

ゲーミングシミュレーションによる 信号制御戦略の探索と学習

久井 守¹・田村 洋一²・山崎 徹也³

¹知能情報システム工学科

²社会建設工学科

³(株)日立製作所

本研究は、人間の視覚的・総合的な交通状況判断能力を信号制御に導入することを試みるものである。そのために、一連の信号交差点の時々刻々の交通状況を再現するようなシミュレーションモデルを開発し、人間が判断しながら系統制御に随時介入できるゲーミングシミュレーションを被験者にしてもらう。そして、交通状況の変動パターンに応じた望ましい制御戦略を探索し記録する。さらに、得られた制御戦略と交通状況との関係を調べ、制御戦略をモデル化することにより、既存の系統制御よりも望ましい制御戦略を得ることを目的とする。

Key Words : human judgement, traffic signal control, simulation, neural network

1.はじめに

一般街路で発生する交通渋滞の原因の1つは交通信号機である。本来、信号機の役割は交差点の安全と交通の円滑化を図るためのものであるが、その設置数の増加とともに逆に交通の円滑化を妨げるようになってきており、したがってその機能を高度化し運用を効率化する必要性が高まっている。

本研究では、複数の信号を互いに関連づけて系統的に制御する系統式信号制御を対象とし、系統式信号制御で特に重要な制御パラメータであるオフセットの制御戦略を探索することを目的とする。過去、信号制御についてはさまざまな制御方法が提案され、また実行されてきている。その中でも、交通状態に応じて自動的にパラメータを変更する交通応答制御においては、さまざまなシミュレーションモデルが開発され、研究が行われてきた。しかし、この交通応答制御に人間の判断を応用した例はあまり見られない。ひどく混雑した交通状況などにおいては、警察官の手動による信号制御の方が効率がよい場合があることも事実である。そこで、人間の視覚的・総合的な交通状況判断能力を信号制御に導入し、さらに制御の効率を向上させることを試みる。ただし、実際の路

線で制御戦略の探索を実行するには条件が限定され、またさまざまな交通状況を作り出すことが困難である。したがって本研究では、実現象を再現するシミュレーションモデルを作成し、このシミュレーションを用いて被験者が信号制御に介入するゲーミングを行うことによって、信号制御戦略の探索を行う。信号交差点では車両の右左折挙動があり、また信号および先詰まりによる加減速などさまざまな要因により交通挙動が変化する。このような交通挙動を再現するため、シミュレーションモデルでは車両の挙動を微視的に扱う必要がある。これにより、信号制御に必要な情報と制御効果に関するデータを得ることができる。そして、得られたデータから人間の判断による信号制御と交通状況の関係を定量的に評価し、信号制御戦略としてモデル化する。制御戦略のモデル化手法としては、階層型ニューラルネットワークを用いる。

2.シミュレーションモデルの作成

シミュレーションモデルは、計算機の画面上で車両1台1台の挙動をリアルタイムで表現する微視的モデルとし、系統信号システムにおける交通流を再現するものである。また、被験者が画面上の交通状況を見ながらキー

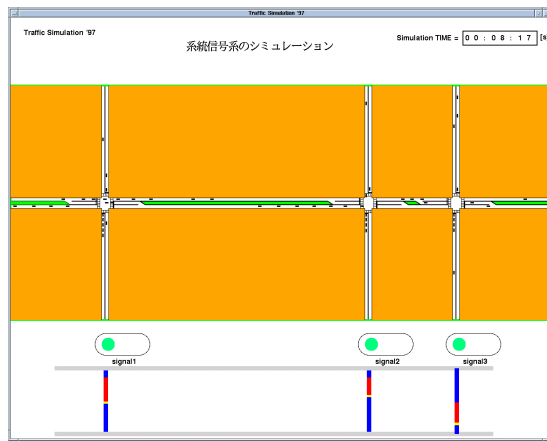


図-1 シミュレーション実行画面

入力で信号を制御することのできるゲーミング機能を有している点が大きな特徴である。モデルの開発には、UNIX-WS 上でC言語を用い、画面表示は X-Window システムを用いた。

シミュレーションの実行画面を図-1に示す。画面内の信号機は主道路のもので、信号機の下にはオフセット図を表示する。ゲーミングシミュレーションでは、被験者が画面上に表示されるオフセット図と交通状況を見て、信号制御への介入を判断する。

