

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22700070

研究課題名（和文）

遅延耐性ネットワークにおける相対的な時刻同期方式の確立

研究課題名（英文）

Relative clock synchronization in Delay Tolerant Network

研究代表者

笹部 昌弘 (SASABE MASAHIRO)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：10379109

研究成果の概要（和文）：遅延耐性ネットワークではノード間の安定したコネクションが存在しないことから、基準となる時刻（参照時刻）をノード間に拡散するような従来型とは異なる時刻同期方式が必要となる。本研究では、移動端末同士が遭遇時に互いの時刻の平均へと時計を調整する平均法に基づく時刻同期方式を確立した。収束時の同期精度・収束速度と端末のクロック精度・端末間の遭遇率との関係を数学的に明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In delay tolerant networks, global clock synchronization among nodes is a challenging problem because reference clock information cannot be disseminated promptly over nodes due to the lack of stable connections among nodes. We proposed averaging-based algorithms for distributed global clock synchronization, where two mobile nodes exchange their local clock times when they meet and adjust their own clocks to the average of them. We further conducted the continuous-time analysis and revealed how the clock accuracy of nodes and meeting rates among them affect the rate of convergence to the steady state and the accuracy of clock synchronization in steady state.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：計算機システム・ネットワーク

キーワード：時刻同期，平均法，遅延耐性ネットワーク，DTN，疎密度モバイルアドホック網

## 1. 研究開始当初の背景

惑星間インターネット，生態系調査のためのセンサネットワーク，災害発生時の緊急用ネットワークなど，有線による通信インフラの構築が困難な状況に置けるネットワークング技術として，遅延耐性ネットワーク(DTN:

Delay Tolerant Network)や疎密度モバイルアドホック網(MANET: Mobile Ad Hoc Network)への期待が高まっている。このようなネットワークでは，各ノードが通信可能な時間帯や相手先が限られており，現在のインターネットのようなエンド-エンド間での常

時通信がほぼ不可能である。そのため、このような常時通信を前提とした TCP/IP はうまく機能せず、代わりに移動端末によるデータの運搬を考慮に入れた、蓄積運搬転送型通信技術が用いられる。このとき、ネットワーク内の端末間で時刻の同期がとれていない場合、データ転送時の有効期限の判定が行えないなど通信そのものの実現が困難になるだけでなく、送信元エンド端末において発生した情報の発生時刻を受信先エンド端末で把握できないため、アプリケーションレベルでも問題が生じる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、DTN や疎密度 MANET における時刻同期方式の確立である。前述のように、これらのネットワークでは移動端末間の間欠的な通信が基盤となっている。このような状況では、NTP (Network Time Protocol) に代表される、特定のサーバから参照時刻を拡散する方式は不向きである。この問題に対し、本研究では分散型平均法に基づく時刻同期を確立するとともに、収束速度や収束時の同期精度など基本的な特性を理論的解析とシミュレーション評価により明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究ではまず、二つの移動端末が遭遇した際に、互いの時刻情報を交換し、それらの平均値にそれぞれの時計を調整するという、単純平均法について検討を進めた。なお、この方式は近年コンセンサスアルゴリズムの一種として注目されている。単純平均法に基づく時刻同期に対して、達成可能な同期の精度と同期が達成されるまでに要する時間（収束時間）を解析により導出する。また、解析の妥当性をシミュレーション評価と比較することで検証し、さらに、実世界で観測された人と人との遭遇に関するトレースデータを用いた評価を通して、単純平均法に基づく時刻同期方式の実用性についても検証する。

## 4. 研究成果

### (1) 解析

閉領域内に 1 から  $N$  までの  $N$  個の移動端末の集合  $\mathcal{N}$  が存在すると仮定する。端末  $k$  のクロック速度を  $\rho_k$ 、オフセットを  $\phi_k$  とする。端末  $k$  の時刻  $t$  におけるローカル時刻を  $c_k(t)$  とする。  $c_k(0) = \phi_k$  である。また、  $(t_1, t_2]$  の間に端末  $k$  の時計が調整されない場合、  $c_k(t_2) = \rho_k(t_2 - t_1) + c_k(t_1)$  となる。

