フェロモンコミュニケーションを利用した 自律移動型センサ群による監視の高信頼度化[†]

石 垣 陽*・田 中 健 次*・伊 藤 誠**

Autonomous Mobile Sensors System Communicating by Pheromone for Reliable Monitoring[†]

Yo ISHIGAKI*, Kenji TANAKA* and Makoto ITOH**

This paper proposes a safety monitoring system by small number of autonomous sensors. High-reliable safety monitoring system is vital to operate large-scale systems, such as nuclear power plants. Monitoring by multiple and fixed sensors is effective, but it requires large cost. Also, in nuclear systems, there are difficult places to fix sensors for long time since a sensor has weakness for radiation near a nuclear reactor. Thus, this paper proposes a reliable autonomous and distributed monitoring system by small number of sensors.

There are three requirements for the autonomous monitoring system from aspect of reliability. The first one is that several sensors should aggregate to prevent false alarms when a sensor detects abnormal situation, and that then they should diffuse efficiently all over the objected area to prevent lack of alarms. The second is that a frequency of sensors' visit should be constant for every point in area when the monitored area is homogeneous. The last is that the frequency should be controllable depending on the priorities when the monitored area is heterogeneous. The monitoring system that this paper proposes is an Ant-like Sensor System (ASS) that consists of autonomous sensors communicating by pheromone. In ASS, each sensor agent moves around leaving the markings of repulsive pheromone that means that some sensor has visited the surveillance point. Such pheromone communication makes sensors system satisfy the above three requirements.

Two experiments are conducted to clarify the condition to assign optimal parameters for ASS, such as quantity of sprayed pheromone and evaporation speed of pheromone. The optimal parameters are determined dependent on the number of sensors and the characteristics for monitored area.

Key Words: safety monitoring system, swarm intelligence, false alarm and lack of alarm, reliability, real-time search

1. はじめに

原子力発電所、大規模化学プラント、超高層ビルなどの施設においては、誤報・欠報といったセンサの誤動作を防ぎ、高信頼度に異常を発見するための安全監視システムが不可欠である。誤動作を防ぐためには、 N 個の同質センサであれば、 k -out-of- n 型の論理構成が有効である¹⁾。しかし複数のセンサを多数の監視地点に固定することは経済的に難しい²⁾(Fig. 1(a))。そこで、この問題を解決するため、本研究では、少数センサ群による自律移動型の監視システムに注目す

る (Fig. 1(b))。

本稿ではまず、監視の信頼性の観点から、自律移動型センサ群に求められる要求を考える。つぎに、フェロモンコミュニケーションを利用したセンサ群の自律分散的な制御方式を、アリ型センサシステム (ASS: Ant-like Sensor System) として提案する。フェロモンコミュニケーションは昆虫群の協調行動をヒントにしたモデルであり、すでにマルチエージェントの適応的通信手段として研究されている^{3)~5)}。本研究では、センサが監視したことを意味する情報を忌避フェロモン (repulsive pheromone) として場に埋め込むことで、センサ間のフェロモンコミュニケーションを実現する。

障害物を回避するためにポテンシャル場の情報を利用した研究もある⁶⁾が、それは静的な場の利用であり、フェロモンコミュニケーションでは、場の情報を変化させることで動的にコミュニケーションを進めることができる。

ASSを設計する際には、監視対象の特性に応じて、個々のセンサエージェントが散布するフェロモンの量 (高さ・半径) やフェロモン場の特性 (蒸発速度) などのパラメータをいか

[†] 第14回自律分散システム・シンポジウムで発表 (2002・1)

* 電気通信大学大学院情報システム学研究科
調布市調布ヶ丘1-5-1

** 筑波大学電子・情報工学系 つくば市天王台1-1-1

* Graduate School of Information Systems, University of
Electro-Communications, Chofu, Tokyo

** Institute of Information Sciences and Electronics, University of
Tsukuba, Tsukuba

(Received April 24, 2003)

(Revised September 17, 2003)

Fig. 1 Safety monitoring by autonomous sensors

にバランスよく決定すればよいかが問題となる。本研究では、センサ数や監視対象の面積・特性に応じた、望ましいフェロモンの散布・蒸発パラメータを明らかにする。

ASSの行動制御方式は、実時間探索の一種である^{7),8)}。Koenigら⁸⁾は、LRTA*やNode Countingなどの実時間探索方式において、エージェントに予期せぬ移動や故障などが起きても、ロボストに空間全体を均一に探索し続けることを示した。しかし、実時間探索を安全監視に応用することを考えた場合、ある場所がどれだけの時間監視されないかを考慮したり、あるいは監視対象の特性に応じて、特定の領域を重点的に探索させる必要がある。

