

制約条件の変化を考慮した知的運転支援システム

Intelligent operating support system considering the change of constraint conditions

高橋周太郎¹

Shutaro Takahashi¹

¹² 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 知的制御システム研究室

¹²University of Tsukuba. Graduate School of System Information Engineering

○ 安信誠二²

○ Seiji Yasunobu²

Abstract: Public transportation such as train plays an important role in our daily life. However, if transport volume decreased due to the change of constraint condition (such as irregularities in the timetable of train), it'll be shock to our society. Thus, improvement of performance will be difficult and there will be a problem that cannot achieve original goal if constraint conditions (limited speed, time until the state of traffic signal switch) change while running. In this study, we considered the application of intelligent control to the problem and developed an intelligent operating support system based on operating knowledge of expert operator by using the information of changes of constraint conditions. By providing appropriate support information to operators, we confirmed that intelligent operating support system is effective for shortening arrival time and the recovery of transport volume (improve performance) in the environment where constraint conditions change by simulation.

1 はじめに

現代の日本社会は電車等の公共交通機関によって支えられているが、その反面、制約条件（時刻情報や制限速度等）の変化が生じると輸送量が減り社会に大きな影響がでてしまう。このように所定の制約条件が変化すると輸送量の確保が困難になり、当初の目的達成が困難になってしまうという問題がある。この問題に対し熟練者は変化する制約条件の情報や目的地までの距離・時間等を時々刻々評価しながら複数の操作候補を挙げ、それらの中から最適な操作候補を選択し目的地到着時間の短縮（輸送量の確保）を図っている。

そこで本研究では上記問題に対し電車を適用例として、人間の感覚や知識を取り入れた知的制御の適用を考える。そして熟練者の知識に基き制約条件が変化する情報を利用して運転することで、目的地到着時間を短縮（輸送量を確保）できる的確で柔軟な知的運転支援システムを実現し、制約条件が変化する環境下におけるシミュレーションにより制約条件の変化を考慮した知的運転支援システムの有用性を検証する。

2 列車の運転

2.1 運転作法

一般に信号の状態は運行状況により変化していて、その変化（信号機が切り替わる）のタイミング T_{sg} は列車に伝えられる。その際、列車の運転手は以下の情報を利用でき、(1)~(3)の条件を順守しながら運転を行っている。

- 現在位置から信号機までの距離
- 現在位置から停車位置までの距離

(1) 制限速度 V_{lim} の順守

- (2) 信号機・通過駅付近における通過時刻 T_{sg} の順守
- (3) 指定した停車位置への正確な停車

2.2 目的地到着時間最短化問題の定式化

目的地到着時間 T_{g2} を最短化するための列車の運転としては信号機の表示が赤から青に切り替る直前に急停車し、切り替った直後に急加速するような走行が挙げられるが列車は特性上、瞬時の停車・発進という動作が困難な乗り物であるためそのような走行ができない。これに対して列車の動特性を熟知した熟練者は変化する制約条件等の情報を利用して図1のように、信号機付近を制限速度ギリギリの速度で通過して運転をする。これにより熟練者は目的地到達時間を短縮できるため、輸送量の確保につなげることができる。

目的地到着時間の定式化を行うと以下ようになる(図1)。 $V_{(T_{st}, X_{st})} = 0$ [m/s] で出発地 X_{st} を出発し、信号(制限速度)が切り替わる時刻 T_{sg} 、通過位置 X_{sg} の情報を利用して走行中の制約条件の変化に対応しながら X_{sg} を $V_{(T_{sg}, X_{sg})} = V_{lim}$ で通過し T_{g2} を短縮する。通過・停車に対して M 個の区間に分けて各時刻における経過時間の総和 T_{g2} に対する目的地到着時間最短化問題を定式化すると具体的には以下ようになる。

$$\min \sum_{m=1}^M T_{sgm} - \frac{X_{dpm} + \frac{(V_{mfm} - V_{lim})^2}{2\beta_{tm}}}{V_{mfm}}$$

subject to $V_{(T_{sg}, X_{sg})} \leq V_{lim}$

本研究では T_{sg} が X_{sg} において T_{sg1} から T_{sg2} に変化すると想定する。ただし第 m 区間における目標通過・停車時刻を T_{sgm} 、目標位置までの残距離を X_{dpm} 、