さらに、本モデルの特徴を以下に述べる。

対象路線は、1本の主道路と複数の交差道路で構成する。主道路は往復2車線で各交差点流入部は右折レーン付き、交差道路は往復2車線で右折レーンなしとする。

リンク長、交差点数は任意に設定できる。

信号は2現示とし、周期、スプリットおよびオフセットは任意に設定できる。

エントリーポイントへの車両の到着台数はポアソン分布に従う。また、交差点間における車両の流入出は考慮しない。

交差点での右左折挙動および追従走行を考慮して車両の速度決定を行う。追従モデルとしては、式(1)に示される藤井²⁾の最小安全車頭間隔の式を用いる。

$$S = 0.00818V^2 + 0.139V + 4.62 \quad (1)$$

ここで、 S は最小安全車頭間隔[m]、 V は車速[km/h]、定数 4.62 は停止時の最小車頭間隔[m]である。式(1)の2次方程式を V について解き、単位を秒速に換算して、車速 v [m/s]を求めると次の式(2)が得られる。

$$v = 17.0 \times \sqrt{0.03272 \times [x(i+1) - x(i) - b] + 0.01932} - 2.36 \quad (2)$$

ただし、 $S = x(i+1) - x(i)$ は前車 $i+1$ との車頭間隔、 $b=4.62$ は停止時の最小車頭間隔である。車頭間隔が最大追従距離以上なら自由走行とし、最大追従距離以下となれば追従走行とする。追従走行の場合は式(2)を用いて車速を

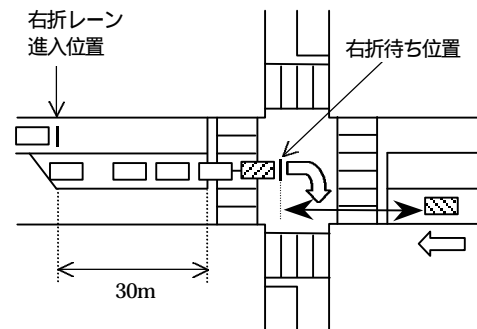


図-2 右折可能判断

決定する。

赤信号のとき停止線手前の先頭車は等減速度運動で停止線まで走行し停車する。青信号になると発進し、希望速度に達するまで等加速度で走行する。

リンクごとに設定した分岐確率にもとづき交差点での車両の右左折を決定する。

ここで、交差点で右折あるいは左折する車両の速度決定について説明する。左折車は、停止線に最も近い位置にいるリンク内先頭車であるなしに関わらず、停止線までの距離が最大追従距離となった時点より、等減速度運動で減速する。ただし、車速が 10km/h 以下となれば減速をやめ 10km/h を維持し、信号青であればそのまま左折する。また、左折直後の車速も 10km/h とする。信号が赤または黄のときは直進車と同様に減速をする。

次に、主道路を走行する右折車は、右折レーン進入位置までの距離が最大追従距離となった時点から速度を調節し、右折レーン進入位置で 20km/h となるようにする。右折レーン進入位置に到達すれば、右折レーン内の車両存在台数を調べる。ここで、右折レーンの長さを 30m としているため、右折レーン内最大存在車両台数は5台とし、既に5台存在する場合は図-2に示すように右折レーン進入位置で停止して進入待ちをする。5台未満の場合は車速 20km/h を保って右折レーンに進入する。右折レーン内の先頭車は、希望速度を 6.3m/s(約 23km/h)として自由走行をし、停止線までの距離が右折レーン内最大追従距離未満となった時点から等減速度運動で減速する。ただし、車速が 10km/h 以下となった時点で減速をやめ、信号が青のときは右折待ち位置まで定速走行して右折処理を行う。信号が赤または黄のときは停止線位置で停止する。

右折処理では、対向車の位置と速度により、右折可能かどうかの判断を行う。右折車が既に停止線を越えているときは、右折待ち位置から対向車までの距離が 30m 以上あいているか、あるいは 30m 未満でも対向車の速度が 10km/h 以下のときは、車速を 10km/h に保って右折する。そうでない場合は右折待ち位置で停止する。ま

