

複数の粘菌を用いた都市交通信号制御の最適化

Optimizing urban traffic signals by multiple slime molds

渡部 皓斗^{1 †} 坂地 泰紀¹ 野田 五十樹¹
Hiroto Watanabe Hiroki Sakaji Itsuki Noda

¹ 北海道大学大学院 情報科学院

Abstract: 本研究では、粘菌手法を活用した交通制御アプローチを導入し、その効果をグリーンウェーブの生成に適用することを提案する。都市交通を最適化する手段は複数存在するが、本研究は信号機の制御に焦点を当てる。まず粘菌の数理モデルを用いて信号機のオフセット制御を自律的に行うマルチエージェント手法を示す。そして複数体の粘菌モデルを都市に導入し、より柔軟な信号機制御を行う交通制御を行う。最後に交通シミュレーション上で仮想的な道路網を作成し、様々な交通パターンを検証した上で本研究の優位性を示す。

1 はじめに

自律分散的な交通制御の実現は、その設置の容易性から注目されている。

交通渋滞問題の解消には、効果的な交通制御が重要である。近年、都市部における渋滞は深刻な社会問題となっている。このため、渋滞を解消し、道路の安全性を確保するために様々な交通管制手法が実施されている。信号機制御はその一つであり、特にグリーンウェーブの導入が注目されている。現在の日本における信号機制御は、中央の集中制御装置が一括して制御する方式が主流である。この方式では、各信号機で観測された交通データが制御を統括する中央に送信され、集められたデータをもとに最適な制御が計算され、その後中央から信号機の制御が行われる。しかし、都市の規模が大きくなるに従いこのようなシステムの設計・設置には大きなコストがかかり、道路網の変化毎に再設計を行う必要がある。そこで、中央制御に代わり、信号機自身が交通状況を考慮して自律分散的に制御を行う方法が研究されてきた。

信号機制御の手法には大きく分けてスプリット制御とオフセット制御の2種類が存在する。本研究では、オフセット制御に焦点を当てる。オフセット制御を活用した技術の一例がグリーンウェーブである。これは、隣接する信号機間でオフセット制御を行い、車両がその区間を赤信号で停車することなく連続して通過できるようにする技術である。交通流量に基づいてオフセット制御を調整し、グリーンウェーブを形成することで、効果的に渋滞を解消することが可能である。

本研究の目的は先行研究 [4] で提案された複数の粘菌を用いたオフセット制御手法の効果について、より多様

な交通流を用いて分析を行い、その有用性を検証することである。特に先行研究では右左折を含む交通流について言及していないため、これを含んだ複雑な交通流を設定したうえで実験を行う。

本論文の構成は以下のとおりである。まず、2章において関連研究をいくつか示す。3章では、シミュレーション実験の概要を説明し、4章で結果と考察を示す。最後に5章で本論文のまとめを行う。

2 関連研究

2.1 粘菌

粘菌は単細胞生物であり、餌を粘菌の近くに置くと体を餌に向かって成長させるという性質を持つ。餌を置いてから暫くすると、餌から遠くにある体は収縮していき最終的に管状の構造になる。中垣らはこの性質を用いて粘菌に迷路探索をさせる実験を行った [1]。粘菌から小片を切り出し、迷路内の各所に設置する。そして、餌を迷路内の2箇所を設置すると、小片は成長を始め、合体してひとつの体になる。そして体は収縮を始め最終的に2つの餌を結ぶ最短経路上にのみ管が残った。粘菌が迷路を解けるのは、以下の2つの性質を粘菌が持っているためである。

- できるだけ大きな体で餌を覆いたい
- 体の連結性を維持したい

この2つの性質を満たすには、餌同士を最短経路で結ぶことが効率的であるため粘菌は迷路を解けるのである。

中垣らはさらにこの粘菌の管の収縮の様子を数理モデルにした [2]。まず、迷路内の行き止まりやT字路の

[†]北海道大学 Hokkaido University

箇所を節点 $N_i (i = 1, 2, \dots)$ とし, 節点 N_1, N_2 に餌が設置されているものとする. ある 2 節点 N_i, N_j 間の管内部を流れる水の流量 Q_{ij} が以下の (1) 式のように定義できる.