目標速度を V_{mfm} , 制限速度を V_{limm} , 減速度を β_{tm} , T_{sg1} と T_{sg2} を T_{sg} が変化前後の信号機が切り替わる時刻とする。

2.3 ST 曲線

信号機の表示が赤 (制限速度 $V_{lim}=0[m/s]$) ということは, ST 曲線 (横軸が距離で縦軸が時間) の傾きの制約条件が ∞ であり, 信号機の表示が赤から青 (制限速度がある速度) に切り替えるということは, ST 曲線の傾きの制約条件が ∞ からある一定の傾きに変化するということを示す。つまり信号機の表示が赤から青に切り替った瞬間に制限速度の制約条件が図 1 のように変化するので, 熟練者はこれらの制約条件を回避するように制約条件が変化する情報 (信号機までの距離 X_{sg} , 信号機の表示が切り替る時刻 T_{sg} 等) を利用しながら現在状況に応じて, 制限速度ギリギリの速度で信号機付近を通過するように運転をしている。これにより制約条件の変化に対応し目的地到着時間を短縮している。

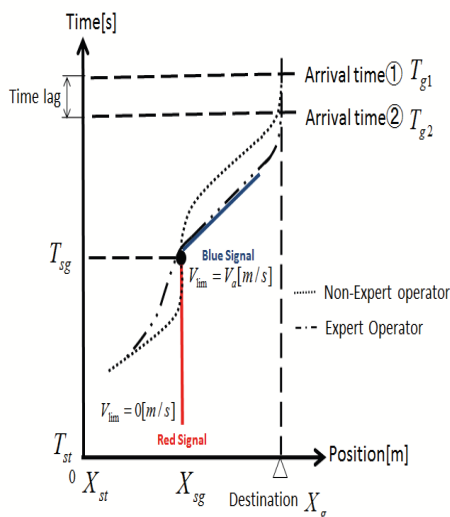


図 1: 信号機付近の運転

3 知的運転支援について

3.1 支援意思の決定

一般に, 熟練者 (支援者) は 0 もしくは 1 のようなシングルトンのなはっきりとした支援意思を持っているわけではなく, 以下に記したように大雑把な支援意思を持っている [1]。これらの支援意思は現在状況・車両特性等を考慮して決定される。

3.2 熟練者の運転知識と制御量

熟練者は過去の運転経験から, 列車の運転操作に関する感覚や知識を獲得している。それらの感覚や知識を利用して熟練者は時々刻々各種判断をし, 的確かつ柔軟な運転を実現しているのだが, 熟練者の感覚は以下に記したように”very good”や”good”といった表現であり, 曖昧である。本研究ではこのような曖昧だが的確な熟練者の感覚をメンバーシップ関数により表現することで, 熟練者の運転知識を列車の制御器に組み込む。

3.2.1 走行時

熟練者は制約条件を順守しながら, 目標位置に通過・停車できるように目標速度を算出し, 目標速度と, ノッチ操作をした際に予測される予測速度の速度誤差を考え, さらに負担を軽減する, つまりノッチ操作頻度を減少させるために前回ノッチ操作をしてからの時間を時々刻々評価する。このように多目的評価を運転中に時々刻々行うことにより, 各自における適切な制御量を算出する。

その際熟練者は「ノッチを+1した場合, 速度誤差が very good, 前回ノッチ操作をしてからの時間が good ならノッチを+1 する」, 「ノッチを保持した場合, 速度誤差が good ならノッチを保持する」といった知識をもとに, 制御量を決定する。

3.2.2 減速時

熟練者は指定位置・時刻に通過・停車するために目標位置に対するブレーキ開始までの残り時間を評価し, 目標通過 (停車) 位置とノッチ操作をした際の予測位置の差 (位置誤差) を評価している。さらに走行時と同様にノッチ操作頻度に関する評価を時々刻々行う。

その際熟練者は「ノッチを+1した場合, 位置誤差が very good, 残り時間が very good, 前回ノッチ操作をしてからの時間が good ならノッチを+1 する」といった知識をもとに, 制御量を決定する。