一方、端末  $k$  と端末  $j$  が時刻  $t = \tau$  に遭遇した場合、両者はそれぞれの時計をそれぞれのローカル時刻の平均に設定する。

$$c_k(\tau) = c_j(\tau) = \frac{c_k(\tau-) + c_j(\tau-)}{2}$$

ここで、システムの参照時刻を全端末の平均時刻として定義する。

$$c^*(t) = \frac{1}{N} \sum_{k \in \mathcal{N}} c_k(t) = \bar{\rho}t + \bar{\phi},$$

ただし、

$$\bar{\rho} = \frac{1}{N} \sum_{k \in \mathcal{N}} \rho_k, \quad \bar{\phi} = \frac{1}{N} \sum_{k \in \mathcal{N}} \phi_k.$$

である。

なお、単純平均の操作が加わっても参照時刻は変化しない。

本研究では、各端末が参照時刻へとローカル時刻を近づけることでシステム内で相対的な時刻同期を取ることを目指す。端末  $k$  のクロック速度と参照時刻のクロック速度との差は次式で表される。

$$s_k = \rho_k - \bar{\rho}.$$

また、端末  $k$  のローカル時刻と参照時刻の差（時刻差）は次式で表される。

$$X_k(t) = c_k(t) - c^*(t).$$

端末  $k$  と端末  $j$  の遭遇は率  $\lambda_{k,j}$  の独立なポワソン過程に従うものとする。端末  $k$  が他の全ての端末と遭遇する率は次式で表される。

$$\lambda_k = \sum_{\substack{j \in \mathcal{N} \\ j \neq k}} \lambda_{k,j}, \quad k \in \mathcal{N}.$$

ここで、 $k$  番目の対角要素を  $-\lambda_k$ 、 $(k, j)$  の非対角要素を  $\lambda_{k,j}$  とする行列  $\Lambda$  を定義すると、この行列は連続時間マルコフ連鎖の無限小生成作用素となる。以上の設定を対象に解析を行った結果、端末  $k$  の時刻差  $X_k(t)$  の期待値（1 次積率）  $E[X_k(t)]$  と 2 次積率  $E[X_k^2(t)]$  を得ることができた。  $E[X_k(t)]$  を  $k$  番目の要素を持つ  $N \times 1$  のベクトルを  $\mathbf{x}^{(1)}(t)$  と定義すると、次式が得られる。

$$\mathbf{x}^{(1)}(t) = \mathbf{x}^{(1)} + \exp\left(\frac{1}{2}\Lambda t\right) \left(\mathbf{x}^{(1)}(0) - \mathbf{x}^{(1)}\right)$$

ただし、  $\mathbf{x}^{(1)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{x}^{(1)}(t)$  は次式で与えられる。

$$\mathbf{x}^{(1)} = 2 \left( \frac{1}{N} \mathbf{e} \mathbf{e}^T - \Lambda \right)^{-1} \mathbf{s}.$$

ここで、  $\mathbf{e}$  は要素がすべて 1 の  $N \times 1$  ベクトル、  $\mathbf{s}$  は  $k$  番目の要素が  $s_k$  の  $N \times 1$  ベクトルを表す。一方、2 次積率は次式で与えられる。

$$E[X_k^2(t)] = - \left( \sum_{j=1}^{k-1} x_{j,k}^{(1,1)}(t) + \sum_{j=k+1}^N x_{k,j}^{(1,1)}(t) \right),$$

