牧羊犬制御のモデル化

東 俊一*・田 淵 絢子*・杉 江 俊治*

Modeling of Sheepdog Control

Shun-ichi AZUMA*, Ayako TABUCHI* and Toshiharu SUGIE*

This paper develops a mathematical model of a sheepdog control strategy, in order to clarify a principle for controlling autonomously (and randomly) moving multiple agents. First, by observing real behaviors of a sheepfold and a sheepdog, we extract their essential properties as a multi-agent system. Based on this, difference equations are constructed for the sheep and sheepdog. It is verified by numerical simulations that the proposed model captures their qualitative behaviors.

Key Words: multi-agent system, modeling, sheepfold, sheepdog

1. はじめに

複数のエージェントが協働することで大域的な機能を発現させるシステムは、マルチエージェントシステムと呼ばれている。その応用範囲は多岐にわたり、たとえば、群ロボットシステム、センサネットワーク、スマートグリッドなどが挙げられる。システムの分散化が強く求められている今日において、ますます主要な研究対象となっている。

このシステムに対しては、数多くの研究がすでになされており、主要な成果は、たとえば文献1)~6)で見ることができる。その一方、これまでにあまり研究されていない問題として挙げられるのが、大域的な目的とは無関係に局所的・自律的に振る舞う「多数」のエージェントを、設計可能な「少数」のエージェントを用いて間接的に制御し、エージェント全体の目的を達成する問題である。実際、これまでの研究においては、すべてのエージェントが直接設計できる、すなわち、自律的なエージェントは存在しないと仮定されていたり、もしくは、自律的なものが存在したとしても、それは（相対的に）少数であることが仮定されていた⁷⁾。

著者らは、そのような多数の自律的なエージェントを含む制御問題を解決することを目指しているが、そのための第一歩として、本研究では自然界にヒントを求めた。たとえば、身近な例として挙げられるのは、**Fig. 1**に示されるような牧羊犬による羊群の制御である。そこでは、勝手気ままに振る舞う多数の羊を、少数の牧羊犬がうまく制御しており⁸⁾、まさに、自律的に振る舞う多数のエージェントの制御が実践さ

Fig. 1 Sheepdog control

れている。さて、牧羊犬はどのように羊の群れを認識し、制御しているのだろうか？ もし、このメカニズムを解明できれば、上述した制御を実現するにあたっての重要な足がかりが得られると考えられる。

そこで、本論文では、上述の（工学的な）制御問題に応用できるような牧羊犬の制御原理を抽出するために、牧羊犬が、空間上に散らばった多数の羊を一か所にまとめる過程を再現するような数学モデルを構築する。最初に、実際の羊群の動きを観察し、「羊同士は群れる」や「羊は牧羊犬から離れる」という代表的な振る舞いを抜き出し、それを忠実に再現するモデルを構築した。つぎに、牧羊犬が群れの外側に存在する羊を内側に移動させることで、羊群は制御されている、という仮説をたて、これを牧羊犬の制御アルゴリズムとしてモデル化した。最後に、導出したモデルを用いて数値シミュレーションを行ない、それが実際の羊群制御のようすを定性的に表現していることを検証した。

最後につぎの点に注意しておく。まず、動物の群れ行動のモデル化に関しては、鳥^{9),10)}や魚^{11),12)}を扱った研究がすでになされている。しかし、本論文で対象とする牧羊犬制御に関しては、文献13),14)以外は見当たらない。また、上述の文献13)では、羊群（実際にはアヒル群で代用）をマルチエー

* 京都大学大学院情報学研究科 宇治市五ヶ庄

* Graduate School of Informatics, Kyoto University, Gokasho, Uji

(Received February 20, 2012)

(Revised June 11, 2012)

ジェントシステムとして扱うのではなく、群の重心だけに着目した、かなり大雑把なモデル化を行なっている。したがって、マルチエージェントシステムとして詳細なモデルを得ようとする本論文の方向性とは異なっている。一方、文献14)は、本論文の内容¹⁵⁾が公表された学術講演会において同時に発表されたものであるが、これも文献13)と同様に重心だけに着目したモデルを用いており、本論文で提案するモデルとは異なっている。

