

二輪車への知的多入力多出力制御方式の提案

An Intelligent MIMO Control for Two-Wheeled Vehicle

井上 源太 安信 誠二

Genta Inoue Seiji Yasunobu

筑波大学 システム情報工学研究科

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

Abstract: Human can control a MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) object suitably by using knowledge of the MIMO object (human MIMO control knowledge). An example of MIMO objects is a two-wheeled vehicle. The skilled rider is able to ride on the two-wheeled vehicle skillfully by using human riding knowledge. In this paper, an intelligent MIMO control (iMIMOC) method that can be built in human MIMO control knowledge is proposed. Furthermore, the iMIMOC method is applied to a two-wheeled vehicle, and the effectiveness is confirmed. The simulation results show the validity of this control method.

1 序論

従来の知的制御システムの多くは、単一の制御入力知識を組み込んでいた。一方、実世界において、多入力多出力 (Multiple-Input Multiple-Output : MIMO) 制御対象は多く存在している。この MIMO 対象を制御するのは困難であるが、人間は MIMO 対象についての知識 (MIMO 制御知識) を用いることにより、MIMO 対象をうまく制御している。

MIMO 対象の例として、二輪車がある。熟練運転者は、二輪車の運転知識を持っている。熟練運転者は二輪車の車両特性を理解し、「もし、現在の速度で、腕の力を抜きハンドルを支え、車体を右に傾けたら、このコーナーをうまく曲がることができそうだ」といった予測に基づき、二輪車を運転していると考えることができる。このように、熟練運転者は MIMO 制御知識である二輪車の運転知識を用いて、二輪車をうまく運転することができる。

本論文では、MIMO 制御知識を組み込む知的多入力多出力制御 (intelligent MIMO control : iMIMOC) 方式を提案し、二輪車に適用する。そして、iMIMOC 方式の有効性を検証する。

2 多入力多出力制御対象

2.1 MIMO 対象としての二輪車

本論文では、典型的な MIMO 対象である人間 - 機械系の二輪車を扱う (図 1)。

二輪車の運動方程式は、タイヤは横滑りをおこさない、各角度は微小な値であるという条件の下、式 (1) と記述できる。ここで、 δ : 姿勢角、 ω : 操舵角、 θ : 方向

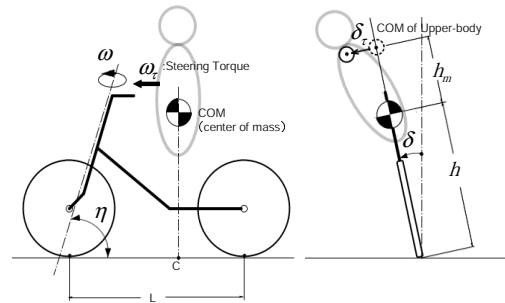


Fig. 1: 人間 - 機械系としての二輪車

角、 ω_τ : ステアリングトルク、 δ_τ : 体重移動である。各パラメータの値は参考文献 [1][2][3] を基にした。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\delta} \\ \dot{\delta} \\ \ddot{\omega} \\ \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & L_d & 0 & L_o & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S_{dd} & S_d & S_{oo} & S_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_o & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \delta \\ \dot{\omega} \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & L_{dt} \\ 0 & 0 \\ S_{ot} & S_{dt} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_\tau \\ \delta_\tau \end{bmatrix} \quad (1)$$

また、二輪車にアッカーマン旋回理論が適用できる (図 2)。アッカーマン旋回理論に基づく運動学における条件式は式 (2) のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= v \cos(\phi) \cos(\theta) \\ \frac{dy}{dt} &= v \cos(\phi) \sin(\theta) \\ \frac{d\theta}{dt} &= \frac{v}{L} \sin(\phi) \end{aligned} \quad (2)$$

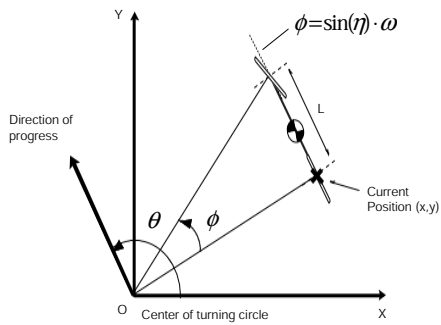


Fig. 2: アッカーマン・ジャントーの操舵機構

ここで、 (x, y) : 位置、 v : 速度、 ϕ : 実舵角、 L : ホイルベースである。

これより、この二輪車は、入力がステアリングトルク ω_τ 、体重移動 δ_τ 、速度 v の3入力、出力が位置 (x, y) 、方向角 θ 、姿勢角 δ の4出力のMIMO対象である。

