

人間の運転知識を組み込む知的多入力多出力制御の二輪車への適用

An Intelligent MIMO Control for Two-wheeled Vehicle
Built using Human Knowledge of Operation

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: Humans can control MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) objects appropriately using knowledge of the MIMO object, which can be referred to as human MIMO control knowledge. An example of a MIMO object is a two-wheeled vehicle. A skilled rider is able to operate a two-wheeled vehicle cleverly using human knowledge. In this paper, an intelligent MIMO control (iMIMOC) method that can be built using human knowledge of operation, including MIMO 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ている。

本論文では、MIMO 制御知識を含んだ人間の運転知識を組み込む、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。シミュレーション実験より、提案した iMIMOC 方式の有効性を評価する。

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)。

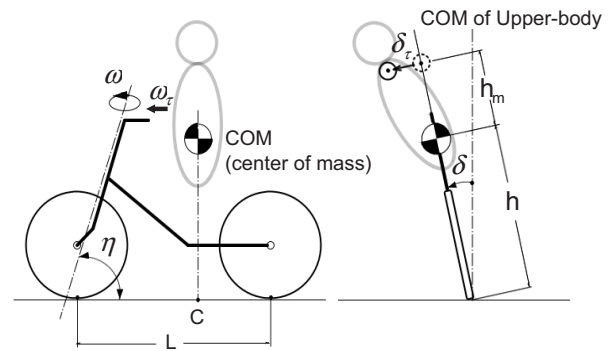


Fig. 1: 人間 - 機械系としての二輪車

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 : 方向角、 ω_τ : ステアリングトルク、 δ_τ : 体重移動である。 L_d などの各パラメータの値は参考文献 [1][2][3] を基にし、オートバイを想定している。

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

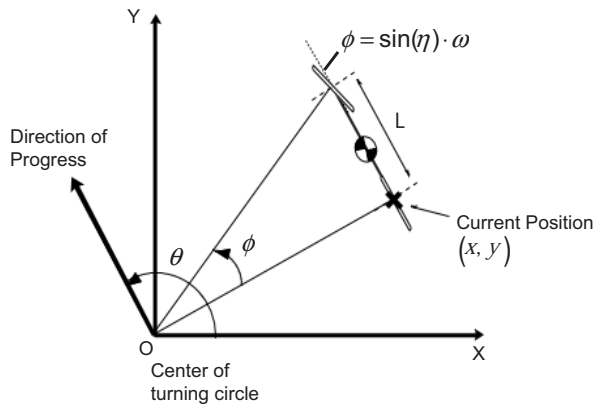


Fig. 2: アッカーマン・ジャントーの操舵機構

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。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos(\phi) \cos(\theta) \\ \dot{y} &= v \cos(\phi) \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= \frac{v}{L} \sin(\phi) \end{aligned} \quad (2)$$

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

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、その方向に旋回する機能である[4]。人間は、この機能を熟知し、二輪車の運転を行っている。

3 知的多入力多出力制御

3.1 MIMO 制御知識

通常、相互関係がMIMO対象の複数の入力間に存在する。この相互関係とは、ある一つの入力を変化させた場合、他の入力に影響を及ぼすといった関係である。このような複雑な関係により、従来制御の手法では、うまく制御できる最適な入力を見つけるのは困難である。

それに対し、熟練者は入力間特性を考慮した、入力間の相互関係の知識を持つ。つまり、熟練者は、どういった入力の仕方をすれば、うまく制御できるかを経験的

に理解し、それを実践している。本論文で扱うMIMO制御知識とは、MIMO対象における入力間特性を考慮した、入力間の相互関係の知識である。熟練者は、このMIMO制御知識に基づき、複数の入力の方法を工夫し、うまくMIMO対象を制御することができる。

二輪車の運転において、MIMO制御知識とは、自己操舵機能を利用した操作方法の知識である。熟練運転者は自己操舵機能を生かすため、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、車体が傾くことにより、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、二輪車を傾けて旋回する運転方法が、最適な方法である[4]。

3.2 人間の二輪車運転知識

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。

- MIMO 制御知識 (入力間の相互関係の知識)
 - 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

まとめると、熟練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のできるだろう」といった予測をし、その予測に基づき、車体を傾けて二輪車を運転する。

3.3 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3)。MIMO制御知識を含む、人間の二輪車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、目標に到達したか、障害物に接触していないかどうかを監視する状況判断部からなる。

3.1節にて、MIMO制御知識より、最適な運転方法は「腕の力を抜きハンドルを支え、車体をうまく傾けて旋回する」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、姿勢角制御装置を利

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。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。

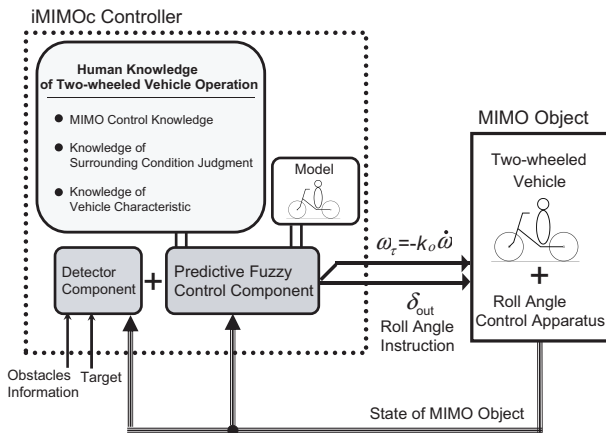


Fig. 3: iMIMOC システムの構成

3.3.1 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 4 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。各操作候補に対する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実際の入力 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 5 に示す。