また、本論文では、工学応用の立場から、牧羊犬が行っている制御のエッセンスを抽出することに興味をもっている点に注意されたい。すなわち、牧羊犬の羊群制御の厳密なモデルを得ることが主目的ではない。

【記法】 $\mathbf{R}$ は実数の集合、 $\mathbf{R}_+$ は正の実数の集合を表わす。ベクトル x のユークリッドノルムを $\|x\|$ で表わす。ベクトル x, y に対し、その内積は $\langle x, y \rangle$ 、 x と y を結ぶ線分（線分上の点集合）は $\mathbf{L}(x, y)$ と記される。 $\mathbf{R}^2$ 上の異なる座標 x_i をもつ n 個の点 i ($i = 1, 2, \dots, n$) に対してボロノイ図を作ったとき、 $\mathbf{V}_i(x) \subset \mathbf{R}^2$ で点 i のボロノイ領域を表わす。ここで、 x は $[x_1^\top x_2^\top \cdots x_n^\top]^\top \in \mathbf{R}^{2n}$ を意味している。また、 x_i を中心とし、ボロノイ領域 $\mathbf{V}_i(x)$ に含まれる最大の内接円の半径を $\text{size}(\mathbf{V}_i(x)) \in \mathbf{R}_+$ で表わす。つぎに、このボロノイ図に対するドロネーグラフは、 $G(x)$ で表わされるものとする。すなわち、頂点集合が $\{1, 2, \dots, n\}$ 、辺集合が $\{(i, j) \in \{1, 2, \dots, n\}^2 \mid \mathbf{V}_i(x) \cap \mathbf{V}_j(x) \neq \emptyset\}$ のグラフが $G(x)$ である。この $G(x)$ の辺集合は $\mathbf{E}(G(x))$ で記されることもある。最後に、上述した i と x 、および $\nu, \varepsilon \in \mathbf{R}_+$ に対し、関数 $\Psi_{i,x,\nu,\varepsilon} : \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}^2$ を

$$\Psi_{i,x,\nu,\varepsilon}(u) := \begin{cases} u & \text{if } \|u\| < \min\{\nu, \text{size}(\mathbf{V}_i(x))\} \\ \frac{u}{\|u\|} \min\{\nu, \text{size}(\mathbf{V}_i(x)) - \varepsilon\} & \text{otherwise} \end{cases}$$

と定義する。これは、ベクトル u の大きさが、 ν と $\text{size}(\mathbf{V}_i(x))$ のいずれかと等しいか大きい場合には、 u と同じ向きで、大きさが $\min\{\nu, \text{size}(\mathbf{V}_i(x)) - \varepsilon\}$ のベクトルを出力する。

2. 羊群のモデル化

2.1 牧羊犬による羊群制御

羊が家畜として飼育され始めたのは紀元前 9000 年頃といわれている。今日では、全世界で約 3000 種類、11 億 6000 万頭を超える羊が飼われており、代表的な家畜の一種となっている¹⁶⁾。羊が家畜化された要因は大きく二つ挙げられる。ひとつは、管理のしやすさである。実際、羊は、なわばりをもたない、群れを作る、ヒトになつく、といった性質を有している。もうひとつは、乾燥に強く、さまざまな地域で飼うことができる上に、肉、乳、毛などさまざまな農産物が得られる点である。

一方、日中のうち 9~12 時間放牧されるが¹⁷⁾、この際、羊はかなり広い領域に散らばって採食するため、羊を一か所に

Fig. 2 Typical behaviors of sheep

まとめたり、特定の場所に誘導するために多大な労力を要する。そこで、このような羊群の制御には、古くから、運動能力の高いイヌが用いられており、このような役割を演じるイヌは牧羊犬と呼ばれている。牧羊犬を利用することで、勝手気ままに動く数百頭の羊を短い時間で制御でき、そのため、牧羊犬は科学技術が発達した現在においても羊の大規模飼育には欠かせないものとなっている。

