

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	節体幹型移動ロボットの最適操舵制御の研究
Title	An Optimal Steering Control for the Articulated Body Mobile Robot
著者(和文)	広瀬茂男, 福島E. 文彦, 塚越真一
Authors	Shigeo Hirose, Edwardo F. Fukushima, Shin'ichi Tsukagoshi
出典 / Citation	日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 5, pp. 759-765
Citation(English)	, Vol. 12, No. 5, pp. 759-765
発行日 / Pub. date	1994, 5
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本ロボット学会に帰属します。 Copyright (c) 1994 The Robotics Society of Japan.

節体幹型移動ロボットの最適操舵制御の研究

広瀬 茂 男*¹ 福島 E. 文彦*¹ 塚越 真 一*²

An Optimal Steering Control for the Articulated Body Mobile Robot

Shigeo Hirose*¹, Edwardo F. Fukushima*¹ and Shin'ichi Tsukagoshi*²

This paper investigates an optimal steering control method for the articulated body mobile robot KORYU-II (KR-II), considering energy consumption and trajectory tracking performance as the optimization criterions. The computer simulation results of the basic control methods of KR-II's θ -axis (bending motion between the segments) and s -axis (rotation motion of the wheels), yield to the conclusion that the best methods are, the "moving average shift method: $\theta 2$ " combined with the "position control with small proportional gain method: $\theta 4$ " for the θ -axis, and the "torque control method: $s 3$ " for the s -axis. The $\theta 2$ method is to take the average value of KR-II's foremost segment's control angle θ_0 over the time to travel distance L (a segment center to center distance) as the next segment command θ_1 , and shift the command θ_1 to the following segments according to the moved distance. The $\theta 4$ method is to set the gain much smaller than the conventional gain value. The $s 3$ method is to control the velocity of the robot by equally distributed torque command for all the wheels. The experiment by the mechanical model KR-II revealed that, although the trajectory tracking performance is somewhat deteriorated, the introduced control greatly reduce the energy consumption and produce very smooth locomotion.

Key Words: Steering control, Mobile robot, Articulated body mobile robot, Snake-like robot, Wheeled mobile robot.

1. はじめに

これらの移動ロボットには階段の昇降, 床の上の障害物の乗り越え, 狭く曲がりくねった通路の通過, また屋外では林の中や山道などを動き回るなど, 高い対地適応機能を導入することが必要である. このような対地移動性を不整地において発揮できる移動ロボットとして, 筆者らはヘビをモデルにした節体幹型移動ロボット「蛟龍 (以下 KR と呼ぶ)」の概念を提案し [1], 第 1 次, 第 2 次モデル KR-I, KR-II の試作実験により, 基本的ないくつかの運動制御法についての検討を行ってきた [2]~[4]. 本研究は, 第 2 次モデル KR-II を対象とし, KR を自在に操舵するための基本的な制御法を検討するものである.

KR-II の操舵とは, オペレータが KR-II 本体に取り付けられた TV カメラ等で移動すべき環境をモニタし, 先頭節の運動についての操舵指令を与えることで行う. この指令値は, 先

頭節の水平方向の運動を指令するだけでなく, 障害物を乗り越えるときなどには上下方向の運動も指令する 3 次元的なものであり, 航空機の操舵に相当する. KR-II の操舵制御系は, 指令された先頭節についての運動を, 全節が先頭節を追従するようにしながら実現し, なおかつ KR-II の姿勢バランスを保ち, 滑らかでエネルギー効率のよい推進運動を生成するものでなければならない. KR-II のこのような操舵を実現するには, KR-II の機構的特性を考慮した多数の関節自由度を協調制御する特有の方法論を必要とする.

本研究ではこのような KR-II の操舵を検討するため, 初めに KR-II の基本的な機構構成と制御構成について述べ (第 2 章), 基本操舵制御法を検討するため, 操舵制御を θ 軸制御, s 軸制御, そして z 軸制御やその他の制御に分類してそれぞれの具体的な制御法を提案する (第 3 章). ついで, 導入した操舵法の妥当性をマルチボディシステム解析ソフトウェア ADAMS (Automatic Dynamics Analysis of Mechanical Systems) によって検証するため, まずそのモデル化の方法論を論じ, 実機との比較検討を行い, 提案する操舵制御法の妥当性を比較検討する (第 4 章). 最後に誘導した最適化操舵法による機械モデル KR-II の操舵実験の様子を示す (第 5 章).

原稿受付 1993 年 7 月 15 日

*¹東京工業大学工学部

*²セイコーエプソン (株)

*¹Tokyo Institute of Technology

*²Seiko Epson corp.