$$Q_{ij} = \frac{D_{ij}}{L_{ij}}(p_i - p_j) \quad (1)$$

ここで, L_{ij} は節点 i, j 間の距離, p_i は節点 i にかかる圧力を示している. D_{ij} はコンダクティビティを表しており, 管の半径 r , 水の粘性係数 η を用いて $D_{ij} = \pi r^4 / 8\eta$ と表される. D_{ij} は管の半径による変数であり, 粘菌の管の太さは管内部の流量が多いほど太くなる. また, 各節点において, 流出量と流入量はバランスしている必要があるため, 以下の (2) 式が成立する.

$$\sum_i Q_{ij} = \begin{cases} -Q_0 & j = 1 \\ +Q_0 & j = 2 \\ 0 & j \neq 1, 2 \end{cases} \quad (2)$$

以上により, (3) 式の数理モデルが得られる.

$$\frac{d}{dt} D_{ij} = f(|Q_{ij}|) - D_{ij} \quad (3)$$

ここで, $f(x)$ は流量に応じたコンダクティビティを与える関数であり, $f(0) = 0$ を満たす増加関数である.

2.2 信号機の位相モデル

西川ら [3] は流量によって信号機間で相互作用するオフセット制御のモデルを提案している. これはまさに粘菌による信号機オフセット制御を再現するモデルといことができ, 本研究ではこの制御モデルを利用することで粘菌の挙動を再現した. 本節では, まず信号機を位相モデルによって表現することを考える.

信号機の現示 1 サイクルを $[0, 2\pi)$ で規格化する. このとき, 時刻 t における信号機の状態は位相の関数 $\phi(t)$ で表現できる. また, 位相の変化速度は, 信号機の周期長 T を用いることで以下の (4) 式の通りに表現できる.

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

この式に, 隣接交差点の信号機との間の流量とオフセットを踏まえた相互作用項を加えることで, 粘菌の特性を踏まえた位相制御が可能となる. 実際の制御式は次節で扱う.

2.3 交通流量に対する制御式

交差点 i を通過する交通流に対する, 信号の位相 ϕ_i の制御式は以下の (5) 式の通りに表現できる.

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_i}{dt} = & \omega + \frac{\epsilon}{N_i} \sum_{j \in N_i} \sum_{l \in N_j, l \neq i} K_{lji} \cdot (\phi_j - \phi_i - \Delta_{ji} + \Pi_{lji}) \\ & + \frac{\epsilon}{N_i} \sum_{j \in N_i} \sum_{l \in N_i, l \neq j} K_{lij} \cdot (\phi_j - \phi_i + \Delta_{ji} - \Pi_{lji}) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで N_i は交差点 i の隣接交差点の集合, K_{lji} は交差点 $l \rightarrow j \rightarrow i$ の順に通過する交通の流量, ϕ_j は隣接交差点の信号機の位相, Δ_{ji} は交差点 i, j 間の目標オフセットを表している. $\epsilon > 0$ は共通の結合強化係数である.

目標オフセットはその区間を通る車両の速度から導かれる理想的なオフセット値のことであり, 以下の (6) 式で定義できる. ここで, T は位相の周期長, L_{ji} は交差点 i, j 間の距離, v_{ji} は $j \rightarrow i$ の方向へ走る車両の理想的な速度である.

$$\Delta_{ji} = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{L_{ji}}{v_{ji}} \quad (6)$$

交通の流量は, 例えば道路上の車両の台数や車両の平均速度などを用いて定義することができる. Π_{lji} は右左折をする交通流に対する調整項であり, 例として主道路と従道路の 2 本が直交する交差点 j において, スプリット s が設定されているとする. つまり $0 \leq \phi_j < s \cdot 2\pi$ が主道路の青信号時間帯, $s \cdot 2\pi \leq \phi_j < 2\pi$ が従道路の青信号時間帯とする. このとき Π_{lji} は以下 (7) のとおりに設定できる.

