

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560474

研究課題名(和文) センサーメッシュネットワークを用いた測位と空間情報共有技術の研究

研究課題名(英文) Indoor positioning and its sensing information sharing protocol over the sensor-mesh network

研究代表者

坪井 利憲 (TSUBOI, Toshinori)

東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・教授

研究者番号：20329171

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：ZigBeeを用いたセンサーメッシュネットワークを屋内測位と位置情報伝達に利用し、メンバー内で位置情報を共有する方法について研究した。屋内測位方法として、ZigBeeの電波強度とリンク通信品質値の関係を求める実験を基に、三点測定法、Scene Analysis法、電波重心法の実験と電波伝搬シミュレーションにより、測位推定精度や適用法を明確化した。ついで、メンバー内で測位情報を交換・共有する測位情報交換ネットワークポロジ、情報処理方式を確立した。さらに、マルチホップ通信の特性向上、スマートフォンを用いたセンサー位置情報交換方式などの提案を行った。

研究成果の概要(英文)：The objectives of this research are to establish the system architecture that measures member persons' positioning in a large building and its information exchange among members. ZigBee mesh network is utilized for both an indoor positioning and information exchange. As for an indoor positioning method, the triangulation method, the scene analysis and the center of radio gravity have been examined by experiments and ray trace simulations. Next, a network topology and positioning information processing methods have been studied. Furthermore, a performance improvement for a multi-hop WLAN and sensor information exchange using smartphone ad-hoc network have been proposed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：屋内位置測定 ZigBee メッシュネットワーク アドホックネットワーク マルチホップ通信

### 1. 研究開始当初の背景

本研究は平成20年～22年に行った科学研究費補助金基盤研究(C)「RFIDを用いた移動動線推定による安心快適コピキタスホーム」(課題番号20560375)の研究成果である屋内測位技術の知見を発展させ、屋内においてメンバーの位置を測位しその情報を共有できる情報システムについて研究することを目標とし研究を開始した。測位と情報転送ネットワークを簡単に構築できる技術として、ZigBeeに着目した。これまでは、ZigBeeによる測位の研究とZigBeeネットワーク構成法は各々独立のテーマとして行われており、この両者の機能を兼ね備えるための方式研究は行われていなかった。

### 2. 研究の目的

研究の目的は、屋内における人の測位技術と測位情報をメンバー間で共有するためのネットワークシステム及び情報処理システム構成法を確立することである。

#### (1) 屋内測位方法

屋内において1～2m程度の精度で人の位置を測位する方法を確立する。コスト上できるだけ簡易な方法を目指す。さらに、メンバー間でお互いの位置情報を共有することが目的であるので、ネットワーク内で位置情報を簡単に収集できるような位置情報計算方法が必要である。

#### (2) 位置情報交換ネットワーク

ZigBee ノードを用いて測位を行うとともに、その測位情報をメンバー間で交換するために、通信方式、情報交換プロトコル、ネットワークトポロジー、測位に適した ZigBee ルータノード配置方法の検討が必要である。

### 3. 研究の方法

屋内測位方法については、ZigBee の電波特性を、実験と電波シミュレーションにより調べ、この結果を基に屋内測位技術について実験検証を行う。位置情報交換ネットワークについては、方式検討とシミュレーションにより検討を行う。さらに、ZigBee ネットワーク技術と関連の深い無線マルチホップ通信の特性向上とスマートフォンを用いた位置情報交換システムに関する検討を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 位置情報交換ネットワーク

##### システム構成

本研究では、美術館や博物館などのグループ見学を想定し、ひとりひとりが好きな展示物を見学できるよう、グループメンバー同士のリアルタイム位置情報交換や参観案内をするシステムの構成法について検討した。このため、無線通信デバイスとして、位置検出と位置情報配信を一つのデバイスで行える ZigBee を用いる。

システム概要はグループメンバーが ZigBee 端末 (ZED) を持つ。館内の部屋や廊下には

ZigBee ノード (ZR) を配置する。最低3箇所の ZR と ZED の距離を測定することにより、ZED の位置を測定することができる。ZED と ZR は ZigBee メッシュネットワークを構成しており、このネットワークを介してグループメンバーの位置情報を交換する。