ただし、

$$x_{k,j}^{(1,1)}(t) = E[X_k(t)X_j(t)]$$

であり、次の  $N(N-1)/2$  個の線形常微分方程式の解である。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} x_{k,j}^{(1,1)}(t) = & \sum_{l=1}^{k-1} \left\{ \left( \frac{\lambda_{l,j}}{2} + \frac{\lambda_{k,j}}{4} \right) x_{l,k}^{(1,1)}(t) \right. \\ & \left. + \left( \frac{\lambda_{l,k}}{2} + \frac{\lambda_{k,j}}{4} \right) x_{l,j}^{(1,1)}(t) \right\} \\ & + \sum_{l=k+1}^{j-1} \left\{ \left( \frac{\lambda_{l,j}}{2} + \frac{\lambda_{k,j}}{4} \right) x_{k,l}^{(1,1)}(t) \right. \\ & \left. + \left( \frac{\lambda_{k,l}}{2} + \frac{\lambda_{k,j}}{4} \right) x_{l,j}^{(1,1)}(t) \right\} \\ & + \sum_{l=j+1}^N \left\{ \left( \frac{\lambda_{j,l}}{2} + \frac{\lambda_{k,j}}{4} \right) x_{k,l}^{(1,1)}(t) \right. \\ & \left. + \left( \frac{\lambda_{k,l}}{2} + \frac{\lambda_{k,j}}{4} \right) x_{j,l}^{(1,1)}(t) \right\} \\ & - \frac{1}{2} (\lambda_k + \lambda_j - 2\lambda_{k,j}) x_{k,j}^{(1,1)}(t) \\ & + s_k x_j^{(1)}(t) + s_j x_k^{(1)}(t), \end{aligned}$$

以上は一般系の解であり、これらの式から数値計算により解を得ることができる。

単純平均法の具体的な特性を確認するために、さらに二つの特別な場合に関する解析を行った。

#### ① 端末間の遭遇率が均質な場合 (Case1)

端末間の遭遇率がすべて  $\lambda$  と一定である場合、

$$E[X_k(t)] = E[X_k] + (E[X_k(0)] - E[X_k]) e^{-\frac{N\lambda}{2}t},$$

となる。

ただし、

$$E[X_k] = \lim_{t \rightarrow \infty} E[X_k(t)] = \frac{2s_k}{N\lambda}, \quad k \in \mathcal{N}.$$

である。したがって、緩和時間  $\gamma = 2/(N\lambda)$  ごとに初期の参照時刻からのずれが指数的に減少していくことがわかる。また、緩和時間は端末間の遭遇率と端末数のみに依存する。一方、定常状態における参照時刻からのずれは端末間の遭遇率、端末数、端末のクロック速度に依存することもわかる。

一方、2次積率は

$$E[X_k^2] = \lim_{t \rightarrow \infty} E[X_k^2(t)] = \frac{8}{3N^2\lambda^2} (2s_k^2 + E[S^2]),$$

$$E[X^2] = \lim_{t \rightarrow \infty} E[X^2(t)] = \frac{8E[S^2]}{N^2\lambda^2},$$

となる。これより、端末  $k$  の時刻のばらつきは端末数、遭遇率、クロック速度のずれに依存して決まることがわかる。

#### ② 1 台の端末のみが高頻度な遭遇率を持つ場合 (Case2)

$$\lambda_{k,j} = \begin{cases} \lambda^* = \lambda_1 + \lambda_2, & k = 1 \text{ or } j = 1, \\ \lambda_1, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

とする。以降では、 $\lambda_2 > 0$ 、すなわち端末 1 だけが他の端末よりも高頻度に遭遇する状況に相当する。

このとき、時刻差の期待値は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} E[X_1(t)] &= E[X_1] + (E[X_1(0)] - E[X_1]) e^{-\frac{N\lambda^*}{2}t}, \\ E[X_k(t)] &= E[X_k] + (E[X_k(0)] - E[X_k]) e^{-\frac{N\lambda_1 + \lambda_2}{2}t} \\ &\quad + \frac{E[X_1(0)] - E[X_1]}{N-1} (e^{-\frac{N\lambda_1 + \lambda_2}{2}t} - e^{-\frac{N\lambda^*}{2}t}), \\ &\quad k \neq 1, \end{aligned}$$

$$E[X_k] = \begin{cases} \frac{2s_1}{N\lambda^*}, & k = 1, \\ \frac{2s_k}{N\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{\lambda_2}{N\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \frac{2s_1}{N\lambda^*}, & k \neq 1. \end{cases}$$

Case1 の場合と比較すると、端末 1 に関しては同様の結果となっている。一方、端末  $k \neq 1$  に関しては、遭遇率の観点で同質である端末  $j$  ( $j \neq 1, j \neq k$ ) との遭遇による要因と端末 1 との遭遇による要因の二つからなることがわかる。