$$\Pi_{lji} = \begin{cases} 0 & C_j \text{で直進} \\ s \cdot 2\pi & C_j \text{で主道路から従道路に} \\ (1-s) \cdot 2\pi & C_j \text{で従道路から主道路に} \end{cases} \quad (7)$$

2.4 複数の粘菌による制御

本手法では都市内を流れる交通流を経路ごとに分割したうえで, それぞれの交通流に対して粘菌を一つ仮想的に割り当てる. すると, 各粘菌は割り当てられた交通流を餌にグリーンウェーブを成長させていく. 各信号機において制御できる粘菌は 1 体までに制限する. すると複数の粘菌が流入する交差点においては, 信号機を制御する権利である所有権をめぐる競合が発生する. この時, 信号機の所有権を持っている粘菌のことをオーナーと呼ぶ. 競合の具体的な動作を先行研究 [4] より引用する.

1. 粘菌 A が信号機 i の接続道路上に流量を得る.

2. 信号機のオーナーがすでに存在するかを確認する.
3. いない場合は粘菌 A が直ちに所有権を獲得できる.
4. 粘菌 B がすでに所有権を持っている場合は以下の操作をする.
 - (a) 粘菌 A と粘菌 B で各々が抱えている流量の比較を行う.
 - (b) n ステップ連続で粘菌 B より粘菌 A が多くの流量を確保できたら, 所有権が A に譲渡される.
5. 所有権を得た粘菌が信号機 i のオーナーとなり, 信号機の位相を制御する.

先行研究の結果, 2 本の対向する直進交通流については, 複数の粘菌を用いることで粘菌 1 体による制御より赤信号による車両待ち時間に改善がみられることが示されている.

3 実験

3.1 実験目的

今回の実験では以下の 2 点について確認を行う.

- オフセット値が適切な値に収束していること
- 他手法と比較し, 車両待ち時間で改善が見られること.

3.2 実験環境

交通シミュレータ Simulation of Urban MObility(SUMO)¹ を用いて実験を行った. 道路網に関する設定は以下の通りである.

- 東西方向と南北方向にそれぞれ 10 本の道路を敷設する
- すべての道路は片道 1 車線とする
- 隣接交差点間の距離はすべて $L = 200[m]$ とする.
- 制限速度はすべての道路で $16.66[m/s]$ である.

すべての交差点に粘菌が操作可能な信号機を設置する. 交差点及び粘菌に関する初期設定は以下のとおりである.

- 信号機のオーナーはいないものとする.
- オーナーが不在の交差点では周期長を $T=80[s]$ とし, 一定の速度で位相を変化させる.

任意の信号機 i の位相 ϕ_i について, $0 \leq \phi_i < \pi$ のとき南北方向が青現示, $\pi \leq \phi_i < 2\pi$ のとき東西信号が青現示とする. クリアランス時間は設けないものとする. 制御式のパラメータとして, $\epsilon = 0.1$ を用いている. また, 目標オフセットに用いる車両速度は制限速度の 0.5 倍に当たる $8.33[m/s]$ を設定する. この速度に設定する理由は, 3.3 節の交通流パターン 1 と 3.4 節の流量パターン 1 を組み合わせた実験設定で, 車両速度の設定を 0.1 倍から 1.0 倍まで 0.1 倍刻みで変化させ平均車両待ち時間を比較したところ 0.5 倍が最善となったためである. つまり目標オフセット値は

$$\Delta = \frac{2\pi}{80} \cdot \frac{200}{8.33} \approx 1.89[rad] \quad (8)$$

と設定している.

3.3 経路設定

交通流の経路設定として図 1 の通り 3 パターンを与える. 各パターンに置いて以後太い矢印の交通流を交通流 1, 細い矢印を交通流 2 と呼ぶこととする. また, 都市の上方を北と呼ぶとき, 交差点 C_{ij} を北から i 本目の道路と西から j 本目の道路の交差点として定義する.