2.2 羊のモデル

さて、放牧された羊群をモデル化しよう。まず、羊の群れ行動の性質を抜き出すために、羊の生態を解説した文献16), 17)を調査し、加えて、実際に牧羊犬が羊群を制御するようすが収録されたビデオ^{18)~21)}を注意深く観察した。これらを総合すると、おおむねつぎの三つが羊の特徴的行動といえる(Fig. 2)。

- (S1) 他のいかなる羊とも近付き過ぎない。
- (S2) 少なくとも一頭の羊とは、距離が大きく離れすぎないようにする。また、牧羊犬が近くにいるときには、外敵からの危険に備えるため、その距離をやや小さめに保つ。
- (S3) 牧羊犬が近付くとそれから離れようとするが、そうでない場合は牧草のある場所を探し移動する。

これらを表現する羊群の数学モデルを以下に構築する。 $\mathbf{R}^2$ 上に n 頭の羊 (羊 1~羊 n) と 1 頭の牧羊犬が存在する状況を考える。羊 i の位置を、 $x_i \in \mathbf{R}^2$ とし、すべての羊の位置をまとめて $x \in \mathbf{R}^{2n}$ と表記する。すなわち、 $x := [x_1^\top x_2^\top \cdots x_n^\top]^\top$ である。一方、牧羊犬の位置は $z \in \mathbf{R}^2$ で表わす。つぎに、 n 頭の羊に対するドロネーグラフ $G(x)$ を考え、羊 i から距離 $r_{min} \in \mathbf{R}_+$ より近い位置に存在し、かつドロネーグラフ $G(x)$ 上で結ばれている羊の (インデックス) 集合を、羊 i の

近傍と定義し, $\mathbf{N}_i(x)$ と記す. つまり,

$$\mathbf{N}_i(x) := \left\{ j \in \{1, 2, \dots, n\} \setminus \{i\} \mid \begin{array}{l} \|x_i - x_j\| < r_{min}, \\ (i, j) \in \mathbf{E}(G(x)) \end{array} \right\} \quad (1)$$

である. また, 羊 i に最も近い羊の位置を $x_i^* \in \mathbf{R}^2$ とする ($x_i^*(k)$ で時刻 k におけるそれを表す). ただし, 羊 i に最も近い羊が複数存在する場合は, x_i^* はその中で最も小さいインデックスが付けられた羊の位置を表すことにする.

このとき, 行動 (S1)~(S3) をもつ羊は, つぎの離散時間の状態方程式でモデル化される.

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i(k) + h \Psi_{i, x(k), v_s, \varepsilon} \left(\begin{aligned} &a_1 f_1(x_i(k), \mathbf{N}_i(x(k))) \\ &+ a_2 f_2(x_i^*(k) - x_i(k), z(k) - x_i(k)) \\ &+ a_3 f_3(z(k) - x_i(k)) \end{aligned} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで, $h \in \mathbf{R}_+$ は時間ステップ幅である. また, $\Psi_{i, x(k), v_s, \varepsilon}$ (ただし, $v_s, \varepsilon \in \mathbf{R}_+$) は, 第1章の最後で定義された関数であり, 1 ステップあたりの移動量を制限するものである. これにより, 1 ステップ先の位置 $x_i(k+1)$ が, 中心が $x_i(k)$, 半径が $h \min\{v_s, \text{size}(\mathbf{V}_i(x(k))) - \varepsilon\}$ の円領域の中に存在することが保証される. f_1, f_2, f_3 は羊の行動 (S1)~(S3) に対応する関数であり, $a_1, a_2, a_3 \in \mathbf{R}_+$ は各項の作用量を定める重み係数である.

以下, 関数 f_1, f_2, f_3 の詳細を示そう.