一方、2次積率は次式で表される。

$$\begin{aligned} E[X_1^2] &= \frac{8E[S^2]}{(N\lambda_1 + \lambda_2)(3N\lambda_1 + 4\lambda_2)} \\ &\quad + \frac{8}{N\lambda^*(3N\lambda_1 + 4\lambda_2)} \\ &\quad \cdot \left( \frac{2(N\lambda_1 + \lambda_2)}{N\lambda^*} - \frac{\lambda_2}{N\lambda_1 + \lambda_2} \right) s_1^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E[X^2] &= \frac{24E[S^2]}{(N\lambda_1 + \lambda_2)(3N\lambda_1 + 4\lambda_2)} \\ &\quad - \frac{8\lambda_2}{N\lambda^*(3N\lambda_1 + 4\lambda_2)} \left( \frac{2}{N\lambda^*} + \frac{3}{N\lambda_1 + \lambda_2} \right) s_1^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E[X_k^2] &= \frac{1}{|-4\mathbf{B}|} \left[ 2N\lambda_1 \{ (2N-1)\lambda_1 + N\lambda_2 \} E[X^2] \right. \\ &\quad + [2\lambda_2 \{ (2N-1)\lambda_1 + N\lambda_2 \} \\ &\quad \left. + 2\lambda_2(\lambda_2 - \lambda_1)] E[X_1^2] + 8\lambda_2 s_k E[X_1] \right. \\ &\quad \left. + 8[\lambda_2 s_1 + 2\{ (2N-1)\lambda_1 + N\lambda_2 \} s_k] E[X_k] \right], \\ &\quad (k \neq 1) \\ |\mathbf{B}| &= 6(N\lambda_1 + \lambda_2) \{ (2N-1)\lambda_1 + N\lambda_2 \} + 2\lambda_2 \lambda^*. \end{aligned}$$

#### (2) 数値例

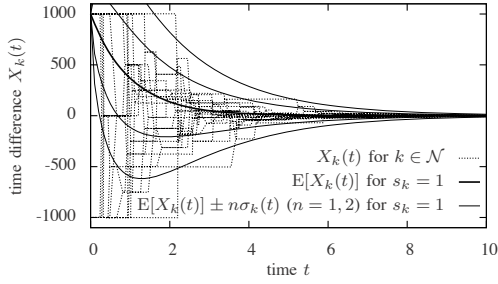
上記の解析結果に対する具体例を以降に示す。また、同様の環境を想定したシミュレーション評価を合わせて示すことにより、解析の妥当性についても示す。

##### ① Case1 の数値例

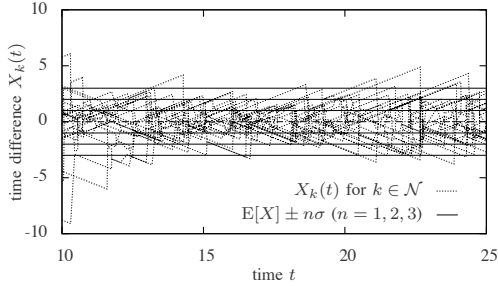
$N = 20$ 、相対クロック速度とオフセットは以下のように設定する。

$$(s_k, \phi_k) = \begin{cases} (1, 1000), & k = 1, 2, \dots, 10, \\ (-1, -1000), & k = 11, 12, \dots, 20. \end{cases}$$

緩和時間  $\gamma = 2/(N\lambda)$  を単位時間とした場合の、時刻差に関する過渡特性と収束特性をそれぞれ図 1(a) と図 1(b) に示す。点線は各端末の時刻差に対するシミュレーション結果を、実線は解析結果を示している。ただし、 $\sigma_k(t) = \sqrt{E[X_k^2(t)] - E[X_k(t)]^2}$  である。図 1(a) より、初期のオフセットのずれは 10 単位時間程度で補正されること、図 1(b) より、収束状態では一定の範囲内に端末時刻が収まる様子が確認できる。



(a) Transient State.



(b) Steady State.

Fig. 1. Transient State and Steady State in Special Case 1.

