

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760350

研究課題名(和文) 移動体群ネットワークにおける移動・無線通信制御に関する研究

研究課題名(英文) A study on mobility control and wireless communications for mobile group networking

研究代表者

四方 博之(YOMO, Hiroyuki)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：00510124

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、無線通信機能を有する多くのロボットや車が、群れのように移動する移動体群ネットワークにおいて、通信範囲や通信品質、群れ形成機能を維持するための無線通信制御技術および移動制御技術を開発した。本成果により、多くのロボットが群れで移動し、被災地などに通信インフラを提供するシステムや、自動車の自動運転システム、さらに、人間の生体情報を取得するセンサネットワークなどを実現することができる。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed wireless communications protocols/algorithms and mobility control techniques which can maintain large coverage, high communication qualities, and coherent movement of mobile robots for mobile group networks that consist of mobile agents such as robots and vehicles with wireless communication capabilities. The developed algorithms and techniques contribute to the realization of mobile mesh networks that can be used in disaster areas to deploy a temporal networking infrastructure, automatic driving with vehicles, and mobile sensor networks to obtain vital information inside a human body.

研究分野：無線通信工学

キーワード：無線通信工学 移動体ネットワーク 群れ制御 メッシュネットワーク 移動制御 プロトコル設計
センサネットワーク 周波数有効利用技術

1. 研究開始当初の背景

携帯電話を代表とする無線通信の応用は多様化の一途をたどり、災害や工事の現場に無線ルーターを配置し、一時的な通信インフラを構築するメッシュネットワーク、自動車間で位置や速度などの情報を無線通信により交換し、安全運転支援を行う車車間通信ネットワーク、環境や医療に関する情報を収集するセンサネットワークなどの研究が行われていた。これらのネットワークに共通する点は、マルチホップ通信を用いて自律分散的にネットワークを構築し、その上で無線ノード間の通信を実現している点であり、これを効率的に実現するための無線通信方式・プロトコルに関する検討が数多く行われてきていた。

上記のネットワークを移動という観点から見てみると、多くの研究では、ネットワークを構成する無線ノードは固定あるいはユーザの意思によりランダムに移動するものと仮定していた。しかし、ロボティクス分野における小型・軽量・省電力なロボット技術の開発により、これまで固定あるいはランダム移動が仮定されてきた無線ノードをロボットに搭載し、移動を制御するネットワークに関する研究が活発になりつつあった。また、センサノードに移動機能を持たせ、多くのノードが移動しながら環境や生体情報などをモニタリングするモバイルセンサネットワークに関する検討も行われていた。車車間通信の分野では、自動運転を導入し、自動車群が障害物を回避しながら走行するように各車両の移動を制御する技術が検討されていた。このような移動を制御対象とする研究は、主にロボティクスの分野で活発に行われていた。しかし、ロボティクス分野では、ロボット間の通信は研究対象ではなく単なるツールとして捉えられ、アルゴリズムの性能に大きな影響を与えないと仮定するものがほとんどであった。一方、無線通信の分野では、移動の制御という概念を取り入れた検討は少なく、移動を制御可能な環境下での通信方式・プロトコル設計に関する知見は多く得られていなかった。

2. 研究の目的

前述の背景のもと、本研究課題では、移動制御が可能な無線通信機能付移動体で構成される移動体群ネットワークの移動制御及び無線通信制御技術を開発し、以下の点を明らかにすることを目的とした。

(1) 無線通信性能向上に対するノード移動の役割と効果

効率的な通信インフラを提供するモバイルメッシュネットワークにおける無線ルーター群の移動制御技術を確認し、通信性能改善を達成する移動制御法及びその効果を明らかにする。

(2) 群移動制御と無線通信性能の間に存在する相互作用の明確化

形状、個体数、接続状態などを保ちながら移動する群を作りだすための群移動制御アルゴリズム設計に無線通信性能の影響を取り入れ、群移動制御と無線通信制御が相互に及ぼす影響を明確にする。