3.2.3 予見ファジィ制御

予見ファジィ制御方式は, いくつかの制御指令候補から適切な制御指令を選択することで, よりの確かつ柔軟な制御が可能となる。図 2 に予見ファジィ制御方式の概要を示す。

予見ファジィ制御が状態評価ファジィ制御と大きく異なる点は, 前件部で評価する値が, 現在の時点で制御指令を実行した場合に制御目的がどうなるかを予見したシミュレーション結果となっていることである。よって予見ファジィ制御方式を採用すれば, 制御を実行するコンピュータが, 制御目的を常に考慮しながら制御指令を決定するため, 人間にとって制御状況がわかりやすく, 安心して使うことができるシステムを構築することができる。

本研究では熟練者の運転知識をメンバーシップ関数を用いて制御器に組み込み, 予見ファジィ制御則を適用したシミュレーションを行う。ただし, 生成された制御指令を直接対象システムに出力するのではなく, 支援情報として, 次のステップ (支援実行部) へと入力するようにする。

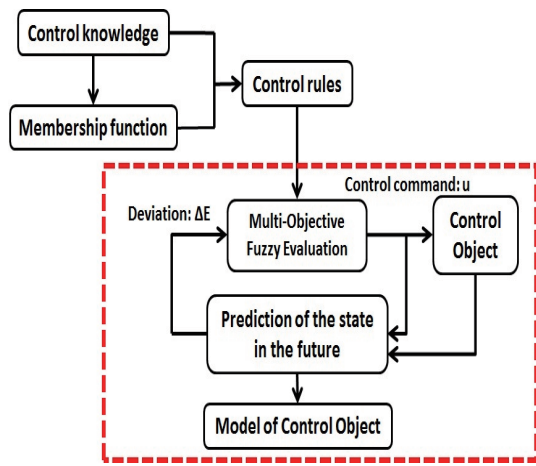


図 2: 予見ファジィ制御の概要

4 知的運転支援システムの構成

知的運転支援システムは、図3のように運転目標設定部・操作量決定部・支援実行部から成る3部構成にする。これにより熟練者が行っているように各目標値に対して、変化する制約条件の情報を用いながら知識に基づいて適切な操作量を算出し、被支援者に支援情報(操作量)を掲示する[3]。このように支援情報を被支援者に掲示することにより、その情報と同様に運転を行えば熟練者と同等の運転ができ、安全・正確に目的地到着時間短縮を可能とする運転を実現する。

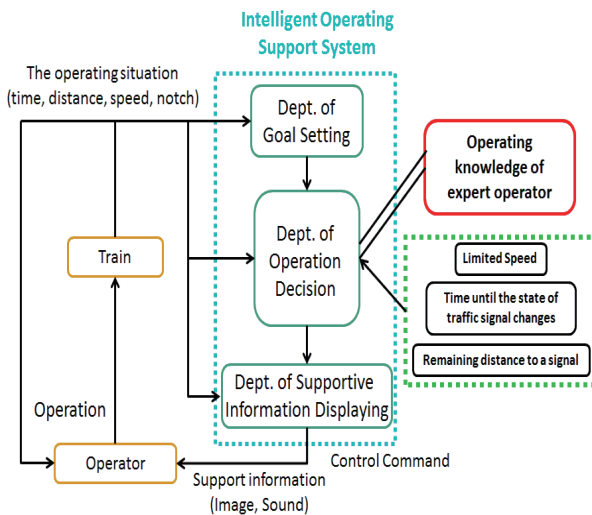


図 3: 知的運転支援システムの概要

4.1 運転目標設定部

運転目標設定部では、通過・停車区間に応じて現在速度・制限速度・目標位置に対する残距離・残時間等の情報から目標速度を設定する。これらの情報が変化しても運転者は制約条件を順守しながら、目標位置に通過・停車できるように時々刻々目標速度を設定する。

最終的な目標速度 V_{mf} は、算出した目標速度と、減速パターン、制限速度の値を随時比較して、それらの最小値を V_{mf} として決定する。

4.2 操作量決定部

操作量決定部では、最終的な目標速度 V_{mf} とノッチ操作をした際に予測される予測速度の差・減速開始までの残り時間・残距離・乗り心地等を熟練者の知識に基づいて評価し、操作量(ノッチ)を決定する。本研究では2.2節で記したように目的地到着時間 T_{g2} に目的地までの残距離 X_{dp} や目標速度に対する速度誤差 V_e が関わってくるのでこれらを熟練者の知識に基づいて評価し、制御量を算出する。

