知り、それに基づいて体型を決定するというような制御は想定できない。ヘビの蛇行運動は「体幹の屈曲情報を体幹に沿って頭部から尾部にシフト」という制御に基づくことは神経生理学的にも推定されている事実であり、実際筆者らがこれまで試作してきたヘビ形ロボットの操

舵もこのようなシフト制御に基づいて行ってきたからである。

しかし、KR-II の最適な操舵制御法を見出す際には、生物であるヘビとの類似性にこだわることはもちろんまったく必要ない。あくまで工学的制約条件の範囲内で最適な手法を探るべきである。KR の辿るべき目標軌道を絶対座標系に対して記述するという「絶対座標型操舵制御法」の有効性は、このような立場で検討した結果として誘導されたものである。この操舵制御法の実施の手順は次節で述べる。なお、「絶対座標型操舵制御法」を行う場合の車輪の推進軸 (s 軸) の制御は従来と同じであり「トルク型車輪速度制御法」を使用している。

3.2 絶対座標型操舵制御法の実施手順

提案する「絶対座標型操舵制御法」は、

- (1) まず、KR の初期軌道とその絶対座標系を想定する。
- (2) サンプル時間ごとに、その時間までに推定した KR の位置と姿勢と、その時間における走行状態から、次のサンプル時間の先頭節の位置と姿勢を絶対座標系上に推定する。
- (3) KR が推定した軌道をたどる条件で、次のサンプル時間での KR のすべての節の位置と姿勢を絶対座標系で誘導する。
- (4) 誘導した絶対座標系の値から、KR の姿勢パラメータを求め、KR に指令する。
- (5) 以降 (2), (4) の手順を繰り返す。

というようにして操舵を行うものである。

なお、この操舵制御は「人間から与えられる操舵指令は制御サンプル時間ごとに離散的に与えられる。」という仮定を設定して行っていることに相当している。実際の操舵指令はもちろん連続的である。そのためこれは実際には成立しない。しかし、KR-II の場合サンプル時間は 10[msec] でありこのような仮定を設定してもそれほど誤差がないことは 5 節の実験結果で確認している。

それぞれの手順の詳細は以下の通りである。

3.2.1 初期軌道の生成

時刻 $t = 0$ 、すなわち初期状態では先頭節がいままでたどった軌跡の履歴は存在せず、先頭節から最後尾節を結ぶ軌道がない。そのため、推進開始時には KR の初期姿勢から先頭節の初期軌道を生成する作業が必要である。本手法では、各節中心を通過するスプライン補間式を用いてその初期軌道を生成する。この演算により $\Theta_0(0)$ が与えられる。

3.2.2 走行軌跡の更新

第0節の車輪に装備されたタコジェネレータから現時刻 t での KR の実際の推進速度 $v_{0m}(t)$ を測定する。サンプル時間 Δt が微小であることから時刻 $t + \Delta t$ までに KR が推進する距離 δs を

$$\delta s = v_{0m}(t)\Delta t \quad (3)$$

と求める。

さらに、時刻 t での先頭節後部の向き $\Theta_1(t)$ は時刻 0 から時刻 t までの絶対座標系上での軌道誘導計算で与えられている。そのため、時刻 t での計測された先頭節の旋回角度 $\theta_{0m}(t)$ から、

$$\Theta_0(t + \Delta t) = \Theta_1(t) + \theta_{0m}(t) \quad (4)$$

Fig. 7 Trajectory representation for the new method

のように時刻 $t + \Delta t$ での先頭節の向き $\Theta_0(t + \Delta t)$ を求める。これらの式から、時刻 $t + \Delta t$ での先頭節の位置と軌道座標点を、

$$Traj(s_0(t + \Delta t)) = Traj(s_0(t)) + E^{\Theta_0(t + \Delta t)} \begin{bmatrix} \delta s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ただし、

$$s_0(t + \Delta t) = s_0(t) + \delta s$$

$$E^{\Theta} = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & -\sin(\Theta) \\ \sin(\Theta) & \cos(\Theta) \end{bmatrix}$$