(3) 移動体群の大規模化のための無線通信技術の確立

群を構成する移動体数が増加しても通信性能を劣化させず、群移動制御が必要とする情報交換をサポート可能な無線通信技術を確認する。

3. 研究の方法

本課題では、前述の目的を達成するために、以下の3つの課題に取り組んだ。

(1) モバイルメッシュネットワークにおけるカバレッジ・通信性能を考慮した無線ルーター群移動制御技術及び無線通信パラメーター制御技術の開発

(2) 無線通信性能を考慮した群移動制御アルゴリズムの開発と群生成・維持性能評価

(3) 大規模移動体ネットワークに適した無線通信方式・プロトコル設計

提案方式の評価は、理論、計算機シミュレーション及び実機を用いた実装実験により行った。

4. 研究成果

(1) モバイルメッシュネットワークにおけるカバレッジを考慮した移動制御技術

ワイヤレスメッシュネットワーク構築におけるノード配置の人為的労力、ノードを減少させることによるコスト削減、また、被災地でのノードの配置に伴う危険性を回避するため、ロボットにルーター機能を持ったメッシュノードを搭載し、自律的なノード移動によりメッシュネットワークを構築するモバイルメッシュネットワークに注目した。文献[1]ではノード間の接続性を確保しつつノードを配置する移動制御アルゴリズムが提案されている。本研究では、既存のノード移動制御アルゴリズムと比較してカバレッジ拡大が可能な自律的ノード移動制御アルゴリズムを提案した。

モバイルメッシュネットワークにおいて、ノードが自律的に移動するにあたり、各ノードの移動を制御する必要がある。ここで、本稿では、モバイルメッシュネットワークのノードは無線LANの機能を持ち、GPSは搭載せず、ノード自身の絶対的な位置は未知であるものとする。本研究では、このような条件を持つノードの移動を制御することにより、カバレッジ(ノードの無線範囲の和集合)を広くすることを目的とする。文献[1]では、カバレッジ拡大を実現するためのノード移動制御アルゴリズムが提案されている。図1に既存のノード移動制御アルゴリズムのPSEUDO CODEを示す。このアルゴリズムでは、ノードがゲートウェイに直接、または間接的につながっていない、または、ある隣接ノード

ド条件 (Neighbor Condition) を満たしていない場合、360 度の中からランダムな方向に速度 v_i で移動する。一方、条件を満足すればその場所で停止を続ける。このアルゴリズムは各ノードにおいて一定時間間隔で繰り返し実行され、その都度ノードの位置が決まる。このようにしてすべてのノードが停止した時、ワイヤレスメッシュネットワークが構築できたとと言える。

Algorithm: Deployment Algorithm (Pseudo Code)

```

1 While true do
2   if not connected to gateway
     or Neighbor Condition not satisfied
3   then
4     heading = random angle
     speed =  $v_i$ 
5   else
6     speed = 0
7   move (speed, heading)

```

図 1 ノード移動制御アルゴリズム (PSEUDO CODE)

図 2 にノード配置法の概要図を示す。図 2 中の i は各ノードを表している。既存の移動制御アルゴリズム [1] は、各ノードの無線信号到達範囲内にある全てのノードを隣接ノードと見なしその数を $\|N_i\|$ としている。既存の移動制御アルゴリズム [1] の Neighbor Condition は $\|N_i\| \geq \alpha$ and $\|N_i\| \leq \beta$ である。ここで、 α と β は $\|N_i\|$ の取りうる値の最小値と最大値である。本研究では、この Neighbor Condition を改良する。まず、図 2 において P_{rx} を、ノード i から距離 x の円周上の地点に存在するノードからノード i に到達する信号の受信電力とする。また、 P_{ry} を、ノード i から距離 y の円周上の地点のノードからノード i に到達する信号の受信電力とする。ここで、 y は、ノード間の無線通信の安定性を保つことができる限界距離とする。そして、ノード i において他のノードから受信される信号の電力 P_r を計算し、 $P_{ry} < P_r < P_{rx}$ を満たすノード数を $\|K_i\|$ とする。この $\|K_i\|$ を用い、[2] では、Neighbor Condition を $\|K_i\| \geq \alpha$ and $\|K_i\| \leq \beta$ とするアルゴリズムを提案した。なお、 α と β は $\|K_i\|$ の取りうる値の最小値と最大値である。また、本研究では、さらに、図 2 の斜線部 ($P_{ry} < P_r < P_{rx}$) のみのノード数だけでなく、その内側 ($P_{rx} < P_r$) に存在するノード数を $\|L_i\|$ とし、 $\|L_i\|$ をゼロとする条件を Neighbor Condition に追加したアルゴリズムを提案した。

提案するアルゴリズムにより構築されるメッシュネットワークのカバレッジをシミュレーションにより評価した。無線信号の伝搬モデルには簡易伝搬損失モデルを利用した。そして、通信距離 200m の場合の受信信号電力が無線 LAN の通信可能限界値の -95dbm