Pattern 1 では交通流 1 が西から東へ直進し, C_{55} で交通流 2 が北側から左折合流する. Pattern 2 では, 交差点 C_{44} で 2 つの交通流が直交した後, 交通流 1 は C_{47} まで直進, 交通流 2 は U 字を描いて C_{47} に向かう. 最後に 2 つの交通流は合流し C_{17} に至る. Pattern 3 は合流をなくし, 2 つの交差点 C_{44}, C_{46} で交差する形にしている.

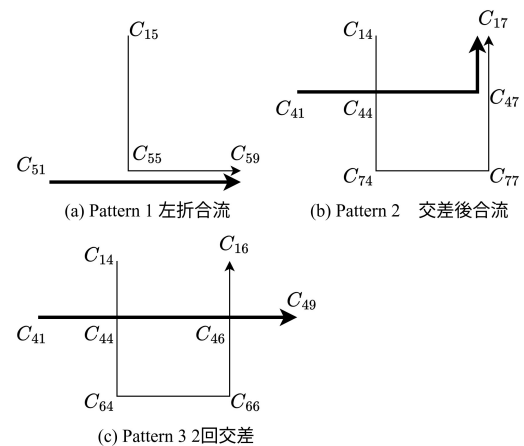


図 1: 交通流のパターン

¹<https://www.eclipse.org/sumo>

3.4 流量設定

各交通流に対して発生させる車両の台数にも以下の3つのパターンをもたせる。以下、これらのパターンを流量パターンと呼ぶこととする。なおどのパターンにおいても車両が発生させる時間は4000[s]とし、すべての車両が目的地に到着した時点でシミュレーションを終了させる。

1. 4000秒間常に、交通流1は10秒に1台、交通流2は20秒に1台出発地で車両が発生。
2. 4000秒間常に、交通流1は20秒に1台、交通流2は10秒に1台出発地で車両が発生。
3. 0-1000秒では1.と同じ流量、1000-3000秒では2.と同じ流量、3000-4000秒では再び1と同じ流量と変化させる。

3種類の交通流パターンと3種類の流量パターンを組み合わせた合計9通りのシミュレーションを行う。

3.5 評価指標

まず、グリーンウェーブの安定性を検証するため、2つの交通流が交差もしくは合流する交差点で、目標オフセット値と実際のオフセット値の差分を測定する。具体的にPattern 1では C_{55} で、Pattern 2とPattern 3では C_{44} 、 C_{47} で測定を行う。

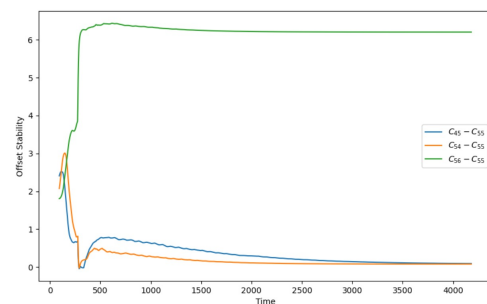
次に車両の平均待ち時間を他手法と比較することで性能評価を行う。比較対象は、粘菌を用いず一定のパターンで位相を変化させる手法と、粘菌1体によりオフセット制御する手法である。粘菌を用いない手法では、周期長80[s]で、40sの南北方向青現示と40sの東西方向青現示を繰り返す。粘菌1体の手法では(5)式の流量 K として、交通流1と交通流2を合計したものを使用して制御を行う。

