

# ロボット群がプラトーン走行するためのクラスタ構成法

星野智史 (東京工業大学)

## 1. 序論

移動体が、縦一列となって同一方向へ移動することをプラトーン走行と言う。知的交通システム (ITS: Intelligent Transportation Systems) の研究分野では、適応的走行制御手法 (ACC: Adaptive Cruise Control) が提案されている [1]。その結果、前後の車が衝突を避けつつも追従するプラトーン走行が可能となった [2]。

著者はこれまでに、レーン上を走行する車輪型移動ロボット群のプラトーン走行に関する研究を行ってきた。そして、仮想的な外力を用いてロボットの行動を直接制御する手法と、環境の側からロボットの行動を外的に規制するためのルールを提案した [3]。また、レーンが交差・合流するといったボトルネックが存在する場合、これら 2 つのアプローチを ACC と組合せてロボットに適用することの有効性も示した。

しかしながら、行動制御手法と環境ルールをロボットへ適用するためには、ロボットが自らの進行方向に存在する全ロボットの情報を把握しておく必要がある。そのため、対象となるシステムの規模やロボットの台数によっては、情報量の観点から適用が困難となる。

本研究では、レーン上にボトルネックがあり、より渋滞が形成されやすいシステムを対象とする。そして、局所的な情報からでもロボット群が動的な状況変化に対応しながら素早く走行することを目的とする。そのため、ACC を適用し、さらに、各ロボットが隣接するロボットとリアクティブにクラスタを構成しながらプラトーン走行を行うための方法論について述べる。

## 2. 適応的走行制御手法 (ACC)

ITS の研究分野では、渋滞を形成することなく車がプラトーン走行するための ACC が提案されている [1] [2]。本研究においても、ACC を適用することで、ロボット群によるプラトーン走行を可能とする。

プラトーン走行中のロボット群に対して、前から順に番号  $n$  を割振る。これにより、ACC システムの力学モデルは以下の式で表すことができる。

$$\tau \frac{dv_n(t)}{dt} + v_n(t) = V(\Delta x_n(t), \Delta v_n(t)), \quad (1)$$

$\Delta x_n(t) = x_{n-1}(t) - x_n(t)$  と  $\Delta v_n(t) = v_{n-1}(t) - v_n(t)$  は、 $n$  番目のロボットとその前のロボットとの相対距離ならびに速度を、 $\tau$  は反応時間を意味している。

式 (1) が示す ACC では、前後のロボットの相対速度を一定にし、ロボット間距離を維持するよう制御が行われる。そのため、式 (1) における  $V$  の関数は以下の式で表すことができる。

$$V = \frac{1}{h_d} \{ \Delta x_n(t) - L \} + \alpha \Delta v_n(t) \quad (2)$$

式 (2) において、 $h_d$  と  $L$  は前のロボットがいた位置に後ろのロボットが到達するまでの時間とロボット間

の最低安全距離、 $\alpha$  は相対速度に対する係数のことである。Liang と Peng は、プラトーン走行時の結合安定性について、 $\Delta x_n$  と  $\Delta x_{n-1}$  に関する周波数伝達関数の絶対値が、ある条件の下で 1 以下となることについて言及している [4] [5]。さらに Davis は、 $\alpha = \tau/h_d$  であれば、この条件が満たされ、いかなる  $\tau$  と  $h_d$  に対しても結合安定性が保証されることを示している [6]。結合安定性が保証されると、プラトーン走行の際に渋滞が形成されることはない。

## 3. クラスタを単位としたプラトーン走行

図 1 に、プラトーン走行するロボット群を示す。ACC が適用されたロボットは、1 つのプラトーンを構成しようとする (図 1(a))。そのため、プラトーンサイズ、すなわち、それを構成するロボットの台数は大きくなってしまふ。これに対して本研究では、ロボット群が複数のクラスタを構成することで、1 つあたりのプラトーンサイズを小さくする (図 1(b))。

