# センサネットワークにおけるパラメータ推定を用いた 気体発生源検出のための濃度補間法

# 徳本 晋一郎 滑川 徹 (慶應義塾大学)

#### Interpolation for the Gas Source Detection using the Parameter Estimation in a Sensor Network

#### \*S. Tokumoto, T. Namerikawa (Keio Univ.)

**Abstract**– The purpose of this paper is to detect gas source which exists in the place where sensor is not arranged in the sensor network. For that purpose, interpolation of gas concentration of a strange domain is required. Therefore, we propose a novel algorithm of parameter estimation required for interpolation of gas concentration in a sensor network. Finally the proposed interpolation algorithm for gas concentration is verified via some numerical simulation results.

Key Words: Sensor Network, Parameter Estimation, Interpolation

#### 1 はじめに

近年,複数のセンサノードをネットワークによって結 合するワイヤレスセンサネットワーク(WSN)システ ムについての研究が盛んに行われている<sup>1,2)</sup>. このシ ステムはノード間のネットワークを利用した情報の交 換・最適化を行うことで,広範囲に渡る情報収集への適 用が期待できる.また,WSN は単体のセンサによるセ ンシングと比較して耐故障性,多点情報の収集等の面で 優れていることが知られており<sup>3,4)</sup>,森林火災等の災害 対策,生態系や機構変動の調査といった環境計測,ある いは屋内施設における監視や制御分野への利用の観点 から,社会インフラへの応用が注目されている.

昨年は東日本大震災が発生した.それを受け,日本で は震災に対する開発・研究が現在盛んに行われている. 震災に対する研究は多種多様であるが,その中でも被災 者を救出するロボットであるレスキューロボットに関 する研究が数多く行われている<sup>5)</sup>.本研究の目的はそ のようなレスキューロボットを実現させるためのアプ リケーションを構築することである.

レスキューロボット実現のための研究として、実際に レスキューロボットを動かすハード面の研究と、人間を 検知するシステム構築を行うようなソフト面での開発 が行われており、本稿ではソフト面の人間を検知する アプリケーションについて扱う. そこで本稿では、レス キューロボットのためのアプリケーションとして、CO2 センサによるセンサネットワークを用いた人感を行う. センサネットワークを用いた人感に関する研究は文献 <sup>6,7)</sup> で行われているが、これらの論文では対象となる人 間が、必ずセンサが配置されている位置にいることが必 要になる.しかし、実際の現場ではそのような状況にな るとは断言できない.また文献<sup>6)</sup>では気体の移流拡散 方程式における流速が既知として用いられている.し たがって本稿では、はじめに気体の移流拡散方程式で用 いられる流速をセンサから得られる CO2 濃度から推定 し. その後, 流速を既知として, センサが配置されてい ない場所の CO2 濃度を周囲のセンサから推定すること で、センサが配置されていない場所に人間がいる場合に もその場所を推定する. 最後に、これらのアルゴリズム の有効性をシミュレーションによって検証する.

### 2 問題設定

本研究では Fig. 1 のように CO2 センサを用いたセ ンサネットワークによって人感を行い, 自律走行ロボッ トを誘導することを目的としている. そのために本稿 では, 人がセンサ配置場所にいなくても自律走行ロボッ トを誘導させるため, センサ間の CO2 濃度補間を行い, 人感を行うことが目的である.



Fig. 1: Purpose of Research

最初に問題設定を行う.まずはじめに流体の移流拡 散方程式を(1)式に示す<sup>8)</sup>.ただし、本稿ではFig.2の ように一次元の問題で考えるものとする.



ここで c(x,t) は位置 x, 時刻 t のときの CO2 濃度を 表し,  $s(x,t)/\Delta t$  は位置 x, 時刻 t のときの単位時間あ たりの CO2 発生量を表している. また, u(x,t),  $\alpha(x,t)$ はそれぞれ風速と拡散係数を表している. 以降ではそ れぞれ u,  $\alpha$  と表記することとする. この移流拡散方程 式を状態空間表現にするために,差分法による近似を行う.本稿で用いる差分法は風上差分法を使用することとする.

ここで風上差分法について (2)~(4) 式に示す.

