

熟練運転技能の習得を目的とした 知的二輪車運転トレーニングシステム

井上 源太¹ 安信 誠二¹
¹筑波大学 システム情報工学研究科

An Intelligent Two-wheeled Vehicle Operation Training System Aiming at Acquisition of Expert Driving Skill

Genta INOUE¹ Seiji YASUNOBU¹

¹University of Tsukuba, Department of Intelligent Interaction Technologies

Abstract: It is necessary that an expert hand down know-how to a non-expert so that the novice may acquire the skill. The operation of a two-wheeled vehicle is a familiar example which requires a skill acquirement. In this study, the operation training system based on driving knowledge of a skilled rider is proposed. The operation method of a skilled rider is functionally separated to a reference setting and a reference tracking. By an i2DSS (intelligent 2-wheeled vehicle Driving Support System) embedded reference setting knowledge, the training based on driving knowledge of a skilled rider is performed. From the simulation experiment, it was confirmed that the training system based on skill rider's driving knowledge is effective to the acquisition of the driving skill.

1. 序論

2007年問題として注目を浴びた技術継承問題により、技術・技能伝承の重要性が高まっている。非熟練者が高度な技能を習得するためには、熟練者が経験の蓄積によって得た知識（ノウハウ）を非熟練者に上手く伝える必要がある。

日常生活の中で、技能習得を要する身近な例として、二輪車の運転がある。二輪車の運転において、操縦者（以下、ライダーと呼ぶ）はハンドル操作、アクセル操作、体重移動入力など複数の操作を行う必要がある。さらに、車体を傾かせて旋回するという二輪車特有の運転方法が存在し、初心者にとって運転は難しく、運転技能を習得することは容易ではない。一方、熟練ライダーである運転指導員は、適切な運転知識を用いて、初心者を中心とする非熟練ライダーに運転指導を行っている。

我々は、熟練者の多入力多出力（MIMO）制御対象に関する知識を組む込む知的多入力多出力制御（iMIMOC）方式を提案し、制御が難しいMIMO対象である二輪車に適用し、その有効性を確認している [1][2]。また、このiMIMOC方式が人間の操作する運転支援に応用できることを確認した [3]。

本研究では、iMIMOCを応用した知的二輪車運転支援システム（i2DSS：intelligent 2-wheeled vehicle Driving Support System）を利用し、熟練者の運転知識に基づく運転トレーニングを実施する。このトレーニングにより、非熟練者が運転技能を習得することを目的とする。非熟練者が運転技能を身に付けることにより、二輪車を巧みに操る楽しさを得ることができ、また、運転能力不足による単独事故の減少にもつながる。

シミュレーション実験より、この熟練者の運転知識に基づく運転トレーニングシステムが運転技能の習得に有用であるか検証する。

2. 二輪車

本研究で扱うライダー - 二輪車対象を図1に示す。ライダー - 二輪車対象の運動方程式は、Sharp[4]のモデルを基にラグランジェ方程式から導出したものを用い、横運動、ヨー運動、ロール運動、ステアリング軸の回転運動、前後運動の5自由度モデルを扱う。ここでは簡略化した方程式のみを記述し、運動方程式の詳細は、参考文献 [3] を参照されたい。