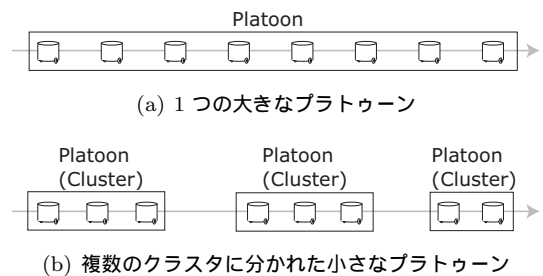


図 1 ACC に基づきプラトーン走行するロボット群

図 2 に、レーンが交差するボトルネック付近にて、ロボット群がプラトーン走行を行っている様子を示す。図 2(a) では、2 つの大きなプラトーンがほぼ同時にボトルネックへ到達したため渋滞が形成され、ロボットは 1 台ずつ交差している。図 2(b) では、クラスタを単位としてロボット群が交差している。プラトーンサイズが小さいため、同時に 2 つのプラトーンが到達しても渋滞は形成されにくくなる。

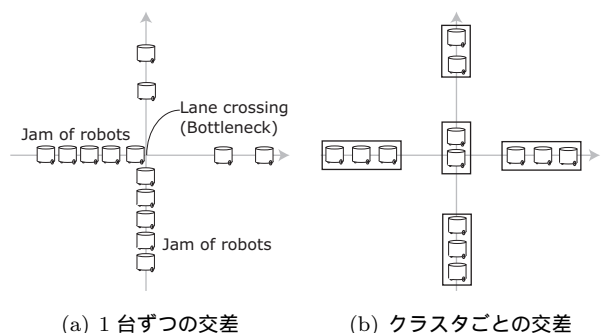


図 2 ボトルネック (交差点) でのプラトーン走行

ロボット群のクラスタ化については、K-Means 法や Puck clustering 理論に基づいた研究がなされている [7] [8]。しかしながら、ロボットはレーンでなく 2 次元平面上を自由に動けるシステムが前提とされており、さらに、クラスタの数 (K や Puck) をあらかじめ設定しなくてはならない。これらに対して、センサネットワークにおいて、発生したイベントの周辺ノードがリアクティブにクラスタを構成することの有効性が示されている [9]。そこで本研究では、クラスタの数を定めず、各ロボットが周辺の状況変動に応じてリアクティブにクラスタを構成するアプローチを採用する。

ロボット群はレーン上を走行するため、クラスタ構成の意思決定を行うロボットは、同一レーン上の前後 2 台のロボットのみを対象とする。各クラスタの先頭ロボットは、前のクラスタ最後尾ロボットから外力を受け減速する。これにより、図 1(b) や図 2(b) が示すクラスタを単位としたプラトゥーン走行が可能となる。

## 4. リアクティブなクラスタ構成法

### 4.1 隣接するロボット間でのクラスタ構成

図 3 に、あるロボットが隣接するロボットの位置と速度情報に基づいてクラスタを構成する様子を示す。ロボット ( $R_h$ ) は、その前後のロボット ( $R_p$ ,  $R_f$ ) いずれかとクラスタを構成する。その際、各ロボットとの距離 ( $\Delta x_p$  と  $\Delta x_f$ ) ならびに速度 ( $v_{R_p}$  と  $v_{R_f}$ ) の情報に基づいたリアクティブな意思決定を行う。

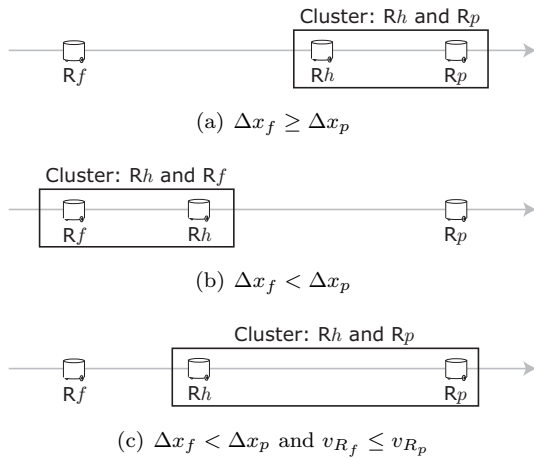


図 3 クラスタを構成するための意思決定

ロボットは、基本、前後のロボットへの距離に基づき、近い方のロボットとクラスタを構成する。そのため  $R_h$  は、図 3(a) では  $R_p$  と、図 3(b) では  $R_f$  と、それぞれクラスタを構成する。しかしながら、ボトルネックによってクラスタが停止してしまった際には、クラスタの先頭ロボットは、ボトルネックを通過した後も距離に基づき後ろのロボットとクラスタを構成してしまい、ボトルネックでのプラトゥーン走行に悪影響となる。そこで本研究では、ロボット間距離に加え、速度に関する以下のヒューリスティクスを導入する。