具体的には、制限速度を守りながら列車を走行させる走行制御、目標通過位置に列車を制限速度ギリギリの速度で通過させる通過制御、目標停車位置に列車を停車させる停車制御に分けて構成し、各々からの出力の最小値を制御ノッチとして決定する。モデルに対して操作候補を入力した場合の各評価指標の評価をし、複数の操作候補を算出し評価値が1番高い操作候補を次の操作量として、出力する。本研究では入力した操作量をノッチとし、ノッチ操作に対応して加減速度が変化するようにする。

4.2.1 走行制御

運転目標設定部で算出した最終的な目標速度 V_{mf} と、ノッチを操作した際に予測される予測速度 V_p の差をとり、その値を速度誤差 $V_e = V_{mf} - V_p$ としてメンバーシップ関数で評価し、操作量を決定する。また、前回にノッチを操作してからの経過時間をメンバーシップ関数で評価することによって、ノッチ操作頻度の評価を行い、運転手に負担がかからないように操作量を決定する(操作頻度を少なくする)。

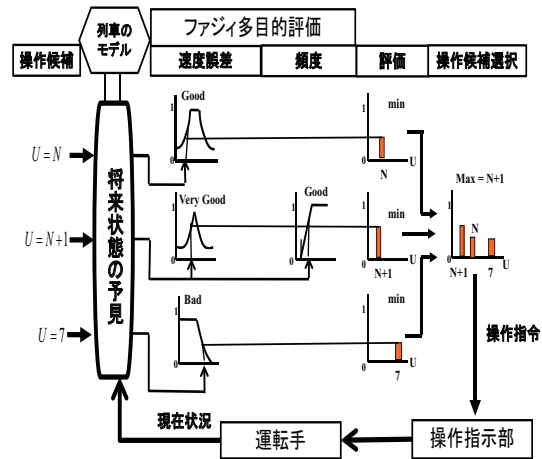


図 4: 走行制御

4.2.2 通過制御

あらかじめ設定した目標通過位置 X_{tp} と、ノッチを操作した際に予測される予測通過位置 X_{pp} の差をとり、その値を通過位置誤差 $X_{ep} = X_{tp} - X_{pp}$ として、 X_{ep} の大きさをメンバーシップ関数で評価している。さらに通過位置に対する減速開始までの残り時間 t_{zp} をメンバーシップ関数により評価し、さらに走行制御と同様にノッチ操作頻度の評価を行い、運転手に負担

がかからないように操作量を決定する (操作頻度を少なくする)。

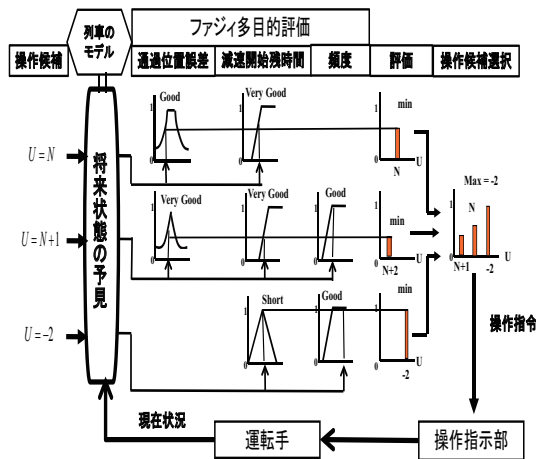


図 5: 通過制御

4.2.3 停車制御

あらかじめ設定した目標停車位置 X_{ts} と、ノッチを操作した際に予測される予測停車位置 X_{ps} の差をとり、その値を停車位置誤差 $X_{es} = X_{ts} - X_{ps}$ として、 X_{es} の大きさをメンバーシップ関数で評価している。さらに停車位置に対する減速開始までの残り時間 t_{zs} をメンバーシップ関数により評価し、さらに走行制御と同様にノッチ操作頻度の評価を行い、運転手に負担がかからないように操作量を決定する (操作頻度を少なくする)。