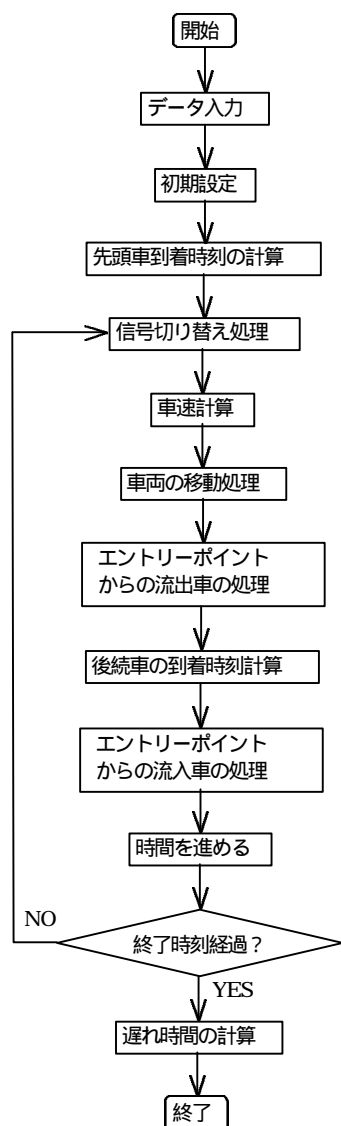


図-3 シミュレーションの流れ

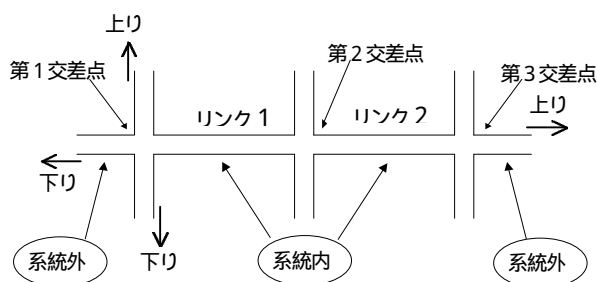


図-4 系統内リンクと系統外リンク

た、交差点内に存在する車両、すなわち停止線を越えている右折車は信号が黄または赤であっても右折を行う。

シミュレーション全体のフローチャートを図-3に示す。シミュレーションはタイム・スキャン方式とし、スキャンサイクルごとに交通状況を更新する。道路座標は総リンク長に応じて自動的に縮尺できるようにしている。また、シミュレーションは路線上に車両が存在しない状態から開始する。図-3の中で、先頭車到着時刻というの

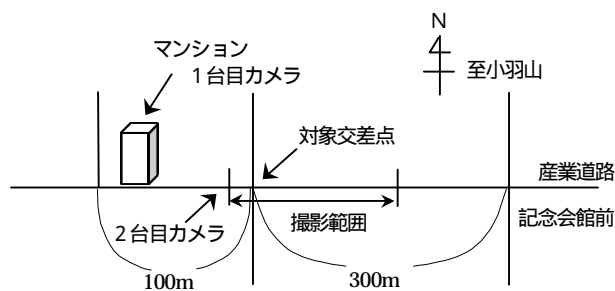


図-5 観測対象路線

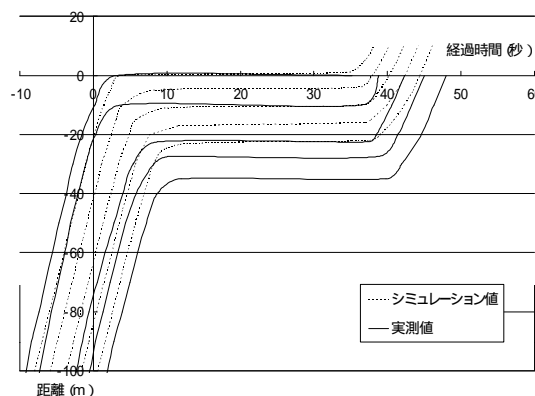


図-6 走行軌跡

はエントリーポイントに到着する最初の車である。

シミュレーションの評価指標としては、遅れ時間を用いる。個々の車両の遅れ時間は、式(3)により算出する。

$$D_i(k) = T_i(k+1) - T_i(k) - x_k / v_k \quad (3)$$

ここに、 $T_i(k)$ は*i*番目車両が第*k*交差点を通過する時刻、 x_k はリンク*k*のリンク長(停止線間の距離)、 v_k はリンク*k*における希望速度である。これは、実際のリンク旅行時間と希望速度で走行したときのリンク旅行時間の差である。シミュレーション開始から終了まで個々の車両の遅れ時間を記録し、リンクごとに車両1台あたりの平均遅れ時間を求める。また、各リンク上り方向、下り方向、系統内リンク、系統外リンク、交差道路およびリンク全体に対してそれぞれ遅れ時間を算出する。図-4に示すように、系統内リンクは走行車両がオフセットの影響を直接受けるリンクであり、2信号を両端にもつリンクである。系統外リンクは直接オフセットの影響を受けないリンクである。

