

人間の運転習熟過程のモデル構築とその自律運転への適用

Human driving skill learning process modeling and application to autonomous driving

主任研究員名：梅井 一英

分担研究員名：大野 麻子、松本 卓也（神戸大学）

研究報告

1. 研究の位置付けと研究の分担

自動運転（自律運転でなく）車両の開発が進んでいる。それらの車両には周囲環境から現在地と道路の形状を取り出し目標に追従するようハンドルなどの操作装置を動かすプログラムが組み込まれている。人間は 130 年前に自動車が発明されてから自動車の運転をしているが、生まれながらに運転プログラムが組み込まれているわけではない。目標、周囲環境から操作を決めるという入力と出力は人間も制御装置も同じである。人間はどのようにして運転ができるようになるのか。

制御装置では目標に対する操作出力の生成法があらかじめプログラムされているが、人間の運転操作ではこの出力生成法は自ら学習しなければならない。その過程のアルゴリズム例の一つとして、繰り返し学習制御法とそれに基づく操作パターンパラメータの学習を著者らは提案している。

制御装置に遮断周波数の制約があると同様に人間にはより低いその周波数の制約があり、かつ可能な動作方向などのさらなる制約がある。これらは制約であると同時に、動作を真似る場合には初期状態としても利用される。運転操作学習アルゴリズムにこうした制約を適用して再構築する。計算機で実行できるためのモデルを構築することが目標であるため、人間行動の定性的かつ定量的なモデル構造が必要になる。モデル構造については松本が担当した。そして定量化については大野の研究「人間行動特徴の抽出および表現手法の獲得」を用いた。学習過程については梅井が担当した。

2. 学習の必要性

言葉や意味を理解しているとも思えない幼児でも大人の動作と似たふりをすることはできる。いわゆる真似ていることである

2.1 運転挙動の動的モデル

運転者モデルが提案されるかなり以前から人間の応答性を定量化する試みは医学・生理学の分野であり 1930 年代から行われている。工場設備運転者モデルは、1945 年の Bode のフィードバック理論の後に発展した伝達関数を用いて 1963 年に発表されている。長年にわたって操舵を対象とした運転者モデルを研究している Macadem や景山は、1980 年代には NN(ニュー

ーラルネットワーク)のモデルを公表しているが、その後は明示的なパラメータモデルに変わっている。彼らは運転操作がフィードフォワードとフィードバックから構成される(2自由度制御)としているが、原因(入力)と結果(出力)からはそうした区分はなく、機械制御の概念を適用したことになる。

結果を見て修正する操作が成立するかどうかは、応答性に依存する。Macadem はレーンチェンジにおいて予見(先読み)による先行操作と安定性の研究結果を示した。

影山らは運転操作の応答遅れを定量的に 0.3 秒程度と示していて、またこの数値は初心者と熟練者で大きく違うものではないと言っている。

著者らは速度追従運転においてフィードバック安定性の問題を定量的に示した。また個人による技能の差を定式化定量化しようとする宮島らの研究もある。そして、人間行動と習熟を関連させる Skill, Rule, Knowledge (SRK) モデルが運転者行動の解析に適用されている。著者らは排ガス試験サイクルの運転における初心者と熟練者の操作挙動の差を計測評価した。しかしながら、人間の運転技能が訓練により一定水準に到達し、習熟により向上することを自動車制御の分野で論じられたことはあまりない。

2.2 人間の応答性の制約

応答遅れは高次を含む一次遅れ型と無駄時間型があるが、認識と判断を含む人間の反応は無駄時間要素が大きい。それを考慮して目標速度追従運転において人間の運転操作を(1)式のゲインと無駄時間からなる伝達関数で表すと定量的なフィードバック安定性解析が簡易な計算ででき、運転操作はフィードフォワードが主である行動であることが分かる。

2.3 学習の必要性と方法(真似る一なぞる)