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = \frac{c(x,t+\Delta t) - c(x,t)}{\Delta t}$$
(2)

$$\begin{cases} \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} = \frac{c(x,t) - c(x - \Delta x,t)}{\Delta x} & (u \ge 0) \\ \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} = \frac{c(x + \Delta x,t) - c(x,t)}{\Delta x} & (u < 0) \end{cases}$$
(3)

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\Delta x^2} \{ c(x + \Delta x, t) - 2c(x,t) + c(x - \Delta x, t) \}$$
(4)

(2)~(4) 式を用いて(1) 式を近似する.すると以下のようになる.

$$c(x,t+\Delta t) = \left(1 - |u|\frac{\Delta t}{\Delta x} - 2\alpha\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\right)c(x,t) \\ + \left\{\frac{\Delta t}{2\Delta x}(|u|-u) + \alpha\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\right\}c(x+\Delta x,t) \\ + \left\{\frac{\Delta t}{2\Delta x}(|u|+u) + \alpha\frac{\Delta t}{\Delta x^2}\right\}c(x-\Delta x,t) \\ + s(x,t)$$
(5)

後の表記を簡略化するために, (5) 式を以下のように置き換える.

$$c(x, t + \Delta t) = X_t c(x, t) + Y_t c(x + \Delta x, t) + Z_t c(x - \Delta x, t) + s(x, t)$$
(6)

(6) 式を離散時間の状態方程式に書き換えると、以下のようになる.

$$x_{k+1} = A_k x_k + s_k + w_k \tag{7}$$

ただし、(6) 式で t は時刻を表していたのに対し、(7) 式 において k はステップを表している. またセンサによ る観測出力は以下のように書ける.

$$y_k = x_k + v_k \tag{8}$$

ここで,  $x_k = [c(1,k), c(2,k), \dots, c(N,k)]^T \in \mathbb{R}^N$ ,  $y_k = [y^1(k), y^2(k), \dots y^N(k)]^T \in \mathbb{R}^N$ であり,  $y^i(k)$ は 時刻 k のときのセンサ i での観測値を表している. また  $A_k \in \mathbb{R}^{N \times N}$ となる行列であり, Nはセンサ数を表 している.

発生源による気体の発生量は以下のような離散時間 線形システムで表されるものとする.

$$s_{k+1} = s_k + h_k \tag{9}$$

 $s_k = [s(1,k), s(2,k), \ldots, s(N,k)]^T \in \mathbb{R}^N$ である. ここで $w_k \in \mathbb{R}^N, v_k \in \mathbb{R}^n, h_k \in \mathbb{R}^N$ はそれぞれ雑音を表している.

ここで以下のような仮定をおく.

仮定 1.  $w_k$ ,  $v_k$ ,  $h_k$  は (10), (11) 式を満たす平均 0 の ガウス性白色雑音である.

$$E\left\{ \begin{bmatrix} w_k \\ v_k \\ h_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_k^T & v_k^T & h_k^T \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} W & 0 & 0 \\ 0 & V & 0 \\ 0 & 0 & H \end{bmatrix}$$
(10)  
$$E\{w_k x_0^T\} = 0, \ E\{v_k x_0^T\} = 0, \ E\{h_k x_0^T\} = 0$$
(11)

ここで, x<sub>0</sub> は状態の初期値を表している.

ここで簡単な例を示す.以下のような一次元の領 域を考えるとする.



ここでセンサが各点に配置してあり,気体発生源が2 の場所で*S*だけ発生して,他の場所では発生していな いものとする.すると(7),(8)式はそれぞれ(12),(13) 式に対応する.

$$\begin{bmatrix} c(1, k+1) \\ c(2, k+1) \\ c(3, k+1) \\ c(4, k+1) \\ c(5, k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_k & Y_k & 0 & 0 & 0 \\ Z_k & X_k & Y_k & 0 & 0 \\ 0 & Z_k & X_k & Y_k & 0 \\ 0 & 0 & Z_k & X_k & Y_k \\ 0 & 0 & 0 & Z_k & X_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c(1, k) \\ c(2, k) \\ c(3, k) \\ c(4, k) \\ c(5, k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ S \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ S \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1(k) \\ w_2(k) \\ w_3(k) \\ w_4(k) \\ w_5(k) \end{bmatrix} (12)$$

$$\begin{bmatrix} y^{1}(k) \\ y^{2}(k) \\ y^{3}(k) \\ y^{4}(k) \\ y^{5}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(1,k) \\ c(2,k) \\ c(3,k) \\ c(4,k) \\ c(5,k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{1}(k) \\ v_{2}(k) \\ v_{3}(k) \\ v_{4}(k) \\ v_{5}(k) \end{bmatrix}$$
(13)

ここで (12) 式において, c(2, k) について見てみると,

$$c(2, k+1) = Zc(1, k) + Xc(2, k) + Yc(3, k) +S + w_2(k)$$
(14)

となり、この式の持つ意味としては、ある位置における 濃度は1ステップ前の隣の濃度値とその位置での濃度 値、さらにその位置で発生している発生量に依存すると いうことである.

