

学籍番号	10674040	氏名	前田 祐樹
論文題目	多点観測型移動ターゲット捕捉センサネットワークの性能解析に関する研究		

## 1 はじめに

センサネットワークを利用したアプリケーションの1つに移動ターゲット捕捉システムがある。これまで、センサノードの省電力化のために捕捉可能・通信可能・待機の3状態を有することを想定し、メッセージ送受信によって自動的に捕捉可能状態に遷移して複数ノードがターゲットを捕捉するアルゴリズムの提案と捕捉性能や消費電力性能のシミュレーション評価が行われている [1]。しかし、各性能の理論的な検証はされていない。本研究では、センサノードが RIS(Random Independent Sleeping) にしたがって状態遷移すると仮定し、ターゲット静止時の捕捉率、遷移確率を理論的に導出する。さらに、ターゲット移動時にノードの遷移確率が各性能に及ぼす影響を評価することにより、メッセージ交換による捕捉アルゴリズムの改善手法について検討する。

## 2 想定センサネットワーク

### 2.1 センサノードモデル

センサノードは RIS に従い Active, Sleep の2状態を周期  $T[s]$  毎に確率的に遷移するモデルを想定し、Active であるとき  $r[m]$  以内のターゲットの有無のみを検知可能とする。ターゲットとノード間距離  $d[m]$  が  $r$  より大きい場合、ターゲットを検知不可能であるため、省電力化を考慮すると状態遷移確率  $p = 0$  とすることが望ましい。したがって、 $p = p(d, r)$  とする。

### 2.2 配置とパラメータ

ノードは密度  $\lambda[\text{個}/m^2]$  の二次元ポアソン分布にしたがって配置され、ターゲットの移動速度  $v[m/s]$ 、捕捉に必要なノード数  $k[\text{個}]$ 、ターゲットとノード間距離  $d[m]$  は各ノードで既知とする。ここで、距離  $d$  に関して以下を定義する。

- ターゲットを中心とした半径  $d$  の面積:  $S_d[m^2] = \pi d^2$
  - 領域  $S_d$  内の平均ノード数:  $n_d[\text{個}] = \lambda S_d$
- また、センシング半径  $r$  についても同様に定義する。
- ターゲットを中心とした半径  $r$  の面積:  $S_r[m^2] = \pi r^2$
  - 領域  $S_r$  内の平均ノード数:  $n_r[\text{個}] = \lambda S_r$

ここで、領域  $S_r$  内の平均 Active ノード数を  $n_a(\leq n_r)$  とする。

## 3 ターゲット静止時の捕捉率及び遷移確率の導出

### 3.1 捕捉率 $P_m$

領域  $S_r$  に Active ノードが  $k$  個以上存在すれば捕捉成功であり、その確率を捕捉率  $P_m$  と定義する。ノードはポアソン分布に従って配置されるため、 $P_m$  は  $n_a$  を用いて以下のように導出される。

$$P_m = 1 - \sum_{x=0}^{k-1} P(X(S_r) = x) = 1 - \sum_{x=0}^{k-1} \frac{n_a^x}{x!} e^{-n_a} \quad (1)$$

$n_a$  は領域  $S_r$  内のノードの遷移確率  $p$  より求まる。2.1 で  $p = p(d, r)$  としているが、さらに 2.2 の関係から  $p(n_d, n_r)$  と再定義し、以下により求まる。

$$n_a = \int_0^{n_r} p(n_d, n_r) dn_d \quad (2)$$

### 3.2 省電力性能を考慮した遷移確率 $p(n_d, n_r)$

領域  $S_r$  内の全ノードが Active のときの捕捉率を最大捕捉率  $P_{m,max}$  と定義する。しかし、例えば  $k = 1$  で  $P_m = 0.99$  程度を実現したい場合、(1) より  $n_a \approx 4.6$  となるため、 $p(n_d, n_r)$  を以下のようにターゲットまでの距離  $d$ (内に存在する平均ノード数  $n_d$ ) に応じて設定することで省電力効果が期待できる。

$$p(n_d, n_r) = \begin{cases} 1, & n_d \leq \min(4.6, n_r) \\ 0, & n_d > \min(4.6, n_r) \end{cases} \quad (3)$$

(3) を満たす環境下において、 $P_m$  の理論値とシミュレーション値を図 1 に示す。両者が一致しており、 $n_r \geq 4.6$  において  $P_m = 0.99$  を実現しているため導出式の妥当性が確認できる。さらに全ノードを Active とする場合と比較して省電力効果も期待できることがわかる。