そこで人間の運転にはフィードバック補正量を減らすためフィードフォワードが不可欠となる。フィードフォワードには目標に対する操作量が分かっている必要がある。現実的には時系列の目標変化に対する時系列の操作量(操作量列)であり、運転者自身で見つけ出す必要がある。

真似ることは学習の第一歩である。直接人の操作(ふり)を真似ることは比較的容易であり、前述のように幼児でもできる。自動車学校のように正確に運転できる先生がいてその操作を時系列で全部真似ることができれば、結果としての車両挙動も目標通りとなる。

次は目標値に操作の結果がなるように真似ることになる。なぞることであるが、これは習字の手本をなぞるような直接的なことから目標軌道(運転では軌跡や速度)をなぞる(Trace/Tracking 追従)操作と結果までいくつかの過程を含むものまでである。

3. 運転操作の学習(アルゴリズム)

運転操作量が系統的にかつ自然に学習できなければ、ほとんどすべての人が運転資格を持つことができるという今の社会はない。基礎的な技能習得と習熟過程のモデルを提案する。

3.1 目標追従(なぞる)のための基本操作列の生成

真似るあるいはなぞるアルゴリズムにはロボティクス分野で有本らが 1980 年代に提唱した

繰り返し学習制御の理論が参考になる。繰り返しにおいて次の回の操作量系列は前回の操作量系列に目標と結果の偏差を加えたものとなる、これは前回の結果を次回のフィードバックすることである。このアルゴリズムは式(1)で記述され、図1のブロック線図のように制御装置の外側に構成できる。

$$u_{k+1} = u_k + Q(y_t - y_k) \quad (1)$$

ここで u_k : k 回目の操作列, y_k : k 回目の出力列, y_t : 目標列, Q : フィードバックゲイン (行列)

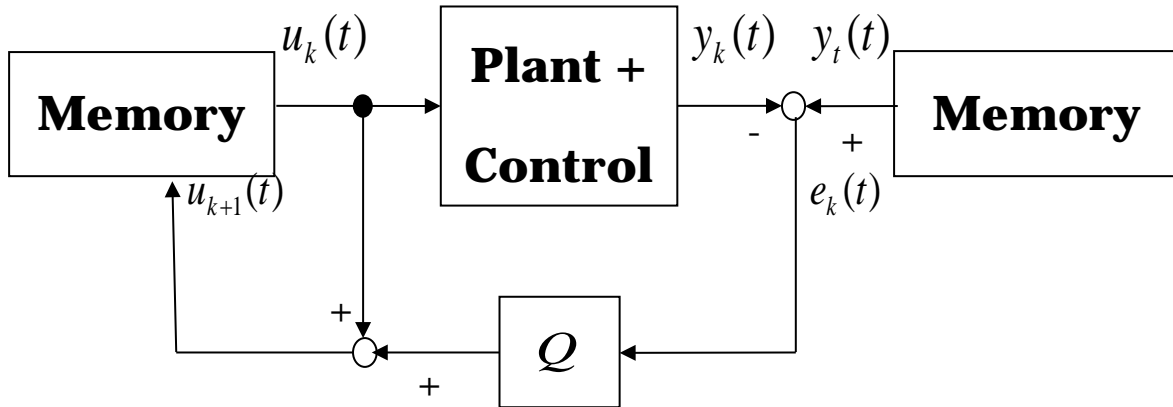


Fig. 1 Iterative Learning Control Law

一般的に制御対象(Plant)はローパスフィルタの特性を持つ。このアルゴリズムでは操作列はこれを補償する特性、つまりハイパスフィルタがかかった形状となる。特に目標系列の周波数が高い場合や滑らかでない(微分係数が不連続、排ガス試験サイクルの目標速度はこれにあたる)場合に顕著となる。人間が運転操作装置であればそこにはパスフィルタフィルタの特性があるので操作列目標がそのまま操作にはならない。