- $\Delta x_f < \Delta x_p$  でも  $v_{R_f} \leq v_{R_p}$  なら、 $R_h$  は  $R_f$  ではなく  $R_p$  とクラスタを構成

これにより、図 3(c) が示すように、 $R_h$  は  $R_f$  との距離が近くても、速度の速い方の  $R_p$  とクラスタを構

成することとなる。

図 4 に、図 3 のクラスタ構成手順を一般化したものを示す。 $i$  はロボット ( $R$ ) の ID、 $C(\cdot)$  は  $R(i)$  のクラスタ番号、 $R(CP)$  は  $R(i)$  がクラスタを構成する前後いずれかの相手ロボット ( $CP$ : Clustering Partner) を示している。ロボット  $R(i)$  がいずれのクラスタにも属していない場合は、 $C(R(i)) = 0$  となる。

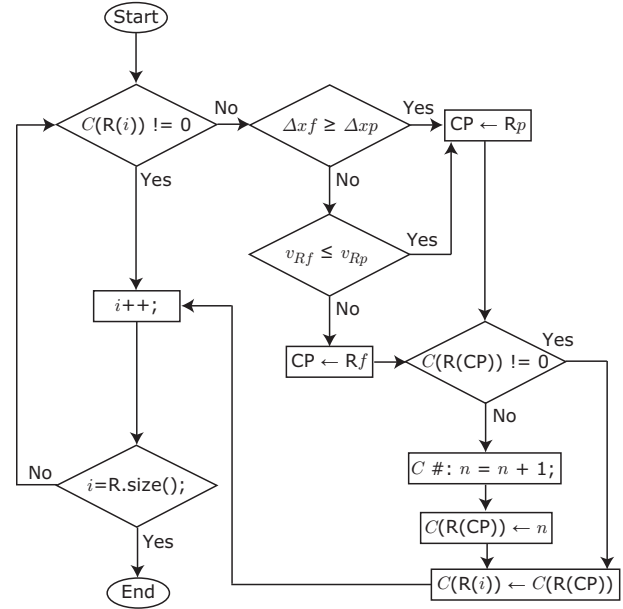


図 4 クラスタ構成のフロー

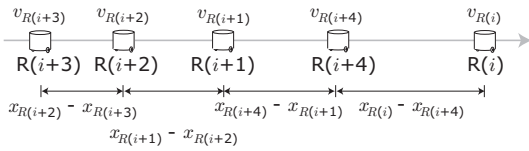
いずれのクラスタにも属していないロボット  $R(i)$  のみが  $CP$  を決定し、 $R(CP)$  とクラスタを構成する。その際、 $R(CP)$  がすでにあるクラスタ  $n$  に属していた場合、自分も同じクラスタ  $n$  に属する。一方、 $R(CP)$  もまだクラスタに属していない場合、新たなクラスタ  $n+1$  を構成し、これに両者のロボットが属することとなる。

### 4.2 クラスタの結合

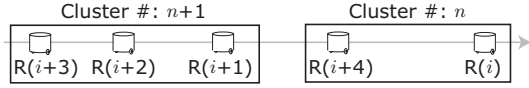
図 4 が示すクラスタ構成手順では、各ロボットによる独立した意思決定が分散的に行われる。そのため、必要以上のクラスタが構成されてしまう可能性がある。これは、外力を受けて減速するロボットの台数が増えることを意味する。その結果、プラトゥーンのサイズを小さくしても、ロボット群全体の走行速度が低下してしまう恐れがある。そこで、これら unnecessary クラスタを結合する。図 5 に、図 4 を通じて構成された 2 つのクラスタを結合する様子を示す。