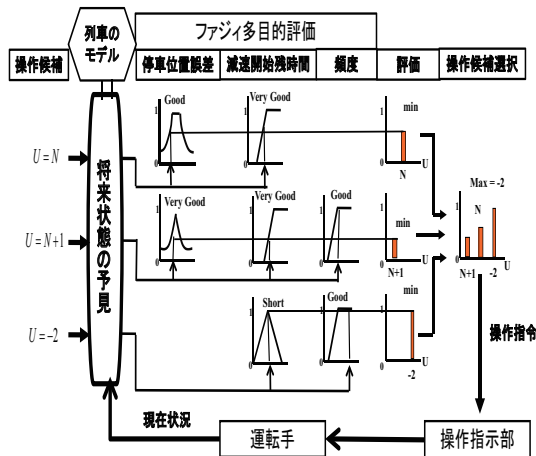


図 6: 停車制御

4.3 支援実行部

支援情報の提示方法は図 7 のような画面情報を利用する。図 7 では被支援者による操作 (左側) が、操作量決定部で決定された制御ノッチ (右側) と同じになるように被支援者に支援情報を掲示する。

以上の情報を用いて列車を運転すれば、被支援者が支援情報と同様のノッチ操作を行うことで、熟練者と同等の運転操作が可能となり、信号機付近において制約条件が変化する情報を用いることによる制限速度ギリ

ギリの速度での通過・停車位置におけるスムーズで正確な操作が可能となる。これにより制約条件が変化する環境下においても目的地到着時間短縮を実現する。

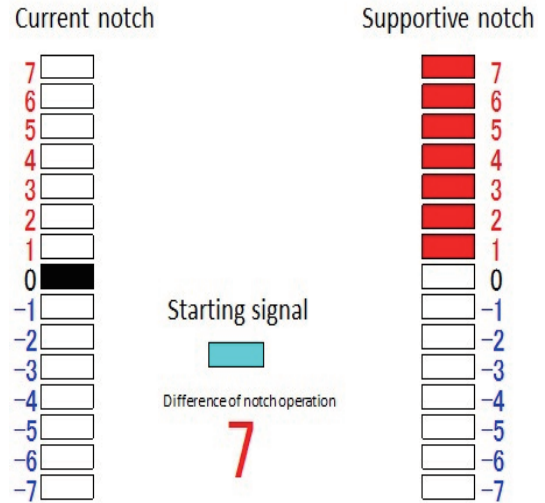


図 7: 支援画面

5 シミュレーション

5.1 環境と条件

本シミュレーションでは出発から 100[s] 後に信号機の表示が赤から青に切り替る予定だったが、前方列車の影響で出発から 30[s] 経過後に信号機の表示が切り替る時刻 T_{sg} (通過予定時刻) が出発から 80[s] 後の時刻へと変化するという環境を想定し、列車の運転シミュレーションを行う (T_{sg} が出発から 30[s] 後に 100[s] から 80[s] へ変化)。ただし図 9 のように初期位置を 0[m]、初速度を 0[m/s]、第 1 区間の制限速度を 23[m/s] として駅を出発し、第 2 区間の制限速度を 15[m/s] とする。さらに出発地点から目的地までの距離は 2000[m] とし、その間に 1 つの信号機 (1300[m] 地点) を設置し、変化する制約条件や現在状態を時々刻々考慮しながら、構築した知的運転支援システムを用いた列車の運転シミュレーションを行う。そして目標速度を追従した PID 制御による支援結果と結果を比較し、知的運転支援システムの有用性を確認する。

その際、シミュレーション環境は実際問題と同じ、ATS の働きによって安全が保障されている環境とした。これにより、制限速度を超えた速度である一定時間走行した場合、自動的にブレーキがかかり減速することで、安全を保障している。

シミュレーションには支援実行画面 (図 7) と一緒に図 8 のような 3 次元空間上に生成した VR 空間内での列車の運転シミュレーションシステムを利用して実施し、本システムの有用性を示す。具体的には、運転手のノッチ操作により列車がノッチ操作に応じた動作をし、運転者は本システムにより算出・表示されている適切な操作量を見ながら、制約条件が変化する環境下において目的地到着時間を短縮できるように操作量

を調整するようになっている。これらを利用することで、時々刻々変化する現在状況を随時確認しながら、支援情報に対応したノッチ操作を行い、知的運転支援システムを用いた非熟練者による列車運転のシミュレーションを行う。