このアルゴリズムを目標速度追従運転に適用した。任意のアクセルとブレーキの操作量から始めて十回でほぼ適正な操作量系列が得られる。さらに100回繰り返し学習すればさらに偏差は少なくなる。しかしこのアルゴリズムでは細かい時間サンプルとそれを全点覚える必要があるため、このとおりに大部分の人間ができるかどうかは疑問である。

3.2 操作の規則の発見とパラメータモデル

繰り返し学習制御は機械的に繰り返せば操作列が見いだせるが、人間が意識的に行うには記憶量の課題がある。特に目標系列を正確に実現するには操作列に高い周波数特性が要求されるためである。

人間の場合はこうした繰り返しで大雑把な操作を覚え、次はより少ないパラメータで操作列を生成できるように、操作の規則を発見していると考えられる。

3.3 経路追従走行の操作学習

目標速度追従は一次元走行であるので操作はアクセル/ブレーキ操作(駆動/制動)に限定された。実際の道路環境では二次元走行なのでさらにステアリング操舵が加わる。速度は停

止すると0になり誤差はいったん消える。(走行距離では異なるが)目標経路追従運転では、類似な操舵量系列を与えても、走行経路はずれてしまい、実道路環境では途中で走行不能となる。この過程を経て学習されるのは、道路曲率に対する操舵角である。これはアクセル操作と車両か速度が非線形であることに対して線形であるので、習得するのは容易である。習熟すると操舵量を考えるまでもなく、道路の曲がり方をなぞって手が動いていることになる

4. 習熟過程

4.1 道具の使用：拡張された身体

図2に示される木製の小球を指でつまむ動作と箸でつまむ動作では、小球にかかる力は同じであるが、指にかかる力は同じでない。しかしほとんど意識されずにこの指の力は切り替えられている。これは頭の中で身体が拡張された形で意識化されていると考えられる。

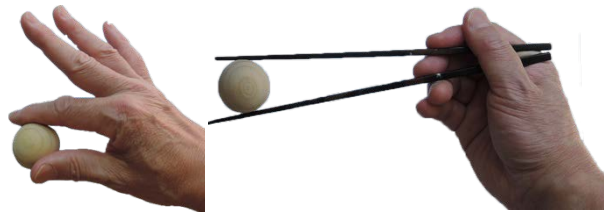


Fig. 2 Tool use as a extended hand

4.2 操作対象を含む内部モデル

運転操作の習熟過程初期では対象の動きとともに操作(あるいは操作量)も強く意識される。技能の習熟に伴い操作をすることが意識に上らなくなる。脳の内部に対象の(逆)モデルが形成されると考えられる。

4.3 熟練による高度技能の習得

ある目的に対する操作(あるいは体の動き)の系列を広い意味で技能と呼ぶことにする。この技能は人により異なり、上手かあまり上手くないという技能水準がある。一般に目標が簡単であれば操作に滑らかさがなくても目標が実現できる。上達者は綺麗な動きで目標を実現し、それは認識系と操作系でエネルギー最小となる行動と言える。図3に課題の難易度と選択できる操作系列および必要なパワーを示す。目標が高度になるとそのための操作の幅が狭くなり、操作の時系列がほぼ一義的に決まる。運転目標の例としては曲がりくねった道を高速で通過するものである。人間の操作においてフィードバック応答が遅いので安定のためにはフィードフォワードが主になる。

操作系列の幅が狭くなるとほとんどフィードフォワードとなり、その操作量も繰り返して正確さが要求される。またフィードフォワードにも人間の応答性遅れ(認識から操作)があるため、早い段階での認識、つまり正確な予測が必要である。これらが実現されると熟練者の操作と言える。