【関数 f_1 】

$$f_1(x_i(k), \mathbf{N}_i(x(k))) := \sum_{j \in \mathbf{N}_i(x(k))} (\|x_j(k) - x_i(k)\| - r_{min}) \frac{x_j(k) - x_i(k)}{\|x_j(k) - x_i(k)\|} \quad (3)$$

ここで, $r_{min} \in \mathbf{R}_+$ は, 羊同士が保とうとする距離の最小値である. 関数 f_1 が行動 (S1) を表現していることはつぎのように確認できる. まず, (1) 式に注意すると, 羊 j と羊 i の距離は r_{min} より小さく, $\|x_j(k) - x_i(k)\| - r_{min}$ は, 羊 i と近傍の羊が保とうとする最小距離と実際の距離との差に対応する. このとき, ((1) 式から) $\|x_j(k) - x_i(k)\| - r_{min}$ は, 常に負の値であり, 総和記号の右側は羊 i が羊 j から離れるように動く項となる. つまり, f_1 は行動 (S1) に相当する.

【関数 f_2 】

$$f_2(x_i^*(k) - x_i(k), z(k) - x_i(k)) := \begin{cases} (\|x_i^*(k) - x_i(k)\| - r_{max}) \frac{x_i^*(k) - x_i(k)}{\|x_i^*(k) - x_i(k)\|} & \text{if } \|z(k) - x_i(k)\| > d_c, \|x_i^*(k) - x_i(k)\| > r_{max} \\ (\|x_i^*(k) - x_i(k)\| - r_{min}) \frac{x_i^*(k) - x_i(k)}{\|x_i^*(k) - x_i(k)\|} & \text{if } \|z(k) - x_i(k)\| \leq d_c, \|x_i^*(k) - x_i(k)\| > r_{min} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

Fig. 3 Stochastic model of $\sigma_i(k)$

$d_c \in \mathbf{R}_+$ は, 羊 i が牧羊犬の存在を認識し警戒し始める距離, $r_{max} \in \mathbf{R}_+$ は, 牧羊犬が近くにいないときに, 羊 i が最も近い羊との間に保とうとする距離である. 第一の条件は, 牧羊犬が近くにおらず, さらにすべての羊との距離が離れすぎている状況を表わしている. このとき, $x_i^*(k)$ の定義から, $\|x_i^*(k) - x_i(k)\| - r_{max}$ は, 羊 i が少なくとも一頭の羊と最低限保っておきたい距離と, 実際に一番近くにいる羊との距離との差に対応し, 第一の条件からこの値は常に正となる. したがって, この条件のもとで, f_2 は, 羊 i と一番近い羊との距離が r_{max} (に近い値) になるように働く. 第二の条件は, 牧羊犬が近くに存在し, かつそれから身を守るために羊同士が保つべき間隔が得られていない状況を表わす. この場合も, 第一の条件が成立した場合と同様にして, f_2 は, 羊 i と一番近い羊の距離が r_{min} に近くなるよう働くことがわかる. このように, 行動 (S2) は関数 f_2 によって表現される.

【関数 f_3 】

$$f_3(z(k) - x_i(k)) := \begin{cases} (\|z(k) - x_i(k)\| - d_r) \frac{z(k) - x_i(k)}{\|z(k) - x_i(k)\|} & \text{if } \|z(k) - x_i(k)\| < d_r \\ \sigma_i(k) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$d_r \in \mathbf{R}_+$ は, 羊 i が牧羊犬との間に最低限保っておきたい距離, $\sigma_i(k) \in \mathbf{R}^2$ は, 羊が牧草を探して動くことを表現する時間関数である. f_3 は, 牧羊犬が羊 i の近くにいる場合は, 羊は牧羊犬から離れ, そうでない場合は, 羊が牧草を探して動くことを表現している. 第一の条件に関する部分は, 関数 f_1 と同様の考察から確認できる. 一方, 第二の条件に関する部分, すなわち $\sigma_i(k)$ は, Fig. 3 に示されるマルコフ連鎖系としてモデル化する. 各頂点は $\sigma_i(k)$ がとりうる値であり, 「停止」と $v_r [\cos \phi_l \sin \phi_l]^T$ だけ現在位置から移動 ($l \in \{1, 2, \dots, N-1\}$) を意味する. また, 各辺は遷移関係であり, 各辺に付けられたラベル $p, q \in [0, 1]$ は遷移確率を表わしている. このように, 羊が牧草を探して動くという行

