

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630193

研究課題名(和文) 多脚動物が示す巧みな脚間協調に着想を得た交通信号制御の新展開

研究課題名(英文) Decentralized Control Scheme for Traffic Signals Inspired by Inter-limb Coordination of Multi-legged Animals

研究代表者

加納 剛史 (Kano, Takeshi)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：80513069

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：これまで数多くの交通信号の制御方策が提案されてきたが、いずれも予期せぬ交通量の変化に対して適応することが困難であった。この問題解決のため本研究では、四脚動物が示す脚間協調メカニズムに着想を得て、力学的な考察に基づいた交通信号の自律分散制御方策を提案した。具体的には、各信号機において、現時刻から一定時間の間に赤信号や前の車から受ける力積をOptimal Velocityモデルを用いて計算し、力積が小さくなるように信号の切り替え判定を行った。さまざまな車両密度の条件下でシミュレーションを行ったところ、いずれの場合においても提案手法が効果的に機能することを確認できた。

研究成果の概要(英文)：Although various control schemes of traffic signals have been developed, they could not adapt to unpredictable changes in the amount of traffic. To tackle this problem, we here propose an autonomous decentralized control scheme of traffic signals on the basis of physics consideration of the inter-limb coordination of quadrupeds. More specifically, impulses given by red signals or preceding cars are calculated at each traffic signal by using optimal velocity model, and traffic signals are switched so that the impulses are reduced. We performed simulations with changing number of cars, and the results showed that the proposed control scheme works properly under all conditions examined.

研究分野：非線形物理

キーワード：交通信号制御 自律分散制御 四脚ロボモーション

1. 研究開始当初の背景

昨今、交通渋滞は経済に深刻なダメージを与えており、大きな社会問題となっている。この問題の解決に際して、交通信号の制御はきわめて重要な役割を担う。交通信号を道路状況に応じて柔軟かつ適切に制御することができれば、交通渋滞の緩和につながると思われる。

これまでの信号制御の常識は、「前もって得られた交通需要量のデータをもとに、『サイクル長』『スプリット』『オフセット』と呼ばれる3つのパラメータをそれぞれ個別に設計する」というものであった[1]。しかしながら、従来の制御方策では、想定状況下ではある程度適切に機能するものの、予期せぬ交通量の変化に対応することは困難であった。これは、上記3つのパラメータの制御を個別に設計しなければいけないという固定観念が足枷になり、制御則設計にあたっての重要な本質が見落とされていたためと考えられる。以上からわかるように、信号制御の研究はいわば袋小路に入り込んでしまっている。

2. 研究の目的

異分野の研究者の斬新なアイデアが、主流の研究路線に一石を投じ、袋小路に入った現状を打破することがしばしばある。本研究の狙いはここにある。筆者らはこれまで、四脚動物のロコモーションにおける脚間協調（環境や身体特性の変化に呼応して、各脚の接地・非接地のタイミングを自律分散的に調節すること）のメカニズムに着目し、内在する自律分散制御則の解明に取り組んできた。そして、床反力に応じて接地期間を調節する効果を取り入れた単純な位相振動子モデルにより、四脚動物が示す適応的な振る舞いの多くを再現してきた[2]。この成果を踏まえ、筆者らは以下の着想を得るに至った：「四脚動物の脚間協調メカニズムをもとに交通信号の制御方策を考えることができるのではないか？ 交差点付近の車の台数に応じて信号切替タイミングを調節する（信号の赤・青の持続時間を調節する）ことで、予期せぬ交通量の変化にも耐え得る信号制御が実現できるのではないか？（図1）」