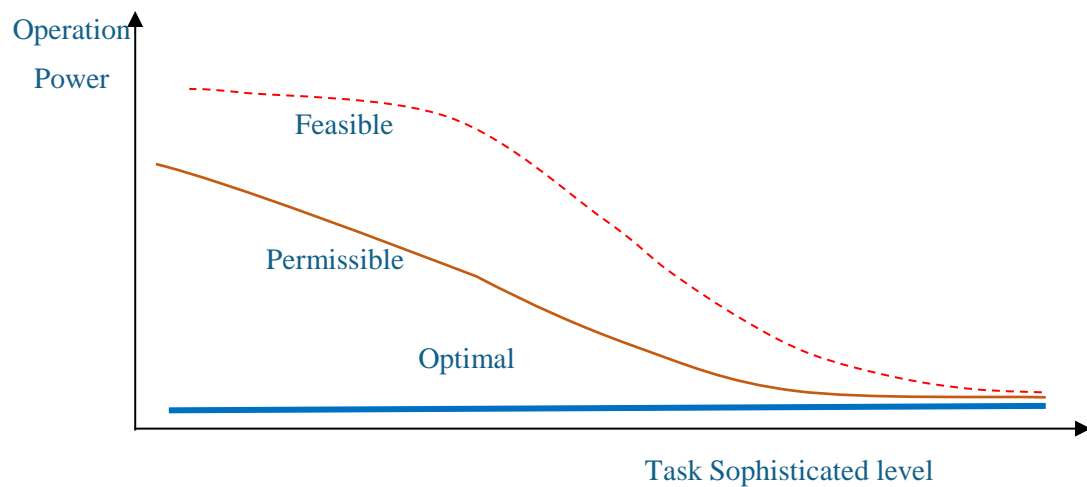


Fig. 3 Skillful operation requires less operation power

5. まとめ

人間の運転者と自動運転車の制御装置の目標と運転結果は同じであってもその過程は異なる。人間の場合、応答性が電子制御装置より遅く、そのためにフィードバックによる目標追従が容易ではない。伝達関数解析から示したように排ガス試験サイクルの目標速度にはフィードバックだけでは追従できない。その代わりにフィードフォワードが必要となり、その操作量を見出すためには学習が必要である。

学習により操作量が獲得されると、習熟にしたがい目標に対して無意識で操作ができるようになり、箸を使うようにあるいはあたかも手足を使ってそこに走って行くように意識される。

運転では人間が最終的な意思決定をする上位制御装置である。そして制御ループの中に補助の環境認識から操作装置まで、機器を含んでいてもあたかも自身の感覚のように意識され、操作を意識することなく運転する。

しかし、人間の外部の反応が、経験の範囲外（線形で外挿できる場合以外）であると、不安感につながり、運転操作が困難になる。運転支援システムの設計にはこの習熟と人間内の車両モデルの考慮が必要である

関連する主な論文

- [1] Kazuhide Togai, Asako Ohno, Takuya Matsumoto, Hisashi Tamaki, A Skill Learning Process Model for Driving a Car, Advanced Vehicle Control (AVEC' 16), pp. 352-356, Edelmann, Plöchl & Pfeffer (Eds), CRC Press, Leiden, The Netherlands, 2016
- [2] Asako Ohno, Yoshihiro Ohata, Takahiro Yamasaki, and Kin-ichiroh Tokiwa, "Could a customer's

migratory behaviour in inner areas explain his/her purchase: an exploratory analysis”, *International Journal of Computational Intelligence Studies*, 5(3-4), pp.303-316, 2016.

- [3] 松本卓也, 稲元勉, 玉置久, 梅井一英, 目標速度追従運転における熟練度の異なる運転者を表現可能な運転者モデル, システム制御情報学会論文誌, Vol. 27, No. 9, pp. 364-373, 2014

技能の獲得と習熟過程のモデル構築と運転支援への適用

梶井 一英 (工学部交通機械工学科)

成果報告

最近急速に開発が進んでいる自動車の自動運転技術で開発が必要なのは環境認識とそれに基づく判断である。道路のある曲率に対するハンドルの操作量は簡単な比例計算で求められ、既存の技術である。制御装置にはあらかじめその計算式のプログラムが書き込まれている。一方、人間の運転操作は脳内にプログラムを書き込むことができないので、そのプログラムを生成する必要がある。これは自ら学習することである。