2. 自律移動型センサシステム

自律移動型センサシステムが、誤報・欠報を防ぎつつ、少数のセンサで高信頼度な監視を行なうためには、(a)異常を検出した際は複数センサが1箇所に集まることで誤報を防ぎ、(b)平常時はセンサが空間内を動き回ること欠報を防ぐ必要がある。

(a)の動作後、センサ群は再び空間全体に効率よく拡散することが要求される。これを要求①とする。ここで効率のよい拡散とは、一度あるセンサによって監視された場所が、再度他のセンサによって監視されることなく、空間全体にセンサ群が広がることをいう。

また(b)では、異常の検出に遅れが生じないことが要求される。Fig. 2に、異常を検出するための特徴量の時間的変化を示す。異常を検出するための特徴量が、センサによって検出できる値になったときから、事故に至るまでの時刻をcritical timeと呼ぶ。センサが集合し判定を下すまでの時間や、警報を発してから対象箇所を修理するまでの時間を Δ とおけば、対象箇所が、少なくとも(critical time- Δ)に一度の割合でセンサによって監視されれば、事故を未然に防ぐことができると考えられる。監視対象が均質である場合、領域内のどの場所でも、センサが監視に訪れる時間間隔(以下、到着間隔と呼ぶ)がほぼ一定である(以下、空間的な分散が少ないという)ことが要求される。これを、要求②とする。

さらに、実際の監視対象では、場所によってcritical timeが異なる。したがって、critical timeに応じた到着間隔を設定できることが要求される。これを、要求③とする。

Fig. 2 Critical time and quantity indicating abnormal

3. アリ型センサシステム

3.1 モデル

N 個のセンサエージェント(以下単にセンサという)は、監視対象平面 S 上を常に動き回る。各センサが監視できる範囲は、センサの位置 (x, y) から、有効監視半径 u 以内の場所とする。

フェロモンを蓄積するフェロモン場を $P(x, y)$ で表わす。個々のセンサは1[step]動くごとに、円錐状のフェロモンを散布する。このとき散布するフェロモンの高さを h 、半径を w とする。フェロモン量は1ステップに d だけ減少するものとし、これをフェロモンの蒸発と呼ぶ。ただし、フェロモンが1つの場所に蓄積される量には最大値があるものとする。Fig. 3は、直進しているセンサにより各ステップで散布されたフェロモンが、蒸発して減少しているようすの、ある瞬間の状態を表わしたものである。

最初の時刻において、フェロモンが存在しない状態を、初期状態と呼ぶ。これに対して、初期状態から時刻が十分に経過し、フェロモン場全体に存在するフェロモンの総量が安定している状態を、定常状態と呼ぶ。

Fig. 4に示すとおり、センサは今いる場所でのフェロモン量 $P(C)$ と、半径 u の距離にある、前後左右の場所でのフェロモン量 $P(N), P(E), P(W)$ および $P(S)$ のみを知ることができる。このとき $\min\{P(N), P(E), P(W), P(S)\} < P(C)$ であれば、つぎの時刻では P が最小値をとる点に向かって移動する(ただし、最小値をとる点が複数ある場合には、そのなかから移動先をランダムに選択する)。さもなければ、現在の方向を維持する。

以上の規則によって、ASSでは、センサをよりフェロモン量の少ない方へ移動させることで、忌避フェロモンに基づいたフェロモンコミュニケーションを実現できると考えられる。

3.2 期待される特性

初めに要求①について考える。初期状態において、狭い範囲にセンサが集まっていると、センサ群は、互いの出すフェロモンを検出し合い、互いの距離が大きくなる方向に向かって動き出すことが予想できる。さらに、初期状態ではフェロモンが全くないので、センサ群は、対象空間全体を少なくとも1回、くまなく監視する特性があると考えられる。センサ

Fig. 3 Ant-like sensor secreting pheromone

Fig. 4 Sight of sensor agents

が集合している状態から効率よく拡散し、いずれは対象空間全体をくまなく監視する特性を、拡散監視特性と呼ぶ。ASSが要求①を満たすためには、この特性を発現する必要がある。