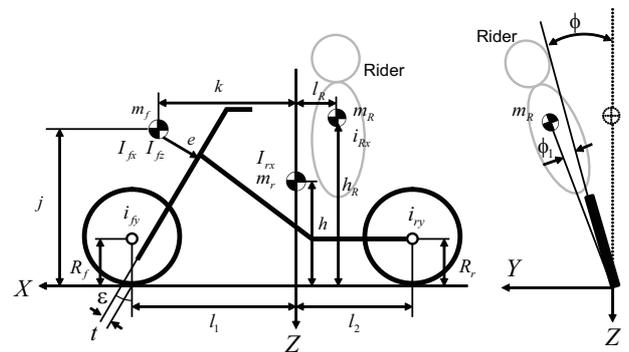


Fig. 1 Coordinates and symbols of rider - two-wheeled vehicle

$$B_{11}\ddot{y} + B_{12}\ddot{\psi} + B_{13}\ddot{\phi} + B_{14}\ddot{\delta} + A_{11}\dot{x}\dot{\psi} + A_{17}Y_f + A_{18}Y_r = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
& B_{21}\ddot{y} + B_{22}\ddot{\psi} + B_{23}\ddot{\phi} + B_{24}\ddot{\delta} + A_{21}\dot{x}\dot{\psi} + A_{22}\dot{x}\dot{\phi} \\
& + A_{23}\dot{x}\dot{\delta} + A_{27}Y_f + A_{28}Y_r + A_{29}T_{zf} \\
& + A_{2a}T_{zr} = 0 \quad (2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& B_{31}\ddot{y} + B_{32}\ddot{\psi} + B_{33}\ddot{\phi} + B_{34}\ddot{\delta} + A_{31}\dot{x}\dot{\psi} + A_{33}\dot{x}\dot{\delta} \\
& + A_{34}\dot{\phi} + A_{35}\dot{\delta} + A_{3b}T_{xf} + A_{3c}T_{xr} = F_{ws} \quad (3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& B_{41}\ddot{y} + B_{42}\ddot{\psi} + B_{43}\ddot{\phi} + B_{44}\ddot{\delta} + A_{41}\dot{x}\dot{\psi} + A_{42}\dot{x}\dot{\phi} \\
& + A_{44}\dot{\phi} + A_{45}\dot{\delta} + A_{46}\dot{\delta} + A_{47}Y_f + A_{49}T_{zf} \\
& + A_{4b}T_{xf} = F_{st} \quad (4)
\end{aligned}$$

$$B_{55}\ddot{x} = F_{at} \quad (5)$$

まとめると、状態変数が、位置 (x, y) 、方向角 ψ 、姿勢角 ϕ 、操舵角 δ 、ライダーが二輪車に加える力は、体重移動入力 F_{ws} 、ステアリングトルク F_{st} 、アクセルトルク F_{at} であり、このライダー - 二輪車対象は、3 入力 の MIMO 制御対象となる。

3. 熟練ライダーの運転知識

先の研究 [1][2] において、二輪車の自動運転制御で行った熟練ライダーの運転は、運転トレーニングの観点から再検討した結果、次のように記述できることがわかった。熟練ライダーは自車両の車両特性を考慮しながら、「今の状況なら腕の力を抜いてハンドルを支えて、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、その予測結果に基づき、目標値を定めている。そして、その目標値を上手く追従するように複数の入力を加えている。

これより、図 2 に示すように、熟練ライダーの運転を目標設定と目標追従の 2 つに機能的に分離する。まず熟練ライダーは、目標設定の知識を持つ目標設定部で、自車両の状態と周辺の外部情報から、状況に応じた適切な目標値を定める。そして、目標追従の知識を持つ目標追従部で、設定した目標値を上手く追従できるように操作を行う。このように熟練ライダーはカスケード制御的な意思決定をし、二輪車を運転している。

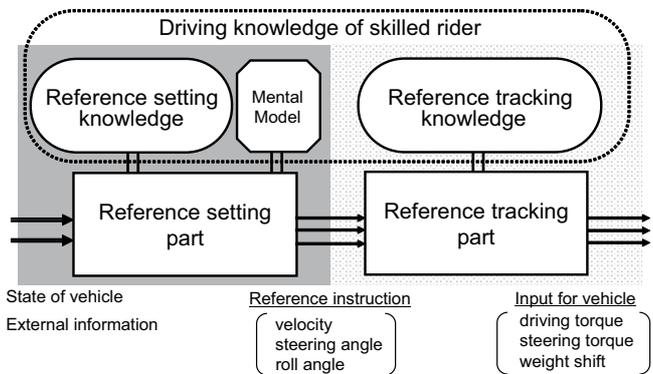


Fig. 2 Structure of skilled rider's operation method and driving knowledge

熟練ライダーの目標設定知識は、各目標値に関する知識と設定する順序の知識で成り立っており、表 1 のように

Table 1 Reference setting knowledge of skilled rider

目標値	目標値設定知識	設定順序
速度	現在の状況に応じて加減速を決定	先
操舵角	腕の力を抜きハンドルを支持	先
姿勢角	将来状態を予測し車体を適切に傾斜	後

まとめることができる。熟練ライダーは、この目標設定知識に従い、現在の状況から一意に決定される目標速度と目標操舵角を先に設定し、自車両の車両特性に関するメンタルモデルを用いて将来状態を予測し、i. 進む先に定める目印に対して、できるだけ早く正確に到達、ii. 安全性を保つために障害物を回避、iii. 自車両の安定性を考慮し、再現不可能な姿勢や急激な姿勢変化を回避、といった評価を行い、適切な目標姿勢角を定めている。