動を、確率過程としてモデル化している。

以上によって、羊群のモデルが(2)~(5)式で与えられる。

本章の最後に、提案したモデルに関して、注意を与える。もし、ある $(i, j, k) \in \{1, 2, \dots, n\} \times \{1, 2, \dots, n\} \times \{1, 2, \dots\}$ に対し、 $x_i(k) = x_j(k)$ が成立したならば、関数 f_1, f_2 において零割が生じる可能性がある。しかし、(2)式において、各羊の1ステップでの移動が、関数 $\Psi_{i, x(k), v_s, \varepsilon}$ によって、各羊のボロノイ領域の内部に制限されているため、各羊の初期位置が異なれば(すなわち、すべての $(i, j) \in \{1, 2, \dots, n\} \times \{1, 2, \dots, n\}$ に対し $x_i(0) \neq x_j(0)$)、そのような零割は生じないことが保証されている。また、同様のこと ($z(k) = x_i(k)$) は、関数 f_3 に対しても起こり得るが、たとえば、牧羊犬と各羊の初期位置が異なり(すべての $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ に対し $z(0) \neq x_i(0)$)、かつ

$$\|z(k+1) - z(k)\| < \min_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} \|z(k) - x_i(k)\| - v_s \quad (6)$$

を満たせば、すべての $(i, k) \in \{1, 2, \dots, n\} \times \{1, 2, \dots\}$ に対し、 $z(k) \neq x_i(k)$ となることが保証される。ここで、 $\min_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} \|z(k) - x_i(k)\|$ は、牧羊犬と最も近い羊の間の距離、 v_s は、各羊の最大の速さ(2)式に対して与えられる値)を表わし、(6)式の右辺は、 $z(k) \neq x_i(k)$ が保証される牧羊犬の移動量に相当している。

3. 牧羊犬制御のモデル

つぎに、牧羊犬の制御アルゴリズムをモデル化する。特に、ここでは、空間上に散らばった n 頭の羊を目標位置 ($\mathbf{R}^2$ 上の原点) 付近にまとめる制御を考え、これを再現するものを構築する。

さて、牧羊犬はどのように羊群を制御しているのだろうか？ これに関し、つぎのことが知られている^{8), 19), 21)}。

- (D1) 牧羊犬は、羊群の外側の羊のうち自分の視界に入るものを認識している。
- (D2) 自分に近い位置に存在し、かつ目標位置から遠い羊に近付き羊群を制御する。

以下では、これを牧羊犬の制御原理として、数学モデルを導出しよう。

まず、牧羊犬の行動(D1)に従い、時刻 k における羊の位置 $x_i(k)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) に対して凸包を作る。そして、その境界上に存在し、かつ牧羊犬が 360° 周囲を見渡したときに視界に入る羊の(インデックス)集合を $\mathbf{C}(k) \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$ とする。これは、牧羊犬によってその存在が認識される羊の集合を表わし、言い換えれば、牧羊犬によって制御される可能性をもつ羊の集合である。たとえば、Fig. 4においては、丸で囲まれた羊のインデックスが $\mathbf{C}(k)$ の要素となる。つぎに行動(D2)を考慮し、集合 $\mathbf{C}(k)$ の中で、実際に牧羊犬によって制御される羊(のインデックス)を

$$i^*(k) := \arg \min_{i \in \mathbf{C}(k)} \left\| z(k) - \arg \min_{y \in \mathbf{L}(0, z(k))} \|y - x_i(k)\| \right\| \quad (7)$$

Fig. 4 Candidate sheep to be moved by sheepdog

Fig. 5 Sheep to be moved by sheepdog

Fig. 6 Position $z_d(k)$

と定義する。ここで、 $\arg \min_{y \in \mathbf{L}(0, z(k))} \|y - x_i(k)\|$ は、 $\mathbf{R}^2$ 上の原点と牧羊犬の位置 $z(k)$ を結ぶ線分上 $\mathbf{L}(0, z(k))$ に、羊 i の位置 $x_i(k)$ を射影して得られる点であり、 $i^*(k)$ はその射影した点が牧羊犬に最も近くなるような(最も手前の)羊を表わしている。たとえば、Fig. 5では、丸で囲まれた羊がそれに対応し、羊 $i^*(k)$ は、行動(D2)の「自分に近く、目標位置から遠いもの」の一表現になっている。