と誘導する。なお、実際には計算機のメモリ節約のため式 (5) の演算はできる限り一定間隔の移動距離 Δs ごとに行うようにしている。

3.2.3 後続節の位置と姿勢の探索

KR のすべての節中心が、軌跡 $Traj_0(s_n) = (x(s_n), y(s_n))$ をたどる条件で、節間の距離が L となる各節の位置を誘導する。この探索は推定した先頭節の位置 $s_0(t + \Delta t)$ から次の第 1 節の位置 $s_1(t + \Delta t)$ をまず探索し、その探索が完了したら第 1 節から第 2 節の位置を探索するというように順に後部節に向かって行っていく。この探索では、第 $n-1$ 節と第 n 節の節間距離 L_{calc} を

$$L_{calc}^2 = [x(s_n) - x(s_{n-1})]^2 + [y(s_n) - y(s_{n-1})]^2 \quad (6)$$

と誘導し、

$$(0.99 L)^2 \leq L_{calc}^2 \leq (1.01 L)^2 \quad (7)$$

のように収束を判定しながら行う。ただし、式 (6) では平方根の演算を避けるため式の表記を二乗の形式のままにとどめている。また、式 (7) では探索の収束性を上げるため、若干の収束誤差を許容するようにしている。ここでの 0.99 や 1.01 などの許容誤差定数は KR-II の操舵で実際に使用したものである。

さらに、KR-II での探索においては、各節の探索開始点を前のサンプリング時間における軌道上の位置からにすることによって高速化を計っている。ただし、このような演算で操舵指令を生成可能とするために、操縦者から与えられる操舵指令は、i) その最小旋回半径は節間距離 L より大きい、ii) 後続節に衝突するような軌道を生成しない、などの条件を満たすものでなければならない。

3.2.4 旋回角度指令値 θ_n の算出

時刻 $t + \Delta t$ での $n = 1 \sim 6$ のうちの第 n 節ベクトルの向きは以上の計算から

$$\Theta_n(t + \Delta t) = \text{atan2}[y(s_{n-1}) - y(s_n), x(s_{n-1}) - x(s_n)] \quad (8)$$

と求まる。ただし、第 6 節の後部の向き Θ_7 は車輪を推進方向に向けるため

$$\Theta_7 = 2\Phi_6 - \Theta_6 \quad (9)$$

と与える。これらにより θ 軸旋回角度指令値 $\theta_n (n = 1 \sim 6)$ は次式のように求まる。

$$\theta_n = \Theta_n - \Theta_{n+1} \quad (10)$$

3.3 絶対座標運動推定の妥当性

試作モデル KR-II の場合には、その運動を絶対座標系で計測するセンサは装備していない。そのため導入する「絶対座標型操舵制御法」では、絶対座標系を逐次的に推定している。そのため、「絶対座標型操舵制御法」が十分な精度を発揮するためには、この座標系の推定が正確であることが必要である。そのため、直線路から旋回半径 $R = 500$ [mm] のコーナを 90 度回った後直線路に戻るコースを想定し、その既知設定軌道を KR-II がたどる操舵制御について「絶対座標型操舵制御法」でどの程度正確な操舵が可能かを調べるシミュレーション実験を行った。比較のため、厳密な操舵指令を生成できる「幾何学的軌道追従法: θ_3 法」での操舵指令値も生成した。ただしシミュレーションは、移動速度を 100 [mm/sec]、サンプリング時間は 10 [msec] として実際の KR-II の走行と条件を合わせた。

シミュレーション実験の結果を Fig. 8 に示す。破線で示した「絶対座標型操舵制御法」によって生成した操舵指令値は、厳密な指令値である「幾何学的軌道追従法: θ_3 法」による指令値と非常によく一致することが分かる。そして、「絶対座標型操舵制御法」によって生成された軌跡も、ほとんど既知設定軌道と一致していた。このことから、「絶対座標型操舵制御法」における絶対座標系での運動の推定はかなり高い精度を有することが推定できる。

ただし精度が高いとはいっても、本手法は絶対座標運動をオドメトリの原理に基づいて推定する手法であり、滑りやすい環境を長距離移動すれば当然誤差は蓄積し、推定する絶対座標系は実際の絶対座標系とずれていく。しかし、「絶対座標型操舵制御法」ではこのような誤差の蓄積はそれほど問題にならないという特性を有している。このことは重要でありご注意いただきたい。なぜなら、KR がこの絶対座標系を利用するのは、先頭節に対する後続節の運動を生成するためであり、推定の精度が問題になるのは KR の体幹の長さ (KR-II の場合には 3.3 [m]) の範囲だけだからである。例えば、推定している絶対座標系が実際の絶対座標系から大きくドリフトしていても、遠隔操縦をする操縦者はテレビカメラなどの情報により、先頭節を後続節に対し相対的に操縦するだけであるため、このドリフトの存在は問題とならないのである。

Fig. 8 θ axis steering commands

4. 「W字型体形」

4.1 W字型体形とは

KR-II は人間がやっと通れるような狭い通路も通過できるように幅が狭く設計されている。そのため、直線状の体形で凹凸面を走行する場合には若干不安定となる。この不安定性の問題を解決するため、KR-II では Fig. 9 に示すように特に狭い隙間を通り抜ける場合以外は全体を W 字型体形にし、車幅を広くする体形を構成して操舵する制御モードが有効であることをこれまで述べてきた [3]。本報ではその具体的な生成法を論ずる。なお KR-II は、車輪の向きを「1/2 角機構」によって駆動している。そのため W 字形体形をとっても、KR-II の各節の車輪の向きは全体としての推進方向にそろって向く特性を有し、この走行体形は有効である。

さて、このような W 字型体形をここでは

「絶対座標系上の二つの並行な軌跡を想定し、それらに KR-II の奇数節中心、および先頭節と偶数節の節中心を一致させる体形」

と定義する。ここでいう並行な軌跡とは、左側軌跡における各点での法線が右側軌跡においても法線となり、その法線で結ばれる両曲線の距離が曲線上のどの点でもできる限り一定であるような隣合う二つの軌跡である。これらの左側軌跡と右側軌跡は KR-II の左右節がたどる左側レールと右側レールに相当する。そのため本文ではこれを「レール」とも記述する。また、左右軌跡の幅（法線で結ばれる両曲線の距離）を W 字型幅 B_w と定義し、「W 字型体形」を取る度合いを示すパラメータとして使用する。 B_w が零だと左側と右側軌跡が一致し、直線状体形に帰着する。このように「W 字型体形」と「直線状体形」間の移行は B_w を変化させることで実現でき、「W 字型体形」は「直線状体形」を含む。走行安定性を向上するためには、W 字型幅 B_w は移動環境が許す限り大きくとるべきであるが、最小旋回半径からの制約を受ける。この制約については付録 A で論ずる。

4.2 「W 字型体形」操舵制御法

絶対座標型操舵制御法を W 字型体形へ拡張するには走行軌跡の設定法を変えれば良い。直線状体形では先頭節の軌跡が全体の辿るべき走行軌跡であったが、W 字型体形では偶数節の辿るべき左側軌跡を $Traj_L(s)$ 、奇数節の辿るべき右側軌跡を $Traj_R(s)$ とそれぞれ並行に生成する。以下に、第 3.2 節に記述した絶対座標型操舵制御法の基本アルゴリズムを W 字型体形操舵制御法に拡張するための具体的な変更点を示す。

4.2.1 目標軌道の初期生成

KR-II の初期状態を W 字型体形と想定する場合の各節初期

Fig. 9 A W-shaped configuration

軌道の推定法は、基本的には第 0, 2, 4, 6 節の通過点から左側軌跡: $Traj_L(s)$ を、第 1, 3, 5 節の通過点から右側軌跡: $Traj_R(s)$ を求める。しかし単に右側と左側の軌道を独立に補間生成しても、一般的には両曲線は W 字型体形の定義に当てはまる並行なレールとはならない。そこで、次のような手順を導入した。

- (1) 初期体形における W 字型幅 $B_{w_{initial}}$ を推定する。これは第 1 節から第 5 節までの間の W 字型幅の平均値を用いて

$$B_{w_{initial}} = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 L \sin \left(\frac{|\theta_n|}{2} \right) \quad (11)$$

と求める。なお、先頭節と最後尾節の節ベクトルの向きに関しては、運動の初期化のときに任意の方向に向かせることができるためここでは考慮しない。

- (2) 左側補助軌跡 $Traj_{L_{aux}}(s)$ を第 0, 2, 4, 6 節の通過点から補間式で生成する。
- (3) $Traj_{L_{aux}}(s)$ 上の第 0, 2, 4, 6 節の中心点から法線方向に距離 $-B_{w_{initial}}$ 離れた位置にそれぞれ $0'$, $2'$, $4'$, $6'$ と呼ぶ点を設定する。
- (4) 右側レール $Traj_R(s)$ を第 1, 3, 5 節の中心点と $0'$, $2'$, $4'$, $6'$ からなる七つの点から補間式で生成する。
- (5) $Traj_R(s)$ 上の第 1, 3, 5 節の中心点から法線方向に距離 $B_{w_{initial}}$ 離れた位置にそれぞれ $1'$, $3'$, $5'$ と呼ぶ点を設定する。
- (6) 左側レール $Traj_L(s)$ を第 0, 2, 4, 6 節の中心点と $1'$, $3'$, $5'$ からなる七つの点から補間式で生成する。

上記のアルゴリズムを用いた目標軌道の生成の一例を Fig. 10 に示す。

4.2.2 走行軌跡の更新

W 字型体形の場合、奇数節と、第 0 節と偶数節はそれぞれ $Traj_R(s_0)$ と $Traj_L(s_0)$ の軌跡上をたどる。このうち、 $Traj_L(s_0)$ は式 (5) から求められる $Traj(s_0)$ と同じ式から更新できる。また、右側の軌跡 $Traj_R(s_0)$ は W 字型体形の定義から、左側の軌跡から法線方向に W 字型幅 B_w だけ離れて位置する。よって $Traj_R(s_0)$ は

$$Traj_R(s_0(t + \Delta t)) = Traj_L(s_0(t + \Delta t)) + E^{\Theta_0(t + \Delta t)} \begin{bmatrix} 0 \\ -B_w \end{bmatrix} \quad (12)$$

と求めればよい。

Fig. 10 An example of trajectory initialization

4.2.3 節中心位置の探索

奇数節と、第0節と偶数節の節中心の座標点がそれぞれ $Traj_R(s_n)$ と $Traj_L(s_n)$ 上に属することを考慮して、直線軌道の式 (7) と同じ考え方で節中心位置を求める。

4.2.4 θ 軸旋回角度指令値 θ_n の計算

ここでも直線軌道の考え方がそのまま適用できる。

4.3 直線状体形操舵との統合

上述のアルゴリズムから分かるように、W字型操舵では右側の走行軌跡 $Traj_R(s_0)$ を求めるために式 (12) が追加されたこと、そして走行軌跡格納容量が2倍必要になること以外には直線状体形操舵と大差ない。そして直線状体形ではW字型幅 B_w が零の $Traj_R(s_0)$ は左側の走行軌跡 $Traj_L(s_0)$ と一致するので実際には式 (12) を計算する必要はなくなる。そのため、直線状体形での操舵はW字型操舵法に容易に統合できる。

4.4 先頭節の旋回角度指令 θ_0 の補正

蛟龍では第0節の指令は通常はオペレータからジョイスティック操作によって与えられるが、W字型体形ではW字型体形をとるためのオフセット旋回角度 θ_{0w} をあらかじめ考慮する。

また、W字型体形では直線状体形と比べて進行方向に対する節間距離 L' が短くなり、同じ操舵角指令 θ_{joy} でも旋回半径が小さくなる。そのため、節間距離の変化の比に比例した補正項を導入し、W字型体形での先頭節の旋回角度指令値 θ_0 は

$$\theta_0 = \theta_{joy} \cos(\theta_{0w}) - \theta_{0w} \quad (13)$$

と与える。ただし、

$$\theta_{0w} = \sin^{-1} \frac{B_w}{L} \quad (14)$$

である。

4.5 「直線状体形」と「W字型体形」との切替え

直線状体形とW字型体形間の移行を実現するには基本的には B_w を現在の値から目的値まで緩やかに変化させればよい。Fig. 11 にいくつかの移行の方法を示す。

5. 提案する操舵制御法の実験結果

本論文で提案する操舵制御法の有効性を検証するために、実機のKR-IIを用いていくつかの操舵制御実験を試みた。ただし、走行実験は、平滑なリリウム床面上での走行であり、推進速度は平均350[mm/sec]とした。操舵制御のための計算機にはKR-II本体に搭載した486DX-2/50[MHz]倍速CPU仕様パソコンを用い、サンプリング周期はすべての制御則を含めて10[msec]であった。走行時のKR-IIには、z軸制御に垂直軸を常時重力場方向と一致させながら適当な支持力分布を実現する姿勢制御と力制御を組み合わせたインピーダンス制御を行い、またs軸制御には全体の速度を調整するのに各車輪に様なトルク配分を施すトルク型車輪速度制御法：s3[7][9]を実施した。

Fig. 12, 13, 14 に実験の様子を示す。Fig. 12 は直線状体形でのコーナリング運動である。Fig. 13(a) は直線状体形からW字型体形への移行運動の様子である。最終的なW字型幅は $B_w = 200$ [mm] に設定している。逆に、Fig. 13(b) はW字型

Fig. 11 Line to W-shaped configuration shift

Fig. 12 Right angle cornering experiment

体形から直線状体形への移行運動の結果である。これはW字型幅を $B_w = 200$ [mm] から $B_w = 0$ [m] へ変化させている。最後の Fig. 14 は $B_w = 200$ [mm] のW字型体形でのコーナリング運動を表している。いずれの場合にも緩やかな運動が生成できることが検証できた。

なお、これらの実験ではKR-IIを完全自立状態にして無線で先頭節への操舵指令を与えた。また、本文では詳細には述べなかったが、実際のKR-IIの制御ソフトでは体形間の移行（任意に B_w を変化させること）は旋回運動と同時に与えるようにしている。また、全体の前後関係を逆転して第6節を先頭節にして後方に推進する操舵も導入している。この後退操舵制御は、第0節と第6節の車輪のオフセット量が異なる点以外は前進と同じ構成である。

(a) Line $\Rightarrow$ W-shaped (b) W-shaped $\Rightarrow$ Line

Fig. 13 Configuration shift

Fig. 14 W-shaped configuration steering

6. ま と め

本論文では「絶対座標型操舵制御」と呼ぶ幾何学的軌道従法に分類される新しい操舵制御の効率的な計算法を提案した。本手法は i) 絶対座標系に対して軌道を記述することによってエネルギー効率と軌道追従性の優れた運動が実現できる, ii) ロボットの移動距離を助変数とした媒介変数表示を軌道の記述に用いて演算を高演化し実時間制御を可能としている, などの特徴があることを明らかにした。さらに, 蛟龍の体幹を W 字形に屈曲して安定性を向上した「W 字型体形」の操舵法にもこの操舵制御法が拡張できることも明らかにした。W 字型体形の操舵制御は W 字型幅 B_w を緩やかに変化させることによって実現するものであり, これにより直線状体形は W 字型体形操舵法に統合できた。提案する操舵制御法の妥当性と有効性は実際の節体幹型移動ロボットの第 2 次モデル KR-II による操舵実験に

Fig. 15 Cornering with W-shaped configuration

よって検証した。その結果, 本手法を用いることにより軌道追従性やエネルギー効率の向上はもとより, 操作性が著しく向上することが確認した。今後は蛟龍を実用的な作業に適用していくための問題などを検討していく予定である。