図 5(a) における  $i$  から  $i+4$  がロボット  $R$  の ID であり、この順番でクラスタ構成の意思決定が行われる。また、各ロボット間距離  $x$  ならびに速度  $v$  の関係は、 $x_{R(i+2)} - x_{R(i+3)} < x_{R(i+1)} - x_{R(i+2)} < x_{R(i+4)} - x_{R(i+1)} < x_{R(i)} - x_{R(i+4)}$ ,  $v_{R(i+3)} > v_{R(i+2)} > v_{R(i+1)} > v_{R(i+4)} > v_{R(i)}$  とする。そのため、図 5(b) が示すように、 $R(i)$  が  $R(i+4)$  とクラスタ  $n$  を構成し、続いて  $R(i+1)$  が  $R(i+2)$  とクラスタ  $n+1$  を構成、さらに  $R(i+3)$  がクラスタ  $n+1$  に加わることとなる。

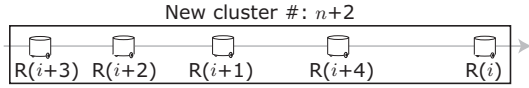
しかしながら、上記の位置と速度関係の場合、本来なら  $R(i+4)$  は  $R(i+1)$  とクラスタを構成するにもかかわらず、 $R(i)$  の意思決定にしたがいクラスタ  $n$  を構成する矛盾が生じてしまう。そこで本研究では、各口



(a) 各ロボットの位置ならびに速度情報



(b)  $R(i+1)$  と  $R(i+4)$  の間で矛盾するクラスタ構成



(c) 2つのクラスタを結合

図5 クラスタ結合プロセスの一例

ロボットがクラスタを構成し終えたら、クラスタを構成する際の矛盾を判定し、矛盾が見つかる限り、2つのクラスタを結合するプロセスを繰り返す。これにより、図5(c)が示すように、 $i$  から  $i+4$  のロボット群が同一のクラスタ  $n+2$  を構成しこれに属することとなる。

#### 4.3 外力を用いたプラトーン走行

著者はこれまでに、走行中の各ロボット間に仮想ダンパを挿入し、そこから作用する相互外力を利用した制御手法を構築してきた [3]。そこで本研究では、この外力を用いることによって、ロボット群にクラスタを単位とした小さなプラトーン走行を行わせる。

クラスタの先頭ロボットは、自身が前のロボットより高速で走行していた場合、前のロボットとの間に仮想ダンパを挿入する。これにより、先頭ロボットに対して  $D\Delta v$  の相互外力が作用する。 $D$  は仮想ダンパの粘性係数のことで、ロボット間の相対距離ならびに速度に基づいた相互外力が作用するよう、 $D = \text{単位速度}/\Delta x_n$  から決定する。図6に、相互外力を受けながらプラトーン走行するロボット群を示す。

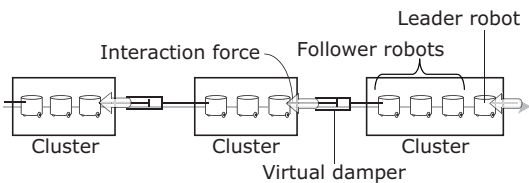


図6 各クラスタの先頭ロボットに作用する相互外力

各クラスタは、先頭でプラトーン走行の速度を決定するロボットと、それに追従するロボット群から構成されている。各ロボットにはACCが適用されているため、追従ロボットの目標速度は式(2)から算出される。一方、相互外力が作用することで、先頭ロボットの目標速度は、式(3)から算出される。そして、先頭ならびに追従ロボットの加速度は、それぞれの目標速度に基づき式(1)から決定される。

$$V = \frac{1}{h_d} \{ \Delta x_n(t) - L \} + \alpha \Delta v_n(t) + D \Delta v_n(t) \tau \quad (3)$$

式(3)において、右辺の第2項と3項は  $(\alpha + D\tau)\Delta v_n(t)$  と書き換えることができる。これは、相互外力を付加することにより、式(2)の制御モデルにおける  $\Delta v_n(t)$  の係数が変化することを意味している。

## 5. シミュレーション実験

### 5.1 実験条件

本実験では、ロボット群の走行時間を指標に、クラスタを単位としたプラトーン走行の妥当性ならびに有効性について比較・評価する。ロボット群は、図7が示すシステムにて、ボトルネック(交差と合流)の存在するレーン上を走行する。