# 3 カルマンフィルタを用いたパラメータ推定 3.1 パラメータ推定アルゴリズム

気体濃度補間のためには、前章で示した流速に依存す るパラメータ  $X_k$ ,  $Y_k$ ,  $Z_k$  の推定が必要となる. した がって本節ではパラメータ  $X_k$ ,  $Y_k$ ,  $Z_k$  の推定を行う. まず以下のような仮定をおく.

仮定 2. 観測雑音は無視できるものとする.

仮定 2 が成り立つとすると、(8) 式より  $y_k = x_k$  となる. この仮定のもとで、(7) 式を書き換えると以下のようになる.

$$y_k = Q_k p_k + s_k + w_k \tag{15}$$

ここで  $p_k = [X_k \ Y_k \ Z_k]^T \in \mathbb{R}^3$  であり、以下の離散時間線形システムで表されるものとする.

$$p_{k+1} = p_k + g_k \tag{16}$$

ここで  $g_k$  は平均 0, 共分散行列  $G \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  のガウス性 白色雑音であるものとする.  $Q_k \in \mathbb{R}^{N \times 3}$  は以下のよう な要素を持つ行列を示している.

$$Q_{k} = \begin{bmatrix} y^{1}(k-1) & y^{2}(k-1) & 0 \\ y^{2}(k-1) & \vdots & y^{1}(k-1) \\ \vdots & y^{N}(k-1) & \vdots \\ y^{N}(k-1) & 0 & y^{N-1}(k-1) \end{bmatrix}$$
(17)

(9), (15), (16) 式を変形させると以下のように変形する ことが出来る.

$$\begin{bmatrix} p_{k+1} \\ s_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_k \\ s_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_k \\ h_k \end{bmatrix}$$
(18)

$$y_k = \begin{bmatrix} Q_k & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_k \\ s_k \end{bmatrix} + w_k \qquad (19)$$

ここで (18), (19) 式で  $Q'_k = [Q_k \ I]$  とおき, カルマン フィルタに適用すると, (20) ~ (24) 式のようになる <sup>9</sup>.

$$\begin{bmatrix} \hat{p}_{k+1|k} \\ \hat{s}_{k+1|k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{p}_{k|k} \\ \hat{s}_{k|k} \end{bmatrix}$$
(20)
$$\begin{bmatrix} \hat{p}_{k|k} \\ \hat{s}_{k|k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{p}_{k|k-1} \\ \hat{s}_{k|k-1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \langle k \\ s | k \\ \end{cases} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_k | k^{-1} \\ \hat{s}_k | k^{-1} \end{bmatrix} \\ - K_k \left( y_k - Q'_k \begin{bmatrix} \hat{p}_k | k^{-1} \\ \hat{s}_k | k^{-1} \end{bmatrix} \right)$$
(21)

$$P_{k+1|k} = P_{k|k} + \begin{bmatrix} G & 0\\ 0 & H \end{bmatrix}$$
(22)

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_k Q'_k P_{k|k-1}$$
(23)

$$K_{k} = P_{k|k-1}Q'_{k} \left| Q'^{T}_{k} P_{k|k-1}Q'^{T}_{k} + W \right| \quad (24)$$

ここで、 $\hat{p}_{k+1|k}$  はカルマンフィルタによる  $p_k$  の推定値、  $\hat{p}_{k|k}$  は更新値を表している。 $\hat{s}_{k+1|k}$ 、 $\hat{s}_{k|k}$  も同様である. この (20) ~ (24) 式を用いることで状態推定を行うこ

とが出来る.また (18), (19) 式のように変形を行うこ とで, 流速に依存するパラメータ  $p_k$ を推定すると共に, 未知である気体発生量  $s_k$ の推定を行うことが出来る. 3.2 シミュレーション検証

本節では前節で示したカルマンフィルタを用いたパ ラメータ推定アルゴリズムによるシミュレーション検 証を行う.