運転技能の視点からみると、熟練ライダーの目標設定は認知・判断技能であり、目標追従は操作技能である。非熟練ライダーが運転技能を習得するためには、認知・判断技能と操作技能の双方が不可欠である。特に操作技能は、運転技能の中で最も早く学習され、比較的容易に習得でき、他の技能習得の基礎となる [5]。

4. 知的二輪車運転トレーニングシステム

知的二輪車運転支援システム (i2DSS) を用いた運転技能習得のための運転トレーニングシステムを提案する。

i2DSS は、図 3 に示すように、熟練ライダーの目標設定知識と制御対象のモデルを組み込む目標設定部と運転支援インタフェースから構成される。目標設定部にて、適切な目標値を算出し、運転支援インタフェースでその目標値を支援情報に変換して、非熟練ライダーを対象とするユーザに提示する。

運転トレーニングを段階的に行う。最初の段階として、ユーザは支援情報に従い目標追従操作に専念し、運転するという訓練を実施する。繰り返し行うことで、自身の目標追従知識を増加させ、目標追従ができる操作技能の習熟を目指す。次の段階では、支援情報を基に、熟練ライダーの目標設定の仕方を意識しながら運転をする訓練を行い、目標設定ができる認知・判断技能の体得を目指す。最後に、i2DSS の支援無しで二輪車を運転し、運転技能の習得を確認する。

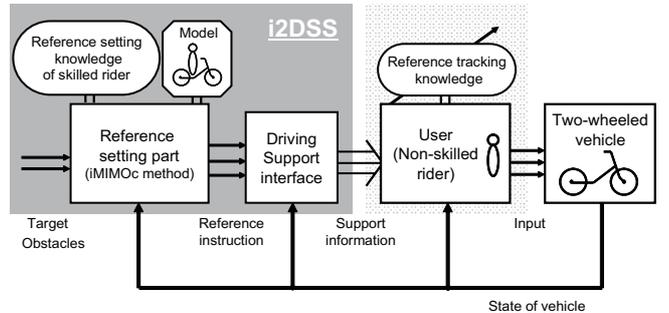


Fig. 3 Configuration of i2DSS for operation training

4.1 i2DSS における目標設定

目標設定部にて、支援情報に用いる複数の目標値を iMIMOc 方式 [1][2] を用いて算出する。

まず、目標設定知識に従い、目標速度と目標操舵角を先に決定する。目標速度 v_{ref} は、「現在の状況に応じて、加減速を決定」という設定知識から、状態評価ファジィ制御方式 [6] で求める。目標速度設定に用いた状態評価ファジィ制御則 (SEFC 則) を以下に示す。

- IF 前方の壁との距離が近い and 車体が直立状態近傍 THEN 目標速度を下げる。
- IF 前方の壁との距離が十分に遠い and 車体が直立状態近傍 THEN 目標速度を上げる。

目標操舵角 δ_{ref} は、熟練ライダーの「腕の力を抜き、ハンドルを支える」という知識より、現在の操舵角 δ_{now} を保つとして、 $\delta_{ref} = \delta_{now}$ と設定する。

最後に、「将来状態を予測し、車体を適切に傾ける」という目標設定知識に基づいて、目標姿勢角 ϕ_{ref} を決定する。まず、「車体をそのまま保つ」、「右に傾ける」、「左に傾ける」といった目標姿勢角に関するいくつかの候補を用意する。それらの候補に対して、先に決定した v_{ref} と δ_{ref} を組み込んだモデルを使い、図 4 に示すように、現在の状態から車両の将来状態を予測する。各姿勢角候補に対するの予測結果を、車両が進む先に設置した目印との偏差 (距離、角度)、壁との距離 (前方向、左右方向)、姿勢角とその変化をファジィ多目的評価することで評価値を求める。そして、最も評価の高い候補を ϕ_{ref} として決定し、 v_{ref} 、 δ_{ref} と共に、運転支援インタフェースに送る。目標姿勢角決定の過程を図 5 に示す。