3. シミュレーションモデルの検証

(1) 停止と発進の挙動

実際の路線で交通流観測調査を行い、交差点での信号切り替わりによる車両の停止と発進の挙動を調べ、モデルの調整を行った。実際の交通流のデータは、図-5に示す

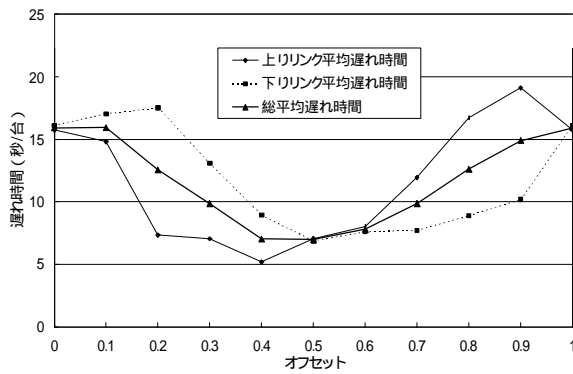


図-7 オフセットと遅れ時間の関係(周期 60 秒)

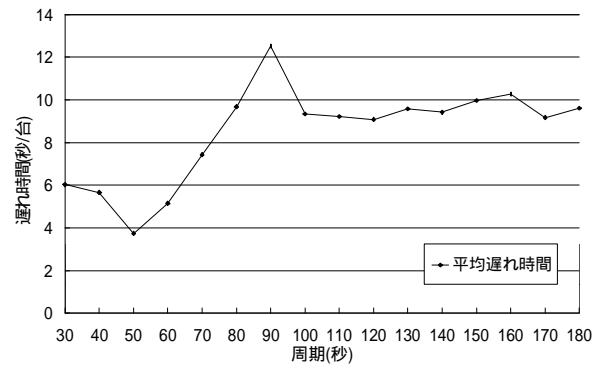


図-9 周期と遅れ時間の関係

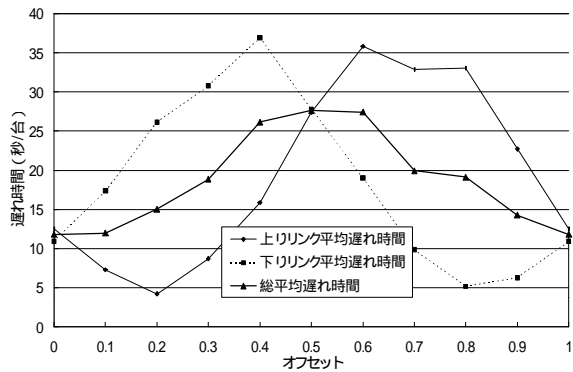


図-8 オフセットと遅れ時間の関係(周期 120 秒)

宇部市内の産業道路の記念館前交差点と隣接西側の信号交差点の間のリンクについて西行交通をビデオ撮影し、それを解析して得たものである。この路線の制限速度は 40km/h であることから、主道路希望速度を 10m/s (約 36km/h) として、シミュレーションから得られた走行軌跡を実測値とともに図-6 に示す。縦軸は停止線からの距離、横軸は赤信号開始時からの時間である。図-6 をみると、停止時の車頭間隔に多少不一致があるほか、加減速度などのパラメータをさらに微調整して、停止発進時の挙動を実現象に近づけることが必要である。

(2) オフセットと遅れ時間の関係

オフセットと遅れ時間の関係を調べる。これは、系統信号制御における制御戦略を探索する上で、重要な制御パラメータであるオフセットの変化が遅れ時間にどのような影響を及ぼすかを知るためである。そこで、孤立した 2 信号 1 リンクの路線を対象として、以下の条件のもとで、第 1 信号と第 2 信号の間の相対オフセットを 0 から 1 まで 0.1 刻みで変化させシミュレーションを実行し、系統内リンクの平均遅れ時間を求めた。

リンク長：300m

共通周期：60 秒

120 秒

主道路青現示率：各信号 60%

損失時間：各現示 4 秒

平均到着率 主道路：0.15 台/秒

交差道路：0.05 台/秒

希望速度 主道路：12m/s

交差道路：10m/s

右左折率 主道路：直進 80%，右折 10%，左折 10%

交差道路：直進 60%，右折 20%，左折 20%

シミュレーション時間：600 秒

シミュレーション結果を図-7 および図-8 に示す。このシミュレーションのような孤立 2 信号 1 リンクの路線でリンク長が 300m の場合、スルーバンド幅最大化基準でも、飽和方形波を仮定した場合の遅れ最小化基準でも、最適オフセットは周期 60 秒のとき交互式オフセット、周期 120 秒のとき同時式オフセットとなる。図-7 および図-8 をみると、周期 60 秒のときはオフセット 0.5 で総平均遅れ時間が最小となり、周期 120 秒のときはオフセット 0 で総平均遅れ時間が最小となっている。この結果より、オフセットと遅れ時間の関係は理論に従っているといえることができる。