考える問題は以下のような問題設定であるものとする. source





センサが Fig. 4 のように 28 個配置されており, セン サ間隔は Δ*x* であるものとする. また発生源は 18 の位 置で時刻 200[*s*] 以降で発生させ続けるものとする. 以下にシミュレーションに用いるパラメータを示す.

 Table 1: Simulation Parameters

Parameter	Symbol	Value
Number of Sensor	N	28
Dispersion Coefficients	α	$0.1[m^2/s]$
Sensor Interval	$\Delta x$	1[m]
Sampling Time	$\Delta t$	1[s]
System Noise	$w_k$	$\mathcal{N}(0, 1e-3*I_{28})$
Observation Noise	$v_k$	$\mathcal{N}(0, 1e-3*I_{28})$
Parameter Noise	$g_k$	$\mathcal{N}(0, 5e-4*I_3)$
Emergence Noise	$h_k$	$\mathcal{N}(0, 1e-3*I_{28})$
Amount of Emergence	s(18, k)	$\overline{50}$

ここで,  $I_m$  は  $m \times m$  の単位行列を表す. また風速は以下のような時系列を持つものとする.



Fig. 5: True Value(Wind Speed)

ここで風速が負になっている部分があるが、これは風向きが左向きのときは負であり、右向きのときは正である.

それではシミュレーション結果を示す. まず各センサでの濃度変化の時系列を以下に示す.



Fig. 6: Gas Concentration

また以下に風速に依存するパラメータ $X_k, Y_k, Z_k$ の新 値と推定値を示す.



Fig. 12: Estimation $(Z_k)$ 

ここでさらに分かりやすくするために、推定されたパ ラメータから風速を計算し、風速の推定値を以下に示 す.計算方法は以下の手法により行った.

$$Y = \frac{\Delta t}{2\Delta x} (|u| - u) + \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$
(25)

$$Z = \frac{\Delta t}{2\Delta x}(|u|+u) + \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$
(26)

となるので、風速 u は以下の式で導出することが出来る.

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} (Z - Y) \tag{27}$$

この式を用いて風速 *u* の推定値 *û* の計算を行った. 結 果を以下に示す.



Fig. 13: Estimation(Wind Speed)

さらに発生量の真値  $s_k$  と推定値  $\hat{s}_k$  についても示す.



ここでシミュレーション結果について考察する. Fig. 7~Fig. 12を見ると、ある程度時間が経つとうまく推 定されていることが分かる. また Fig. 5 と Fig. 13 を 比べても推定が出来ていることが分かる.同様に発生 量 *sk* についても Fig. 14 と Fig. 15 を比べると時間が 経つにつれて推定がうまく出来ている.

#### 気体濃度補間法 4

本章では気体濃度の補間法について述べる.

未知領域の濃度補間法 4.1

前章でパラメータを推定することで,流速の推定を行 なったので、ここでは仮定として以下の仮定をおく.

仮定 3. 風速は既知である.

仮定3のもとで、補間を考える.ただし、本稿で紹介 する手法では雑音を考慮することができないため、雑音 を無視して考えるものとする.

ここで以下のようなシチュエーションを考える.



Fig. 16 において j - 2, j + 1 の場所ではセンサが配 置されており、CO2 濃度が既知であるものとする. j, j-1における移流拡散方程式を考える. それぞれの 場所で(6)式に当てはめると、以下のような式になる. ただしここではs(x,t)は未知の項であるため、ここで は無視する.

$$c(j, t + \Delta t) = Xc(j, t) + Yc(j + 1, t) + Zc(j - 1, t)$$
(28)  
$$c(j - 1, t + \Delta t) = Xc(j - 1, t) + Yc(j, t) + Zc(j - 2, t)$$
(29)

ここで CO2 濃度は定常状態であるものとする. 式で表 すと  $c(x,t+\Delta t) = c(x,t)$  となる. c(x,t) = c(x) と書 き換えると、以下のようになる.

$$c(j) = Xc(j) + Yc(j+1) + Zc(j-1)$$
(30)

$$c(j-1) = Xc(j-1) + Yc(j) + Zc(j-2)$$
(31)