### ②Case2 の数値例

$N = 20, \lambda_1 = \lambda_2$  とし、端末 1 の遭遇率が高いものとする。まず、端末  $k$  ( $k \geq 3$ ) の相対クロック速度とオフセットを以下のように設定する。

$$(s_k, \phi_k) = \left( -\sqrt{\frac{N}{(N-1)(N-2)}}, -100 \right) \approx (-0.24, -100).$$

ここで、端末 1 のクロックの精度が他の端末に比べて高い場合 (Case2(a)) と低い場合 (Case2(b)) の 2 通りを想定する。Case2(a) では、

$$(s_1, \phi_1) = (0, 0),$$

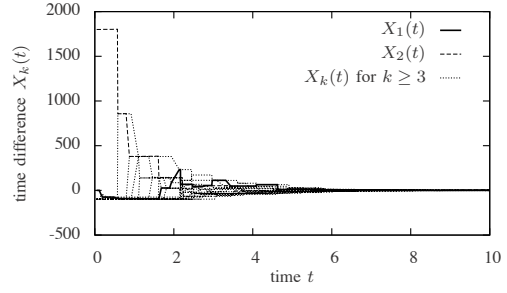
$$(s_2, \phi_2) = \left( \sqrt{\frac{N(N-2)}{N-1}}, 1800 \right) \approx (3.08, 1800),$$

とし、Case 2(b) では

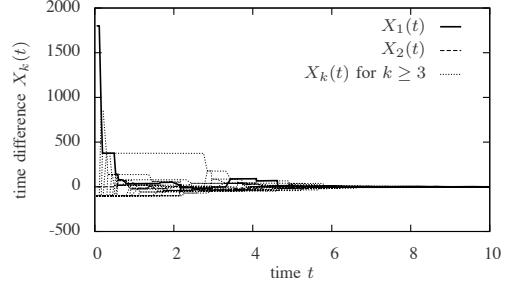
$$(s_1, \phi_1) = \left( \sqrt{\frac{N(N-2)}{N-1}}, 1800 \right) \approx (3.08, 1800),$$

$$(s_2, \phi_2) = (0, 0),$$

とする。緩和時間  $\gamma = 2/(N\lambda_1 + \lambda_2)$  を単位時間とした場合の時刻差に関する過渡特性を図 2 に示す。図 2(a), 2(b) はそれぞれ Case2(a), 2(b) に対応しているが、いずれの場合も 10 単位時間で初期のオフセットの影響が無くなっていることがわかる。次に、定常状態における時刻差の挙動を図 3 に示す。図 3(a), 3(b) はそれぞれ Case2(a), 2(b) に対応している。Case1 の場合と同様にいずれの場合もある範囲内に時刻差が収まっていることがわかる。ただし、図 3(a) と 3(b) を比較すると、3(b) の方が時刻差のばらつきが抑えられていることがわかる。これは、Case2(a) では、クロック精度の悪い端末 2 が

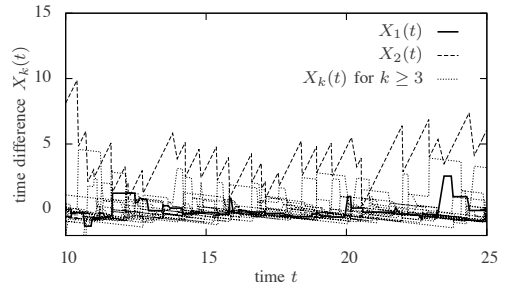


(a)  $s_1 = 0$ .

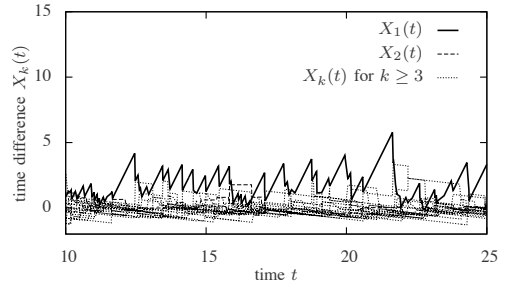


(b)  $|s_1| = \max_{k \in N} |s_k|$ .

Fig. 2. Transient State in Special Case 2.



(a)  $s_1 = 0$ .