2.2 二輪車の自己操舵機能

二輪車は、走行していると倒れない。この理由は、二輪車のステアリング系に自己操舵機能（セルフステアリング）が備わっているからである。自己操舵機能は、二輪車が倒れようとする方向にハンドルが切れ、その方向に回転する機能である [4]。

(1) 式で記述した二輪車は自己操舵機能を持つ。二輪車の速度は $8[m/s]$ の一定速度で、運転者はハンドルに力を加えず ($\omega_\tau=0$)、最も簡単なフィードバック制御による体重移動 ($\delta_\tau=-k_d\delta$) を仮定する。そのときの二輪車の姿勢角 δ と操舵角 ω の関係を図3に示す。この結果は、姿勢角入力に対する自己操舵機能を示している。

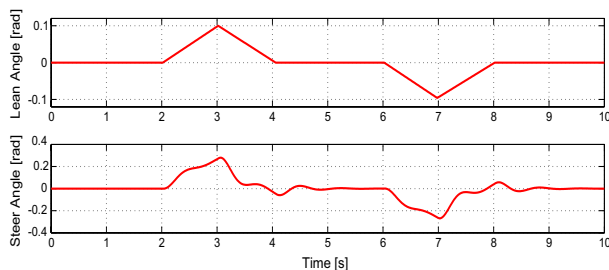


Fig. 3: 二輪車の姿勢角と操舵角の関係

3 知的多入力多出力制御

3.1 MIMO 制御知識としての運転知識

自己操舵機能を生かすため、熟練運転者はハンドルに過度な力を加えない。ハンドルは切るものでなく、結果として切ってしまうものである。よって、腕の力を抜きハンドルを支え、二輪車を傾けて回転する運転方

法が、最適な方法である [4]。同時に、運転者は前方に適切な目標を定め、障害物や壁との距離を考慮しながら、その目標を目指して進む。また、熟練運転者は頭の中で自分が乗っている二輪車の走行特性を把握している。熟練運転者の二輪車運転知識は以下のようにまとめることができる。

- 操作方法の知識
 - 腕の力を抜きハンドルを支持
 - 車体をうまく傾けて旋回
- 周囲の状況判断の知識
 - 到達すべき目標にできるだけ早く正確に到達
 - 安全性を保つために障害物を回避
- 車両特性の知識
 - 自車両の車両特性を把握

運転者は自車両の車両特性を考慮しながら、「現在の速度で、この程度車体を傾けたら、カーブをうまく曲がることができるだろう」といった予測をする。運転者はその予測に基づき、車体を傾けて二輪車を運転する。

3.2 知的多入力多出力制御システム

知的多入力多出力制御システム (iMIMOc システム) を提案する (図4)。MIMO 制御知識である人間の運転知識を組み込んだ iMIMOc コントローラにより、MIMO 対象である二輪車を制御する。

iMIMOc コントローラは、操作決定を行なう予見ファジィ制御部と状況判断部からなる。状況判断部は、目標に到達したかどうか、障害物に接触していないかどうかを監視する。

3.1 節にて、運転者はハンドル操作ではなく、車体を傾けて二輪車を旋回させるのが最適な運転方法とした。そこで、「車体をうまく傾ける」操作方法を実現するために、慣性ロータを利用し、直接姿勢角を制御する。iMIMOc コントローラから制御指令 δ_{out} が送られ、二輪車の姿勢角 δ は、この δ_{out} に従う。

次に、操作決定のための予見ファジィ制御部について詳しく述べ、姿勢角制御のための慣性ロータについて述べる。

3.2.1 予見ファジィ制御部

iMIMOc の制御方式は、MIMO 対象を扱うことができるように予見ファジィ制御 [5] を拡張したものであ

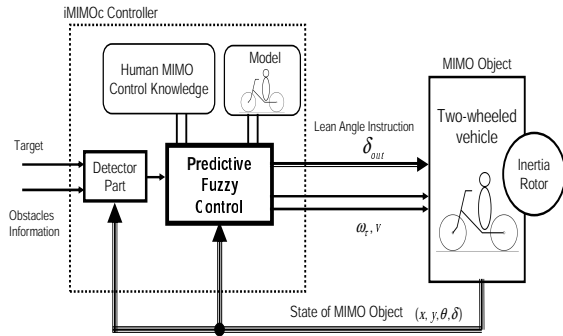


Fig. 4: iMIMOc システムの構成

る。まず、「速度このままで、腕の力を抜きハンドルを支え、車体を右に傾ける」、「速度このままで、腕の力を抜きハンドルを支え、車体を左に傾ける」、「速度このままで、腕の力を抜きハンドルを支え、車体を直立にする」といったいくつかの制御指令を用意する。用意した各操作候補に対して、図 5 に示すように、現在の状態から車両の将来状態を予見する。各操作候補に対しての予見結果を目標との偏差（距離、角度）、壁との距離（前方向、右方向、左方向）、姿勢角の変化をファジィ目的評価することで評価値を求める。最も評価の高い最適な指令を U_{out} とする。予見ファジィ制御による最適制御指令の決定の過程を図 6 に示す。