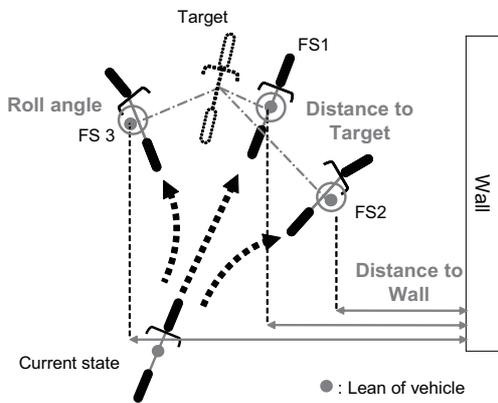


Fig. 4 Future state (FS) of reference candidates by prediction

以下に、i2DSS で用いた目標設定に関する iMIMOc ルールを示す。

- IF(U = 目標速度は SEFC 則に従い、腕の力を抜きハンドルを支え、車体を現在の角度に保つ → Target is *Good*, Obstacles is *Good*, Roll Angle is *Good*) THEN U = 目標速度は SEFC 則に従い、腕の力を抜きハンドルを支え、車体を現在の角度に保つ。
- IF(U = 目標速度は SEFC 則に従い、腕の力を抜きハンドルを支え、車体を右に傾ける → Target is *Very*

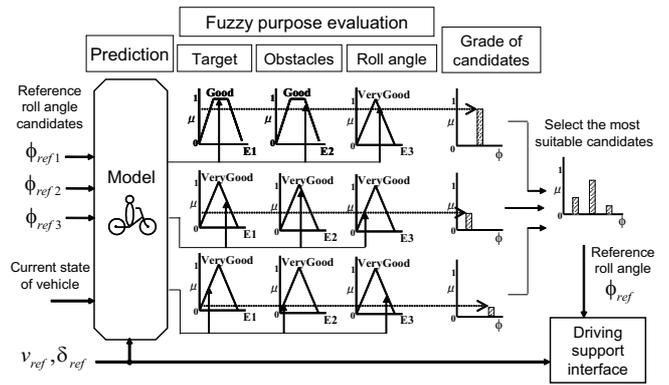


Fig. 5 Process of iMIMOc for decision on reference roll angle

Good, Obstacles is *Very Good*, Roll Angle is *Good*) THEN U = 目標速度は SEFC 則に従い、腕の力を抜きハンドルを支え、車体を右に傾ける。

- IF(U = 目標速度は SEFC 則に従い、腕の力を抜きハンドルを支え、車体を左に傾ける → Target is *Very Good*, Obstacles is *Very Good*, Roll Angle is *Good*) THEN U = 目標速度は SEFC 則に従い、腕の力を抜きハンドルを支え、車体を左に傾ける。

5. シミュレーション実験

提案した運転トレーニングシステムの効果を検証するため、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。

5.1 実験準備

半径 14[m] のカーブを持つ、道幅 7[m] の実験コースを用意する。車両の初速は 50[km/h] とし、実際に運転者がするように車両が進む先に目印を設置し、最後の目印であるゴール地点に到達した時点で走行終了とする。

実験の様子を図 6 に示す。ユーザは、目標姿勢角の追従操作を行う。画面に現在の姿勢角と目標姿勢角がアニメーションで表示され、ユーザはジョイスティックを用いて、体重移動入力 F_{ws} を加え、現在の姿勢角を目標姿勢角に追従させる。実験コースの俯瞰図は表示せず、走

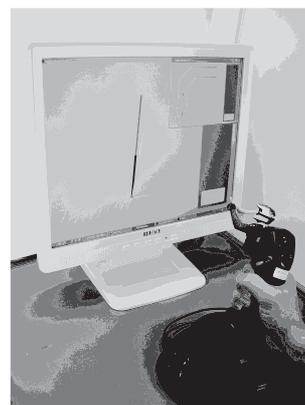


Fig. 6 Experiment scenery

行終了後に走行軌跡の確認を行う。また、アクセルトルクは式(6)で、ステアリングトルクは式(7)で与えている。

$$F_{at} = K_{at}(v_{ref} - v) \frac{1}{T_{at}s + 1} \quad (6)$$

$$F_{st} = K_{st1}\dot{\delta}_{ref} + K_{st2}\dot{\phi} \quad (7)$$

5.2 実験結果

二輪車走行のシミュレーション結果を示す。この結果は、同一のユーザが走行実験を繰り返し行った、26回目の試行結果である。走行軌跡を図7に示し、そのときの二輪車の速度と姿勢角を図8に示す。スタート地点からゴール地点までの走行時間は5.4[sec]であった。