となるものとし、この値を P_{ry} とした。また、距離減衰係数の値は市街地を想定して 3 を用いた。ノード数は 30 台、フィールドは 2000m × 2000m の正方形のエリア、最大通信速度 (R_{max}) を 24Mbps とし、 P_{rx} を -78.78dBm とした。また、 $\alpha=1$ 、 $\beta=5$ とする。ノードの初期配置はフィールドの中心とする。フィールドの周囲には壁があるものとし、ノードが壁の位置に達し、次の移動で壁に衝突すると判断した場合にはその場所で停止する。そして、次の移動時に壁に衝突しない位置が選択されれば移動を再開する。移動条件確認間隔は 1 秒とする。

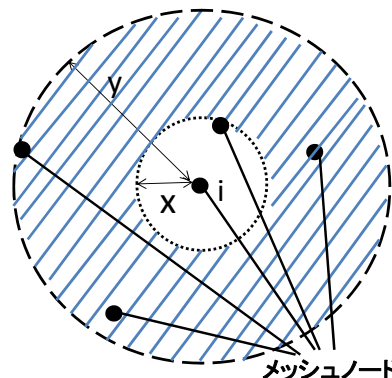


図 2 ノード配置法

図 3 は各ノードが 10000 回アルゴリズムを実行した時の試行回数 (k) に対するネットワーク全体のカバレッジを示している。図 3 から提案移動制御アルゴリズムを用いることで、既存の移動制御 [1] および [2] の各アルゴリズムに比べ、カバレッジを改善できていることが分かる。既存の移動制御 [1] および [2] の各アルゴリズムでは、非常に近い位置にあるノードも隣接ノードと見なすため、ノード間の距離が小さい状態に収束する確率が高い。これに対し、提案するノード移動制御アルゴリズムでは、図 2 の斜線部にノードを完全に停止させ、ノード間の距離が小さくなることを防ぐことでカバレッジの拡大が可能となる。

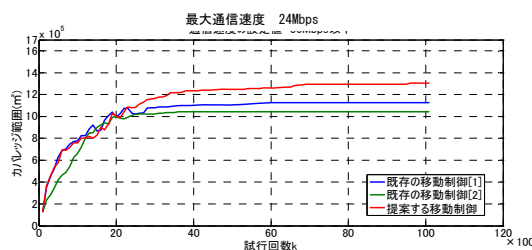


図 3 試行回数に対するカバレッジ特性

以上より、カバレッジを拡大するための移動制御技術を確認できたことを確認した。

(2) モバイルメッシュネットワークにおける通信品質を考慮した移動制御技術

前述したように、モバイルメッシュネットワークにおいてカバレッジ範囲を最大にする

るにはルーター間の距離をなるべく大きくする必要があり、しかし、距離の大きいリンクは伝送速度が低く、STA の発生位置によってはボトルネックリンクとなり、エンドノード間のスループットを低下させる。そこで、本研究では、カバレッジ範囲を維持しつつ、ボトルネックリンクによる通信品質劣化を低減する移動制御アルゴリズムの提案及び数値計算による評価を行った。

本研究では、簡単のためネットワークトポロジーは線形であり、GW (Gateway : 外部ネットワークとの接続ノード) と全 N 台のルーター AP_i ($i=1, 2, \dots, N$) によって構成され、各 AP は x 軸方向のみに移動可能であるものとする。また、初期配置では、各 AP 間距離が最大であり、最小伝送速度 R_{min} で通信可能である位置に配置する。さらに、この初期配置時のネットワークによって提供するカバレッジを最大カバレッジとする。GW は各 AP の移動を制御する制御ノードとしての役割も持つ。ここで、GW、AP 及び STA は GPS を搭載し、位置情報を取得可能であるものとする。各 AP は自身の無線通信範囲内で発生・消滅した STA の位置情報及び各 STA との伝送速度情報を GW に通知する。GW は集約した情報からネットワーク状態の変化状況を把握する。そして、ネットワーク状態が安定したと判断すると、その状態に応じた移動の必要性を検討する。GW は、まずネットワーク内のボトルネックリンクの存在及び AP の移動によるボトルネックリンク解消可能性を確認する。本研究では、ネットワーク内最大 AP-STA 間伝送速度が AP 間伝送速度 (初期配置時は R_{min}) より大きく、その差が、閾値 R_{th} より大きい時、ボトルネックリンクが存在するものと判断する。ここで、接続 STA が存在する GW から最遠の AP を末端 AP (APE) とし、GW-APE 間距離を D と定義する。APE 以降の AP には接続 STA が存在しないため、これらの AP を活用し距離 D 内の AP 数増加を試みる。まず、ボトルネックリンクを解消可能とする AP 間伝送速度 R_{req} を実現する AP 間距離 d を、簡易伝搬損失モデル及び受信信号電力値と伝送速度の対応関係より算出し、距離 D 内の各 AP 間距離を d とするために必要な AP 数 N_a を算出する。ここで、APN は後述するカバレッジ確保のための巡回 AP とするため、GW-APE 間に配置可能な AP 数 N_r は $N-2$ 台となる。 $N_a \leq N_r$ である場合、 N_a 台の AP を距離 D 内に配置する。そして、その他の AP を APE 以降に、AP 間伝送速度が R_{min} となるように配置することで、カバレッジの減少を最小限に抑制する。また、 $N_a > N_r$ である場合、 N_r 台の AP を GW-APE 間に配置する。距離 D 内の配置 AP 数の決定後、各 AP の移動後の配置位置及び移動距離を算出し、接続 STA を考慮したネットワークを構築するために各 AP を移動させる。