(3) 周期と遅れ時間の関係

一般に隣り合う 2 つの信号交差点間で生じる遅れは、相対オフセットと共通周期に係る。そこで、次に周期と遅れ時間の関係を調べる。孤立 2 信号 1 リンクの路線においてリンク長を 300m として、以下の条件のもとで、周期を 30 秒から 180 秒まで 10 秒刻みで変化させ、それぞれの周期に応じて、遅れ時間が最小となるように同時式オフセットまたは交互式オフセットを適切に与えてシミュレーションを実行し、リンクの平均遅れ時間を求めた。

リンク長：300m

主道路青現示率：各信号 60%

損失時間：各現示 4 秒

オフセット：0 (C 30, 100 C)

0.5 (40 C 90)

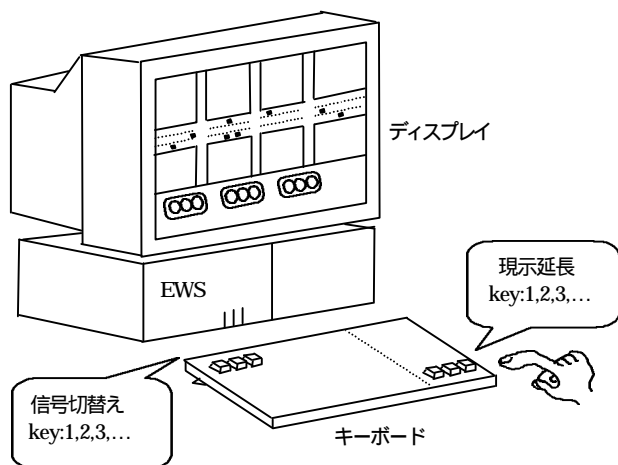


図-10 ゲーミングシミュレーションの様子

ここに C:共通周期

平均到着率 主道路: 0.15 台/秒

交差道路: 0.05 台/秒

希望速度 主道路: 12m/s

交差道路: 10m/s

右左折率 主道路: 直進 80%, 右折 10%, 左折 10%

交差道路: 直進 60%, 右折 20%, 左折 20%

シミュレーション時間: 1800 秒

シミュレーション結果を図-9に示す。越の研究³⁾から、このシミュレーションのような孤立2信号1リンクの路線でリンク長が300mの場合、遅れ時間は周期が50秒付近で極小値をとり、また100秒以上では遅れはほぼ一定となる。図-9をみると、平均遅れ時間は周期50秒で極小値をとり、周期100秒以上ではほぼ一定となっていることがわかる。この結果より、遅れ時間を減少させるためには、常用の周期の範囲では短めの周期を用いた方がよいということがいえる。

このように、本シミュレーションモデルでは遅れとオフセットの関係、および遅れと共通周期の関係が適正に再現できることを確認することができた。

4. 信号制御戦略のモデル化

これまでに説明したシミュレーションモデルに、信号現示の切り替えあるいは延長を行うことができるゲーミング機能を付加し、被験者にゲーミングシミュレーションをやらせた。被験者は大学院の学生1名である。被験者は図-10に示したようにEWSのシミュレーション画面上で再現される交通状況を見ながら、キー入力を行って随時信号制御に介入する。キー入力を行うことによって、その数字キーに対応した番号の信号の青時間を終了したり、青時間を5秒単位で延長することができる。