つぎに要求②について考える。最近センサが通った場所は、それ以前にセンサが通った場所に比べ、フェロモンがより多く残るため、再びすぐには監視されにくい。しかし一定の時間が経つとフェロモンが蒸発し、再び監視される。対象空間内にセンサが均一に分布している場合、どの場所においても、センサの到着間隔がほぼ一定になると考えられる。これを、均一監視特性と呼ぶ。ASSが要求②を満たすためには、この特性を発現する必要がある。

最後に要求③について考える。監視対象空間内で、領域によってフェロモン蒸発速度に差異をつけると、蒸発の速い領域では忌避フェロモンが早く無くなり、センサの到着間隔が短くなることが予想される。特定の領域での到着間隔を制御することができる特性を、重点監視特性と呼ぶ。ASSが要求③を満たすためには、この特性を発現する必要がある。

3.3 評価尺度

ASSが要求①②③を満たす程度を評価するために、初期被覆時間 (first cover time: FCT) と最大到着間隔 (maximum turn-around time: MTT) の、2つの評価尺度を定義する。

FCTは、拡散監視特性がどれだけ有効に発現し、要求①を満たしているかを評価する尺度である。FCT(p)は監視対象空間の面積 S の $p\%$ を被覆 (監視) するまでの最小時間であり、以下の単位被覆関数 $\omega(x, y, t)$ を用いて定義する。

- $\omega(x, y, t) = 1$: 時刻 t において、1つ以上のセンサが、有効監視半径 u 以内に点 (x, y) を含む。
 $\omega(x, y, t) = 0$: 時刻 t において、どのセンサも、有効監視半径 u 以内に点 (x, y) を含まない。

時刻 0 から T までにセンサ群が監視した総面積 $C(T)$ は、

$$C(T) = \sum_{x,y} \max\{\omega(x, y, t) | 0 \leq t \leq T\} \quad (1)$$

と表わされ、 $C(T)$ を用いて、FCT を次で定義する。

・初期被覆時間 (FCT)

$$FCT(p) \stackrel{\text{def}}{=} \min\{t | C(t) \geq S \frac{p}{100}\} \quad (2)$$

FCTが小さいほど、センサ群が監視対象空間に効率よく拡散したことを意味する。

一方のMTTは、要求②と要求③をどれだけ満たしているかをみる尺度であり、次で定義する。

・最大到着間隔 (MTT)

MTT(x, y, T): 定常状態において、区間 $[0, T]$ で、連続して $\omega(x, y, t) = 0$ となる時間幅のなかで最大の値。

MTTの、監視対象内での空間的な標準偏差 $\sigma(\text{MTT})$ をみることによって、要求②を満たす程度を評価することができる。 $\sigma(\text{MTT})$ が小さいほど、対象空間を均一に監視したことを意味する。

さらに、蒸発速度とMTTの空間平均 $\overline{\text{MTT}}$ との関係を知ることで、要求③を満たす程度を評価することができる。 $\overline{\text{MTT}}$ が相対的に小さい領域では、重点的に監視が行なわれたことになる。

4. 実験 I

実験Iでは、個々のセンサエージェントの散布するフェロモンの高さ h と半径 w がどのような値の組みをとるとき、アリ型センサシステムが自律移動型センサシステムへの要求①②を満たすことができるかについて考える。

4.1 仮説

センサ数を N 、監視対象空間の面積を S 、定常状態において1つのセンサから散布されたフェロモンの底面積を S_1 とする。 S_1 は、Fig.3で散布されているフェロモンを、上からみたときの面積に等しい。以下で、散布されるフェロモンの総面積 $N \times S_1$ (NS_1 と記す) と S との比較を考える。

$NS_1 < S$ のとき、フェロモンの蒸発速度が早いために、フェロモンの勾配情報が失われる範囲が多くなり、フェロモンによる情報を有効に利用できない (Fig. 5(a))。こうした現象を散漫と呼ぶ。

逆に $NS_1 > S$ の場合は、フェロモンが過剰に散布されるため、センサ近傍でフェロモンが最大値に達し、勾配情報が失われる可能性が高い (Fig. 5(c))。こうした現象を輻輳と呼ぶ。