左辺に c(j), (j-1) の項, 右辺にそれ以外の項を集める と次のようになる.

$$(1 - X)c(j) - Zc(j - 1) = Yc(j + 1)$$
(32)

$$-Yc(j) + (1 - X)c(j - 1) = Zc(j - 2)$$
(33)

X + Y + Z = 1の関係が成り立つので、連立方程式を 解くとc(j), (j-1)は以下のように求まる.

$$c(j) = \frac{Y^2 + YZ}{Y^2 + YZ + Z^2}c(j+1) + \frac{Z^2}{Y^2 + YZ + Z^2}c(j-2) \quad (34)$$

$$c(j-1) = \frac{Y^2}{Y^2 + YZ + Z^2}c(j+1) + \frac{YZ + Z^2}{Y^2 + YZ + Z^2}c(j-2) \quad (35)$$

となる. これらの式よりセンサ間の状態 (CO2 濃度) を補間することができる. ここで補間された値 c(j), c(j-1)をそれぞれ I(j), I(j-1)とおくこととする. **4.2** シミュレーション検証

本節では前節で示した未知領域の濃度補間法を用い たシミュレーション検証を行う.

考える問題は以下のような一次元の問題設定であるとする.



Fig. 17: Problem Formulation

ここで赤丸の場所にセンサが配置されており,発生源は 18の場合と19の場合でそれぞれ17と18の位置での 気体濃度の補間を行なった.

シミュレーションに用いるパラメータは以下のように設定するものとする.

Parameter	Symbol	Value
Number of Sensor	N	10
Number of State	n	28
Dispersion Coefficient	$\alpha$	$0.1[m^2/s]$
Wind Speed	u	0.05[m/s]
Sensor Interval	$3\Delta x$	3[m]
Sampling Time	$\Delta t$	1[s]
System Noise	$w_k$	$\mathcal{N}(0, 1^*I_{28})$
Observation Noise	$v_k$	$\mathcal{N}(0, 0.1^* I_{10})$
Emergence Noise	$h_k$	$\mathcal{N}(0,10^*I_{28})$

Table 2: Simulation Parameters

ただし発生源は 18 の場合と 19 の場合, 共に 50 の量を 発生させた. 発生源が 18 のときと 19 のときのシミュ レーション結果をそれぞれ Fig. 18~Fig. 21 に示した. (a) 発生源位置が 19 の位置の場合



発生源が19のときのFig. 18とFig. 19を見ると, うまく補間されていることが分かる.一方,発生源が 18にあるときは補間が出来ていないことが分かる.つ まり,発生源がセンサ位置にある場合はうまく補間する ことができるが,そうでない場合には補間を行うことが できない.

4.3 修正濃度補間法

前節のシミュレーションで示したように,発生源がセンサの配置されていない場所にある場合には補間がうまく行えないことが分かった.これを受け,本節ではセンサが配置されていない場所に発生源がある場合の補間法を提案する.

本節で扱う手法としては、閾値を用いて発生源であ るかどうかを判定するというものである.

以下に修正濃度補間法の手順を示す.

Step 1. 補間された I(j), I(j+2)を用いて  $Xc(j+1) + YI(j+2) + ZI(j) = c^*(j+1)$ により計算される  $c^*(j+1)$ を計算し,  $c(j+1) - c^*(j+1)$ から  $\hat{s}(j+1)$ を導出する. ここで観測雑音は無視できると仮定して あるので, c(j+1)の値はセンサによって既知である. もし j+1が発生源の位置であるならば, この  $\hat{s}(j+1)$ が発生量となる. ここで以下のような閾値による判定 を行う.

もし $\hat{s}(j+1)$ が以下のような閾値内に入るならば, j+1が発生源位置となる.

$$s_{min} \le \hat{s}(j+1) \le s_{max} \tag{36}$$

ここで  $s_{min}, s_{max}$  はあらかじめ決めておく設計パラ メータである.

もし $\hat{s}(j+1)$ が上記の式を満たさなければ,j+1は 発生源位置ではないと判断し,次のステップに進む.