以上を踏まえ本研究では、四脚動物のロコモーションに着想を得て、予期せぬ交通量の変化にも適応可能な交通信号の自律分散制御方策を提案する。

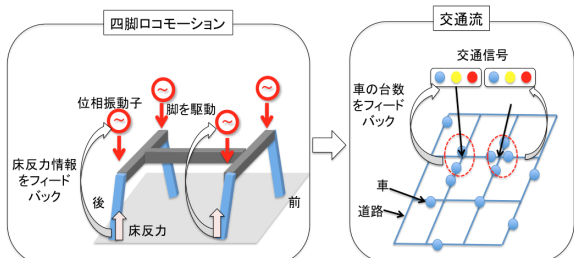


図1：四脚動物の脚間協調メカニズムから探る交通信号の自律分散制御

3. 研究の方法

まず、申請者らが提案した四脚ロコモーションのモデル[2]について説明する。図2に示すように、4本の脚が胴体を介してつながれている。各脚は、位相振動子の位相が0～πの時は遊脚、π～2πの時は支持脚となるように駆動される。そして、脚先が床反力を検知すると支持脚の位相に留まるような局所センサフィードバックを導入する（同図中の式参照）。申請者らは、わずかこれだけのメカニズムでロコモーションが実現できる（！）ことを、四脚ロボットを用いた実験により示してきた。

本研究では、四脚ロコモーションのモデルをもとに交通信号の自律分散制御則を設計する。具体的には、上述の局所センサフィードバックの物理的意義を解釈し、四脚ロコモーションと交通信号制御の間に成り立つアナロジーを見出す。そして、信号切替を判断する指標を見つけ、それをもとに交通信号の自律分散制御則を設計する。さらに、作成したシミュレータを用いて提案制御則の有用性をさまざまな道路状況で検証し、定量的な評価を行う。

4. 研究成果

(1) 四脚ロコモーションと信号制御の間に成り立つアナロジーの探索

まず、四脚ロコモーションと信号制御の間に成り立つアナロジーについて考察した。上述のように、四脚ロコモーションモデルにおける局所センサフィードバック項（図2中の式の右辺第二項）は「床反力を検知すると支持脚の位相に留まる」効果を表している。これを信号制御に対応させるならば、「赤信号近傍に近傍の車を検知すると当該信号を青信号のフェーズに移行させる」とすれば良い。

(2) 信号切替を判断するための指標の考案

上記(1)の考えに基づき、信号切替を判断するための指標を考案したので、ここではその導出過程を示す。

車の振る舞いは以下のOptimal velocity

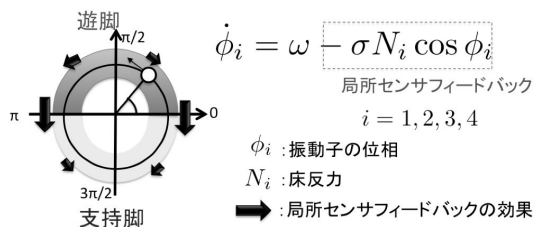
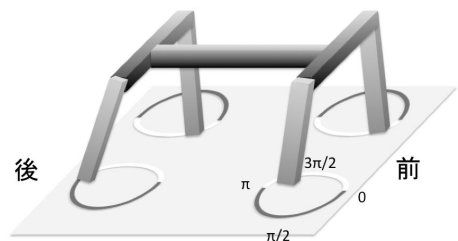


図2：四脚ロコモーションのモデル

(0V)モデル[3]を用いて記述できる:

$$\dot{v}_i = a\{V(\Delta x_i) - v_i\} \quad (1)$$

ただし、 $i$ は車に割り振られた番号、 $v_i$ は車の速度、 $a$ は感応度と呼ばれるパラメータである。 $\Delta x_i$ は前の車もしくは赤信号までの距離を表す。 $V(\Delta x_i)$ は目標速度を表す既知の関数である。

ここで、車の質量 $m$ はすべての車について等しいと仮定すると、赤信号もしくは前の車との距離が $\Delta x_i$ の時、運動方程式は(1)式より以下のように表される:

$$m\dot{v}_i = ma\{V(\Delta x_i) - v_i\} \quad (2)$$

となる。ところが、もし仮に $i$ 番目の車の前に赤信号や他の車が存在しなかったとすると、運動方程式は

$$m\dot{v}_i = ma\{V(\infty) - v_i\} \quad (3)$$

となるはずである。(3)式で得られる自己駆動力を基準に取り、基準と(2)式で得られる $i$ 番目の車の実際の自己駆動力の差を取ることによって、「前の車や赤信号の存在によって減少した $i$ 番目の車の自己駆動力」を求めることができる。この減少分を「赤信号もしくは前の車が $i$ 番目の車に与える力 $F_i$ 」と解釈・定義する。すなわち、 $F_i$ は、(2)式と(3)式の差を取ることによって、