運転シミュレーションシステムは本研究室OBである佐藤勝太氏が Matlab[4] を利用して構築したシステム [2] を改良して利用し、列車が移動するにつれて景色も変わり、画面上に常時、現在位置、現在速度、通過までの残り時間、現在ノッチ、支援ノッチの大きさが表示されるようにした。また図.8は運転席からの視点となっているが、設定により任意の方向からの視点を設定できるようにした [5][6]。これらの情報を利用しながら、運転手は支援情報に応じた運転をする。

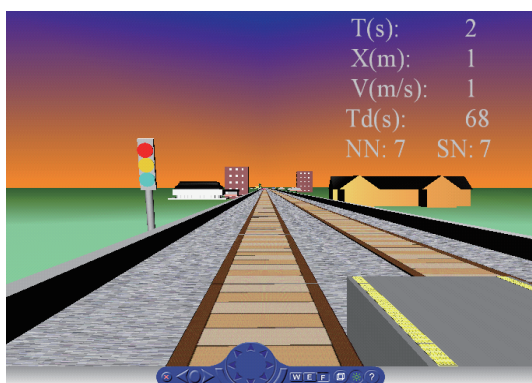


図 8: シミュレーション実行画面

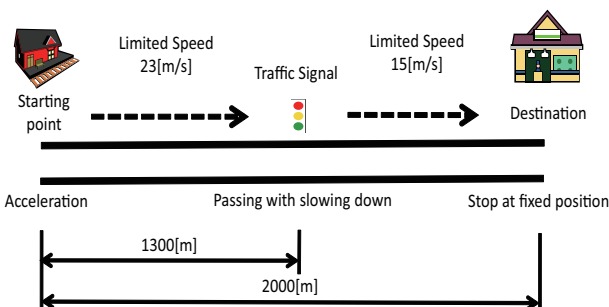


図 9: シミュレーション環境

5.2 結果と考察

図 10 より最終的な停車位置に関しては、知的運転支援システム利用時は走行中に制約条件が変化した場合 (通過時刻が変更になった) にもかかわらず 2000.02[m] となり、ずれが小さくなったことがわかる。また出発から 80[s] 後の通過位置に関して知的運転支援システムを利用した場合は 1300.3[m] となり、さらに制約条件が変化したにもかかわらず制限速度ギリギリの 15[m/s] で正確な位置を通過できていることが確認できた。以上の事から、知的運転支援システムは制約条件が変化する環境下でも通過・停車位置の正確さの追求に有用であることが確認できた。

また図 12 より、制約条件が変化する情報を利用しない場合のノッチ総変化回数が 80 回、PID 制御によ

る支援結果が 130 回 (サンプリング周期毎に制御量が決定されるため) だったのに対して、知的運転支援システムを利用した場合の結果は 32 回となり、ノッチの総変化回数が減少したことがわかる。特に通過・停車中 (減速時) でのノッチ変化回数を大幅に軽減できていることが確認できた。この結果から知的運転支援システムを利用した運転は、制約条件が走行中に変化してもノッチの総変化回数を削減でき、特に減速中のノッチ変化回数 (頻度) を大幅に軽減でき、運転手の操作負担を少なくできることが確認できた。

さらに図 10 と図 11 より、知的運転支援システム (予見ファジィ制御) を利用した場合は、走行中に制約条件が変化したにもかかわらず、出発から 80[s] 後に制限速度ギリギリの速度 (15[m/s]) で信号機付近を通過し、停車位置付近でスムーズに停車しているので、目的地到着時間が 138.5[s] となり、制約条件が変化する情報を利用しない場合より 23.5[s] 早く目的地に到着できた。