つぎに、羊 $i^*(k)$ を群れの内側に移動させ、かつ羊群全体を目標位置に近付けるために牧羊犬が存在すべき位置を考えるが、これはつぎの条件を満たす $z_d(k) \in \mathbf{R}^2$ とする。

$$\langle (z(k) - x_{i^*(k)}(k)), (z_d(k) - x_{i^*(k)}(k)) \rangle = 0 \quad (8)$$

$$\|z_d(k) - x_{i^*(k)}(k)\| = \zeta \quad (9)$$

$$\|x_{i^*(k)}(k)\| < \|z_d(k)\| \quad (10)$$

ここで、 $\zeta \in \mathbf{R}_+$ は定数であり、(8)~(10)式を満たす $z_d(k)$ が複数存在する場合は、 $z_d(k)$ は牧羊犬から見て最も左側の点を表わすものとする。このような条件を満たす $z_d(k)$ はFig. 6のように図示される。(8)式は、牧羊犬の(現在)位

Fig. 7 Snapshots of sheep and sheepdog positions for uniformly placed sheep

置と羊 $i^*(k)$ の位置を結ぶ線分と、牧羊犬が存在すべき位置と羊 $i^*(k)$ の位置を結ぶ線分が直交することを意味し、(9) 式は牧羊犬が存在すべき位置と羊 $i^*(k)$ の距離が ζ になることを述べている。また、(10) 式は、牧羊犬が、羊 $i^*(k)$ に比べて、目標位置 ($\mathbf{R}^2$ 上の原点) から遠い位置に存在することを求めている。したがって、 $\zeta \leq d_r$ のとき牧羊犬が $z_d(k)$ に到達すると、羊 $i^*(k)$ は群れの内側に移動するとともに、羊群全体としても $\mathbf{R}^2$ 上の原点に近付くことが期待される。

以上より、牧羊犬のモデルをつぎのように与える。

$$z(k+1) = z(k) + \begin{cases} \min \left\{ v_d, \min_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} \|z(k) - x_i(k)\| - v_s - \varepsilon \right\} \frac{z_d(k) - z(k)}{\|z_d(k) - z(k)\|} & \text{if } \|z_d(k) - z(k)\| > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 $v_d \in \mathbf{R}_+$ は、牧羊犬の最大の移動の速さである。(11) 式に従う牧羊犬は、現在位置が $z_d(k)$ でなければ、現在位置から $z_d(k)$ に向かって速度 $\min\{v_d, \min_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} \|z(k) - x_i(k)\| - v_s - \varepsilon\}$ で進んでいく。この際、(6) 式が満たされるように速度が設定されているため、(5) 式において零割が起きないことが保証されている。

4. 数値シミュレーションによる検証

第2章、第3章で導出したモデル ((2)~(5), (11) 式) を数値シミュレーションによって検証する。

各パラメータは Table 1 のように設定した。ここで、 v_s , v_r , v_d , p , q , ζ は文献 18), 20) に収録された映像から見積もり、 r_{min} , r_{max} , d_c , d_r は文献 16) を参考に選んだ。ま

Table 1 Parameter setting in numerical simulations

Parameter	Description	Value
n	Number of sheep	50
v_s	Maximum velocity of sheep	4
ε	Constant number specifying moving ranges of sheep and sheepdog	0.001
a_1	Weight for function f_1	1
a_2	Weight for function f_2	1
a_3	Weight for function f_3	2
r_{min}	Desired minimum distance between sheep	2
r_{max}	Desired maximum distance between sheep and its nearest sheep	7.5
d_c	Distance that sheep can recognize sheepdog	10
d_r	Distance that sheep starts to get away from sheepdog	7.5
N	Number of states in Markov chain in Fig. 3	9
p	Transition probability of Markov chain in Fig. 3	0.0125
q	Transition probability of Markov chain in Fig. 3	0.1
v_r	Velocity of sheep in normal situation	0.5
ϕ_l	Moving direction in normal situation	$\frac{\pi}{4}l$
ζ	Constant number specifying sheepdog control	5
v_d	Maximum velocity of sheepdog	5