4 結果と考察

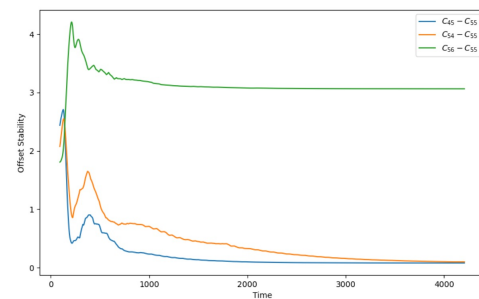
4.1 オフセット計測

交通流のパターン1の結果を図2に示す。青線が C_{45} 、 C_{55} 間、黄線が C_{54} 、 C_{55} 間、緑色が C_{55} 、 C_{56} 間のオフセットと目標オフセット値の差分である。まず、どの流量パターンに対してもシミュレーション時間内にオフセット値が収束することが確かめられた。流量パターン1ではすべて0付近に収束した。緑線は 2π となっているが、ここで位相の周期が 2π であることから、これも0に収束していると見てよい。0に収束することは C_{55} において、オフセットが目標オフセットと

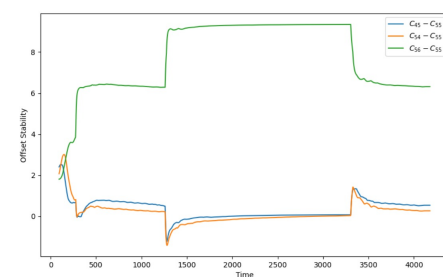
同じ値に収束しており、直進流に対して優位になるように制御されているということである。ここから競合の結果直進側の交通流1が競合に勝ち、自分に優位になるように位相を制御していることが読み取れる。反対にパターン2では緑が π に収束している。これは C_{55} で右左折して C_{56} 流入してくる交通流に対して対応するため、交通流2が競合に勝ったことが読み取れる。最後にパターン3では交通流1が優位な間は緑は0付近にとどまり、交通流2が優位な間は π 付近にとどまっていることが読み取れる。交通量の時間的な変化に対しても、数百ステップのうちに対応できていることが読み取れる。



流量パターン1



流量パターン2



流量パターン3

図 2: 交通流パターン1のオフセット値と目標オフセット値の差分

次に交通流パターン 2 の結果を示す. 図 3 は交差点 C_{44} における隣接交差点とのオフセット値と目標オフセット値の差分である. 交通流パターン 1 の時と比べて安定して収束しないことが読み取れる. 特に流量パターン 2 については, 流量の少ない交通流 1 の流出側にあたる, 交差点 C_{45}, C_{44} 間のオフセット値が大きく変動していることが確認できる. 競合の発生する交差点が 2 つに増えたことで, 競合に勝った粘菌が交差点 C_{44}, C_{47} 間の位相を安定させるまで, 競合に負けた側の粘菌も協調動作が難しくなると考えられる. その結果, C_{44}, C_{47} 間の距離が長い流量 2 が主流となる流量パターン 2 については特に不安定な位相変化が観測されたものと考えられる. 流量パターン 3 について, 流量の変化に伴い差分に変化が見られないのは, この交差点で直進対直進の競合が起きているためと考えられる. 右左折を含まないため, 制御式 (5) にある調整項 Π の影響は受けない. 図 4 は交差点 C_{47} におけるオフセット値と目標オフセット値の差分である. この交差点では交通流 1 が交通流 2 に左折合流する. 流量パターン 1 では交通流 1 が通る交差点 C_{37}, C_{47} 間 (グラフの青線) と C_{46}, C_{47} (グラフの黄線) では収束しており, 更に左折を加味して互いに π だけ離れた値に収束している. ここから競合の勝者である交通流 1 はこの交差点で優位にオフセット制御できていることが読み取れる. 一方, 交通流 2 の通る交差点 C_{57}, C_{47} 間ではオフセット値が収束していない. つまり交通流 2 側の粘菌が協調動作に失敗していることが読み取れる. 流量パターン 2 ではすべてのオフセット値が収束しており, 競合動作, 協調動作に成功していると考えられる. 流量パターン 3 は交通流 2 の流量が増す時間帯でオフセット値が収束しておらず, 流量の変化に対しグリーンウェーブを切り替えることができなかった.