散漫・輻輳のどちらも、フェロモンの情報を有効に利用できない状況であり、避けることが望ましい。そして、 $NS_1 = S$ のとき、輻輳・散漫のどちらの状態にも陥ることなく、拡散監視特性と均一監視特性が最も有効に発現すると予想される (Fig. 5(b))。以上の考察から、以下の仮説をたてる。

(仮説) $NS_1 = S$ のとき、FCT と $\sigma(\text{MTT})$ が最小となる。

Fig. 5 The balance between NS_1 and S

Fig. 6 Approximation of pheromone-covered area

これを $NS_1 = S$ の仮説と呼ぶ。ここで、 $NS_1 = S$ の仮説が成り立つとき、フェロモン散布の高さ h と半径 w がどのような関係になるかを考える。センサが直進している場合、 S_1 は、三角形と半円の面積で近似すると、Fig. 6 より、

$$S_1 = Lw + \pi w^2/2 \quad (3)$$

と表わすことができる。ここで L は、散布されたフェロモンの尾の長さである。散布された総フェロモンの断面は、厳密には Fig. 6 に示す通り、その頂点がセンサの位置よりも後方となる。

点 A に初めてフェロモンが散布されてから、蒸発によってフェロモンが無くなるまでの時間は、センサの移動速度が $1[\text{grid}/\text{step}]$ であることから、 $L+w$ で表わすことができる。したがって、A において蒸発するフェロモンの総量は、蒸発速度 d と移動時間 $L+w$ の積で求められる。一方、A に散布されるフェロモンの総量は wh であり、蒸発と散布のフェロモン量は等しいので、次式が成立する。

$$d(L+w) = wh \quad (4)$$

(3) と (4) から L を消去する。

$$S_1 = (\pi/2 + h/d - 1)w^2 \quad (5)$$

ただし、 $h, w, d > 0$

$NS_1 = S$ が成立するとき、 h と w は次式を満たす。

$$N(\pi/2 + h/d - 1)w^2 = S \quad (6)$$

4.2 実験の目的と方法

実験 I の目的は、 $NS_1 = S$ の仮説が成り立つか否かを確かめることである。実験は、計算機シミュレーションによって行なう。監視対象空間は、 50×50 のグリッド ($S = 2500$) で構成し、センサ数 $N = 5$ 、センサの有効監視半径 $u = 5$

および蒸発速度 $d = 1$ にそれぞれ固定し、センサの移動量は $1[\text{step}]$ あたり $1[\text{grid}]$ とする。フェロモン散布の高さ h と半径 w を 1 から 30 までの整数値で変化させ、900 の h と w の組み (以下、パラメータセットと呼ぶ) における初期被覆時間 FCT および、最大到着間隔の標準偏差 $\sigma(\text{MTT})$ の値を測定する。フェロモン場に存在するフェロモン量は整数値で表わし、最大値は 255、最小値は 0 とする。センサの初期配置はランダムに決めた。

以下で、FCT と $\sigma(\text{MTT})$ それぞれの測定方法を示す。なお、(1) と (2) は別々に実験を行なった。

(1) FCT について

最大 $T = 200[\text{step}]$ まで、FCT の測定を行ない、これを 1trial とする。各パラメータセットごとに、100trial の実験を行ない、それらの平均値を、そのパラメータセットでの評価値とする。

(2) $\sigma(\text{MTT})$ について

測定は、初期状態から十分に時間が経過し、定常状態となった時刻から行なう。 $T = 400[\text{step}]$ までの、 $\text{MTT}(x, y; T)$ の空間的な標準偏差 $\sigma(\text{MTT})$ を測定し、これを 1trial とする。各パラメータセットごとに、100trial の実験を行ない、それらの平均値を、そのパラメータセットでの評価値とする。なお、期間 $T[\text{step}]$ の間に、ある領域に一度もセンサが存在しなかった場合は、その領域の $\overline{\text{MTT}}$ を T とする。

4.3 実験結果と考察

4.3.1 FCT とパラメータ h, w

実験 I における FCT(90%) の図 (Fig. 7) から、つぎの結果が得られる。

(a) FCT の値が小さい領域付近では、その値は h よりも w に大きく依存して変化する。

FCT の値は、 h が変化しても安定している。たとえば、 $w = 7$ のときの断面をみると、 $h > 8$ であれば FCT が小さい値で安定している。これに対し h が一定のとき、 w の変化に対して、FCT は大きく増加する。たとえば $h = 15$ のとき、 w が 6 から 11 の間あたりで FCT が小さい値をとり、 w の値がこの範囲から外れると大きく増加する。