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。

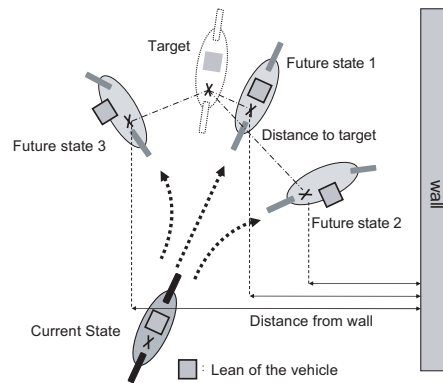


Fig. 4: 操作候補による将来状態の予見

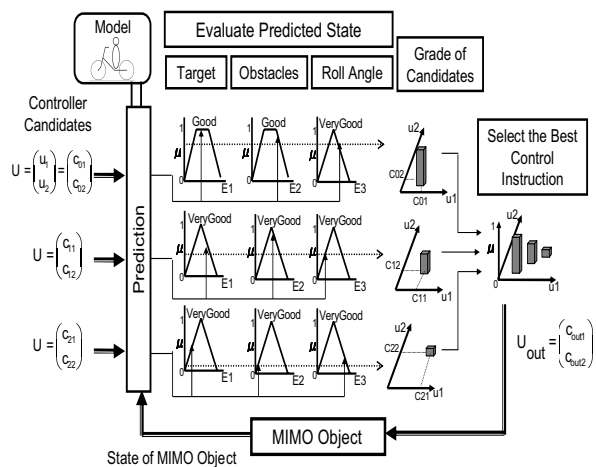


Fig. 5: 予見ファジィ制御部の推論課程

iMIMOC を用いた結果と従来制御を用いた結果を比較する。

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も目標を目指す走行方法となる。

4.2 実験結果

従来制御による走行軌跡を図 6 に示す。そのときの姿勢角と操舵角を図 7 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 8 に示す。そのときの姿勢角と操舵角を図 9 に示す。走行時間は $5.2 [sec]$ であった。

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

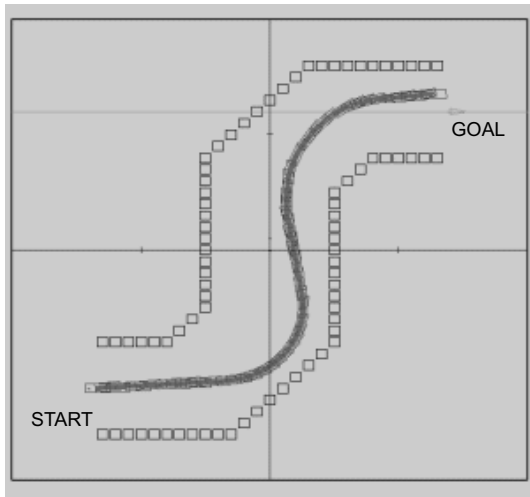


Fig. 6: 従来制御による走行軌跡

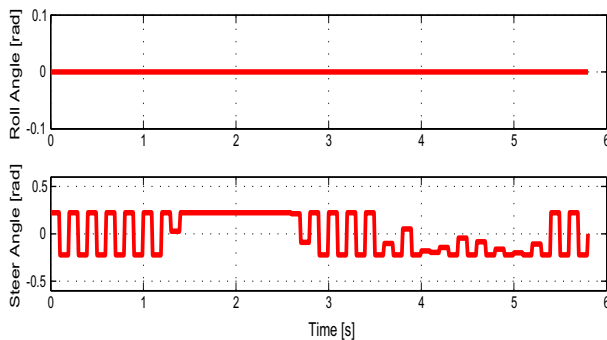


Fig. 7: 姿勢角と操舵角（従来制御）

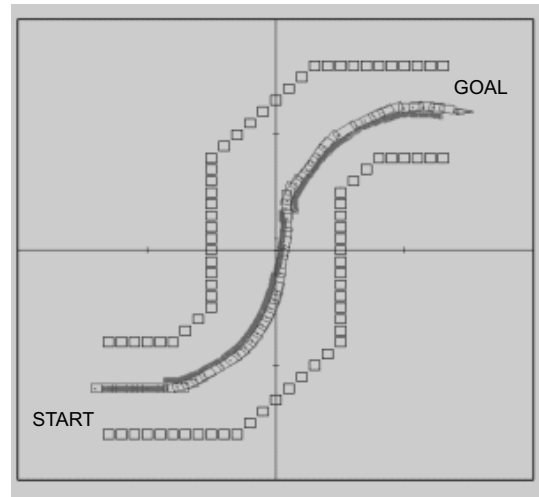


Fig. 8: iMIMOcによる走行軌跡

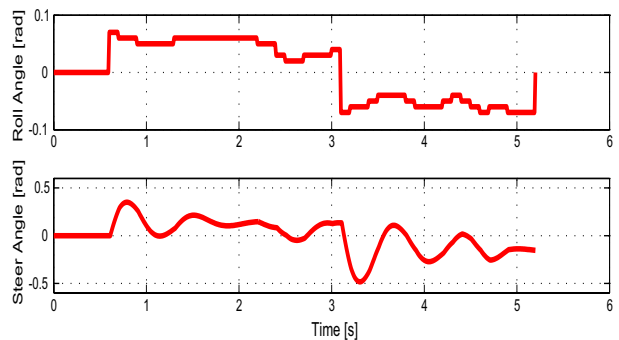


Fig. 9: 姿勢角と操舵角（iMIMOc）

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、人間の運転知識を組み込む 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

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、人間の運転知識を組み込む 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] G.Inoue and S.Yasunobu, *An Intelligent MIMO Control for Two-Wheeled Vehicle*, FUZZ-IEEE 2007, CD-ROM proceedings, 6 pages, 2007