#### 位置計算構成法

##### (a) 位置計算モデル

位置計算の方法としては、自己位置計算法と遠隔位置計算法に大別できる。これに基づき以下の3つの構成法を比較検討した。

##### 方式1：端末計算モデル

ZR は周囲の ZR と ZED と直接通信することができ、ZED 同士では直接通信はできない。ZED が自身と複数の ZR との距離を計測し、自身の位置を計算する。最後に自身の ID、位置情報と検出した時刻を、ZigBee メッシュネットワークを介しサーバに転送する。

##### 方式2：端末計測サーバ計算モデル

方式1と同じく ZED が自身と複数の ZR との距離を計測する。ZED が自身の ID、利用した ZR の ID、距離と計測した時刻を、ZigBee メッシュネットワークを介しサーバに転送する。最後にサーバで端末の位置情報を計算する。位置計算をサーバで行う点が方式1と異なる。

##### 方式3：サーバ計算モデル

遠隔位置計算方式であり、ZR は ZED を検出し、検出した時刻、自分の ID および ZED の ID、距離測定のための計測値をサーバに転送する。サーバで位置計算を行う。

##### (b) システム構成法の比較

三つの計算方式を端末の負荷、サーバの負荷、ネットワークのトラヒック量及び位置計算の容易性から比較した。結果は表1に示す。そして、送受信に必要な情報量を仮定し、1秒間に一回情報を転送する場合の人数による情報量の変化を計算した。結果は図1で示したように、人数の増加により、情報量は線形に増加する。

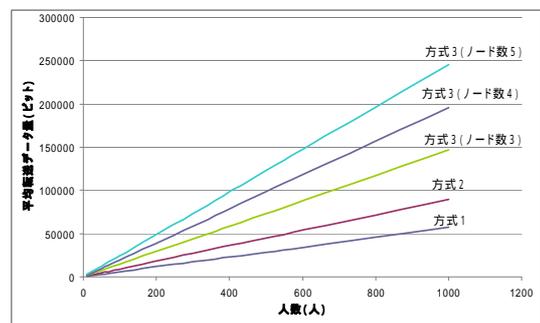


図1 転送データ量の比較

表1 位置計算方式比較

	方式1	方式2	方式3
端末負荷	×		
サーバ負荷			×
トラヒック量			×
位置計算の容易性			

図1から、方式1が平均転送データ量が少ないが、ZEDで位置情報或いはZRとの距離を計算することは、ZEDに大きな負担をかけることになる。ZEDの計算能力を配慮した上、ネットワーク内のトラヒック量が比較的少ない方式2が望ましい。

#### 位置情報配信法

##### (a)位置情報配信モデル

グループメンバーの位置情報をお互いに確認するために、お互いの位置情報の配信法について比較検討した。

##### 方式A：サーバ配信モデル

サーバに保存されていた位置情報データを、ZigBeeメッシュネットワークを介し一定間隔で端末に配信するモデルである。位置計算方法として、の方式1～3のいずれも可である。

##### 方式B：ユーザアクセスモデル

サーバにグループメンバーの位置を表示するWebを用意する。ユーザが手持ちの端末からサーバにアクセスし、位置情報を確認するモデルである。位置計算方法として、の方式1～3のいずれも可である。

##### 方式C：端末P2P交換モデル

サーバに位置情報データを転送しない方法である。端末がZigBeeメッシュネットワークを介し、他の端末と位置情報を交換するモデルである。位置計算方法として、の方式1が対応する。

##### (b)情報配信法の比較

三つの配信方式を端末の負荷、サーバの負荷、ネットワークのトラヒック量、情報整理の容易性及び配信制御から比較した。結果は表2に示す。

表2 配信方式比較

	方式A	方式B	方式C
端末負荷			x
サーバ負荷	x		
トラヒック量	x		
情報整理の容易性			x
配信制御			

方式Aでは、端末への負荷が小さく、情報整理及び配信制御は容易である。しかし、サーバへの負荷及びネットワークのトラヒック量が非常に多くなる。方式Bでは、定期的に位置情報を配信する必要がないため、サーバへの負荷は小さくて済み、そして、方式Aと同様に、情報整理及び配信制御は容易である。しかし、端末がサーバに問い合わせをする必要があるため、端末への負荷が方式Aより多少高くなる。方式Cでは、端末同士でメッシュネットワークを介し、位置情報を交換するため、サーバの設置が不要である。それに伴い、情報整理、配信制御はすべて端末で行うため、端末への負荷が非常に大きくなる。定性的比較の結果を見ると、方式Bが総合的に良い。