最後に交通流パターン 3 について, 交差点 C_{44} の様子を図 5 に, 交差点 C_{46} の様子を図 6 に示す. どのパターンにおいても値が 0 に収束しており直進流のための適切なオフセット値に収束していることがわかる. なお, 交通流 3 について流量の変化に対しオフセット値がほとんど変化していないが, これは交通パターン 2 でも述べたとおり直進対直進の交差点では競合に勝った粘菌も負けた粘菌も目標オフセットの通り収束させるのが最適であり, 競合の勝ち負けが反転する前後で同じ収束値に向けて制御しようとするためである.

4.2 車両待ち時間

まず交通パターン 1 の車両待ち時間について表 1 に示す. 粘菌を複数体用いた手法と粘菌 1 体の手法を比較したところ, 大きな改善は見られなかった. 一方粘菌なしの手法との比較では, どの流量パターンに対しても 7 割程度の改善が見られた.

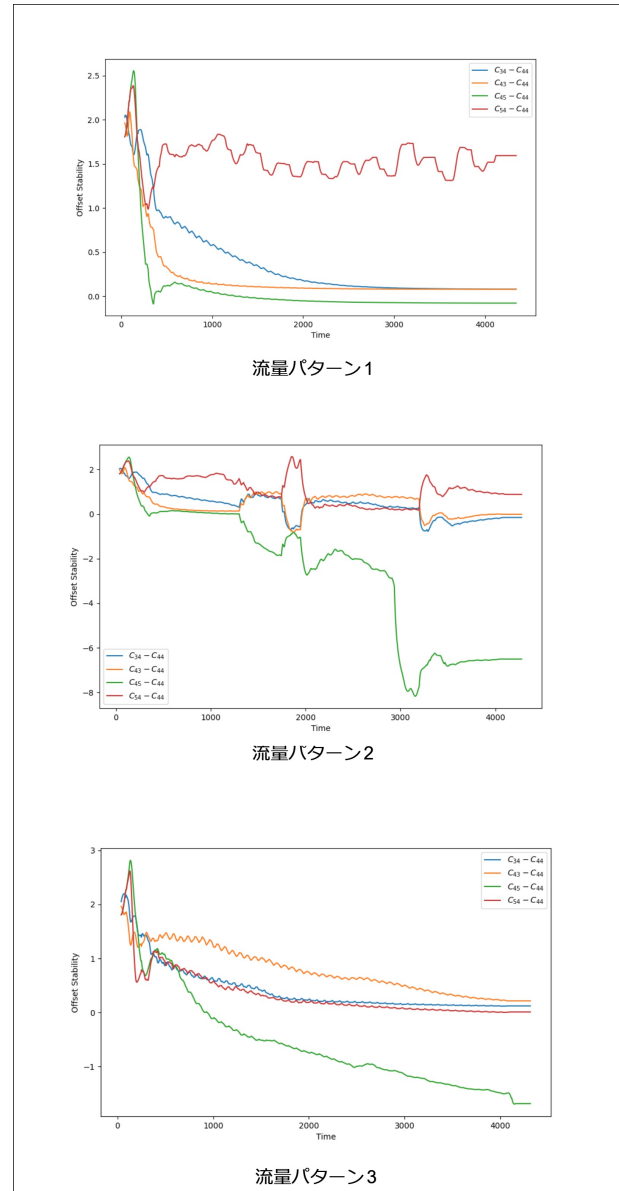
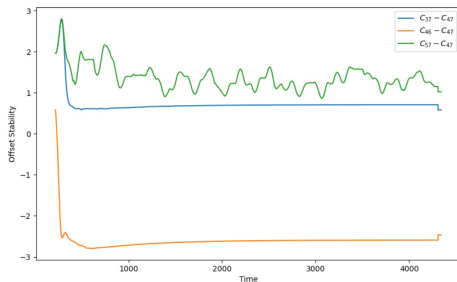
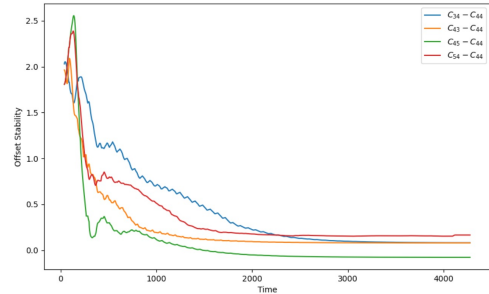