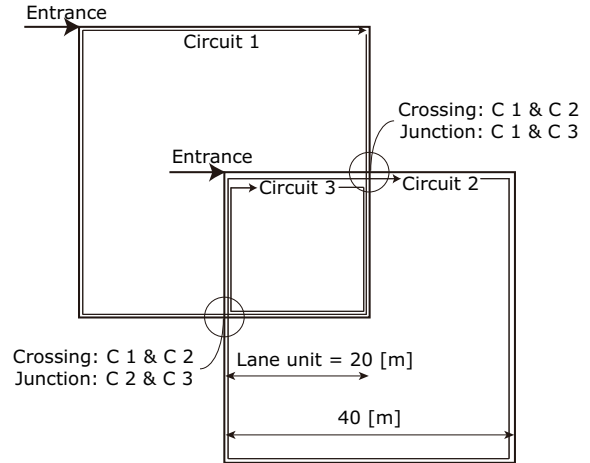


図7 ボトルネックを有した混合型サーキットシステム

合計で35台のロボット群を投入し、1台のロボットがサーキット3を、残りのうち、それぞれ17台ずつのロボット群がサーキット1と2を時計回りに200周走行する。各制御パラメータは以下の通り、 $\tau = 1$  [s],  $h_d = 2.0$  [s],  $L = 3.0$  [m],  $\alpha = \tau/h_d = 0.5$ ,  $\beta = 10$  とした。ロボットの最高速度は  $1.5$  [m/s] とした。

### 5.2 プラトーン走行のためのシナリオ

ロボット群がプラトーン走行するようACCが適用される。さらに、以下の(a)~(e)がロボットに適用される。(a)は、著者が提案した行動制御手法と環境ルールを適用するシナリオ(文献[3]を参照のこと)、(b)~(e)がクラスタを構成するためのシナリオで、(e)が提案するクラスタ構成法のシナリオとなる。

- (a) ACC + 行動制御手法 + 環境ルール
- (b) ACC + 各ロボット1台から構成されるクラスタ
- (c) ACC + 距離のみに基づいたクラスタ構成
- (d) ACC + 距離と速度ヒューリスティクスに基づいたクラスタ構成
- (e) ACC + 距離と速度ヒューリスティクスに基づいたクラスタ構成 + クラスタ結合

(b)では、35台全てのロボットが単体クラスタとして走行する。(c)では、前後で近い方のロボットとクラスタが構成される。(d)では、前のロボットの速度が後のロボットより速い場合にのみ、距離に関係なく前のロボットとクラスタが構成される。(e)では、(d)で構成されたクラスタが、4.2節の手順で結合される。

### 5.3 実験結果

図 8 に、各シナリオによるロボット群の走行時間を示す。ACC のみの結果 (14.89 [h]) から、ボトルネックの存在するシステムにおける有効性の限界が見て取れる。ただし、(a) の結果 (11.54 [h]) では、行動制御手法と環境ルールが効果的に機能したことで、走行時間が 3 時間以上も短縮されている。

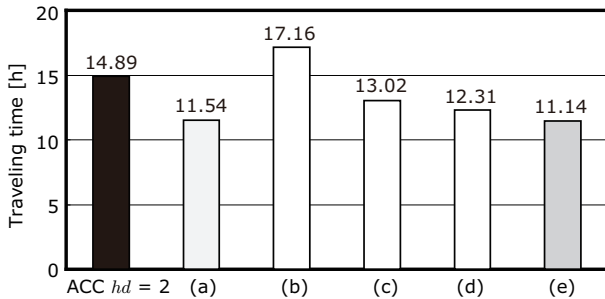


図 8 各シナリオによる走行時間の比較

(b) の結果 (17.16 [h]) では、全ロボットが相互外力により減速したため、ACC のみによるプラトーン走行よりも時間がかかったことが分かる。一方 (c) の結果 (13.02 [h]) から、クラスタを構成することで、(b) の結果と比べ、走行時間が 4 時間以上短縮されることとなった。また、ACC のみの結果と比べても約 2 時間、走行時間が短縮された。これらの結果は、プラトーンのサイズを小さくする際には、その大きさを適切に決定する、そのためのクラスタ化が重要であることを示している。なお、シナリオ (c) では、平均 13.57 個のクラスタが構成される結果となった。

(d) の結果 (12.31 [h]) では、(c) よりもさらに 0.7 時間ほど走行時間が短縮された。このとき、(c) では、若干ではあるが後ろのロボットとクラスタ構成の意思決定を行ったロボットが多く、一方 (d) では、前あるいは後ろのロボットとクラスタ構成の意思決定を行ったロボット台数の比が、約 3 : 1 となった。