## (2) ZigBee電波特性と三点測定方式

位置測定精度は、どの部屋のどの辺りかが分れば良い場合、数メートル程度の精度があれば良いが、今回のシステムにおける測定精度は、例えば見学中の展示物に関する説明情報の配信などを行う場合、1m程度の精度が要求される。

位置測定法の最も基本的な方式は、位置が既知の3つの基準点と被測定対象との距離を測定する三点測定法である。距離測定方法としては通常電波強度を用いることが多いが、ZigBeeではリンク品質LQIが簡単に測定できるので、電波強度の代わりにLQIを用いることを検討した。

LQIの算式はIEEE802.15.4標準では定義されていないため、LQIの特性は明確にはされていない。LQIは環境に依存し、障害物からの影響を受ける。位置計算をするため、実験でLQIの特性を検証する必要がある。実験は東京工科大学片柳研究所11階にあるネットワーク研究室で行った。

LQIは受信強度及びパケット損失率に影響されると言われているが、具体的にどのよう

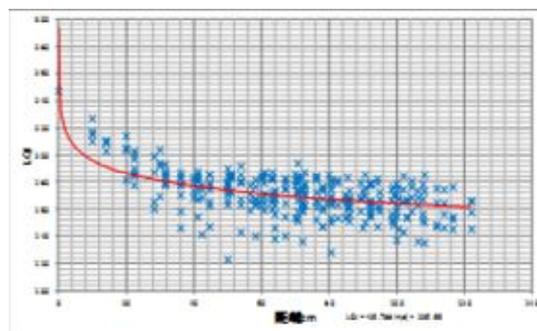


図2 LQIと距離の関係

に影響するのかを検証した。今回の実験は1.5mの範囲内で行われているため、パケット損失率はほぼ零であった。LQIと受信強度の関係を検証した。図2はLQIと距離の関係である。三点測定法では通常距離測定には、受信強度を測定するRSSI法が使用されるが、この結果からZigBeeで通常測定されるLQIを受信強度の代用とできることが分かる。しかし、距離70cm以上では距離とLQIの関係に誤差が大きく、位置推定誤差が大きくなることが推測される。

図2でLQIと距離の関係を求めた。LQI値と距離の関係を式(1)に示す。

$$LQI = -16.788 \ln(d) + 235.66 \quad (1)$$

次に三点測定方式を用いた位置推定実験を行った。実験方法としては基準点(ZR)3つを既知位置に設置し、未知端末(ZED)の位置を計算する。ZEDから取得したLQIを用いて、式(1)によりZRとの距離(d)を計算する。そして、3つのZRの位置及びZEDとZRの距離でZEDの位置を計算する。

15点計算した結果を表3に示す。交差点が2以上の地点の平均推定誤差は97cmであった。誤差は要求条件を満足するが、1/3の地点で位置が計算できなかった。その原因とし

では、LQI は図 2 のように、位置によって変動が大きく、位置計算は大きな誤差が生じた。そして、LQI だけでなく、測定した電波強度も同じような変動があり、RSSI 法でも同じ結果になると考えられる。

表 3 位置測定実験結果

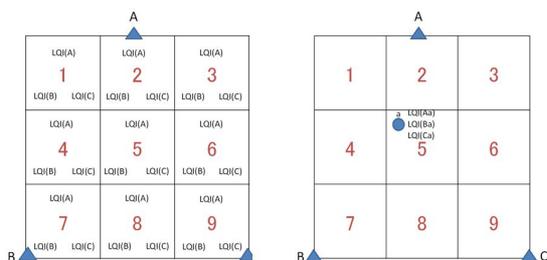
交点数	出現回数
0	5
2	5
4	4
6	1
平均誤差	97cm

### (3) 測位方法の比較検討

(2) で説明したように三点測定方式では位置推定できない地点が生じた。そこで、LQI を用いて Scene Analysis 方法と LQI から電波強度を推定した重心法で求める方法を行い、二つの方法を比べた。

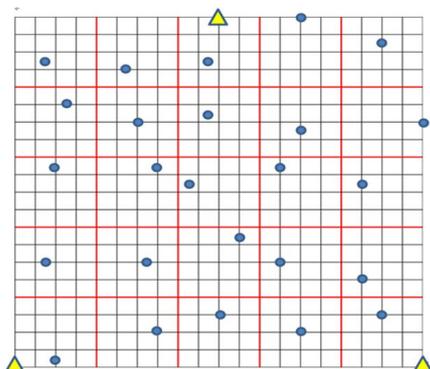
#### Scene Analysis 法

位置推定する空間を任意の大きさに区画分けし、図 3(a)のように区画ごとの LQI を測定して、各区画の LQI 値をデータベースに保持する。位置推定の際は図 3(b)のように実際に計測された LQI の値とデータベースに保持しておいたデータの差分の最小二乗誤差が最小の区画の中心を推定位置とする。



(a)データベース構築 (b)位置測定

図 3 Scene Analysis 方式の説明



▲ は送信点の位置  
● は受信点の位置

図 4 位置測定点

### 重心法

$$(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^k P_i * (x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^k P_i} \quad (2)$$

基準ノード  $i (i=1, 2, \dots, k)$  の座標  $(x_i, y_i)$  と基準ノードからの受信電力  $P_i$  (mW) により式 (2) で推定位置を計算する。

#### 実験結果

実験は図 4 に示すように 2.0m\*2.0m の範囲で 40cm\*40cm の 25 区画で測定した。位置が既知の 3 つの基準ノードを用いて測位を行った。ZigBee 機器は TOCOS 社の TWE-EK-002 と TWE-EK-003 開発キットを用いた。

Scene Analysis 法で求めた各区画における位置推定誤差を図 5 に示す。

重心法を用いるために、LQI と電波強度の関係を実験で調べた。TOCOS 社のホームページに LQI と電波強度の関係式が掲載されている。この関係式は部屋の環境により異なると思われるので、位置計測を行った部屋で測定した実測値と関係式を図 6 に示すが両者は良く対応しているので、関係式 (3) を用いて LQI を電波強度に変換し、式 (2) により位置を推定した、この推定誤差を図 7 に示す。

$$P(\text{dBm}) = (7 * LQI - 1970) / 20 \quad (3)$$

また、式 (3) によれば、LQI 値とデシベル値で表記した受信電力値は線形関係にある。そこで、LQI を仮想的にデシベルと同様とみなし、 $LQI = 10 \log(Iq)$  で求められる値  $Iq$  を LQI の真値と呼び、式 (2) で受信電力の

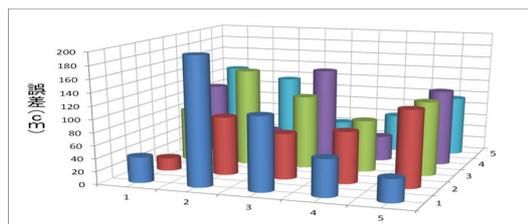


図 5 Scene Analysis の位置推定誤差

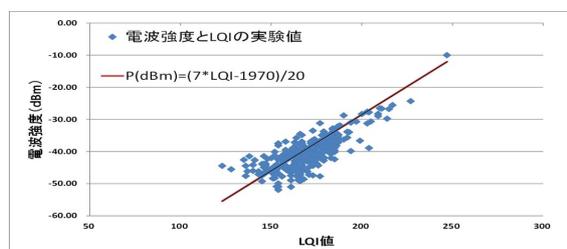


図 6 LQI と電波強度の関係

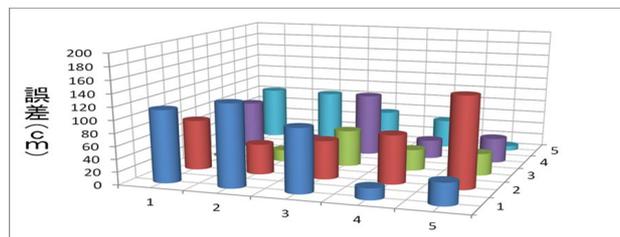


図 7 電波強度で計算した重心法位置推定誤差

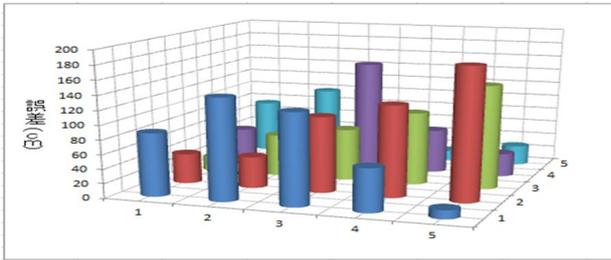


図 8 LQI で計算した重心法位置推定誤差

表 4 3方式の位置推定誤差の比較

方法	最小誤差	最大誤差	平均誤差	標準偏差
Scene Analysis方法	20cm	198cm	91cm	43cm
重心法(LQI)	12cm	183cm	78cm	46cm
重心法(電波強度)	7cm	143cm	60cm	38cm

真値 Pi の代わりに Iq を用いて位置計算を行った。この時の位置推定誤差を図 8 に示す。以上 3 通りの方法で実験して得られた誤差の比較を表 4 に示す。

位置推定精度は部屋の広さ、障害物の存在、区画の広さ、ZigBee 基準ノードの配置数と配置法に依存する。これらとの関係は今後の検討課題であるが、平均的に 1m 程度の精度が得られることが確認できた。

#### (4) マルチホップ通信の特性向上

メッシュネットワークやアドホックネットワークの無線通信は複数の端末を経由するマルチホップ通信である。現状では 1 つの通信チャンネルを用いたシングルチャンネル方式のために、リンク間で電波干渉が発生し、スループットが劣化する。これを改善する方式として、複数の通信チャンネルから空いているチャンネルを選択するマルチチャンネル方式を取り上げ、MAC(Media Access Control) プロトコルとルーティングプロトコルを連携させる新しいマルチチャンネル通信方式を提案した。

本研究では、各ノードにおける空きチャンネル数を指標としたルーティングと、隣接ノード間で競合しないチャンネルを割り当てるチャンネル管理手法をクロスレイヤ処理によって連携させた方式を提案した(図 9)。各ノード間で競合しないチャンネルの選択制御を行うために MAC プロトコルとして CSMA/CA をベースとした M-CSMA/CA (CSMA/CA for Multi-Channel) を開発し、周辺ノードにおける使用中チャンネルの管理と自身が使用するチャンネルの割り当てを行う。また、ルーティングプロトコルとしては、MANET の移動性や経路選択時におけるチャンネル使用状況を把握する必要性からリアクティブ型の AODV をベースとした CC-AODV (Channel-Controlled AODV) を開発した。各リンクにおける空きチャンネル数のボトルネックを指標としたルー

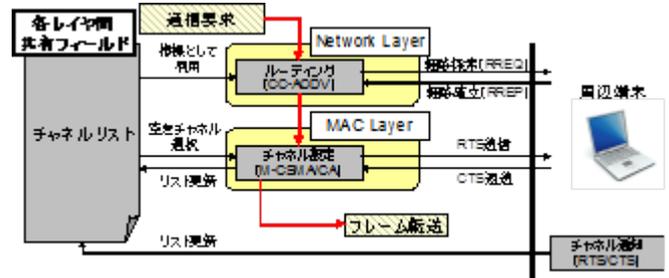


図 9 共有フィールドを利用したクロスレイヤ設計

ティングを行うことで各ノードにおけるチャンネル使用率を平滑化し、チャンネルの閉塞率を低下させる。

提案方式の特性を評価するために、ネットワークシミュレーションソフトウェア Exata に提案プロトコルを実装した。81 個の端末を約 100m 間隔で格子型に設置し、データサイズを 1000byte、UDP 送信レートは 800kb/s でセッション数 4(横方向)、TCP 通信セッション数を 4(縦方向)とする。この条件で提案方式(M-CSMA/CA, CC-AODV)、M-CSMA/CA と AODV 用いた方式、及び従来方式(CSMA/CA, AODV)の 3 方式を比較する。3 方式に対するシミュレーションで求めた UDP と TCP の合計スループットを図 10 に示す。本提案方式が一番スループットが高い。これはネットワークのトラフィック量が多くなると、比較的空きチャンネル数の多い経路を選ぶことにより、CC-AODV を実装して連携させることによってネットワーク全体のチャンネル使用率が平滑化されたためと考えられる。

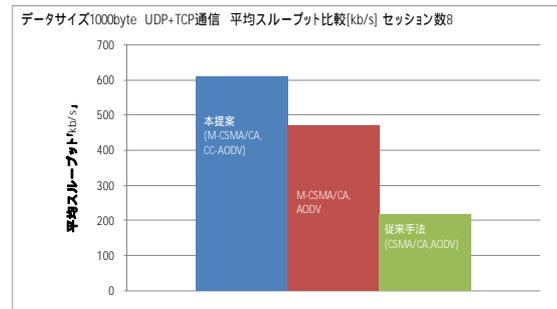
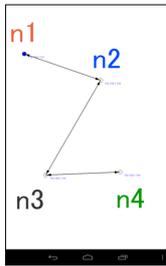


図 10 UDP と TCP 通信の合計スループット比較

#### (5) スマートフォンを用いたアドホック・センサーネットワーク

スマートフォンは多種類のセンサー素子を搭載している。そこで、スマートフォンをアドホックネットワーク端末にできれば、多様なセンサーネットワークが構築できる。そこで、Stoker が開発、公開している Android 用アプリ "MANET Manager" を用いてアドホックネットワークの構築を行った。アドホックネットワークの無線通信は IEEE802.11n 規格を用い、ルーティングプロトコルに OLSR を使用した。



チェーンネットワーク

各端末のIPアドレスと  
MACアドレスの対応

	IPアドレス	MACアドレス
n1	192.168.1.101	08:60:6e:3e:1f:37
n2	192.168.1.102	30:85:a9:58:f8:89
n3	192.168.1.103	60:a4:4c:c4:1f:61
n4	192.168.1.104	60:a4:4c:c3:9d:75

図 11 スマートフォンによるアドホックネットワーク



図 12 センサーデータ共有動作例

実験は4台のスマートフォンでアドホックネットワークを構築し、図 11 に示すようなネットワークで動作を検証した。

ついで、アドホックネットワーク上で端末間がセンサーデータをリアルタイムに共有できるアプリケーションを開発した。その動作画面を図 12 にて示す。左側の画面が、端末間でのセンサーデータのモニタリング機能動作画面であり、右側の動作画面が GPS、方位計、各種センサーを利用することで可能となった、端末間の相対的な位置関係、及び環境情報をモニタリングする機能である。前者は TCP にて 1 対通信を行い、後者は UDP を使用したブロードキャスト通信によってセンサーデータ共有を行うものである。

これらから、スマートフォン特有の豊富なセンサーを同時に利用できるため、複数のセンサーを組み合わせることで様々な利用方法が期待できる結果が得られた。

## 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 6 件)

Toshinori Tsuboi, Hiromi Ueda, Indoor trace tracking algorithm with pattern-based positioning technique of UHF band RFID, Proc. APCC(Asia Pacific Commu. Conf.)2013, 査読有, 2013, pp.345-350

白石剛大、小室信喜、上田裕巳、河西宏之、坪井利憲、UHF 帯パッシブ RFID を用いる屋内位置推定アルゴリズムの提案、電子情報通信学会論文誌 B、査読有、Vol.J95-B、No.10、2012、pp.1302-1312

〔学会発表〕(計 13 件)

文静、高橋麻貴、田所裕康、坪井利憲、ZigBee を用いた屋内位置推定方式の比較検討、電子情報通信学会通信方式研究会、2014 年 3 月 19 日、新潟大学

太田伸男、田所裕康、坪井利憲、スマートフォンを用いたアドホックセンサーネットワークの構築、電子情報通信学会通信方式研究会、2014 年 3 月 19 日、新潟大学

畢兆孟、伊藤敬生、田所裕康、坪井利憲、経路選択とチャネル管理連携を用いたマルチチャネル MANET の性能評価、電子情報通信学会通信方式研究会、2013 年 12 月 5 日、京都工芸繊維大学

伊藤敬生、上田裕巳、坪井利憲、単一インタフェースを用いたマルチチャネル MANET における経路選択とチャネル管理連携手法の提案、電子情報通信学会通信方式研究会、2012 年 3 月 9 日、新潟大学

王碩、高橋麻貴、坪井利憲、ZigBee を用いた館内位置情報システムの検討、計測制御学会システムインテグレーション部門大会、2011 年 12 月 23 日、京都大学

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.teu.ac.jp/tslab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坪井 利憲 (TSUBOI, Toshinori)

東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・教授

研究者番号：20319171

### (2) 研究分担者

小室 信喜 (KOMURO, Nobuyoshi)

千葉大学・融合科学研究科・助教

研究者番号：70409796

(平成 24 年度から連携研究者)