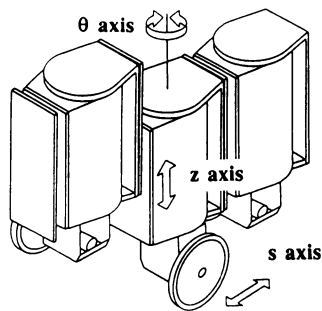


Fig. 1 A "segment" unit of KR-II

2. KR-II の機構と制御系構成

KR-II は、Fig. 1 のように車輪の推進機を下部に有し、側部に隣節との能動的な相対運動を生成する連結機構を装備したユニット化構造をなす「節」から構成される。節の駆動系は具体的には次の 3 自由度である：

- (1) 節相互の垂直方向の並進運動を生成する系 (z 駆動)
- (2) 節相互の垂直軸まわりの旋回運動を生成する系 (θ 駆動)
- (3) 各節下部の車輪推進系 (s 駆動)

そして、KR-II はこのようなユニット化された節を直列に 6 台連結して構成されている。ただし、一般に n 節は $n-1$ の連結部で連結され、ひとつの連結部が余る。KR-II では、余分となるひとつの連結部に、若干他の節より軽量の特別の第 0 節が先頭節として連結されている。この第 0 節には、推進駆動軸 (s 軸) を持たないフリーな車輪が装備され、通常の走行ではこの車輪が先頭で地形の凹凸に従って運動し地形を探るプローブとして機能するようになっている。また、第 0 節には 4 自由度のマニピュレータが取り付けられているが、これは KR の他の節の運動自由度との協調制御により多自由度的な運動性が発揮できるものである。第 i ($i=1\sim 6$) 節の能動車輪は、軽量化と対地適応性向上のため Fig. 1 のように片輪で構成され、奇数節は右、偶数節は左にそれぞれ距離 B だけオフセットした状態で装備されている。またこれらの能動車輪の垂直軸回りの旋回方向は、歯車機構で構成される「 $1/2$ 角機構」によって関節のなす角の中間を常時向くように構成されている。これは、車輪方向制御用の自由度を省略し姿勢にかかわらず概略進行方向に車輪の向きを調整するためのものである。KR-II の諸元は、第 1~6 節の質量がおのおの 50[kg]、第 0 節が 25[kg]、各節中心間の距離 L は 480[mm] で全長 3.3[m]、節中心から車輪接地点までの幅 B は 206[mm]、高さ 1.08[m] である。また、KR-II は電源 (12 V 5 Ah を 7 個)、制御用コンピュータ (PC-486 P+ 倍速 CPU)、遠隔操縦用の無線通信装置を本体内部に搭載しており、完全自立形移動ロボットである。

3. KR-II の操舵制御法

KR-II の操舵制御法とは、Fig. 2 に示すようにジョイスティックなどによりマニュアルで与えられるか、あるいは高次の自律制御系から自動的に与えられる操舵指令を解釈し全節全駆動

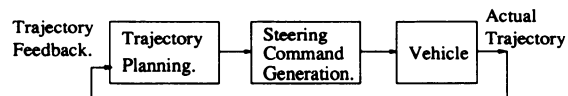


Fig. 2 General block diagram for a mobile robot maneuvering system

軸の運動指令を生成する系である。そして節体幹型移動ロボットの操舵制御の基本は、先頭節の通過したあとを後節がたどる水の流れるような運動を生成することである。

節体幹型移動ロボットが、もしもへびのように無数の微小サイズの節の直列機構で構成され、連続的な曲線形状をとり得るものであれば、このような運動は走行速度に同期した速度で先頭節の旋回角度指令を 1 節ずつ後方の節に伝播しそれをそのまま各節の駆動指令とするいわゆる「シフト制御」[5]で生成でき、滑らかな推進運動を行うことができる。しかし KR-II は、前述したように節間距離 L も長く、車輪も左右に距離 B 離れて位置している。また、各節の車輪は「 $1/2$ 角機構」により関節のなす角の中間を向くため、関節角が小さい範囲ではほぼ推進方向と一致するが、関節角が大きいと必ずしも推進方向を向かない場合も生ずる。このようなことから、KR-II の操舵には操舵指令解釈法としての特有の操舵制御法の導入が必要であることがわかる。本研究は、このような観点から KR-II の全駆動系 (θ 軸、 s 軸、 z 軸) のうち、特にそのうち操舵制御に関連の深い θ 軸、 s 軸の制御法を中心にして検討を行う。なお、KR-II の操舵には、これら以外に左右の安定性を増大するための W 字型走行の操舵法、凹凸面での対地適応的な操舵法、後退運動のための操舵法など検討すべき事項が多いが、それらについては稿を改めて検討することにする。

3.1 KR-II の θ 軸操舵制御

離散的構造をなす KR-II の操舵追従性に最も直接的に影響を与えるのは θ 軸の運動調整である。その制御法の基本は前述したシフト法である。以降このシフト法は $\theta 1$ 法と呼ぶことにする。そしてそれ以外に移動平均シフト法 ($\theta 2$)、幾何学的軌道追従法 ($\theta 3$)、そして θ 軸の位置制御ゲイン調整法 ($\theta 4$)、などを取り上げ検討する。

3.1.1 移動平均シフト法 ($\theta 2$)

従来から使用されてきたシフト制御 ($\theta 1$) は節間距離の長い KR-II の θ 軸操舵制御にはそのままでは適用できない。たとえば、Fig. 3(a) から (b) のように直線状をなして前進する KR-II に対し、第 0 節が点 P を通過した時点でステップ状にある屈曲角の操舵指令が与えられたとする。

このとき第 0 節はすぐに方向を変えるが、その後第 1 節が点 P に到るまでの期間は、第 1 節から第 6 節までの車輪が直進するため、第 0 節の車輪は方向転換した状態で直進駆動され大きくスリップするような現象が生ずる。これは節間距離の長い KR-II 特有の問題である。KR-II のこのような問題点は、たとえば第 1 節がまだ点 P へ到着しない時点で、第 0 節への指令値を感知し第 1 節が第 0 節を屈曲方向に進めるような運動を自動的に生成できれば解決できるであろう。そのため、ここでは新たに「移動平均シフト法 ($\theta 2$)」と呼ぶ制御法を導入する。

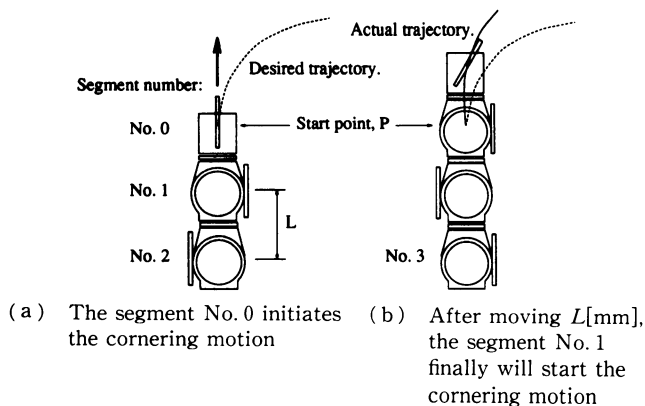


Fig. 3 Steering with an ordinary shift control

移動平均シフト法とは、ある基本出発点から先端節が累積距離 s だけ移動した位置にあるとき、その点での $\theta_1(s) \sim \theta_6(s)$ の角度指令を

$$\theta_1(s) = 2 \frac{\int_{s-L}^s \theta_0(x) dx}{L} \quad (1)$$

$$\theta_k(s) = \theta_1(s - kL) \quad k=2 \sim 6 \quad (2)$$

と与える制御法である。ここで、 $\theta_0(s)$ は先端節の車輪が第 1 節に対してなす角度である。 $\theta_0(s)$ は車輪の方向を示すが、 $\theta_1(s) \sim \theta_6(s)$ は節間の角度でありそれぞれの関節部の車輪の方向はその角度の中間に「1/2 角機構」によって常時保持される。そのため式(1)には係数 2 が付加されている。

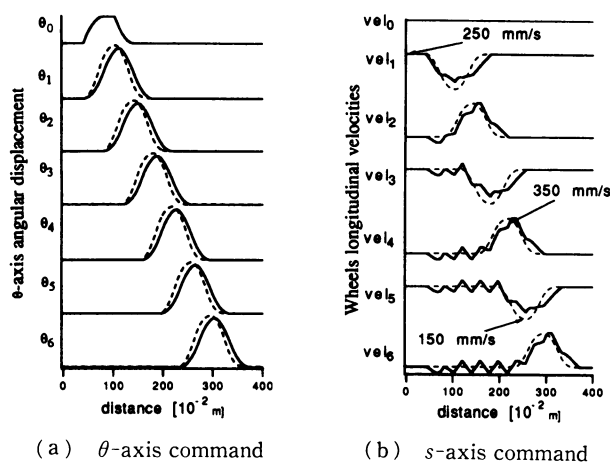
このような移動平均シフト法によると、第 1 節への旋回角度指令値 $\theta_1(s)$ は、区間 $[0, s]$ で第 0 節へ与えられた旋回指令値 $\theta_0(s)$ を区間 L について平均した値となり、第 0 節が屈曲するとその影響がすぐに第 1 節におよび、第 0 節の屈曲運動を助ける方向に屈曲する。そのため車輪の横滑りを大幅に低減することが予測される。なお、式(1)には定積分演算が含まれているが、実際の演算は加算の繰り返しで実施できるため高速に演算が可能である。

3.1.2 幾何学的軌道追従法 ($\theta 3$)

操舵法の中には、先頭節を指令された目標軌道に追従させ、それ以降の節への指令値はその情報をシフトして生成するという考え方以外に、KR-II の全節の中心が常に指令目標軌道をたどるように想定したときの関節指令値を用いる制御法も考えられる。これを以降「幾何学的軌道追従法 ($\theta 3$)」と呼ぶことにする。 $\theta 3$ によって生成した走行の例を Fig. 4(a) に示す。これは旋回半径 500[mm] の直角コーナリング運動を生成するものである。図中、波線で示しているのは $\theta 2$ で生成した後節の指令値である。 $\theta 3$ では KR-II の節長さの誤差を吸収するため s 軸に振動的な指令値が生成されていることがわかる。なお、 $\theta 2$ の移動平均シフト法による指令値は $\theta 3$ の幾何学的軌道追従法の指令値より位相が若干進む傾向があることがわかる。

3.1.3 θ 軸位置制御ゲイン調整法 ($\theta 4$)

上述した $\theta 2, \theta 3$ の制御法は、いずれも車輪の方向を指令された軌道に沿うように制御し車輪での滑りを軽減する目的で導入している。車輪での滑りの発生は動きの滑らかさを阻害し、

Fig. 4 Steering commands for a $\theta 3$ method (solid line) compared with $\theta 2$ method (dashed line)

大きなエネルギーロスの原因になると考えられるためである。しかしこのような運動の滑らかさは、駆動軸へのサーボ指令値をできるだけ正しいものにすること以外に、そのサーボ系のサーボゲインを落とすという簡便な手法でも生成できることが予測される。なぜなら、このようにすると車輪の強引なステアリングがなくなり、車輪の方向が推進運動に受動的に適應することが考えられるからである。もしもこのような手法が有効であれば、手法が著しく簡易であるため実用的であろう。そこで本論文では、通常的位置ゲインで $\theta 2, \theta 3$ など制御法の特性を比較検討した後、そのゲインを下げる「 θ 軸位置制御ゲイン調整法 ($\theta 4$)」についても検討してみることにする。

3.2 KR-II の s 軸操舵

KR-II の s 軸、つまり各節の車輪の回転運動の調整は主として移動速度を調整するものであるが、同時に移動姿勢も調整でき操舵において重要である。しかし、KR-II は特殊な車輪配置構造を有するため、 s 軸の制御法には十分の吟味が必要である。ここでは s 軸による操舵法として、内輪差車輪速度制御法 ($s 1$)、軌道追従車輪速度制御法 ($s 2$)、トルク型車輪速度制御法 ($s 3$)、そしてシフト速度型車輪速度制御法 ($s 4$)、などを取り上げ検討していくことにする。

3.2.1 内輪差車輪速度制御法 ($s 1$)

KR-II の各車輪の回転速度は、カーブ通過時に内輪と外輪で異なるいわゆる内輪差を生ずる。この速度差を簡便な手法で計算し、車輪への速度指令を補正しようとするのが「内輪差車輪速度制御法 ($s 1$)」である。 $s 1$ での速度補正は対象とする節の θ 軸の角度 θ_k から、その節は旋回半径 R_k の円軌道を追従して行く。この考え方によれば、求める車輪速度 V_k は、

$$V_k = \left(1 \pm \frac{B}{R_k}\right) V_0 \quad (3)$$

ただし、

$$R_k = \frac{L}{2 \sin\left(\frac{\theta_k}{2}\right)} \quad (4)$$

と与えられる。式(3)の符号は、車輪が外側にあるときに正、

内側にあるときに負である。

3.2.2 軌道追従車輪速度制御法 (s2)

KR-IIの各節中心を指令軌道に沿わせ、しかも指令速度で追従走行させることを想定したとき、KR-IIの各節の車輪が生ずべき回転速度を計算し、それをs軸の指令値にしようとするのが「軌道追従車輪速度制御法(s2)」である。これは θ 軸制御における θ_3 に対応しているものであり、s1の内輪差車輪速度制御法により厳密な速度誘導が可能な方法であると考えられる。前述したFig. 4(b)中の実線はこのs2の手法で誘導した車輪の速着指令値の例である。

3.2.3 トルク型車輪速度制御法 (s3)

KR-IIの複数の車輪は地面との間に不静定系を構成する。そのため車輪がすべて速度制御される場合には、その速度指令値に誤差があるとスリップが生じエネルギーロスとなる。この問題は平地走行用にいかに厳密な速度指令値を誘導したとしても、荒地では速度の乱れが必ず生ずるため看過できない。そこでs軸のサーボ系をトルク制御系とし、KR-IIの車体推進速度が目標速度指令値に一致するように各軸車輪のトルク指令値を調整するという「トルク型車輪速度制御法(s2)」を導入する。

ここで、トルク指令値はすべての車輪に同一のトルク指令値を与えるものとしている。もちろんこのトルク指令値の生成法としては、s1やs2などの車輪速度制御法で求めた指令速度に比例させる手法なども考えられるが、KR-IIによる予備実験によると、その性能はすべて均一にした場合と大差なかった。よって最も簡単な方法を選択した。今後は床面との摩擦状態まで考慮した逆動力学計算ができればそれに置換すべきであるが、摩擦状態を完全に予測するのはまず不可能と考えている。なお、車体推進速度は先頭節の車輪の回転速度のモニター値を基本的に用いるが、先頭節の地表との接触状況で異常な回転を生ずることもあるので他の車輪の回転での補正が必要である。

3.2.4 シフト速度型車輪速度制御法 (s4)

ヘビの蛇行運動では、体幹の屈曲運動つまり θ 軸の運動がヘビの推進力を生成することが知られている[5]。KR-IIの場合も、もしも体型が屈曲していれば θ 軸の指令値のシフト速度の調整によって、車輪の回転速度を変えたのと同様の効果が生成できると予想される。そのため、このような考え方による操舵法を「シフト速度型車輪速度制御法(s4)」と呼び検討項目としておくことにする。なお、s4のシフト速度を調整する具体的な方法としては、移動平均法計算に用いる見かけ上の走行速度を次式のように与ればよい。

$$V_{\theta} = V_{des} + (V_{des} - V_{actual})K_{p\theta} - \dot{V}_{actual}K_{d\theta} \quad (5)$$

ただし、 V_{des} は目標速度、 V_{actual} は計測された速度、 $K_{p\theta}$ は比例ゲイン、 $K_{d\theta}$ は微分ゲインである。それらの係数の最適値は解析的に誘導できる可能性があるが、現在はまだ行っておらず試行錯誤的に決定している。

4. 計算機シミュレーション

これまで述べてきた諸操舵制御法の妥当性を検討するためシミュレーション実験を行った。対象とする運動は、KR-IIをコーナの旋回半径が500[mm]である直角右コーナを推進させ

る運動で、その推進速度は250[mm/s]である。シミュレーションには市販の汎用運動解析ソフトウェア：ADAMSを使用した。そのモデル化条件、シミュレーション結果、実機との対応性は以下の通りである。

4.1 KR-IIのモデル化

KR-IIのADAMSのためのモデル化は以下のようにした：

- i) KR-IIのモデル化においては、KR-IIの各節のアクチュエータや運動伝達機構部（減速機やジョイントの構成部分）の詳細なモデル化は省略し、駆動部の出力軸に直接指令を与えるようにした。ただし、節旋回軸(θ 軸)と推進軸(s軸)を連結する「1/2角機構」は無視できないため実機同様にギア組でモデル化した。また、アクチュエータについては、その最大パワーを実機に合わせて限界を設定した。
- ii) 各連結部の摩擦力や粘性抵抗等ははこのシミュレーションでは省略した。
- iii) KR-IIの操舵法をシミュレータで検討する際、タイヤ要素のモデル化は重要であるが、今回は自動車の解析に多く使用され有効性が立証済みと考えられるADAMS/Tire 5.2.1バージョン[7]のタイヤ要素モデルを使用した。なお、KR-IIのウレタン性のタイヤの動摩擦係数は予備実験によって測定し0.50とした。また、タイヤの回転抵抗係数は0.001とした。これはKR-IIを直線で推進運動させ、静止までの距離を計測する実験で推定した値である。
- iv) z軸はすでにKR-IIで実施されている[2]力制御と姿勢制御を行う位置制御を組み合わせたいンピーダンス制御を実施しているとした。

4.2 シミュレーション結果の評価基準

本シミュレーションでの操舵制御法の比較は以下の三つの評価基準のもとで行うことにする：

- 1) 消費エネルギー：ADAMSでは、 θ, s 軸駆動に力・トルク指令を与えているので、簡易化したサーボ・モータのモデルを用い、消費エネルギーの計算を以下のように誘導する。まず、DCモータへの入力パワーを次式で表す。

$$P = Ra i^2 + Tw = Ra \frac{T^2}{K^2} + Tw \quad (6)$$

ただし、 Ra は電機子巻線抵抗、 i は電機子電流、 T はモータ軸の出力トルク、 w は軸の回転速度である。こうして、消費エネルギーは $E = \int P dt$ として求められる。ただし、単純に式(6)のパワーを積分すると負のパワーも積分され、エネルギー回生が施されることになってしまう。そのためここでは式(6)の入力パワーの負の値はゼロとしている。

- 2) 車輪の横方向の滑り量：車輪の滑りは路面との摩擦によるエネルギー損失を生じ駆動系に無理な力を生ずるので少ない程よい。この評価はほぼ1)のエネルギー消費に対応する。

- 3) 軌道追従性：先頭節が通過した後を後節がどれだけ正確にたどるかの特性である。狭隘な環境の移動では重要な特性であるが、広い環境では特にこの特性が正確である必要はない。これは定量的には評価せずに直角コーナリング運動の例での軌跡から判断することにする。

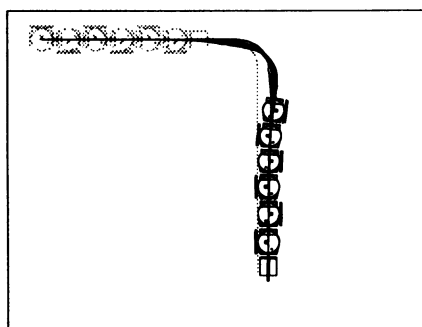
4.3 シミュレーション結果の考察

前章で提案した θ 軸と s 軸の諸制御法について検討を行った。組み合わせの数は膨大であり、実施したシミュレーション実験の結果をすべては紹介できない。そこでここでは、Table 1 に代表例のみを示す。Table 1 で $(\theta 1+s 1)$ という表記は $\theta 1$ のシフト法と $s 1$ の内輪差車輪速度制御法を組み合わせた操舵を行ったものであることを示している。なおこの $(\theta 1+s 1)$ の操舵法は最も基本的と考えられるので「基本操舵法」と呼び、

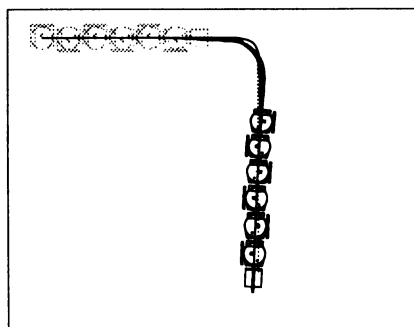
以降の操舵法比較の基準とする。また、 $\theta 4(1/4)$ 、 $\theta 4(1/100)$ などは θ 軸の位置制御ゲインをそれぞれ $1/4$ 、 $1/100$ に低下したものであることを示している。さらに、 E_{total} は総合消費エネルギー、 $\sum |V_{lat}|$ は車輪の横方向滑り量、 $traj.$ は軌道追従性である。なお、軌道追従性の評価は Fig. 5(a)~(d) に示すように、シミュレーション結果の軌跡の点線で示す目標軌道からのずれ量で判断したものである。得られた結果についての考察を以下に示す。

Table 1 Energy consumption for the right cornering motion

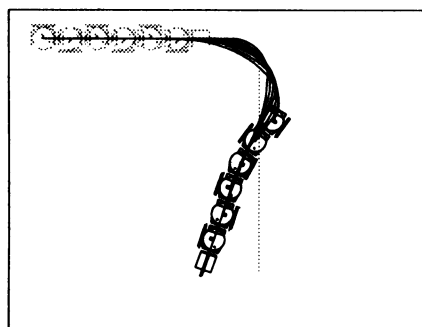
Method	E_z [J]	E_s [J]	E_s [J]	E_{total} [J]	ratio	$\sum V_{lat} $	ratio	Traj.
$(\theta 1+s 1)$	7.8	116.5	160.3	284.8	1.000	1196.9	1.000	○
$(\theta 2+s 1)$	2.8	104.6	104.6	248.4	0.872	887.4	0.741	◎
$(\theta 3+s 1)$	2.5	127.6	108.8	239.0	0.839	748.6	0.625	◎
$(\theta 3+s 2)$	2.7	127.7	25.7	156.4	0.549	734.6	0.614	◎
$(\theta 2+s 3)$	3.2	155.3	6.3	165.0	0.579	773.6	0.646	△
$(\theta 3+s 3)$	3.0	134.9	5.8	143.8	0.505	665.3	0.556	○
$(\theta 2+s 4)$	5.6	81.6	17.8	105.1	0.369	634.7	0.530	×
$(\theta 3+s 4)$	4.1	79.7	17.8	101.7	0.357	544.5	0.455	×
$(\theta 2+s 3+\theta 4(1/4))$	1.0	49.3	7.1	57.5	0.202	199.3	0.166	○~△
$(\theta 3+s 3+\theta 4(1/4))$	0.8	39.5	6.2	46.5	0.163	179.1	0.149	○~×
$(\theta 2+s 3+\theta 4(1/100))$	0.7	1.0	19.3	21.1	0.074	61.8	0.052	△~×
$(\theta 3+s 3+\theta 4(1/100))$	0.8	0.9	19.9	21.6	0.076	65.8	0.055	△~×



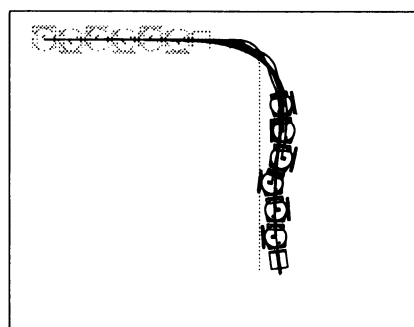
(a) $(\theta 1+s 1)$: ordinary shift method
○=good trajectory tracking



(b) $(\theta 3+s 1)$: geometric method
◎=very good trajectory tracking



(c) $(\theta 3+s 4)$: geometric method with compensation of θ -axis commands shifting velocity
×=bad trajectory tracking



(d) $(\theta 3+s 3+\theta 4(1/100))$: geometric method with $K_p=0.01K_{p\text{original}}$
△=acceptable trajectory tracking

Fig. 5 Example of performance evaluation of some trajectories

1) (θ_1+s_1) の基本操舵法と (θ_2+s_1) と (θ_3+s_1) の実験の比較から、移動平均シフト法による (θ_2+s_1) はエネルギー損失を基本操舵法に対し87.2%に減少しており、幾何学的軌道追従法による (θ_3+s_1) はさらに83.9%までに減少させる効果を持つ。また、軌道追従性はいずれも良好であるが、Fig. 5(a)(b)に示すように θ_1 から θ_3 へ改善されることがわかる。

2) (θ_3+s_1) において車輪の回転速度は内輪差車輪速度制御法であり厳密に計算されていない。これを厳密な車輪の回転速度を求める軌道追従車輪速度制御法に変えたのが (θ_3+s_2) である。 (θ_3+s_1) に対し (θ_3+s_2) を対比すると、その車輪のエネルギー損失 E_s は1/4程度に減少できている。1), 2)の結果から θ 軸、 s 軸とも幾何学的に正確に計算した指令値を使用することでエネルギー損失が低減化できまた軌道追従性も向上することがわかる。

3) 車輪をトルク制御する効果を検討するため、 s_3 のトルク型車輪速度制御を使用する (θ_2+s_3) と (θ_3+s_3) を検討した。これらを (θ_2+s_1) と (θ_3+s_1) などの車輪を速度制御する操舵法と比較すると、車輪でのエネルギー損失 E_s は確かに大幅に低減できている。しかし軌道追従性は若干低減し、またこの軌道の乱れを θ 軸で補正しようとするため θ 軸でのエネルギー損失が増大している。これらの結果、全体としてのエネルギー効率の改善はそれほどない。

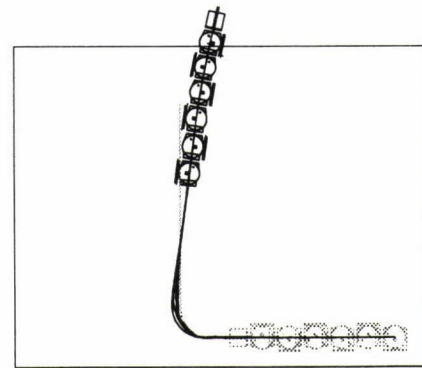
4) 推進速度をシフト速度で調整する s_4 のシフト速度型車輪速度制御法の有効性の検討も行った。この場合各車輪をフリーに回転する車輪と等価とするため、その内部損失トルクに相当するトルクを常時加え、その状態で θ 軸のシフト速度を調整して操舵した。その結果、 (θ_2+s_4) と (θ_3+s_4) を (θ_2+s_3) と (θ_3+s_3) などと比較すれば明らかに E_s は確かに減少し有効であったが、Fig. 5(c)に示すように軌道追従性は著しく悪化してしまった。

5) 最後に、 θ 軸の位置制御ゲインを低くする効果を検討した。 (θ_2+s_3) と (θ_3+s_3) の θ 軸位置制御ゲインを1/4, 1/100にする $(\theta_2+s_3+\theta_4(1/4))$ と $(\theta_3+s_3+\theta_4(1/100))$ の結果からゲイン低下の効果は著しく、またFig. 5(d)からもわかるように軌道追従性もそれほど悪くないことがわかった。

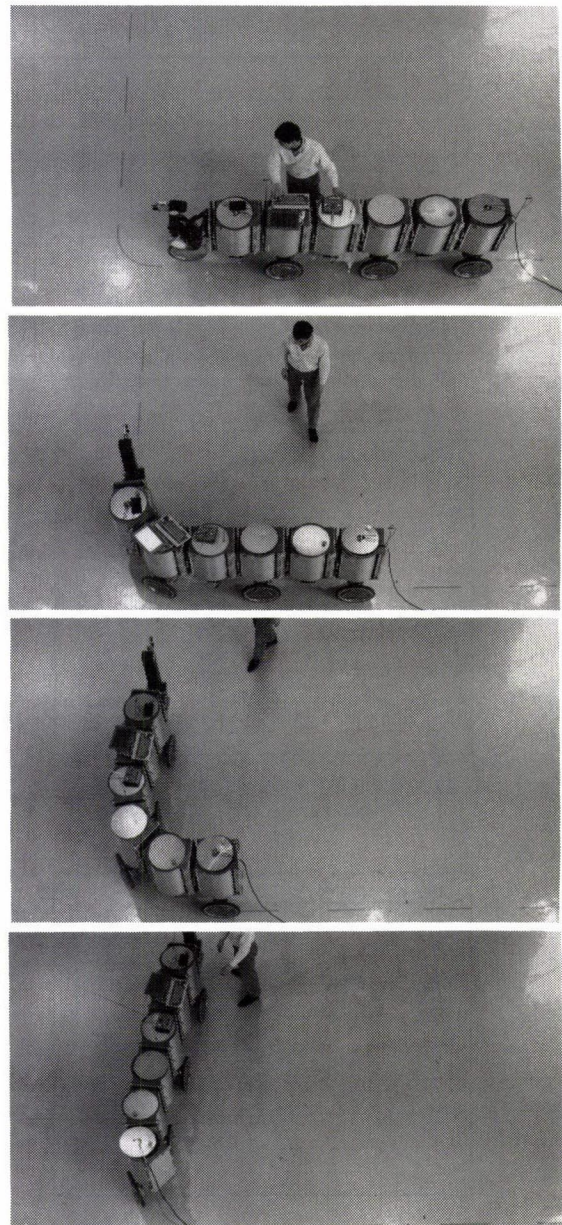
以上のシミュレーション実験の結果をまとめると、 s 軸はトルク型の車輪速度制御が望ましく、 θ 軸は θ_3 の幾何学的軌道追従性が望ましい。ただし、ゲインを低下させれば θ_2 の移動平均型のシフト法でも良好なエネルギー特性、軌道追従特性が得られる等のがわかった。

5. KR-II 機械モデルでの実験結果

使用したADAMSのシミュレーションモデルの妥当性を検証するいくつかの実験を行った。その一例をFig. 6(a)(b)に示す。Fig. 6(b)は平滑なりノリウム床面上でKR-IIを直線運動から半径500[mm]の半円コーナーを直角に屈曲する運動である。走行速度は250[mm/s]としている。Fig. 6(a)は同じ制御指令によるADAMSモデルのシミュレーション結果である。この実験では、いずれも θ 軸の指令生成は θ_3 、車輪は s_3 としている。KR-IIはシミュレーションで示されていると同



(a) ADAMS simulation result



(b) KR-II experiment result

Fig. 6 Comparison between ADAMS simulation and actual KR-II cornering experiment results



Fig. 7 KR-II moving over an uneven terrain



Fig. 8 KR-II moving around a shopping center street

様な軌道からのずれを生成していることが観察できる。このようないくつかの比較実験から、ADAMSによるシミュレーションは実機の挙動をよくモデル化していることが確認できた。

KR-IIの走行実験としては、Fig. 7, 8のような不整地や市街地の遠隔操縦走行などを行い良好に操舵できることを確認した。このときの制御には、 θ 軸には実時間制御がしやすい θ_2 の移動平均シフト制御法をゲインを可能な限り低下して使用し、 s 軸には s_3 のトルク型車輪速度制御法を使用した。

6. 結 論

本論文では、節体幹型移動ロボットKR-IIの基本的な操舵制御法について、計算機シミュレーションと実機実験によりその最適手法を検討した。その結果、車輪の s 軸には s_3 のトルク型車輪速度制御法が、そして θ 軸には θ_3 の幾何学的軌道追従法が望ましいが、 θ_4 と名付けたゲインを低下させた位置サーボ系によれば θ_2 の移動平均型のシフト法でもかなり良好なエネルギー特性、軌道追従特性が得られる等が明らかとなった。このうち θ_2 は演算が簡潔であるため実時間制御に適する。よってKR-IIの実際の操舵には $s_3, \theta_2 + \theta_4$ の組み合わせが最適であることがわかった。この操舵法の有効性は屋外の不整地環境での遠隔操縦走行で実験的に検証した。

今後、操舵制御で残されているその他の問題点を解決していき、また外界認識系と組み合わせた自律走行問題を検討していく予定である。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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, 1331/1338, 1989.
- [3] S. Hirose, A. Morishima, S. Tugagoshi, T. Tsumaki and H. Monobe: "Design of Practical Snake Vehicle: Articulated Body

Mobile Robot KR-II," Fifth International Conference on Advanced Robotics, June 19-22, Pisa, Italy, Vol. 1, pp. 831-838, 1991.

- [4] 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, 311/314, 1991.
- [5] 広瀬: "生物機械工学" pp.103/117, 工業調査会, 1987.
- [6] 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, 627/630, 1990.
- [7] Mechanical Dynamics, Inc.: ADAMS/Tire User's Manual, Version 5.2.1, MDI 2002-02, 1989.



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終了。工学博士。同年同学機械物理工学科助手, 1979年同学助教, 1992年同学教授, 1993年機械宇宙学科に学科名変更, 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)



塚越真一 (Shin'ichi Tsukagoshi)

1967年1月3日生。1989年3月東京工業大学機械物理工学科卒業。1991年3月同大学院修士課程終了。同年4月セイコーエプソン(株)入社。以来、ハンディターミナルの開発, 設計に従事し, 現在に至る。(日本ロボット学会正会員)



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工学専攻修士課程卒業。同年同学博士課程入学。現在に至る。ロボットの制御の研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)