人間の赤ちゃんは、身体的な可能性と制約があるもののほとんどプログラムがない状態で生まれる。そして周りの状態を見ているような人間らしい行動や操作(道具の使用)ができるようになる。身体単体では生まれつき備わった運動能力があるが、道具の操作やさらにはその延長である機械の操作には操作方法を習得する必要がある。手本となる動きを見て操作し、その手本になるように操作行動を修正するが操作や行動の学習である。

目標とする動きを認識し、そして操作した結果と目標との違いを判断する、それにより操作行動を修正している。この過程をアルゴリズムとして実現するために、ロボティクスで使われている繰り返し学習制御法に注目した。この学習制御方法を目標速度に追従するアクセルとブレーキ操作量の学習に適用した。計算機シミュレーションにより10回程度の繰り返しで目標速度に対する操作量が学習できることがわかる。

しかしこの方法は刻々の操作量の記憶が必要であるため、人間には適用できない。人間は目標に対する操作パターンとそのゲインを習得すると考える方が自然である。この学習もアルゴリズムを構築して、計算機シミュレーションにより実現可能であることが分かる。ここまですべてが基本的な技能である。

ある目的に対する操作(あるいは体の動き)の系列を広い意味で技能と呼ぶことにする。この技能は人により異なり、上手かあまり上手くないという技能水準がある。一般に目標が簡単であれば操作に滑らかさがなくても目標が実現できる。上達者は綺麗な動きで目標を実現し、それは認識系と操作系でエネルギー最小となる行動と言える。目標が高度になるとそのための操作の幅が狭くなり、操作の時系列がほぼ一義的に決まる。運転目標の例としては曲がりくねった道を高速で通過するものである。人間の操作においてフィードバック応答が遅いので安定のためにはフィードフォワードが主になる。

操作系列の幅が狭くなるとほとんどフィードフォワードとなり、その操作量も繰り返して正確さが要求される。またフィードフォワードにも人間の応答性遅れ(認識から操作)があるため、早い段階での認識、つまり正確な予測が必要である。これらが実現されると熟練者の操作と言える。

大規模時系列データを対象とした人間行動特徴の抽出 および表現手法の獲得

大野 麻子 (工学部電子情報通信工学科)

成果報告

近年のセンサネットワークの発達や計算機環境の向上により、大量のデータを収集し分析することが容易となった。なかでも、システムがデータの特徴を自ら学習し、高い精度で認識可能な深層学習 (Deep Learning) をはじめとした機械学習を用いて特徴分析を行う研究が注目されている。

本研究の目的は、人間行動の結果として計測された時系列データから、その行動主体のとるあいまいさを含む行動パターンを特徴として抽出し、モデルにより定量表現する手法を獲得することである。本共同研究においては、よりシンプルな問題設定を行うため、小売店におけるショッピングカートの走行データ (動線データ) を使用した。動線データにはカートの店舗内における位置を示す二次元座標、「移動」・「停止」状態の別や各状態の継続秒数などが記録されている。動線データを顧客の属性情報と紐づけすることにより、行動主体の属性とその行動特性について分析を行うことが可能となる。本研究では購入金額をもとに顧客をグループ分けし、グループ間の行動特徴の違いについて説明を行った[1][2]。

本研究ではこれまでに、同一の発生源 (行動主体) から獲得した複数の時系列データから、ゆらぎを含むパターンを特徴として抽出し、隠れマルコフモデル (Hidden Markov Model: HMM) により表現する手法を提案した。また、一般的な顧客動線の挙動とは異なる顧客の行動特徴を抽出・定量化する手法を考案した。本手法で用いた決定木モデル (Decision Tree) は機械学習における予測モデルの一つであり、サポートベクタマシン (SVM) などに比べると予測精度は劣るものの、出力結果の解釈がしやすいという利点がある。本研究で構築した二つのモデルを用いて、行動特徴に基づく顧客の分類を行うことができた。また、旧来の経験則に基づく知見をサポートするような顧客の行動特徴を確認することに加え、新たな行動特徴を読み取ることができた (詳細については[1][2]を参照されたい)。