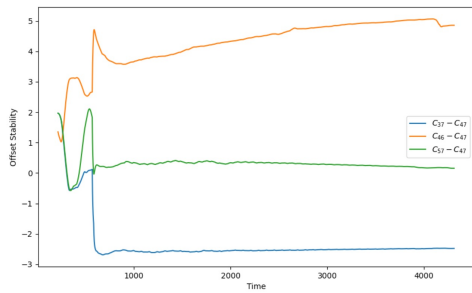
図 3: 交通流パターン 2 の交差点 C_{44} におけるオフセット値と目標オフセット値の差分



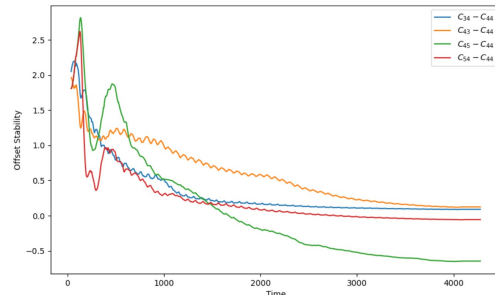
流量パターン1



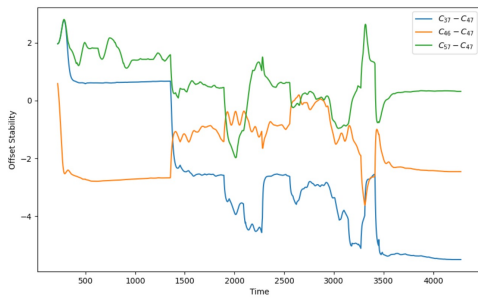
流量パターン1



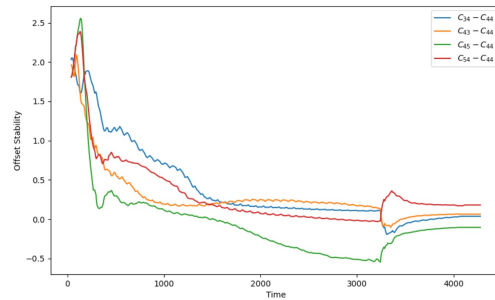
流量パターン2



流量パターン2



流量パターン3



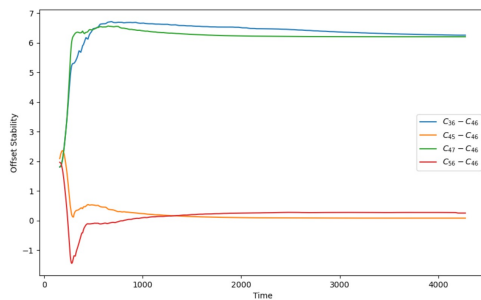
流量パターン3

図 4: 交通流パターン 2 の交差点 C_{47} におけるオフセット値と目標オフセット値の差分

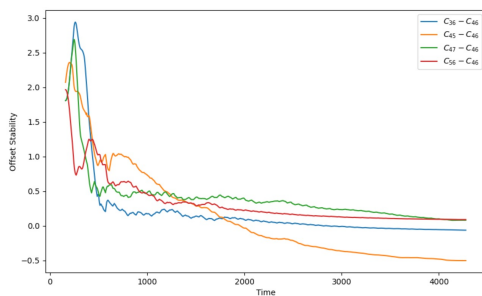
図 5: 交通流パターン 3 の交差点 C_{44} におけるオフセット値と目標オフセット値の差分