AP がボトルネックリンク解消のため、GW 側に移動するとネットワーク全体のカバレ

ッジが減少する。提案アルゴリズムでは、ネットワークの再構築後、APN による減少カバレッジ部内の新規 STA 探索動作と、GW によるネットワーク情報の把握を行う。ここで、減少カバレッジ部とは再構築後のネットワークのカバレッジと最大カバレッジの差である。

APN は、減少カバレッジ部内の各 AP 初期配置位置に移動後、一定時間停止し、定期的にビーコンを送信する。各停止位置において、APN に接続を希望する STA が存在した場合、APN は STA と一旦接続し、STA の位置情報の取得と、ネットワークへの接続を待機させる「待機命令」を送信する。各停止位置での STA 探索動作後、APN は APN-1 に接続し GW に探索結果を通知する。減少カバレッジ部において新規 STA が検出された場合、GW からの最遠新規 STA を決定する。そして、 x 軸上における最遠新規 STA と同一 x 座標の位置を新たな APE の位置とし、GW-APE 間の配置 AP 数の検討及び AP の再移動を行う。また、接続 STA がネットワーク内に存在しない場合は、各 AP を初期位置に再配置し、GW によるネットワーク状態の監視を再開する。これらの動作によって、通信品質とカバレッジを考慮した AP の移動制御を実現する。

計算機シミュレーションにより、提案アルゴリズムを用いた場合の、各 STA におけるエンドノード間 1 ビット伝送時間の削減率を評価した。また、減少カバレッジ部に発生した STA の発生時間からネットワーク接続までの接続遅延時間も併せて評価した。削減率を図 4 に示す。図中の μ は、STA の平均滞在時間を表している。図より、STA の平均滞在時間が小さい場合、同時滞在 STA 数が少なく、AP の移動可能性が高いことから、削減率の大きな STA が多いことが分かる。また、逆に平均滞在時間が大きい場合には、AP の移動可能性が低いことから、削減率が小さい STA が多い。しかし、この結果より、提案アルゴリズムにより、伝送時間削減効果が確認できる。また、遅延時間については、巡回 AP の STA 探索時間が 1 秒の時、3.97 秒程度の平均遅延を得た。これより、提案アルゴリズムは、減少カバレッジ部に発生する STA の接続時間を低くしつつ、伝送時間の削減が可能であることが分かった。

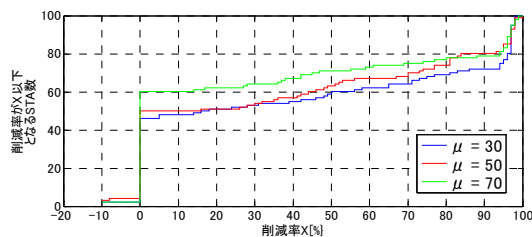


図 4 伝送時間削減率特性

(3) 群制御 (フロッキングアルゴリズム) における無線通信性能を考慮した評価
群れ形成を実現するフロッキングアルゴ

リズムでは、各ロボットは自身の通信範囲内に存在するロボットから位置および進行方向情報を取得し、自身の進行方向を制御する。これまでのフロッキングアルゴリズムに関する検討によりロボット間の情報交換が理想的に行われると仮定した場合、通信範囲の拡大に伴い群れの形成状態が良くなることが分かっている。しかし、ロボット間の情報交換には、無線通信を利用することが現実的であり、この場合、通信範囲の拡大に伴い通信品質は劣化する。したがって、群れ形成において、群れ形成効果と無線通信品質の間には通信範囲を介してトレードオフの関係が存在する。そこで本研究では、通信範囲の拡大に伴う無線通信品質および各ロボットの取得情報量の変化が群れ形成に与える影響について計算機シミュレーションにより評価した。