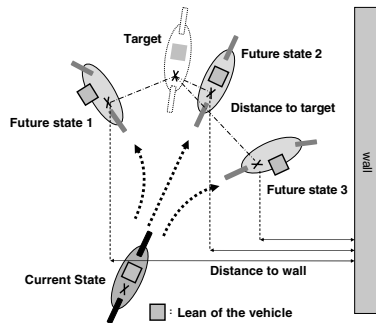


Fig. 5: 操作候補による将来状態の予見

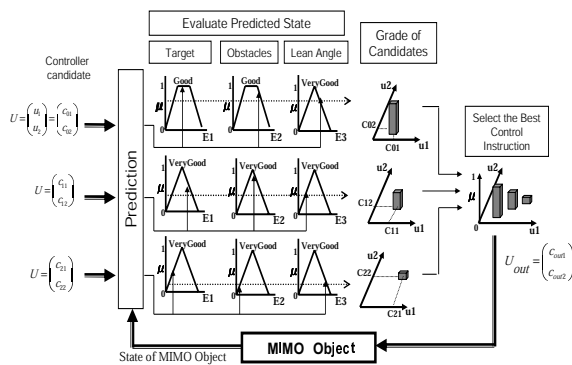


Fig. 6: 予見ファジィ制御の推論過程

3.2.2 慣性ロータ

慣性ロータは、二輪車の姿勢角を直接制御するアクチュエータである (図 7)。このアクチュエータは、ロータが回転する際発生する反動トルクを利用し、姿勢角を制御することができる [6]。慣性ロータは、本来ならば不安定領域である低速、停止状態でも二輪車を安定状態にできる。つまり、慣性ロータは二輪車の不倒停止を実現できる。

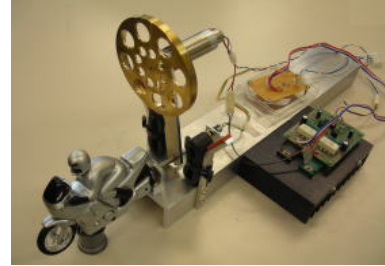


Fig. 7: 姿勢角制御のための慣性ロータ実験装置

4 シミュレーション実験

構築した iMIMOc システムの有効性を確認するために、実際のコースを想定したシミュレーション実験を行った。

4.1 実験準備

実験コースは第 1 カーブと第 2 カーブからなる S 字コースである。目標は第 1 カーブの出口と、第 2 カーブの入口と出口（最終目標）の三箇所に設置した。

iMIMOc を用いた結果と従来制御を用いた結果を比較する。簡単のため、二輪車の速度は $8 [m/s]$ の一定速度とする。

従来制御にはカスケード PD 制御を用いる。このカスケード PD 制御の二輪車の操作方法は、姿勢角固定 ($\delta=0$) でハンドル操作のみで運転する方法である。つまり、絶対に倒れない補助輪付き自転車で、目標に向かう足元の線の上を追従する走行方法となる。

iMIMOc において、二輪車の姿勢角は姿勢角指令に従うと仮定する。また、「腕の力を抜きハンドルを支える」という操作は、 $\omega_r = -k_o \dot{\omega}$ により実現している。

4.2 実験結果

従来制御による走行軌跡を図 8 に示す。そのときの姿勢角と操舵角を図 9 に示す。スタート地点からゴール地点までの走行時間は $5.8 [sec]$ であった。

一方、iMIMOc による走行軌跡を図 10 に示す。そのときの姿勢角と操舵角を図 11 に示す。走行時間は $5.2 [sec]$ であった。

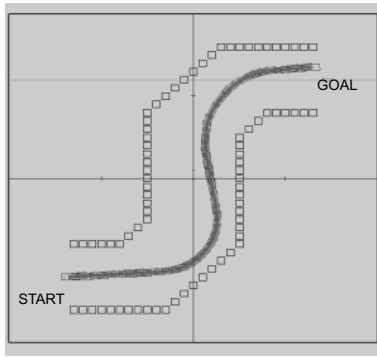


Fig. 8: 従来制御による走行軌跡

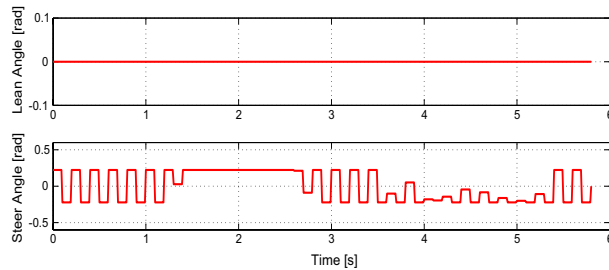


Fig. 9: 姿勢角と操舵角 (従来制御)