次に交通パターン 2 の車両待ち時間について表 2 に示す。このパターンでは粘菌単体の手法と比べ、2 倍ほど性能が悪化してしまっている。これは前節でも述べたとおり、オフセット値の収束が遅れ、シミュレーション時間内にグリーンウェーブの形成が十分に行われていないためであると考えられる。ただ、粘菌なし手法と比較するとこちらも 6 割から 7 割の性能改善が見られた。

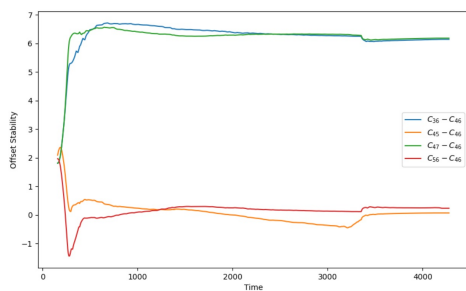
最後に交通パターン 3 の車両待ち時間について表 3 に示す。こちらはパターン 1 と同様に粘菌単体との間に性能の差は認められなかった。ただ、粘菌なしの手法と比較すると 8 割ほど性能が改善しており、交通流が交差する地点が増えるほど粘菌によるオフセット制御がより有効であることを示している。



流量パターン1



流量パターン2



流量パターン3

図 6: 交通流パターン 3 の交差点 C_{46} におけるオフセット値と目標オフセット値の差分

表 1: 交通流パターン 1 における車両待ち時間 [s]

	流量パターン 1	流量パターン 2	流量パターン 3
粘菌複数体	30.11	22.92	26.93
粘菌単体	25.97	27.27	27.33
粘菌なし	94.83	83.90	89.08

表 2: 交通流パターン 2 における車両待ち時間 [s]

	流量パターン 1	流量パターン 2	流量パターン 3
粘菌複数体	51.90	41.12	49.95
粘菌単体	23.65	24.70	26.24
粘菌なし	113.79	146.26	129.57

表 3: 交通流パターン 3 における車両待ち時間 [s]

	流量パターン 1	流量パターン 2	流量パターン 3
粘菌複数体	21.62	23.43	21.88
粘菌単体	22.76	19.81	22.13
粘菌なし	96.59	110.48	102.92

5 おわりに

複数の粘菌を用いてオフセット制御を行う手法について、右左折を伴う交通流で検証を行った。まず右左折を伴う交通流において、粘菌同士で適切に競合が行われ、優先される交通流を定められることを確認した。その上で、合流する交通流や複数回交差し合う交通流については、右左折を考慮した上で適切なオフセット値に収束することを確認された。ただ、合流と交差が組合わさった複雑な交通流に対しては競合の後に即座に値を収束させることができず、競合を行わない粘菌に対し性能で劣ってしまった。

今後の課題として、オフセット値を可能な限り早く収束させる工夫をする必要があると考える。現状のように競合によって優先させる交通流が定まったあとに競合の勝者の粘菌がいつまでもオフセット値を収束させ

ない状態が続くと、敗者の粘菌も協調動作で適切なオフセット値を探索することが困難になる。この問題を解決するために、グリーンウェーブの安定性も考慮しつつ最適なオフセットへの迅速な収束を実現させる新たな手法の開発が求められる。

参考文献

- [1] Toshiyuki Nakagaki, Hiroyasu Yamada, and Ágota Tóth. Maze-solving by an amoeboid organism. *Nature*, Vol. 407, No. 6803, pp. 470–470, Sep 2000.
- [2] Atsushi Tero, Ryo Kobayashi, and Toshiyuki Nakagaki. A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold. *JOURNAL OF THEORETICAL BIOLOGY*, Vol. 244, No. 4, pp. 553–564, 2 2007.
- [3] 西川郁子, 中澤重人, 喜多一. 位相モデルによる信号機広域制御ダイナミクスの提案. 計測自動制御学会論文集, Vol. 39, No. 2, pp. 199–208, 2003.
- [4] 渡部皓斗, 野田五十樹. 複数の粘菌による競合を用いた信号機オフセット制御. 人工知能学会第二種研究会資料, Vol. 2023, No. SAI-048, p. 09, 2023.