ASS が (a) の特徴をもつ理由は、(5) 式において、 S_1 が、 h に関しては 1 次式だが、 w に対しては 2 乗に比例していることから説明できる。

Fig. 8 に、 $h = 15$ に固定し、 p を変化させたときの FCT(p) を示す。Fig. 8 からつぎのことが得られた。

(b) p を大きくするほど、FCT を小さい値に保つために許容できるパラメータ w の範囲は、輻輳側 (w の値が大きい側) から狭まる。

ASS が (b) の特徴をもつ理由は、つぎで説明される。Fig. 9 に示す通り、 w が大きい値では、1 つのセンサから忌避フェロモンが広範囲に散布される。そのため、センサが通った領域付近では、まだ一度も監視されていない場所であっても、十分な時間が経過してフェロモンが蒸発するまでは、センサによる監視が行なわれない場合がある。こうした場所は、 w

Fig. 7 FCT(90%)

Fig. 10 $\sigma(\text{MTT})$ Fig. 8 FCT(p) for $h = 15$

Fig. 9 Pheromon-covered area and motion of sensors

が大きくなるほど多くなる。したがって、 p が大きくなれば、それに伴って許容できる w の範囲が輻輳側から狭くなると考えられる。

4.3.2 $\sigma(\text{MTT})$ とパラメータ h, w

Fig. 10 は、対象空間内における最大到着間隔の標準偏差 $\sigma(\text{MTT})$ と、高さ h および半径 w との関係を示している。これより、つぎの結果が得られる。

(c) $\sigma(\text{MTT})$ の値が小さい領域付近では、 $\sigma(\text{MTT})$ の値は、 h よりも w の変化によって大きく変わる。

これは、 $\sigma(\text{MTT})$ が小さい領域付近に注目すると、 h が変化しても $\sigma(\text{MTT})$ の変化が小さいことを意味する。たとえば $w = 6$ のときの断面をみると、 $h > 9$ であれば $\sigma(\text{MTT})$ は低い値で安定する。これに対し、 h を一定として、 w が $\sigma(\text{MTT})$ を小さな値に保つ範囲から逸脱すると、 $\sigma(\text{MTT})$ は大きく増加する。たとえば $h = 15$ のとき、 $\sigma(\text{MTT})$ が低い値で安定するのは w が 5 から 8 までの間であり、これを

外れると大きく増加する。これらの特徴をもつ理由は、(a) の場合と同様に説明できる。

4.3.3 仮説の妥当性

Fig. 11(a)(b) は、Fig. 7 および Fig. 10 を、それぞれ上からみた等高線図である。図中の 2 次曲線は、 $NS_1 = S$ ((6) 式参照) を満たす高さ h と半径 w のパラメータセットを表わしている。FCT および $\sigma(\text{MTT})$ が最小となる領域がこの 2 次曲線と一致するならば、その領域において $NS_1 = S$ の仮説は妥当であるということが出来る。

Fig. 11(b) より、 $\sigma(\text{MTT})$ が小さい値で安定している領域は、ほぼ 2 次曲線に当てはまることがわかる。したがって $\sigma(\text{MTT})$ については、ほぼ仮説が成り立つとみてよい。

しかし Fig. 11(a) では、放物線よりも右下 (輻輳) 寄りの領域に、FCT の値が小さい部分が集中している。これはつぎで説明できる。FCT の実験は、フェロモン場にフェロモンが全く存在しない状態から行なわれるため、初期状態から $L + w[\text{step}]$ が経過して初めて、Fig. 6 に示す分布状態となる。したがってそれ以前では、1 つのセンサが出すフェロモンの面積は S_1 よりも小さい。この面積の不足を埋めなくてはならないため、若干輻輳寄りの領域 ($NS_1 > S$) に、FCT の値の小さい部分が偏在したものと考えられる。