た、 ε は、数値計算の安定性を損なわない範囲で小さい値を選択し、重みは、羊同士に関する a_1 , a_2 を 1、羊と牧羊犬に関する a_3 を (緊急の逃避行動であることを考慮し) その 2 倍の値に設定した。

羊の初期位置は、実際に放牧された羊群のようすに近くなる

Fig. 9 Snapshots of sheep and sheepdog positions for nonuniformly placed sheep

Fig. 8 Time evolution of $J(x(k))$ for uniformly placed sheep

よう、2頭のグループおよび3頭のグループをそれぞれ10個作り、これらのグループを領域 $[-50, 50] \times [-50, 50]$ 上に一様分布に従ってランダムに配置した。一方、牧羊犬の初期位置は、羊群の外側になるよう $z(0) := [45 \ 45]^T$ としている。また、関数 f_3 に含まれるマルコフ連鎖系の初期値を $\sigma_i(0) := 0$ ($i = 1, 2, \dots, n$) とし、時間ステップ幅 h は 0.1 sec と設定した（つまり、離散時刻 k は $0.1k \text{ sec}$ に対応）。

このときのモデルの振舞いを Fig. 7 に示す。時刻ごとに、領域 $[-50, 50] \times [-50, 50]$ を上空から見たようすを示している。この図において、縦と横に引かれた点線の交わった点が目標位置（ $\mathbf{R}^2$ 上の原点）であり、 $\square$ と $\times$ はそれぞれ羊と牧羊犬の位置、実線は牧羊犬の300ステップ前までの軌跡を表わしている。

この結果より、提案モデルが、羊と牧羊犬の特徴的行動 (S1)~(S3), (D1), (D2) を捉え、さらに空間上に散らばった羊を目標位置付近にまとめる制御が再現されていることがわかる。これは、牧羊犬が羊群を制御する実際のような^{18)~21)}に、定性的に近くなっていることも確認している。また、Fig. 8 に、羊群が目標位置に付近に集められて度合いを表わす関数 $J(x(k)) := \max_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} \|x_i(k)\|$ の時間応答を示しているが、これからも提案モデルの有効性が見て取れる。

同様の結果は、羊の初期位置が偏って配置された場合にも得られ、そのようすは Fig. 9 に示されている。さらに、他のさまざまな初期条件に対してもシミュレーションを行ない、

牧羊犬の初期位置が羊群の外側である限り、同様の結論が得られることを確認している。

以上より、牧羊犬制御を定性的に再現するモデルが得られたと結論付けられる。

5. おわりに

本論文では、広く群れている羊を一か所に誘導する牧羊犬の羊群制御に着目し、羊群のモデル化および、牧羊犬のモデル化を行なった。今後は、工学的な応用を視野に入れながら、少数のエージェントが多数のエージェントを制御することにより、全体として所期の機能を実現する制御方法を開発したい。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (B) #21360202 の助成を受けた。記して、謝意を表したい。