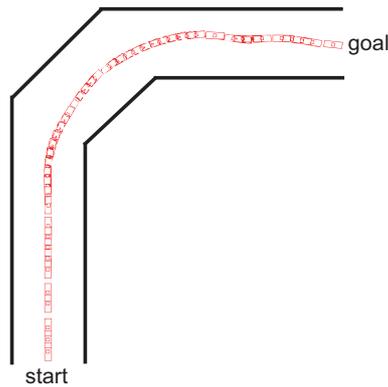


Fig. 7 Vehicle trajectory with i2DSS

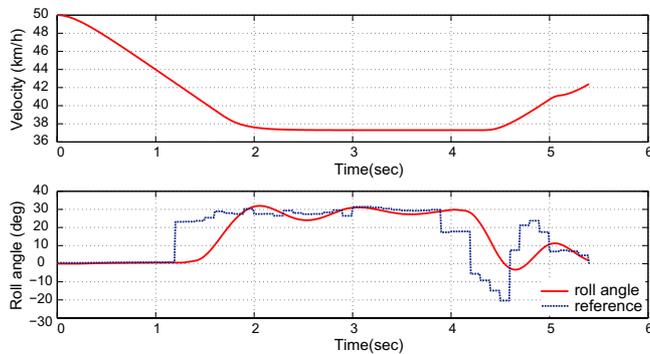


Fig. 8 Velocity and roll angle with i2DSS

5.3 考察

二輪車は、初速 50[km/h] でスタート地点を出発し、カーブの進入までに十分に減速をし、カーブの入り口付近から約 37[km/h] の一定速度で車体を 30[deg] 程度傾かせながらコーナーを旋回している。出口付近から徐々に加速を始め、車体の傾きを直立に戻し、ゴール地点に到着した。また、壁にぶつからずにコースの中央付近を走行できている。これは、i2DSS が熟練ライダーの目標設定知識を組み込み、適切な目標値を算出して、ユーザがその目標値を上手く追従しているからである。

実験の初期では、ユーザは上手く目標値を追従できず、壁への衝突や姿勢角の発散などの問題が発生していた。し

かし、何回も試行を繰り返すうちに、自身の目標追従知識を増加させ、図8のように、上手く目標を追従できるようになった。すなわち、ユーザは操作技能を習熟することができた。

このシミュレーション実験にて、i2DSS を用いたトレーニングシステムが、運転技能の習得に有用であることを確認した。

6. 結論

本論文では、運転トレーニングの観点から熟練ライダーの運転を目標設定と目標追従の2つに機能的に分離した。その目標設定の知識を組み込む i2DSS を利用した、非熟練ライダーの運転技能習得を目的とする運転トレーニングシステムを提案した。ユーザの目標追従によるシミュレーション走行実験を行った結果、次のことがわかった。ユーザが目標追従操作を行うことにより、周囲の状況に対応しながら、速度を調整し二輪車を適切に傾けることによって二輪車を走行させることができる。即ち、熟練ライダー並みの上手い運転を実現できる。また、このトレーニングを繰り返すことにより、目標追従ができる操作技能を習熟できる。

これより、熟練ライダーの運転知識に基づく運転トレーニングシステムが、運転技能の習得に有用であることを確認した。

非熟練者が高度な技能を習得するために、熟練者が持つ知識をトレーニングシステムに組み込むことは有効である。

参考文献

- [1] 井上源太 安信誠二：二輪車への知的多入力多出力制御方式の提案, 第28回ファジィワークショップ, 65/68 (2007)
- [2] G.Inoue and S.Yasunobu : An Intelligent MIMO Control for Two-Wheeled Vehicle, FUZZ-IEEE 2007, CD-ROM proceedings, 745/750 (2007)
- [3] G.Inoue and S.Yasunobu : An Intelligent MIMO control and Its Application to Two-wheeled Vehicle for Driving Support, WCICA 2008, CD-ROM proceedings, 2804/2809 (2008)
- [4] R.S.Sharp : The Stability and Control of Motorcycles, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol.13, No.5, 316/329 (1971)
- [5] 松浦常夫：初心運転者の心理学, 実践女子学園学術・教育研究叢書9 (2005)
- [6] 安信誠二：ファジィ工学, 昭晃堂 (1991)