$$F_i = ma\{V(\infty) - V(\Delta x_i)\} \quad (4)$$

と求められる。この力を時間積分した「力積」が、本研究で提案する制御則における信号切替の指標となる。

### (3)モデルおよび提案制御則

本研究では、できる限り単純化した交通流のモデルを用い、交通信号の制御則について考察する。図3(b)に示すように、一辺の長さが $L$ の正方形のフィールド内に南北・東西に走る道路が各 $M$ 本等間隔で並んだ基盤の目の道路網を考える。各交差点には信号機が配置されている。車は時間 $t$ ごとにフィールドの各端点から確率 $p$ で出現し（当該道路に存在する車の数が $N$ 台に達しているときは車は出現しない）、右左折せず直進する。歩行者や自転車等の存在は考えないものとする。各信号機は「東西が青で南北が赤」、「東西が赤で南北が青」の2状態を取ることができ、黄色信号は考えない。なお、信号切替の際にすべての信号が赤になるクリアランス時間を設け、この時間を $\delta t$ とする。各信号機にはカメラが設置され、当該信号機と四方に隣接する信号機の間が存在する車の位置と速度を検出できるものと仮定する。各車の振る舞いは0Vモデルを用いて記述する。

提案する信号制御方策の流れを図3(a)に示す。時間 $t$ ごとに、得られた車の位置と速度の情報をもとにして各信号機で内部モデルを作成し、カメラが検出できる領域内の車が現時刻から時間 $T$ にわたって受ける力積の総和を、i)現時刻においてすぐに信号を切り替える、ii)信号を切り替えない、iii)現時刻から $n\Delta$ だけ時間が経過してから