以上の考察から、仮説の妥当性についてつぎの 2 つがいえ

る。

(d) FCT が小さい値で安定するパラメータセットは、若干輻輳寄りではあるものの、ほぼ仮説の (6) 式に当てはまる。

(e) $\sigma(\text{MTT})$ が小さい値で安定するパラメータセットは、ほぼ仮説の (6) 式に当てはまる。

なお、センサの移動方向をランダムに設定し同条件での実験を行なったところ、FCT(90%) は 200[step] では達せず、 $\sigma(\text{MTT})$ は 112[step] であった。ASS の示す最小値は、FCT(90%) が 81[step]、 $\sigma(\text{MTT})$ が 26[step] であり (Fig. 7, 10)、いずれも ASS のほうが望ましい。

4.4 まとめ

考察 (d) より、ASS が均一監視特性を有効に発現し、要求 ②を満たすためには、仮説の (6) 式に当てはまるパラメータセットよりも、若干輻輳寄りに設定すればよいことがわかつ

Fig. 11 Topographic plots of FCT(90%) and $\sigma(\text{MTT})$

た。また考察(e)より、拡散監視特性を有効に発現し、要求①を満たすためには、 h と w を仮説の(6)式に当てはまる値に設定すればよいことがわかった。

ASSでは、要求①と②はシステムの運用時に継ぎ目無く要求されるものであるため、両方を同時に満足する必要がある。要求①と要求②を同時に満たすための方策としては、つぎの2つが考えられる。

方策1は、要求①②を同時に満足する、 h と w の組みを見つけることである。この方策をとる場合、考察(a)(c)より、 h よりも w の値を慎重に定める必要がある。また考察(b)から、何%の面積まで効率よく拡散する必要があるか、という運用上の制約によって、FCTを最適に保つために許容できるパラメータ w の範囲が変化する。すなわち、方策1をとる場合、 p を何%に設定するかが重要となる。

方策2は、状況に応じて、センサ自身がフェロモンの散布パラメータを変化させることである。たとえば初期状態では w を(6)の示す値よりも輻輳寄りにし、定常状態に入ったと判断した際は、 w を(6)の示す値に戻す、という制御が考えられる。この方策をとる場合、センサが自律的に、初期状態か定常状態かを判断する必要がある。

5. 実験 II

実験IIでは、ASSが要求③を満たすか否かを知るために、監視対象内の領域により危険な状況が異なり、critical timeが同一でない場合を想定する。蒸発速度の制御によって $\overline{\text{MTT}}$ が制御可能であれば、ASSは要求③を満足することになる。そこで、領域間における蒸発速度 d に差異をつけたとき、各領域における最大到着間隔の平均値 $\overline{\text{MTT}}$ がどのように変化するかを調べる。

d がフェロモン場の特性を示すパラメータであるのに対し、 h および w はセンサの特性を示すパラメータである。 h および w は常に一定の値とし、 d に差異をつけるだけで $\overline{\text{MTT}}$ を制御できれば、センサはどの領域に位置していても、常に一定のフェロモンを散布していれば良く、位置情報を知る必要がない。

本実験では、監視対象空間を、Fig. 12に示すとおり、左右2つの領域に分ける。簡単のため、2つの領域の面積は等

Fig. 12 Two areas with different evaporate speeds of pheromone

しいものとする。領域1, 2それぞれにおけるフェロモンの蒸発速度が d_1, d_2 のとき、各領域での最大到着間隔の空間平均 $\overline{\text{MTT}}_1, \overline{\text{MTT}}_2$ がどのように変化するかを考える。

5.1 蒸発速度と $\overline{\text{MTT}}$

領域1, 2において、1つのセンサによって散布されたフェロモンの面積をそれぞれ S_1, S_2 とおく(Fig. 12)。忌避フェロモンの面積が大きい領域は、その面積が小さい領域に比べ、相対的に存在するセンサの数が少なくなると考えられる。たとえばFig. 12の例では、領域2により多くのセンサが集まることになる。

監視対象空間全体でのセンサ数を N とし、領域1, 2において、平均的に存在するセンサ数を N_1, N_2 と仮定する。領域1および2それぞれにおいて、 $N_1 S_1 = S/2$ および $N_2 S_2 = S/2$ の関係が成り立つとき、実験Iから、各領域における $\sigma(\text{MTT})$ が最小となることが予想される。

本実験では、フェロモン散布の高さ h は一定とする。半径 w は、 d_1 および d_2 に対して、適当な N_1, N_2 （ただし $N = N_1 + N_2$ ）が存在して、 $S/2 = N_1 S_1 = N_2 S_2$ の関係が成り立つ値に設定する。ただし w はすべてのセンサに共通の値とする。