(b) から (d) の結果より、各ロボットが単体ではなく、距離に基づき前後いずれかのロボットとクラスタを構成し、その際、ボトルネックでの交差・合流を考慮して、速度ヒューリスティクスを導入することの妥当性が示された。しかしながら、(a) の結果と比べると、依然、走行時間がかかっている。

(e) の結果では、不必要なクラスタを結合することで、移動時間が 11.14 [h] となった。図 9 は、(d) と (e) のシナリオに基づき、クラスタ結合の有無により構成されたクラスタ数の時間推移を示している。

クラスタを結合することでその数はより少なくなり、1 時間における (d) の平均クラスタ数が 12.63、一方 (e) の平均クラスタ数は 6.97 と、約半数まで減少する結果となった。以上のことから、各ロボットが前後いずれかのロボットとクラスタを構成する際、構成されたクラスタをロボット間での矛盾がなくなるまで結合することの妥当性も示された。

さらに、(e) の結果を (a) と比べても、0.4 時間と若干ではあるものの、走行時間が短縮された。すなわち、前後のロボットのみ位置と速度といった限られた情報だけでも、これらに基づき各ロボットがリアクティブにクラスタを構成することで、(a) のような膨大な情

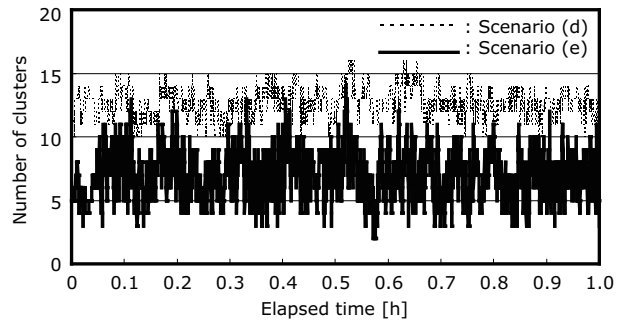


図 9 シナリオ (d) と (e) に基づき構成されたクラスタ数

報を扱わずとも同程度かそれ以上にプラトーン走行に有効であることが示された。

### 6. 結論

本研究では、ロボット群がレーン上を同一方向へ移動するプラトーン走行に着目し、局所的な情報からでも動的な状況変化に対応しながら素早く走行することを目的とした。そして、各ロボットがリアクティブにクラスタを構成し、これを単位としたロボット群による小さなプラトーン走行を行うための方法論について述べた。また、シミュレーション実験では、これらの妥当性ならびに有効性を明らかにした。

### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 24760199 (若手研究 (B)) の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] A. Vahidi *et al.*, “Research Advances in Intelligent Collision Avoidance and Adaptive Cruise Control,” *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol. 4 no. 3, pp. 143–153, 2003.
- [2] P. A. Ioannou *et al.*, “Autonomous Intelligent Cruise Control,” *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 42, no. 4, pp. 657–672, 1993.
- [3] S. Hoshino, “Multi-Robot Coordination Methodology in Congested Systems with Bottlenecks,” *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2810–2320, 2011.
- [4] C.-Y. Liang *et al.*, “Optimal Adaptive Cruise Control with Guaranteed String Stability,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 31, pp. 313–330, 1999.
- [5] C.-Y. Liang *et al.*, “String Stability Analysis of Adaptive Cruise Controlled Vehicles,” *JSME Int. J. Series C*, vol. 43, no. 3, pp. 671–677, 2000.
- [6] L. C. Davis, “Effect of Adaptive Cruise Control Systems on Traffic Flow,” *Physical Review E*, vol. 69, 066110, 2004.
- [7] A. Solanas *et al.*, “Coordinated Multi-Robot Exploration Through Unsupervised Clustering of Unknown Space,” *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 717–721, 2004.
- [8] C. Lee *et al.*, “Robot Clustering,” *IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 1449–1454, 2005.
- [9] Y. Xu and H. Qi, “Decentralized Reactive Clustering for Collaborative Processing in Sensor Networks,” *IEEE Int. Conf. on Parallel and Distributed Systems*, pp. 54–61, 2004.