参考文献

- 1) R. Olfati-Saber, J.A. Fax and R.M. Murray: Consensus and cooperation in networked multi-agent systems, *Proceedings of the IEEE*, **95**-1, 215/233 (2007)
- 2) C.T. Abdallah and H.G. Tanner: Complex networked control systems: Introduction to the special section, *Control systems magazine*, **27**-4, 30/32 (2007)
- 3) S. Martinez, J. Cortés and F. Bullo: Motion coordination with distributed information, *Control systems magazine*, **27**-4, 75/88 (2007)
- 4) 早川, 藤田: マルチエージェントシステムとビークルフォーメーション, 計測と制御, **46**-11, 823/828 (2007)
- 5) 藤田, 畑中: 協調制御～合意から被覆まで～, 第52回システム制御情報学会研究発表講演会, 1/6 (2008)
- 6) M. Mesbahi and M. Egerstedt: *Graph Theoretic Methods in Multiagent Networks*, Princeton University Press (2010)
- 7) 宮崎, 桜間, 中野: マルチエージェントの協調捕獲によるターゲットの誘導, 第11回制御部門大会, 165-1-1 (2011)
- 8) 人間界の動物たち (7) 「イヌ I」, 週刊朝日百科動物たちの地球 127, 朝日新聞社 (1993)
- 9) C.W. Reynolds: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, *Computer Graphics*, **21**-4, 25/34 (1987)
- 10) S.-H. Lee, H.K. Pak and T.-S. Chon: Dynamics of prey-flock escaping behavior in response to predator's attack, *Journal of Theoretical Biology*, **240**, 250/259 (2006)
- 11) A. Hush and C. Wissel: The Simulation of the Movement of Fish Schools, *Journal of Theoretical Biology*, **156**, 153/167 (1992)

- 12) M. Zheng, Y. Kashimori, O. Hoshino, K. Fujita and T. Kambara: Behavior pattern (innate action) of individuals in fish schools generating efficient collective evasion from predation, *Journal of Theoretical Biology*, **235**, 153/167 (2005)
- 13) R. Vaughan, N. Sumpter, J. Henderson, A. Frost and S. Cameron: Experiments in automatic flock control, *Robotics and Autonomous Systems*, **31**-1, 109/117 (2000)
- 14) 羽尻, 大須賀, 石川: 群移動体の制御における機動的制御について, 第 55 回システム制御情報学会研究発表講演会, 327/328 (2011)
- 15) 田淵, 東, 杉江: 牧羊犬制御のモデリング, 第 55 回システム制御情報学会研究発表講演会, 579/580 (2011)
- 16) 佐藤, 近藤, 田中, 楠瀬: 家畜行動図説, 朝倉書店 (1995)
- 17) 三村 耕: 改訂版家畜行動学, 養賢堂 (1997)
- 18) 佐々倉裕美: ひつじがすき 日本のひつじ牧場 [DVD], シンフォレスト (2009)
- 19) D. Winter: *Sheep STATION NZ* [DVD], Greenbit Productions (2009)
- 20) A. Nickless and G. Watson: *Border Collie Sheepdogs: Off Duty!* [DVD], Andy Nickless Media Productions Kings Green Farm (2007)
- 21) A. Nickless: *First Steps in Border Collie Sheepdog Training* [DVD], Andy Nickless Media Productions Kings Green Farm (2009)

=====

[著 者 紹 介]

東 俊 一 (正会員)

1976 年 7 月 24 日生. 2004 年東京工業大学大学院情報理工学研究科博士後期課程修了. 同年より日本学術振興会特別研究員, 2005 年京都大学大学院情報学研究科助手, 2007 年同助教, 2011 年同准教授となり現在に至る. この間, 2004~2005 年ジョージア工科大学客員研究員, 2009~2010 年ペンシルバニア大学客員研究員. ハイブリッドシステム制御論の研究に従事. 博士 (工学). 2005, 2008 年計測自動制御学会論文賞, 2011 年度同学会制御部門バイオニア賞などを受賞. IEEE, システム制御情報学会などの会員.

田 淵 絢 子 (学生会員)

2011 年京都大学工学部物理工学科卒業, 同年京都大学大学院情報学研究科システム科学専攻修士課程に進学し, 現在に至る.

杉 江 俊 治 (正会員・フェロー)

1978 年京都大学大学院修士課程精密工学専攻修了. 84 年同博士後期課程研究指導認定退学. 78~80 年日本電信電話公社勤務. 84 年大阪府立大学工学部助手. 88 年京都大学工学部助教授を経て, 現在情報学研究科教授. ロバスト制御理論とその応用, システム同定などの研究に従事. 工学博士. システム制御情報学会, 日本鉄鋼協会, ロボット学会などの会員. IEEE フェロー.

=====