領域1, 2に存在するセンサ数が N_1, N_2 であるならば、2つの領域の面積は等しいから $N_1 S_1 = N_2 S_2$ となり、つぎの関係が成り立つ。

$$N_1 : N_2 = S_2 : S_1 \quad (7)$$

一般にセンサ数と $\overline{\text{MTT}}$ は反比例の関係にあると考えられる。この関係が成り立つとき、(5)(7)式から、

$$\frac{\overline{\text{MTT}}_1}{\overline{\text{MTT}}_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{(\pi/2 + h/d_2 - 1)}{(\pi/2 + h/d_1 - 1)} \quad (8)$$

となるから、蒸発速度 d_1 および d_2 によって、各領域に平均的に存在するセンサ数と、領域間の $\overline{\text{MTT}}$ の比を予測できる。

5.2 実験の目的と方法

実験IIでは、(8)式の関係が成り立つかどうかを確かめる。監視対象空間は実験Iと同じ 50×50 のグリッド($S = 2500$)とし、これを領域1(左側半分)と領域2(右側半分)に分ける。実験Iと同様、センサ数 $N = 5$ 、センサの有効監視半

径 $u = 5$ とし、センサの移動量は $1[\text{step}]$ あたり $1[\text{grid}]$ とする。

領域1の蒸発速度 d_1 を1に固定し、領域2の蒸発速度 d_2 を制御変数として、1から5までの整数値で変化させるとき、それぞれのパラメータにおける N_1 と N_2 および、最大到着間隔の空間平均 $\overline{MTT}_1$ と $\overline{MTT}_2$ の値を、計算機シミュレーションによって $T = 2000[\text{step}]$ まで測定し、これを1trialとする。各パラメータごとに100trialの実験を行ない、その平均を評価値とする。なお、期間 $T[\text{step}]$ の間に、ある領域に一度もセンサが存在しなかった場合は、その領域の $\overline{MTT}$ を T とする。

フェロモン散布の高さ h は20に固定する。フェロモン量は0から255までの整数値で表わす。センサの初期配置はランダムに決めた。

5.3 実験結果と考察

N_1 と N_2 の実験値と理論値を Fig. 13 に示す。実験値を示すグラフのエラーバーは、全 trial における実験結果の標準偏差を表わしている。理論値とは、(8) と $N_1 + N_2 = 5$ から計算した値である。理論値と実験値がほぼ一致していることから、 N_1 と N_2 は (8) に示した比で、各領域に平均的に存在していることがわかる。

つぎに、 $\overline{MTT}_1$ と $\overline{MTT}_2$ の実験値を Fig. 14 に示す。 $\overline{MTT}_1$ 、 $\overline{MTT}_2$ の理論値は、 $\overline{MTT}$ がセンサ数に反比例することから、 $d_2 = 1$ のときの実験値に、それぞれ $2.5/N_1$ 、 $2.5/N_2$ (ここで、 N_1 と N_2 は理論値) を乗じた値とした。2.5は、 $d_2 = 1$ のときの、 N_1 および N_2 の理論値である。

Fig. 14 から、 $\overline{MTT}_2$ の実験値は、ほぼ理論値にしたがっていることがわかる。しかし $d_2 \geq 4$ では、 $\overline{MTT}_1$ の実験値が理論値を大きく上回り、標準偏差も著しく大きくなる。これは、 $d_2 \geq 4$ では、 N_1 が1を下回り (Fig. 13)、センサが領域1に全く存在しない時間帯があるためと考えられる。本シミュレーションは、領域1にセンサが1つもない状態では、 $\overline{MTT}_1$ は最大ステップ数 T の値をとる。このため $d_2 \geq 4$ では、 $\overline{MTT}_1$ が理論値を大きく上回ったと考えられる。

5.4 まとめ

蒸発速度 d に差異をつけることで、 $\overline{MTT}$ を制御できることから、ASSは、要求③を満足するシステムということができる。 $\overline{MTT}$ の比の値は、領域内の平均センサ数が1を下回らない限り、ほぼ (8) が成り立つため、全体が同じ蒸発速度のときの $\overline{MTT}$ を基準に、適当な d を領域ごとに決定することができる。ASSを設計する際には、領域内の平均センサ数が1を下回らないよう、 d の値を設定する必要がある。