本手法は提案アルゴリズムに従い文字列化を行うことで、様々な時系列データに適用することが可能である。今後の展望として、これまでに行った検討から得られた知見をもとに本手法を自動車走行データに適用し、習熟度の低い運転者と熟練者の行動特徴の違いを説明するモデルの構築を行うことが期待される。

研究発表

- [1] 大畑善裕, 大野麻子, 山崎高弘, 常盤欣一郎「小売店の内側エリアにおける顧客の行動パターンと購買額に関する分析」, 『第 14 回情報科学技術フォーラム(FIT2015)講演論文集』, 14(2), pp.297-302, 2015.
- [2] Asako Ohno, Yoshihiro Ohata, Takahiro Yamasaki, and Kin-ichiroh Tokiwa, “Could a customer’s migratory behaviour in inner areas explain his/her purchase: an exploratory analysis”, *International Journal of Computational Intelligence Studies*, 5(3-4), pp.303-316, 2016.

人間の運転行動のモデル構築と数値シミュレーションによる検証

松本 卓也 (神戸大学(研究期間内))

成果報告

人間が主体となってシステムを操作する人間機械系においては、人間の知的側面と技能的側面が相互に作用し合い、双方が重要な役割を果たしていると考えられる。例えば自動車では、人間が状況を認識・判断し適切な処置を正確に行なうことで機械を操らなければならない。このような人間機械系を対象とした支援や補償を行なう際には、操縦者となる人間の知能面・技能面の双方を陽に考慮することが肝要となる。

本研究では、人間モデルを用いたシミュレーションを通して人間側へ熟練支援・補償のアプローチをすることを目的に、多様な特徴や熟練度による行動を再現できるような人間モデルの構築を目指し、人間-機械系のひとつの例としてレーシングカートを選択し、操縦エージェントを構築することを課題とした。レーシングカートは、自動車を始めとした他の人間-機械系よりも単純な構造であり、人間の操作がそのまま走行に表れやすい。また、タイムや軌跡による走行結果の評価が容易であるという利点がある。

操縦者は観測・認識・判断・操作の4つの処理を繰り返し行なうことで車両を操縦しているものと考え、これらの処理を行なうドライバモデルを構築した。このドライバモデルでは、観測部において外部状態を基に観測状態を獲得し、認識部で観測状態を基に解釈可能な認識状態とする。さらに判断部において認識状態およびコース情報を基に様々な意思決定を行ない、それを実現するための操作量を決定し、操作部において前段で決定した操作量をカートに対して実現する。一般的な認知・判断・操作の3段階とは異なり、認知を観測・認識に分割することで、観測および操作を物理層と情報層のインターフェース部分と捉えることが可能となる。また、判断部は異なる処理内容を担う多数の部分モジュールから構成されているとする。各モジュールは、処理精度や処理時間といった人間らしさを十分に考慮することに留意し構築した。人間の操縦過程や情報処理、試行錯誤による学習や予め持っている知識等の要素を考慮したドライバモデルとし、慣れによる意思決定プロセスの単純化や緊急時など様々な条件下での判断といった事象を表現できるモデルとしている。それらを初等的に実装してシミュレーションを行ない、本モデルの妥当性を確認した。

以上を総括し本研究の現状をまとめると、人間らしい意思決定プロセスを行なわせるドライバモデルの大枠が定まり、シミュレーションを行なう環境もほぼ整った段階であると言える。それを踏まえ、実機実験データの分析や議論を通して具体的な意思決定の処理プロセスを仮定し、シミュレーションを通して検証を行ないモデルの改良・修正を繰り返すことで操縦の際の人間の知能・技能の働きを探っていくことが今後の課題となる。