(b)  $|s_1| = \max_{k \in N} |s_k|$ .

Fig. 3. Steady State in Special Case 2.

他の端末と遭遇しない間にクロックのずれが大きくなるのに対し、Case2(b) ではクロック精度の悪い端末 1 が遭遇率が高いため、そのクロックが他の端末との遭遇により高頻度に補正されるためである。

### ③実トレースデータを用いた評価

前述の解析では端末同士はポワソン過程に従って遭遇することを仮定していたが、より現実的な状況として、国際会議 Infocom' 06 における参加者間の遭遇に関するトレースデータを用いた評価を行う。評価には、4/24

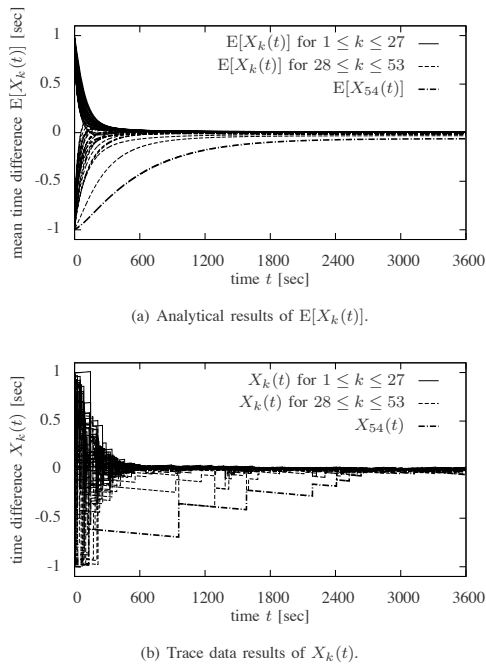


Fig. 4. Results for real trace data.

9:30 から 10:30 の間で参加が確認できた 54 人分の遭遇データを用いる．端末間の平均遭遇率は  $7.96 \times 10^{-4}$  [1/sec] であり，端末の相対クロック速度とオフセットは以下のように

$$(s_k, \phi_k) = \begin{cases} (10^{-4}, 1 - (27 - k) \cdot 10^{-2}), & k = 1, 2, \dots, 27, \\ (-10^{-4}, -1 + (54 - k) \cdot 10^{-2}), & k = 28, 29, \dots, 54, \end{cases}$$

に設定する．

ただし，遭遇率の降順に端末の ID を割り振っている．図 4(a) にトレースデータから得られた遭遇率を解析式に与えた場合の時刻差の期待値の推移を，図 4(b) にトレースデータに基づく端末間の遭遇を発生させた場合の時刻差の推移をそれぞれ示す．両図を比べると，解析結果とシミュレーション結果が似ていることがわかるため，より現実的なシステムにおいても解析結果により性能を推定することが可能であると言える．なお，最も遭遇率の低い端末 54 に着目すると，図 4(b) より，遭遇の度に時刻差がおよそ半減し，10 回程度の遭遇で収束していることがわかる．

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Masahiro Sasabe, Tetsuya Takine, Continuous-Time Analysis of the Simple Averaging Scheme for Global Clock Synchronization in Sparsely Populated MANETs, IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, 査読有, 31 巻, (2013), 782-793

[学会発表] (計 3 件)

① 飴村壮史, 笹部昌弘, 滝根哲哉, 疎密度モバイルアドホック網における重み付き平均を用いた時刻同期方式, 第 30 回インターネット技術第 163 委員会研究会, 2011. 11. 29, 北海道 グリーンピア大沼

② 飴村壮史, 笹部昌弘, 滝根哲哉, 疎密度モバイルアドホック網における重み付き平均を用いた時刻同期方式, インターネット技術 163 委員会新世代ネットワーク構築のための基盤技術 研究分科会ワークショップ, 2011. 9. 27, 兵庫県 みのたにグリーンスポーツホテル

③ 笹部昌弘, 滝根哲哉, 疎密度モバイルアドホック網における単純平均法に基づく相対的時刻同期, 第 28 回インターネット技術第 163 委員会研究会, 2010. 11. 25, 山梨県 清泉寮

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹部 昌弘 (SASABE MASAHIRO)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 10379109