6. おわりに

本研究では、アリ型センサシステム (ASS) が、監視の信頼性の観点から自律移動型センサシステムに求められる要求①②③を満足するシステムとなりえることを示した。今後は、要求①②を同時に満たすために、4.4節で議論した2つの方策の具体的な実現方法について検討したい。また、実際

Fig. 13 The number of sensors, N_1 and N_2

Fig. 14 $\overline{MTT}_1$ and $\overline{MTT}_2$ versus d_2

の運用環境においては、critical-timeや面積の異なる複数の監視対象領域が混在すると考えられ、こうした場合でも、要求③を満たすことのできるモデルを検討する必要がある。

ASSでは、忌避フェロモンだけを用いるのではなく、誘因フェロモンを用いることで、異常検出時にセンサを1箇所に集めることも可能と考えられる。しかし必要な数だけセンサを集めるためには、誘因フェロモンをどのように散布したらよいかが問題となる。

また、ASSを実現するには、フェロモン場の情報をどのような方法で蓄積し、センサ群がどのような通信手段でその情報にアクセスするかが問題となる。これについては、たとえば、知的データキャリア (Intelligent Data Carriers: IDCs)⁹⁾と呼ばれる、通信・情報処理機能を有する小型の装置を用いる方法が考えられる。IDCsを監視対象領域内の各所に設置し、これらの内部にフェロモン場の情報を分散的に蓄積し、各センサが局所的にIDCsと通信を行なうことで、フェロモン情報の取得・更新を行なうことが可能と考えられる。このとき、フェロモンの情報が分散しても、要求①②③を十分に満足するモデルを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 幸田, 井上, 熊本, 高見: 二つの故障モードをもつ安全監視システムの最適論理構造, 計測自動制御学会論文集, 17-9, 36/41(1981)
- 2) 田中, 伊藤: モデルに起因する誤作動・不作為を考慮したモニ

- タリングシステムの設計, 第30回日科技連信頼性・保全性シンポジウム, 281/286(2000)
- 3) 川村, 山本, 大内: 外部観測に基づく進化的フェロモンコミュニケーションの評価と群知能の創発現象に関する研究, 計測自動制御学会論文集, 37-5, 455/464(2001)
- 4) M.Dorigo and G.D.Caro: Ant Algorithms for Discrete Optimization, Artificial Life, 5-3, 137/172(1999)
- 5) E.Bonabeau, M.Dorigo and G.Theraulaz: Swarm Intelligence, Oxford University Press(1999)
- 6) 北村, 田中, 岸野, 谷内田: Octreeとポテンシャル場を用いた三次元環境での経路探索, 日本ロボット学会誌, 14-8, 1186/1193(1996)
- 7) T.Ishida: Real-Time Search for Learning Autonomous Agents, Kluwer Academic Publishers(1997)
- 8) S.Koenig, B.Szymanski, Y.Liu: Efficient and inefficient ant coverage methods, Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 31, 1-4, 41/76(2001)
- 9) 藤井, 浅間, 倉林, 嘉悦, 遠藤: 知的データキャリアによる群ロボットの機能創発, 日本ロボット学会誌, 17-6, 848/854(1999)

[著者紹介]

石垣 陽

2002年電気通信大学大学院情報システム学研究科情報システム運用学専攻修士課程修了。同年セコム(株)IS研究所入社。ネットワークセキュリティに関する研究に従事。システム安全学と生物機構の工学的応用に興味を持つ。

田中 健次 (正会員)

1982年京都大学理学部数学科卒業, 89年東京工業大学大学院総合理工学研究科システム科学専攻博士課程修了。87年より茨城大学工学部情報工学科助手, 95年電気通信大学大学院情報システム学研究科助教授, 現在に至る。主としてシステム安全学, 信頼性の研究に従事(理学博士)。IEEE-SMC, 人工知能学会, 日本品質管理学会などの会員。

伊藤 誠 (正会員)

1996年筑波大学大学院工学研究科中退, 同年筑波大学先端学際領域研究センター助手, 98年10月電気通信大学大学院情報システム学研究科助手, 2002年より筑波大学電子・情報工学系専任講師。システム安全学を中心に, システムへの信頼と協調, 不確実性下の意思決定などの研究に従事。博士(工学)。第16回井上研究奨励賞受賞。IEEE, 日本品質管理学会などの会員。