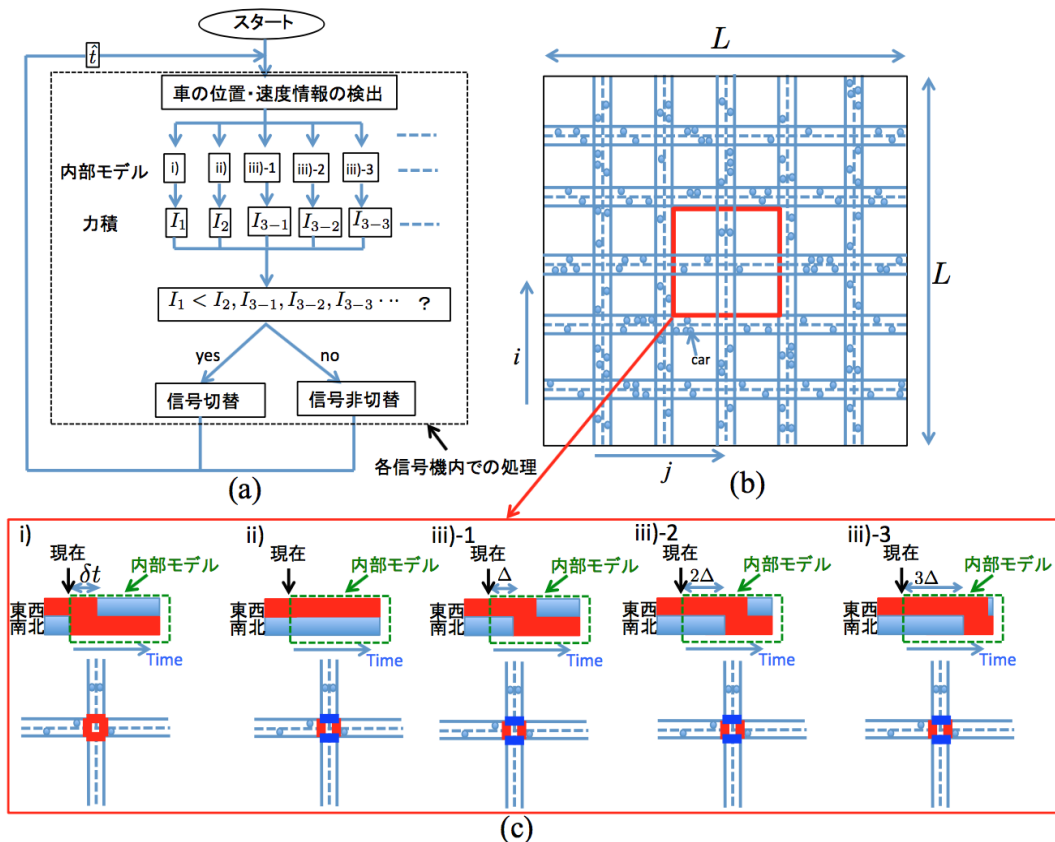


図3: モデルと提案制御則

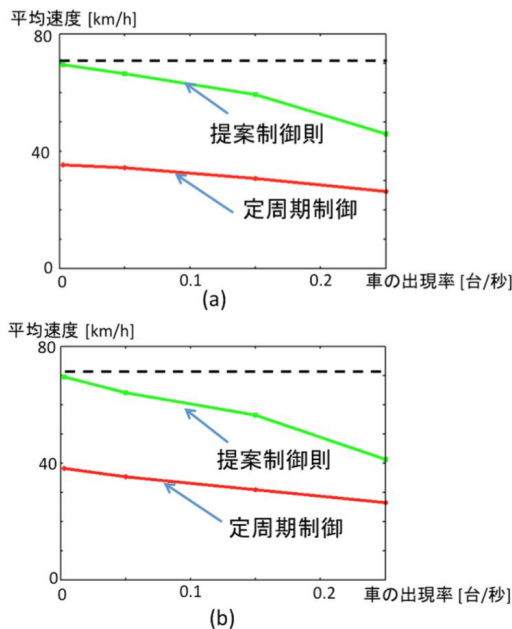


図4：シミュレーション結果。(a)西と南のみから車が出現する場合，(b)全方向から車が出現する場合。

ら信号を切り替える ( $\Delta$ は正の定数， $n$ は自然数， $n\Delta < T - \delta t$ )，のそれぞれの場合について計算する (図3(c))。そして，i)の場合の力積がii)やiii)の場合の力積よりも小さい時のみ信号の切り替えを行う。

#### (4)シミュレーション

提案制御則の妥当性を検証するため，シミュレーションを行った。西と南からのみ車が出現する場合と全方向から車が出現する場合のそれぞれについて，車の出現確率 $p$ を変えてシミュレーションを行った。評価指標としては，全車の平均速度を用いた。提案制御則を実装した場合と一定周期で現示を切り替えた場合の比較結果を図4に示す。提案手法の場合の方が一定周期で現示を切り替えた場合よりも顕著に平均速度が高くなっていることがわかる。このことから，提案手法は車両密度によらず効果的に機能することが確認できた。

- [1] 改訂交通信号の手引 (交通工学研究会，2008)；I. Nisikawa (2004)；A. Akbas *et al.* (2005)；Sugi *et al.* (2003)；Papageorgiou *et al.* (2003)  
 [2] D. Owaki *et al.*，J. Roy. Soc. Int.，doi: 10.1098/rsif.2012.0669.  
 [3] M. Bando *et al.*，Phys. Rev. E，**51**，1035-1042 (1995)。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 2件)

1. 加納剛史，杉山雄規，石黒章夫，交通量の変動に適応可能な交通信号の自律分散制御，第27回自律分散システムシンポジウム (2015.1.23) 東京理科大学，東京
2. 加納剛史，杉山雄規，石黒章夫，力積予測に基づく交通信号の自律分散制御，第20回交通流のシミュレーションシンポジウム (2014.12.5)，名古屋大学，名古屋

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 1件)

名称：力積予測に基づく交通信号の自律分散制御方策

発明者：加納剛史，杉山雄規，石黒章夫

権利者：加納剛史，杉山雄規，石黒章夫

種類：特許

番号：特願 2014-223925

出願年月日：2014年11月4日

国内外の別：国内

取得状況 (計 0件)

該当なし

〔その他〕

該当なし

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

加納 剛史 (KANO TAKESHI)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：80513069

##### (2)研究分担者

杉山 雄規 (SUGIYAMA YUKI)

名古屋大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：20196778

##### (3)連携研究者

石黒 章夫 (ISHIGURO AKIO)

東北大学・電気通信研究所・教授

研究者番号：90232280