参 考 文 献

- [1] 広瀬, 塚越, 森島: “節体幹型移動ロボット「蛟龍」の研究, 第 7 報 操縦の最適化に関する考察”, 第 8 回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.627-630, 1990.
- [2] S. Hirose and A. Morishima: “Design and Control of a Mobile robot with an Articulated Body,” International Journal of Robotics Research, vol.9, no.2, April, pp.99-114, 1990.
- [3] 広瀬, 森島: “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.
- [4] S. Hirose, A. Morishima, S. Tsukagoshi, T. Tsumaki and H. Monobe: “Design of Practical Snake Vehicle: Articulated Body Mobile Robot KR-II,” Fifth International Conference on Advanced Robotics, Pisa, Italy, June 19-22 1991, vol.1, pp.831-838.
- [5] 広瀬, 福島, 森島: “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.
- [6] 広瀬: 生物機械工学, pp.103-117, 工業調査会, 1987.
- [7] 広瀬, 福島, 塚越: “節体幹型移動ロボットの最適操舵制御の研究”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.5, pp.759-765, 1994.
- [8] 福島, 広瀬: “節体幹型移動ロボット「蛟龍」の研究, 第 12 報 幾何学拘束に基づく操舵制御”, 第 12 回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.377-378, 1994.
- [9] S. Hirose, E.F. Fukushima and S. Tsukagoshi: “Basic Steering Control Methods for The Articulated Body Mobile Robot,” IEEE Control Systems Magazine, vol.15, no.1, 1995.

付録 A. 最小旋回半径 $R_{\min}$ と W 字型幅 B_w の関係

蛟龍が直線状態の W 字型体形を構成している場合には, θ 軸の旋回角度 θ_w と W 字型幅 B_w の関係は

$$B_w = L \sin \frac{\theta_w}{2} \quad (15)$$

となる。ここで, W 字型幅を広くすれば安定性は向上するので, 凹凸面を走行する場合には通常最大の W 字型幅に設定することが望ましい。式 (15) から, θ 軸の最大可動範囲 ($\pm 90^\circ$) を考慮すれば, B_w の最大値は $B_{w\max} = 339.4$ [mm] ($L = 480$ [mm]) になる。しかし, 最大の W 字型幅 $B_{w\max}$ を維持しながら旋回することは θ 軸の可動範囲を越えることになるので不可能である。したがって, B_w を設定する際には KR-II が実現できる最小旋回半径も考慮しなければならない。そのため, KR-II の旋回半径に W 字型幅 B_w がもたらす影響について考察しておく。

Fig. 15 に示される R をコーナーの内側にある節中心軌道の

Fig. 16 $R_{\min}$ vs B_w

$$R = \frac{L^2 + B_w^2 - 2LB_w \sin \frac{\theta_n}{2}}{2(L \sin \frac{\theta_n}{2} - B_w)} \quad (16)$$

ここで、KR-IIの最小旋回半径を制限するのは θ 軸の最大可動範囲である。式(16)で $\theta_n = 90^\circ$ としてW字型幅 B_w を0から339.4[mm]まで変化させたときの最小旋回半径 $R_{\min}$ の誘導結果をFig. 16に示す。この図から、 B_w を280[mm]程度以上にすると $R_{\min}$ は急激に大きくなることが分かる。KR-IIは後退できるため、旋回の困難な場所からも抜け出せるため、最小旋回半径の制限はそれほど大きな問題ではない。KR-IIにより一連の操舵制御実験の結果、 $B_w = 280$ [mm]を最大W字型幅に制限し、 $R_{\min} = 1000$ [mm]ぐらいの最小旋回半径を確保すればほとんど不自由のない操舵が可能であった。

旋回半径、 L を節間距離とすれば、三角関係から次式が求まる。

福島 E. 文彦 (Edwardo F. Fukushima)

1967年4月14日生。1990年ブラジル国CEFET-PR大学工学部電気電子工学科卒業。1993年東京工業大学機械物理学専攻修士課程修了。1994年から東京工業大学工学部機械宇宙学科助手、現在に至る。移動ロボットの機構、制御と駆動系の研究に従事。
(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。同年、同学機械物理学学科助手、1979年同学助教授、1992年同学教授、現在機械宇宙学科教授。ロボットの機構、センサ、制御の研究に従事。工学博士。(日本ロボット学会正会員)