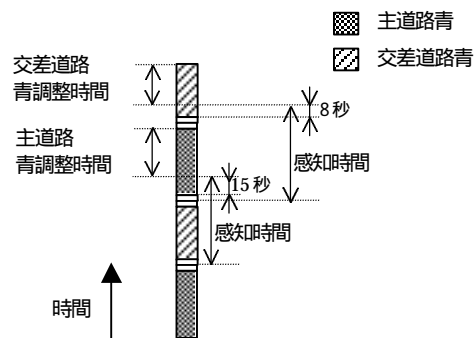


図-11 青調整時間と感知時間

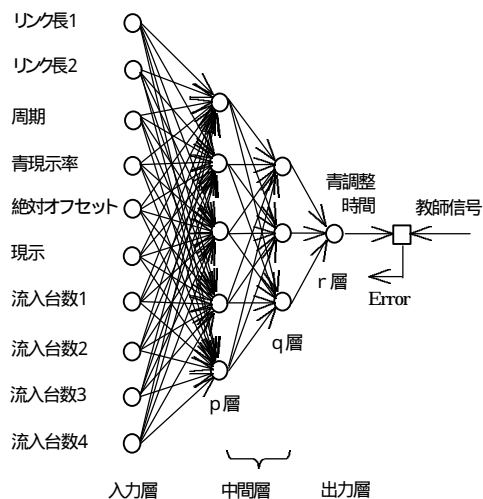


図-12 階層型ニューラルネットワーク

これらの操作は、かなりの習熟が必要であり、事前に十分トレーニングを行った。この制御介入によって、例えば交差道路に車両が存在しないのに主道路の交通を赤信号で長時間信号待ちさせるといった非効率的な制御を避けることができる。また、制御の介入対象は両端の2信号を除いた系統内の信号とする。

本モデルでは被験者が信号制御に介入することによって周期ごとにオフセットと青時間が変化する。青時間の最小値は指定するが最大値は指定しない。被験者が制御に介入しない場合は、周期と青時間は最初に指定した値をとる。このようにした上で、最小青時間(主道路15秒、交差道路8秒)経過時点からの青時間を計測し、それを青調整時間として記録する。また、各リンクの上流端に設置した車両感知器の感知時間(計測時間)を図-11に示すように設定する。感知時間は青調整時間の開始直前までとってできるだけ広く流入交通状況を把握するようにする。すなわち制御介入を行ったときの交通状況である各リンクの流入台数を計測する。このように感知器をリンク上流端に配置したのは、感知時間内にリンクに流入する台数を広く把握するためである。さらに、それぞれの感知時間の終了時点では、第1信号を基準とした絶対オフセットも同時に記録するようにした。

次に、図-12 に示すような階層型ニューラルネットワークを用いて、制御介入を行った信号ごとに、ゲーミングシミュレーションによって得られた信号制御戦略を学習しモデル化する。人間の判断による信号時間の短縮あるいは延長は、そのときの信号条件や交通状況に左右される。しかも青時間の延長量または短縮量は確定的なものではない。このように入出力関係が定式化できないため、ニューラルネットワークの学習機能によって、入力（信号条件や交通状況）に対する出力（信号の短縮時間あるいは延長時間）を獲得する。

ニューラルネットワークへの入力は制御対象交差点に流入する主道路のリンク長、対象信号の制御パラメータおよび交差点へ流入する4リンクの流入台数とし、出力は青調整時間とする。ただし、各データは定数で割って0から1の範囲となるように標準化したものである。教師データにはゲーミングにより得られた青調整時間を用いて誤差逆伝搬法で荷重調整を行い、交通状況に応じて適切な青調整時間を求められるようにする。

ニューラルネットワークの学習においては、適切な荷重の調整を行うために中間層の数およびそのユニット数、平滑化係数、学習速度係数、温度定数、学習回数などのパラメータを決めてやる必要がある。本研究では、これらのパラメータはを試行錯誤で与えて学習を繰り返すを行い、その中から出力の誤差率が小さくなるようなパラメータを探索した。その結果、ゲーミングデータの学習には、10 ユニットの入力層と1 ユニットの出力層に対し、中間層を1層とし、そのユニット数を5とした階層型ニューラルネットワークを用いるのが最も効果的であった。また、平滑化係数は0.5、学習速度係数は0.9、温度定数は1.0として、1万回から10万回程度学習を繰り返すことにより、出力の誤差率がほぼ最小になることがわかった。

5. 信号制御戦略の適用

このニューラルネットワークから得られた信号制御戦略を、逆にシミュレーションに適用し、主道路と交差道路のそれぞれの青時間を伸縮することによって、隣接信号との相対オフセットを随時調節する。主道路の青時間の制御においては、青開始から15秒経過した時点でそのときの信号制御パラメータおよび交通状況などの条件を学習の完了したニューラルネットワークに入力として与える。そして、出力として青調整時間を求め、それを用いて主道路の残りの青時間すなわち青時間終了時刻を変更する。交差道路の青時間の制御においては、青開始か

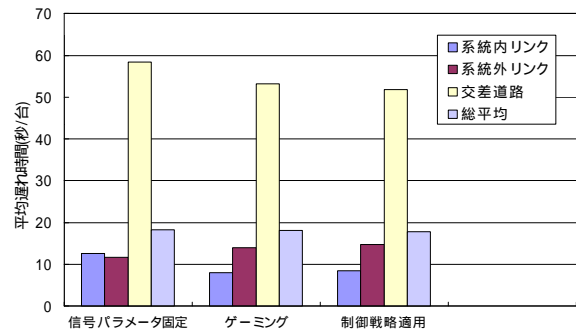


図-13 信号制御戦略の適用結果(3信号2リンク路線)