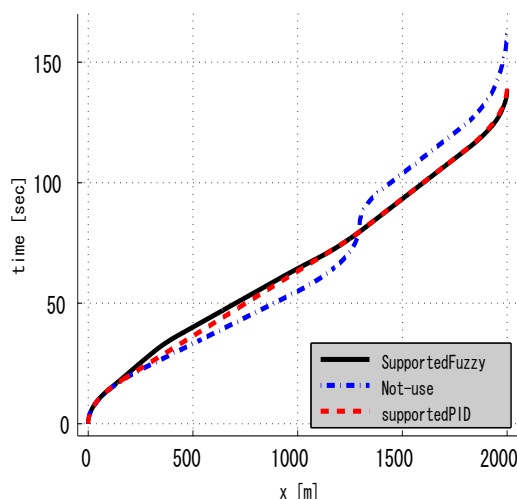


図 10: ST 曲線

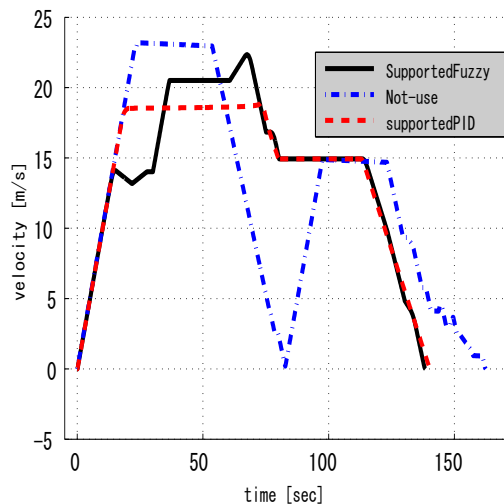


図 11: 時間と速度の関係

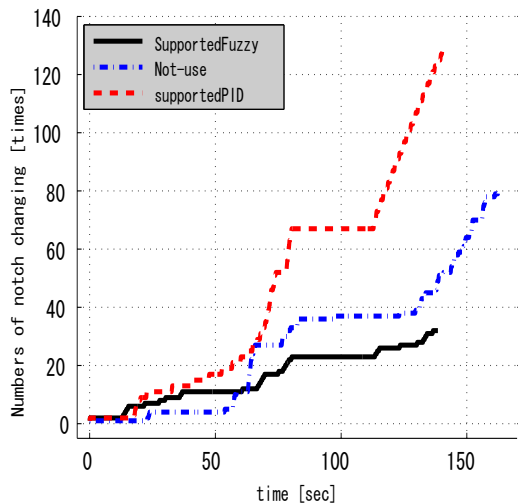


図 12: 時間とノッチ操作頻度の関係

以上の結果から制約条件が変化する環境下において、走行中に制約条件が変化する情報と知的運転支援システムを利用して運転すれば、正確に、快適に、迅速に目的地に到着するような運転ができ、目的地到着時間短縮(輸送量の確保)を実現できる事がわかった。これにより、本知的運転支援システムが制約条件が変化する環境下における輸送量の確保に有用であることを示した。

6 おわりに

本論文では走行中に制約条件が変化する環境下において、制約条件が変化する情報を用いて熟練者が時々刻々何を評価して運転しているのかを解析し、熟練者の運転知識に基づいた知的運転支援システムを構築した。そして、構築した知的運転支援システムを用いた列車運転のシミュレーションを行い、知的運転支援システムを利用して運転すれば、制約条件が変化する環境下においても、熟練者の知識に基づき、それらが変化する情報を利用することで正確・快適に目的地へ到着でき、到着時間を短縮できる事を示した。これにより制約条件の変化を考慮した知的運転支援システムは、制約条件が変化する環境下において輸送量の確保に有用であることを示した。

7 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 24500272 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 安信誠二:「ファジィ工学」, 昭晃堂, 1991.
- [2] 佐藤勝太, 安信誠二: 所定時刻に定位置停止を実現する知的運転支援システムの構築, 第 37 回知能システムシンポジウム, pp.231-234 (2010.3)

- [3] 高橋周太郎, 安信誠二: 「動的に変化する環境下における知的運転支援システムの開発」, 第 60 回知的制御研究会, pp.12-13, 2011
- [4] <http://www.mathworks.co.jp/>
- [5] 高橋周太郎, 安信誠二: 「制約条件が変化する環境下における知的運転方式の提案」, 第 38 回ファジィワークショップ, pp.242-245, 2012
- [6] Shutaro TAKAHASHI, Seiji YASUNOBU: 「A proposal of an intelligent operating method under the environment where constraint condition changes」, SCIS-ISIS2012, pp1856-1861

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
 知的制御システム研究室 高橋周太郎
 E-mail: takahashi@fz.iit.tsukuba.ac.jp