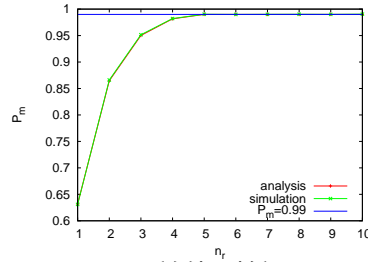


図 1: 理論値の検証

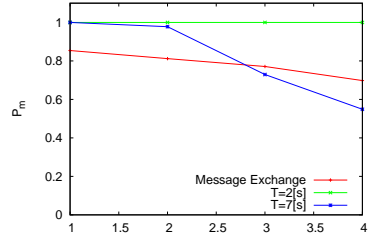


図 3:  $P_m - v$  特性

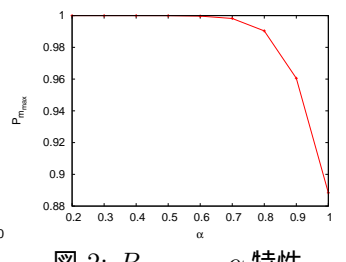


図 2:  $P_{m,max} - \alpha$  特性

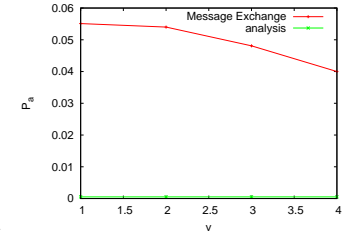


図 4:  $P_a - v$  特性

## 4 ターゲット移動時の性能

移動ターゲットを追従して捕捉するため各ノードは周期  $T$  毎に状態を決定するものと仮定する。ターゲットが速度  $v[m/s]$  で等速移動する場合、1 周期あたりの移動距離  $vT$  と各ノードのセンシングエリア径  $2r$  との比率が各性能に影響することになる。そこで、正規化移動距離  $\alpha = \frac{vT}{2r}$  を定義し、 $\alpha$  に対する  $P_{m,max}$  の影響を調査する。 $k = 1$ ,  $\lambda = 1$ ,  $r = 2.5$ ,  $T = 2$  とし、 $\alpha$  に対する  $P_{m,max}$  を図 2 に示す。この図より  $\alpha$  の増加により  $P_{m,max}$  が減少しているが、この特性が捕捉性能の上限を示すことになる。

## 5 既存方式との比較及び改善方法の検討

[1] のメッセージ交換による捕捉アルゴリズムの性能と理論的な上限値を比較する。図 3 にターゲットの移動速度  $v$  に対する捕捉性能、図 4 に省電力性能  $P_a$  を示す。ここで、 $P_a$  は全センサノードに対する Active ノード数の割合と定義する。図 3 から周期  $T = 7[s]$  のとき  $v$  の増加により  $P_m$  が小さくなり、 $v \geq 3$  において [1] を下回るが、これは  $\alpha$  が大きくなったことが原因である。それに対し、 $T = 2[s]$  とした場合、 $v = 4$  においても  $\alpha$  が小さいため、捕捉率はほぼ 1 を維持する。よって、ターゲット速度  $v$  に対して適切な状態遷移周期を設定することで捕捉性能は向上することがわかる。また、図 4 より省電力性能は  $v$  や  $T$  に影響されず同じ値をとり、1/50 程度に改善可能であることがわかる。

既存アルゴリズムは各ノードがメッセージの受信状況のみで状態を決定しているためターゲットの位置を把握していない。しかし、各ノードが他ノードの位置を既知とした場合、位置情報をメッセージに追加することでメッセージ受信ノードはターゲット位置を推定でき、その位置情報を状態決定に利用することで各性能を向上できると考えられる。

## 6 まとめ

ターゲット静止時の捕捉性能を理論的に導出し、移動時に適用した際の理論上の最大値を確認した。そして、具体的な方式と比較することで従来アルゴリズムの改善方法に関する指針を示した。

### 参考文献

- [1] 長野俊祐 他, "ターゲット捕捉センサネットワークにおける移動予測型アルゴリズムの提案と性能評価", 情報処理学会火の国シンポジウム 2008

### 研究業績

- 前田祐樹 他, "多点観測型移動ターゲット捕捉センサネットワークの性能解析", IN 研究会, 2012 年 3 月. 発表予定