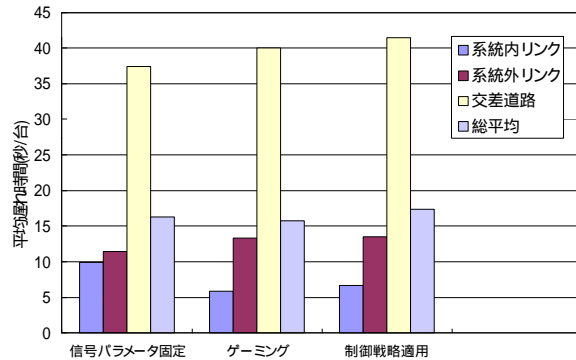


図-14 信号制御戦略の適用結果(4信号3リンク路線)

ら8秒経過した時点で、主道路の制御と同様にして青調整時間を求め、それを用いて交差道路の青時間終了時刻を変更する。ただし、ゲーミングシミュレーションで介入対象でなかった両端信号については、信号制御戦略を適用せず信号制御パラメータは固定とする。

(1) 3信号2リンク路線への適用例

まず、3信号2リンク路線を対象とし、主道路の各リンク長を300m、周期を120秒としたときの信号制御戦略の適用結果を図-13に示す。比較対象は、スルーバンド幅最大化基準による平等オフセットである同時式オフセットを与えて1800秒のシミュレーションを行った場合の平均遅れ時間とする。シミュレーション条件およびニューラルネットワークの学習精度を以下に示す。

リンク長：各リンク 300m

共通周期：120 秒

主道路青現示率：各信号 75%

損失時間：各現示 4 秒

初期オフセット：各信号 0 秒

平均到着率 主道路：0.25 台/秒

交差道路：0.05 台/秒

希望速度 主道路：12m/s

交差道路：10m/s

右左折率 主道路：直進 80% , 右折 10% , 左折 10%

交差道路：直進 60% , 右折 20% , 左折 20%

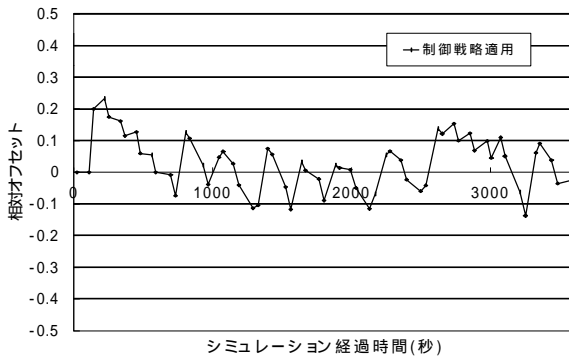


図-15 制御戦略適用によるオフセットの変化

シミュレーション時間：1800 秒

ニューラルネットワークの学習パターン：28 組

単純平均誤差率：0.253

RMS 誤差：8.49 秒

図-13 より，ゲーミングによって系統内リンクおよび交差道路の平均遅れ時間は，平等オフセットを与えて信号制御パラメータを固定したときよりも約 5 秒程度減少し，またニューラルネットワークでモデル化した信号制御戦略を適用した結果も，同様に遅れ時間短縮効果が現れている．このため，総平均遅れ時間も平等オフセットを与えて信号制御パラメータを固定したときより約 3 % 程度減少している．この結果とは別に，主道路の平均到着率を 0.15 台/秒と少なくした場合についてもシミュレーションを行ったが，この場合は制御戦略を適用すると交差道路の平均遅れ時間が大きく増加し，全体としては効率的な制御が行えなかった．これらの結果を総合して考えると，交通流が混雑してきたときの方が制御効果上がるのではないかと考えられる．

(2) 4 信号 3 リンク路線への適用例

次に，4 信号 3 リンク路線を対象とし，主道路の各リンク長を 300m，周期を 120 秒としたときの制御戦略の適用結果を図-14 に示す．シミュレーション条件およびニューラルネットワークの学習精度を以下に示す．