4.3 考察

従来制御を用いた二輪車は、旋回する際、大きく膨らみ、壁に近づいている。また、直線走行の際、操舵角の切り替えが頻繁に行なわれている。これは、従来制御方式が目標値と状態量の偏差を評価しながら、目標値になるべく正確に追従する制御方式だからである。

一方、知的制御である iMIMOC を用いた二輪車は、壁との距離と目標までの距離を考慮しながら、適切に車体を傾かせて旋回し、コースの中央付近をうまく走行している。これは、iMIMOC が人間の運転知識 (MIMO 制御知識) を組み込み、これを用いて制御するからである。またスタートからゴールまでの走行時間は従来制御方式に比べて、0.6 [sec] 短かった。これより、従来制御と比較して、一般的に iMIMOC を二輪車に適用した結果は良好である。

このシミュレーション実験にて、構築した iMIMOC システムの有効性を確認した。

5 結論

本論文では、人間の MIMO 制御知識を組み込む iMIMOC 方式を提案した。この方式を典型的な MIMO 対象である二輪車に適用し、シミュレーション実験より、以下のことを確認した。 a) iMIMOC は人間の運転知識 (MIMO 制御知識) を組み込むことができる。この制御により、熟練運転者が運転するように、周囲の状況に対応しながら、車体を傾けることによって二輪車を旋回させ、S 字コースをうまく走行させることがで

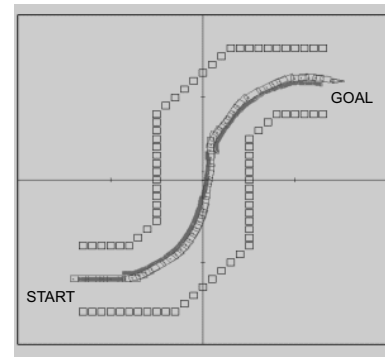


Fig. 10: iMIMOC による走行軌跡

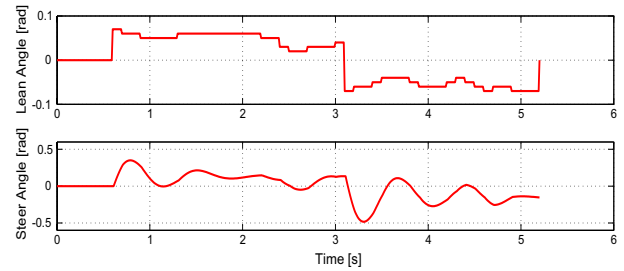


Fig. 11: 姿勢角と操舵角 (iMIMOC)

きる。 b) iMIMOC を二輪車に適用した結果、従来制御と比較して、走行軌跡・到達時間において、良好な結果を実現できる。

これより、提案した iMIMOC、すなわち知的多入力多出力制御は二輪車に有効である。

そして、人間の MIMO 制御知識を組み込む iMIMOC 方式は、難しい制御対象である MIMO 対象に有効であることを確認した。

参考文献

- [1] 古茂田真幸, 制御工学, 朝倉書店, 1993
- [2] 井口雅一, 二輪車の運動力学, 機械の研究 Vol.14, No.7, pp.34-38, No.8, pp.37-45, 1962
- [3] D.G.Whitt, Bicycling Science 3rd ed., MIT Press, 2004
- [4] 和歌山利宏, ライディングの科学, グランプリ出版, 1990
- [5] 安信誠二, ファジィ工学, 昭晃堂, 1991
- [6] 由良諭, エネルギー法とスライディングモード制御法による慣性ロータを有する倒立振子の振り上げ・安定化制御, 電気学会論文誌. D, 産業応用部門誌, Vol.121, No.8, pp848-854, 2001

連絡先

〒 305-8573

茨城県つくば市天王台 1-1-1

筑波大学大学院 システム情報工学研究科

知能機能システム専攻 知的制御システム研究室

井上 源太

電話: 029-853-6186

E-mail: inoue_ics@edu.esys.tsukuba.ac.jp