本研究で用いるフロッキングアルゴリズムでは、各ロボットは無線通信を行い情報の送受信を行う。各ロボットは T_p [s]毎に自身の現在の位置・進行方向情報をブロードキャストする。そして、各ロボットは T_u [s]毎に、保持情報を基にレイノルズフロッキング[3]に従って進行方向を変更する。図5にレイノルズフロッキングでの進路決定法を示す。図5に示すように、他のロボットの位置および進行方向情報から4つのベクトルを算出し、それら4つのベクトルにそれぞれ重み付けを行い足し合わせることで、進行方向 (running) を決定し、進行する。各ロボットは、情報を送信する際、パケットの衝突を回避するために IEEE802.11 規格で定義されているブロードキャスト通信用 CSMA/CA 方式を用いる。また、パケットを受信した各ロボットは、フラッディングベースのパケット中継を行う。各ロボットはパケットをブロードキャストし、受信したパケットを繰り返し転送する。そして、各パケットのホップ数の上限、すなわちパケット中継回数の変化により、通信範囲を変化させる。本研究では中継を行う際、他のロボットからパケットを受信する毎に、直ちにフラッディングを用いて中継を行う即中継方式を用いる。

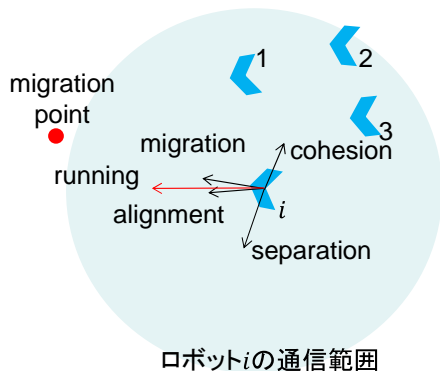


図5 進行方向決定法

本評価では、ロボット数 $N=50$ とし、初期位置として 100×100 [m]の仮想フィールド上

にランダムに配置する。初期方向は各ロボット 360° ランダムに選択されているものとする。また、 $T_p=1$ [s]、 $T_u=10$ [s]とし、移動速度を 1 [m/s]とする。各ロボットのキャリアセンス範囲およびパケット到達範囲を半径 30 [m]とし、 $CW=31$ 、スロット時間を 50 [μ s]とする。そして、各ロボット間距離の合計 e_d 、各ロボット間の進行方向の差の合計 e_θ により、群れ形成評価を行った。

図6に結果を示す。図6から、ホップ数の増加により、パケット遅延が大きくなることが分かる。また、ホップ数の増加によりパケット損失率が大きくなることが分かる。これは、即中継方式では、ホップ数の増加によりパケットの送信を試みるロボットの台数が増加し、ネットワーク全体の通信量が増加するためである。しかし、図6からホップ数の増加により、群れがまとまっていることが分かる。したがって、群れ形成においては、例えパケットの到達率が低い情報であっても、広範囲の情報を多く取得し、制御を行うことが重要であると言える。

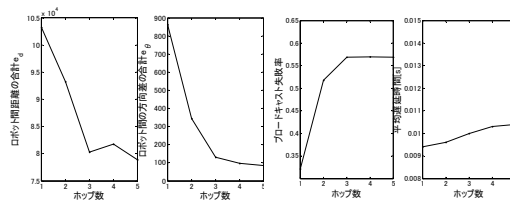


図6 即中継方式の特性

即中継方式を用いた場合に、ホップ数を5とした場合のロボットの移動軌跡を図7に示す。この図からも、ロボットの群れがまとまって移動している様子が分かる。

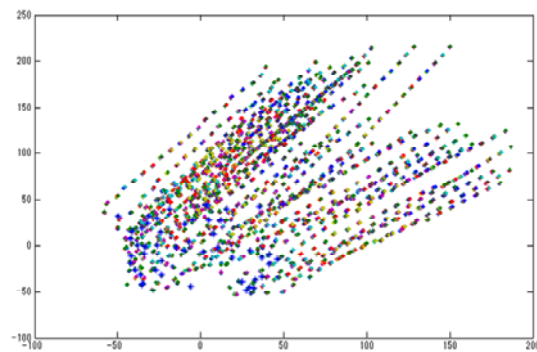


図7 ロボットの移動軌跡 (即中継方式、ホップ数5)