Fig. 22: Interpolation Algorithm(Step 1)

Step 2. ここで j が発生源位置であると仮定すると c(j+1) = Xc(j+1) + Yc(j+2) + Zc(j) が成り立つ ので, この式から c(j) の補間値 I'(j) を求めると, 以下 のようになる.

$$I'(j) = \frac{(1-X)c(j+1) - YI(j+2)}{Z}$$
(37)

また発生源の発生量  $\hat{s}(j)$  を含んだ場合の (34) に対応 する式を導出すると以下のようになる.

$$I'(j) = \frac{Y^2 + YZ}{Y^2 + YZ + Z^2}c(j+1)$$
(38)

$$+ \frac{Z^{2}}{Y^{2} + YZ + Z^{2}}c(j-2) + \frac{Y+Z}{Y^{2} + YZ + Z^{2}}\hat{s}(j)$$
(39)

となり, ここで

$$\frac{Y^2 + YZ}{Y^2 + YZ + Z^2}c(j+1) + \frac{Z^2}{Y^2 + YZ + Z^2}c(j-2) = I(j) (40)$$

が成り立つので,

$$I'(j) - I(j) = \frac{Y + Z}{Y^2 + YZ + Z^2}\hat{s}(j)$$
(41)

となる. この式より  $\hat{s}(j)$  を求めることが出来る. 先ほどと同様に閾値  $s_{min}$ ,  $s_{max}$  により発生源かどうか を判断し, 閾値内に入っていれば j が発生源位置とな る. そうでなければステップ 3 に進む.



Fig. 23: Interpolation Algorithm(Step 2)

#### **Step 3.** ステップ 2 と同様に j + 2 について発生量 を計算し, 閾値判定を行う. 尚も当てはまらなければ, j+3, j-1 にも同様の操作を行う.

#### 4.4 シミュレーション検証

本節では前節で示した修正濃度補間法を用いたシミュ レーション検証を示す. パラメータは Table 2 と同じも のを用いる. ただし  $s_{min}$ ,  $s_{max}$  はそれぞれ  $s_{min} = 45$ ,  $s_{max} = 55$  とした.



シミュレーション結果を見ると分かるように、補間が 行えていることが分かる.

#### 5 おわりに

本稿ではレスキューロボット誘導のためのアプリケー ションとして、CO2 センサを用いたセンサネットワー クによって人感を行うことを目的としていた.センサ ネットワークによる人感の研究として、文献<sup>6)</sup>では風 速が既知の場合にのみ人感を行えたが、本稿でははじめ に風速を推定することで、風速が未知の場合にも人感を 行えるアルゴリズムを考案した.また人感を行う上で、 従来は人間がセンサの配置されている場所にいる場合 のみ行えたが、本稿では閾値を用いた判定を行うことに より、センサが配置されていない場所に人間がいる場合 にも人感を行える手法を考案した.

そしてそれぞれの手法を数値シミュレーションによっ て検証し、本稿の手法が有効であることを示した.

#### 参考文献

- 1) 安藤,田村,戸部,南:センサネットワーク技術,東京電 機大学出版局 (2007)
- 2) 飯野,畑中,藤田:センサネットワークと制御理論,計測 と制御,47-8,649/656 (2008)
- 3) K. Kosugi, S. Tokumoto and T. Namerikawa, "Faulttolerant Sensor Network based on Fault Evaluation Matrix and Conpensation for Intermittent Observation.", Proc. of 51st IEEE Conf. on Decision and Control, (2012) (to be published)
- 4) 小杉, 滑川:近傍比較戦略に基づく異種混合センサスケジューリング,計測自動制御学会論文集, 47-8, 329/336 (2011)
- 5) 田所 諭, "レスキューロボットの技術チャレンジ", ロ ボット学会誌, 28-2, 134/137, (2010).
- 6) J. E. Weimer, B. Sinopoli, B. H. Krogh, "Multiple source detection and localization in advectiondiffusion processes using wireless sensor networks.", 30th, *IEEE Real-Time Systems Symposium*, 333/342, (2009)
- 7) J. E. Weimer, B. Sinopoli, B. H. Krogh, "A relaxation approach to dynamic sensor selection in largescale wireless sensor networks." *Proceeding of IEEE International Conference on Distributed Computing* Systems, 501/506, (2008)
- 8) 棚橋 隆彦," はじめての CFD -移流拡散方程式-"コロ ナ社, (1996)
- 9) 片山 徹, "新版応用カルマンフィルタ", 朝倉書店, (2000)