リンク長：各リンク 300m

共通信号周期：120 秒

主道路青現示率：各信号 70%

損失時間：各現示 4 秒

初期オフセット：各信号 0 秒

平均到着率 主道路：0.15 台/秒

交差道路：0.05 台/秒

希望速度 主道路：12m/s

交差道路：10m/s

右左折率 主道路：直進 80%，右折 10%，左折 10%

交差道路：直進 60%，右折 20%，左折 20%

シミュレーション時間：3600 秒

ニューラルネットワークの学習パターン：各信号 58 組

単純平均誤差率(2 信号平均)：0.283

RMS 誤差(2 信号平均)：7.30 秒

図-14 より，ゲーミングシミュレーションでは，制御介入によって直接影響を受ける系統内リンクの遅れ時間がほぼ半減し，路線全体の総平均遅れ時間も約 5 % 減少している．これに対して，ニューラルネットワークでモデル化した信号制御戦略を適用した結果においては，系統内リンクでは遅れ時間が大きく減少し効果が現れているのに対して，総平均遅れ時間は平等オフセットを与えて信号制御パラメータを固定したときよりも逆に 7 % 程度増加している．これは，特に交差道路の遅れ時間の増加によるものである．

次に，制御戦略適用時の第 1 信号と第 2 信号の間の相対オフセットの変化を図-15 に示す．図-15 より，制御戦略の適用によって平等オフセットである同時式オフセットを中心として，小刻みにオフセットが変動していることがわかる．

本研究においては，ゲーミングによって平等オフセットのような既存の制御よりも効率のよい制御を行うことまでは実現できた．しかし，それをモデル化し適用する段階では，うまくモデル化できてゲーミングと同程度の制御効率を得られる場合と，うまくモデル化できずに効率のよい制御が行えない場合とがあった．ニューラルネットワークの学習回数を増やすと，得られる制御戦略とゲーミングデータとの誤差は小さくなり，それによって得られた信号制御戦略を実際に適用すれば，ゲーミングで行われた制御と同様の制御が行われる．しかし，ゲーミングで経験しなかった別の交通状況に対しては逆に制御効果が悪くなる．これが，ニューラルネットワークから得られた制御戦略を適用したときに逆に遅れ時間が増加した原因の 1 つであると思われる．このように，ゲーミングから得たデータだけでは対応しきれない状態が発生する可能性があり，これに対処するためにはできるだけいろいろな交通状況についてゲーミングデータを収集する必要がある．

6. まとめ

本研究では，一連の信号交差点の交通状況を再現し，ゲーミング機能を有するシミュレーションモデルを開発した．また，モデルの検証を行い，結果の評価指標となる遅れ時間が適切に求められることも確認できた．さらに，ゲーミングシミュレーションを行い，交通状況の変

動に応じた信号の制御戦略を探索し、ニューラルネットワークで学習することにより、信号制御戦略としてモデル化した。こうして得られた制御戦略を、逆にシミュレーションに適用したが、シミュレーション条件によって最適オフセットを上回るまでの効率が得られる場合とそうでない場合があった。

今後は、ゲーミングシミュレーションによって得られるデータを詳しく分析して、信号制御戦略のモデル化手法をさらに検討し、より効率のよい信号制御戦略を得られるようにすることが課題である。また SCOOT, OPAC, UTOPIA などの制御方法との比較を行うことも重要な課題である。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金の助成を受けて行った研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 河上省吾, 松井寛: 交通工学, 森北出版, 1987
- 2) 米谷栄二・渡辺新三・毛利正光: 交通工学, オーム社, pp.117 ~ 121, 1965
- 3) 越正毅: 系統交通信号におけるサイクル制御の研究, 土木学会論文報告集, 第 241 号, pp.125 ~ 133, 1975
- 4) 久井守: 系統信号と地点感應信号群の制御効果の比較, 徳山工業高等専門学校研究紀要, 第 1 号, pp.57 ~ 73, 1987
- 5) 久井守, 高橋昌之: 系統信号システムのファジィ制御シミュレーション, 山口大学工学部研究報告, 第 46 巻, 第 1 号, 1995
- 6) 安居院猛・長橋宏・高橋裕樹: ニューラルプログラム, 昭晃堂, pp.11 ~ 18, 51 ~ 57, 1993

(1998.11.10 受付)

SEARCH AND LEARNING OF TRAFFIC SIGNAL CONTROL STRATEGIES THROUGH GAMING SIMULATION

Mamoru HISAI, Youichi TAMURA and Tetsuya YAMASAKI

In this paper, human ability capable of visually judging the whole traffic situation is introduced into traffic signal control. For the purpose, a traffic simulation model is developed to simulate traffic behavior according to the indication of coordinated signal control. From gaming simulation where a subject can join the control by hit some keys to change or extend any signal indications watching traffic situation on the computer screen, the control strategies suitable to traffic conditions are obtained and recorded. The control strategies are learned and modeled by neural network. The control strategies obtained from the model are applied to the simulation and the control effect is evaluated.