(4) 大規模無線ネットワーク制御技術

大規模な移動通信ネットワークを実現するためには、周波数利用効率の向上が必要となる。本研究では、周波数利用効率を向上させる技術として、コグニティブ無線に注目し、干渉除去を用いた周波数利用効率向上法を提案し、その有効性を示した。また、指向性を有するアンテナを利用する無線通信システムの干渉を受けるコグニティブ無線の効果を確認した。さらに、物理層ネットワーク

コーディング技術に注目し、物理層ネットワークコーディングを用いる無線ネットワークにおけるMAC層プロトコルの設計、評価を行い、その有効性を示した。また、周波数利用効率の向上と省電力効果は、一般的にトレードオフの関係にあるため、周波数利用効率の高いシステムにおける省電力化法の検討も行い、その有効性を示した。

<引用文献>

[1] N. Correll et al, "Ad-hoc Wireless Network Coverage with Networked Robots that Cannot Localize," in Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009, pp. 3878-3885.

[2] 芝田他, "モバイルメッシュネットワークのためのロボット間距離を考慮した移動制御アルゴリズム", 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, 2011年9月.

[3] S. Hauert et al, "Reynolds flocking in reality with fixed-wing robots: communication range vs. maximum turning rate," Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sept., 2011.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

① Kentaro Nishimori, Hiroyuki Yomo, Petar Popovski, Distributed Interference Cancellation for Cognitive Radios Using Periodic Signals of the Primary System, IEEE Transactions on Wireless Communications, 査読有, Vol. 10, No. 9, pp. 2971-2981, Sept. 2011. DOI: 10.1109/TWC.2011.062911.101524

② Kentaro Nishimori, Rocco Di Taranto, Hiroyuki Yomo, and Petar Popovski, Cognitive Radio Operation under Directional Primary Interference and Practical Path Loss Models, IEICE Transactions on Communications, 査読有, Vol. E94-B, No. 05, pp. 1243-1253, May 2011. DOI: 10.1587/transcom.E94.B.1243

[学会発表] (計8件)

① 稲田 浩平、四方 博之、無線通信の影響を考慮したフロッキングアルゴリズムの特性評価、電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会、2015年3月3日、沖縄コンベンションセンター (沖縄県・宜野湾市)

② 深山 翔平、四方 博之、モバイルメッシュネットワークのための通信品質とカバレッジを考慮した移動制御アルゴリズム、電子情報通信学会総合大会、2014年3月21日、新潟大学 (新潟県・新潟市)

③ 谷 知幸、四方 博之、オンデマンドWiFi ウェイクアップのための受信レベル相関を用いたウェイクアップフレーム検出法に関する一検討、電子情報通信学会 無線通信システム研究会、2013年8月29日、信州大学 (長野県・長野市)

④ 義若 武、四方 博之、オンデマンドWiFi ウェイクアップにおけるウェイクアップチャネル選択法に関する一検討、電子情報通信学会 無線通信システム研究会、2013年8月29日、信州大学 (長野県・長野市)

⑤ 垣渕 翔大、福井 洋則、宮本 昇、四方 博之、伊藤 哲也、無線LANセカンダリチャネルを用いたM2M2H通信に関する一検討、電子情報通信学会 高信頼制御通信研究会、2013年5月17日、京都大学 (京都府・京都市)

⑥ 森 茂樹、岡本 景太、芝田 善紀、四方 博之、モバイルメッシュネットワークのためのロボット間通信速度を考慮した移動制御アルゴリズム、電気関係学会関西連合大会、2012年12月9日、関西大学 (大阪府・吹田市)

⑦ Hiroyuki Yomo, Yoshiki Maeda, Distributed MAC Protocol for Physical Layer Network Coding, The 14th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, 2011年10月6日、ブレスト (フランス)

⑧ 芝田 善紀、森 茂樹、四方 博之、モバイルメッシュネットワークのためのロボット間距離を考慮した移動制御アルゴリズム、電子情報通信学会 ソサイエティ大会、2011年9月15日、北海道大学 (北海道・札幌市)

[図書] (計0件)

[その他]

<http://wnet.ee.kansai-u.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

四方 博之 (YOMO, Hiroyuki)
関西大学・システム理工学部・准教授
研究者番号: 00510124

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし