

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23240010

研究課題名(和文) ユビキタス環境のためのトポロジコーディングによる全体プログラミング

研究課題名(英文) Whole programming for ubiquitous environments using topological coding

## 研究代表者

塚本 昌彦 (TSUKAMOTO, MASAHIKO)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60273588

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、実世界に多数散らばるユビキタスデバイスをそれらのトポロジを用いてプログラミングする(群コンピューティング)枠組みを構築した。特に、ネットワークのトポロジを用いてうまくコーディングしていくこと(トポロジコーディング)を考えた。まず最初に、格子状のネットワーク上でグローバル通信とローカル通信を組み合わせて全体制御をする枠組みGlocalGridを設計し、デバイス、システムを実装した。さらに、主としてセンシングデータ収集を行うことを想定して、さまざまな効率的なアルゴリズムを検討した。応用分野としてはダンス、演劇、スポーツなどのアート・エンターテインメント分野を考え、システム展開を図った。

研究成果の概要(英文)：In this research, we established a framework to enable programmers to program as a "whole" in an environment where there are a tremendous number of ubiquitous devices in the real world. Especially, we focused a programming method implicitly using network topology, which we call topological coding. We constructed a framework, called GlocalGrid, to control a network as a whole by combining global and local communications. In this framework, by sending messages to the global network, each node proceeds calculation by exchanging messages with neighbour nodes via local communication. Then, we considered several algorithms for efficiently collecting data in sensor networks. As for application areas, we tried to apply our framework to art and entertainment areas such as dances, dramas, and sports.

研究分野：情報システム工学

キーワード：ユビキタスコンピューティング 全体プログラミング マクロプログラミング モバイルエージェント  
プログラム変換 センサネットワーク 群コンピューティング メタプログラミング

## 1. 研究開始当初の背景

IC タグやセンサなどを用いたユビキタスコンピューティング環境の浸透に伴い、近い将来、人々の暮らしの中で多数の超小型コンピュータが生活環境内に埋め込まれて使われるようになるだろうと考えられるようになってきた。しかし、これらをうまく分散で協調動作させるための技術は不十分であった。デバイスを連携させるためには複雑かつ高度なプログラミングが必要となる。

これに対し報告者のグループでは、これまでに多数のユビキタスデバイスを「全体として」プログラムする「全体プログラミング」の研究を行ってきており、様々な手法やシステムを開発していた(図1、図2)。その具体的な目標は以下のようなものであった。

- ・デバイス全体を一斉に動作させ、同期をとりながらセンシング、I/O 制御を行う。
- ・地面にばら撒かれたセンサをうまく交代で動作させて動作持続時間を長くする。
- ・空間にばら撒かれた発光デバイスを使って大きなスクリーンとして利用する。
- ・自律移動可能なユビキタスデバイスを用いて、全体を整列させ、一列になって移動させる。あるいはアリの採餌行動などを模して、特定のものを探したり、運搬したりさせる。

一方で、ユビキタスデバイスのマクロプログラミングという研究分野があり、複数のデバイスを対象としたプログラミングに関する研究分野が立ち上がっていた。しかし、これらは個々のデバイスのプログラミングの延長であり、個別の ID を指定する必要があるなど、デバイスの数に対するスケーラビリティがなかった。これに対し、報告者らのそれまでの研究成果により、多数のデバイスを連携動作させる群コンピューティングを実現するには、個々のデバイスがどのようにつながっており、全体の中でどのような位置にあるかを知り、それをうまく利用してそれぞれの位置に応じた役割を果たしていくこと、すなわち、トポロジの利用が有効であるが示唆されていた。当初、オブジェクト指向、論理プログラミング、メタプログラミングなどの枠組みをうまく組み合わせることで群に対するプログラミングを抽象化できるものと想定していたが、トポロジの役割が思った以上に重要であり、それをうまく取り入れたプログラミングが枠組みに必要なのではないかという仮説である。この点に関しこれまで十分に対応できていなかったことが、サンプルコーディングから実应用到に展開する上での重大なギャップとなっていたのではないだろうかと思定した。

## 2. 研究の目的

本研究では、ユビキタス環境において多数のユビキタスデバイスによる群コンピューティングを実現することを目的とする。すなわち、環境内に数百から数千個規模のユビキタスデバイスが存在することを想定して、環

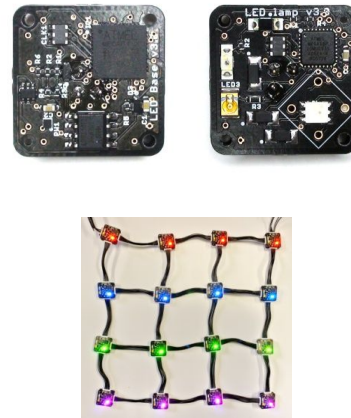


図1. 研究開始当初報告者らが実装を進めていた GlocalGrid を構成するデバイス(上)と動作状況(下)

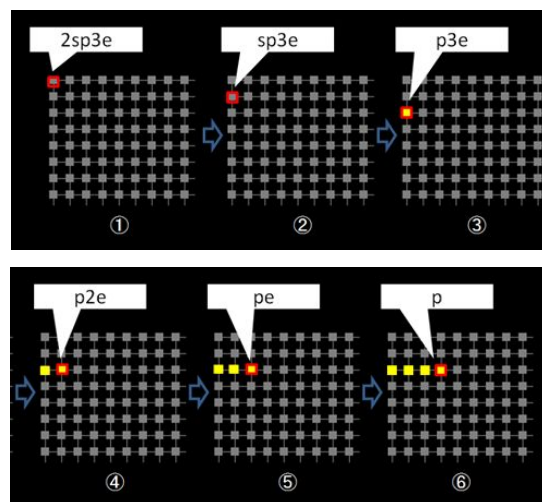


図2. 格子状トポロジでモバイルエージェントプログラムを短縮伝播しながら実行する例

境内のデバイス全体を対象としたプログラミングを行えるような方式を確立するという点で、それまでのアプローチを継続するものである。今回特に、ネットワークのトポロジを用いてうまくコーディングしていくこと(トポロジコーディング)により全体を描くことを考えた。

まずはローカルとグローバルのトポロジに対応が比較的自明な格子状有線ユビキタスネットワーク(ホップをカウントすれば座標値が得られる)を対象にしてこれを実現した。グローバルとローカルな通信を併せ持つシステム(GlocalGrid と呼ぶ)を構成し、GlocalGrid を管理するためのシステムアーキテクチャを考える。すなわち、接続性のチェック(格子状を形成しているかの確認)やコンフィグレーション(隣接関係や座標値の把握)ができるようにすることを考えた。

次に一般トポロジネットワークを対象を拡張することにより、さらにこれを高度に実現する。具体的には一般トポロジネットワーク上で GlocalGrid をエミュレーションすることにより、さらにこれを高度に実現するアプローチをとることにより、もとの

GlocalGrid 用のプログラムを疑似的に実行できるようにする。

### 3. 研究の方法

前述のように、まずは、自明なトポロジを持つ格子状有線ユビキタスネットワークを対象に、グローバル通信とローカル通信を組み合わせて、プログラム変換とモバイルエージェントの枠組みを適用する。格子状ネットワークのインフラストラクチャ GlocalGrid を整備し、グローバルなコマンドに基づいてローカルなコンフィギュレーションやプログラム実行を可能にする。また、モルフォロジ理論やセルラーオートマトン、画像処理のフィルタなどの考え方を適用して、個々のデバイスの機能を強化したより高度な全体プログラミングを実現する。さらに、それまでに実現した枠組みを無線などの一般トポロジネットワーク、センサネットワークに拡張し、元のプログラムを疑似実行する枠組みを構築する。同時に農業や健康、エコ、安全・安心などの広範な応用分野への適用を試み、実証実験によってシステムの評価を行う。

まず、平成 23 年度は、格子状有線ユビキタスネットワーク GlocalGrid インフラストラクチャ、および、そのうえで動作する、モバイルエージェントシステム、さらにその上位の言語からエージェントプログラムへのプログラム変換システムを実現した。

平成 24 年度は、平成 23 年度に開発した GlocalGrid 上の全体プログラムを Processing で書けるようにし、それを平成 23 年度に開発したモバイルエージェントのコードに変換するシステムを開発した。さらに、モルフォロジやセルラーオートマトンなど、画像処理のフィルタなどの計算原理を備えるように、GlocalGrid においてグローバル通信を使って全ノードに動作定義を放送できるようにした。隣接とデータを交換してこれらの計算を GlocalGrid 上でグローバル同期をとりながら進めていけるようにした。モバイルエージェントとのシステム融合についても考えた。いずれもローカルな情報を使って全体的な図柄を作ったり情報を抽出したりできる枠組みである。

平成 25 年度には、座標連続化、三次元化などを対象にローカルエンジンをさらに強化した。それと同時に、無線 GlocalGrid システム、すなわち、GlocalGrid の格子状という制約を外し、一般トポロジネットワーク上で動作するように改良した。具体的には一般トポロジネットワーク上で GlocalGrid のシステムが動作するように、仮想的に格子状の疑似ノードをシステム上でエミュレートする。システムのコンフィギュレーションと効率よい実行、ポイド（多数ホップからなる非相互接続領域）解決のアルゴリズムなどを別途考えた。さらに、GlocalGrid 強化エンジン上での各種プログラムを開発した。

平成 26 年度は、オブジェクト指向や論理

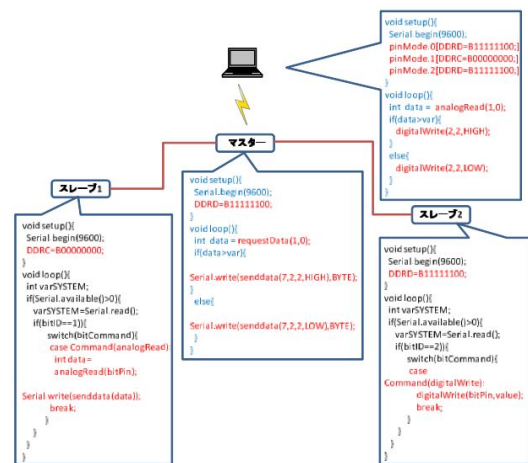


図 3. 格子状に配列した多数の Arduino を対象としたマクロプログラムのプログラム変換例

プログラミングの枠組みを用いて簡潔にプログラミングができるようにした。また、データ集約やストリーミングなどのプログラミングの枠組みも考えた。それと同時に、大規模 GlocalGrid システムへの展開を検討し、その応用システムを開発した。

平成 27 年度は、上記応用システムを実環境に適用し、評価実験を行った。

具体的な応用としては、主にアート、エンターテインメント分野を考え、ダンス、演劇、スポーツなどの分野において有効なシステムを開発した。

### 4. 研究成果

GlocalGrid 上で動作するモバイルエージェントシステムおよびより抽象的な上位言語をモバイルエージェントプログラムに変換するシステムを実装した（雑誌論文、学会発表 ほか）。図 2 に示したモバイルエージェントプログラムの動作例では、最も左の図で赤枠ブロックの上部からプログラムを送ると、プログラムを短縮伝播しながらネットワーク上を移動していく様子が描かれている。2s は s（下に移動）を 2 回、p はペイントモード、3e は e（右へ移動）を 3 回実行する。p コマンドは短縮されず、結果として 4 か所の LED が点灯する。繰り返しを含むプログラム“\*(3s3e)”などは“3s3e\*(3s3e)”のように展開して実行される（\*は無制限繰り返し）。このような考えに基づき、分岐や繰り返しなどのコマンドも付加して、さまざまなモバイルエージェントプログラムが記述できるようにした。

さらにこの上位の全体プログラミングの枠組みを定義し、circle や box などのコマンドを用いたコーディングができるようにした。circle や box のコマンドは決まったテンプレートに基づき、モバイルエージェントプログラムに自動的に変換する。

一方で、このような変換型の全体プログラミングの枠組みを広く一般に用いられている Arduino デバイスに適用するシステムの開発も併せて行った（学会発表 ほか）。

図3に格子状に配置した多数のArduinoデバイスを対象とした全体プログラムを個々のデバイスに対するプログラムに変換する例を示す。この例では一個のマスタデバイスと残り多数のスレーブデバイスに対するプログラムに変換しているが、プログラム実行時の性能等を考慮して、より分散度の高い変換へとコンパイラオプションパラメタによって指定できるようなシステムを作った。

さらに、関数型言語のLISPやF#などを対象とした全体プログラミングの枠組みを作った(学会発表 )。LISPはGlocalGrid上で動作させるようにLISPのサブセットおよびそのライブラリを定義し、GlocalGrid上で実装した。ノード間をまたがる実行にはプログラムの遠隔呼び出しのメカニズム(call)を用い、再帰的なプログラミングにより連鎖的なノードに対する繰り返し呼び出しを可能にした。リソースの制限から呼び出し中のデバイスに対して呼び出すことができない仕様としたが、その点に関しては実装方法の今後の検討が必要である。

一方でF#に関しては、まず、マイクロソフト.NET用の中間言語であるCILを処理する専用のデバイスを別途開発し(学会発表 )、その上で専用のソフトウェアを実装した。CILデバイスに実装したプログラムの動的実行ができるようなメカニズムを使い、F#のノード間にまたがる再帰呼び出しを実現した。

一方で、GlocalGridに関して何度かにわたりシステム拡張を行った。まず最初にGlocalGridを制御するためのグローバル通信によるオペレーションを定義した(学会発表 )。具体的には、ID設定、隣接関係抽出、方角設定、座標設定、データ通信(個別通信、データ集約、同時個別通信)の基本オペレーションを定義し、形成不良検出、欠損リンク検出のアルゴリズムを示した。

また、GlocalGrid上での情報交換のステップ数に関して、各ノードが4方向に同時送信可能、複数隣接ノードからの同時受信が不可能な場合について、さまざま情報交換に何ステップかかるかを示した(学会発表 )。まず、送信時受信不可能な場合には、

- ・全ノードが情報送信し、すべての隣接ノードがそれを受信するのに5ステップ(最小)
  - ・2近傍情報交換するのに3ステップ(最小)
- ただし、排他的な送信に限定するならば5ステップ、
- ・4近傍情報交換するには5ステップ、これは排他的送信限定の場合には最小、
  - ・8近傍情報交換するには6ステップ、これは排他的送信限定の場合には7ステップ(最小)

ということを証明した。図4ではこれらの通信の手順の一例を示したものである。から順に送信を行うことにより決められた情報交換が可能になる。「排他的」という場合には互いに送受信の妨害なく情報交換できる

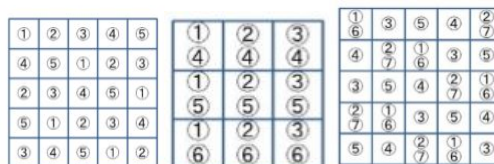


図4. 送信時受信不能な場合における情報交換のための排他的スケジュール例: 全ノードが情報送信し隣接ノードがそれを受信する(左)、8近傍情報交換(中央)、8近傍像法交換のための排他的スケジュール(右)

ことを意味する。「排他的」でない場合は、妨害されない受信ノードにおいて情報受信がなされ、結果として目的が達せられる。また、送信時受信可能な場合には、

- ・全ノード情報送信には4ステップ(最小)
- ・2近傍情報交換は3ステップ(最小)
- ・4近傍情報交換4ステップ(最小)
- ・8近傍情報交換6ステップ

ということが示されている。送信時受信が可能か不可能かはデバイスの物理的な実装に依存するため、両方のケースを考えたものである。8近傍情報交換が、画像処理のフィルタをGlocalGridに適用して分散処理するための基本処理となるため、これらをGlocalGridの基本プロトコルとして厳密な検討を行ったものである。

GlocalGridでは格子状のネットワークを想定していたが、ランダムにノードを配置した場合などに無線でそれらを接続するようなケース(一般トポロジネットワーク)を想定して、GlocalGridの8近傍情報交換とそれに基づく画像処理フィルタの適用を模した計算方法について考察している(学会発表 )。通信距離に応じてうまく重みをつけることにより、類似した結果が出せる可能性を示している。

これらのアルゴリズムに加え、格子状トポロジネットワーク上で分散パターンマッチングを行うReteアルゴリズムの適用について検討した(学会発表 )。提案手法により、分散パターンマッチングを用いて、センサネットワークからの検出結果をもとに他の場所でアクチュエータを動かしたり、LEDを点滅させたりするということが、効率的に分散処理できることになる。

そのほかにも一般的なトポロジを想定して、センサネットワークにおけるデータ集約の方法(雑誌論文 )、各ノードの位置検出の方法(雑誌論文 )、データストリーム配信の方法(雑誌論文 )などについて検討を行った。

アプリケーションに関しても様々なアプローチを行っている。GlocalGridを用いたアプローチとしては、LED服における故障検出のアルゴリズムを検討した(学会発表 )。分散情報管理によるホームエネルギー管理(雑誌論文 )や多数の球形デバイスのトポロジカルな制御によるダンスパフォーマンス(雑誌論文 )などのシステム構築を行っている。これらについてはデバイスの制約に

よりこれまでの研究では GlocalGrid の方式は適用していないが、今後の適用により、いっそう効率的な分散処理が可能になるものと考えている。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)以下抜粋

佐野涉二, 柳沢豊, 櫻井保志, 岸野泰恵, 寺田努, 塚本昌彦, 須山敬之, “相関性のあるデータを集約する無線センサネットワークにおけるシンクノード決定問題の近似解法,” 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol. 53, No. 3, pp. 1177-1188 (2012年3月)

Naoya Isoyama, Tsutomu Terada, Junnich Akita, and Masahiko Tsukamoto, “A Position Detection Method of Devices on Conductive Clothes by Controlling LED Blinking,” International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing (IJWMIP), 査読有, Vol. 14, No. 2, pp. 1350020-1-23 (Mar. 2013)

國本慎太郎, 藤田直生, 佐野涉二, 寺田努, 塚本昌彦, “モバイルエージェントを用いた格子状ネットワークを構成するユビキタスコンピュータ群の制御”, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol. 54, No. 5, pp. 1697-1708 (2013年5月)

Tomoya Kawakami, Yoshimasa Ishi, Tomoki Yoshihisa, Yuuichi Teranishi, “A P2P-Based Sensor Data Stream Delivery Method to Accommodate Heterogeneous Cycles”, Journal of Information Processing (JIP), 査読有, Vol. 22, No. 3, pp. 455-463(2014年6月)

Tomoya Kawakami, Naotaka Fujita, Tomoki Yoshihisa, and Masahiko Tsukamoto, “An Evaluation and Implementation of Rule-Based Home Energy Management System Using the Rete Algorithm”, The Scientific World Journal, 査読有, Vol. 2014, No. 591478, pp. 1-8(2014年7月)

土田修平, 寺田努, 塚本昌彦, “ダンスパフォーマンスにおける移動型スクリーンを用いた隊形練習支援”, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol.56, No.5, pp.1428-1441(2015年5月)

〔学会発表〕(計77件)以下抜粋

塚本昌彦, 藤田直生, “格子状ネットワークにおけるグローバル通信とローカル通信を組み合わせたユビキタスコンピューティング,” 情報処理学会研究報告(モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会), 査読なし, Vol. 2011-MBL-59, No. 20, pp. 1-8 (2011年9月)

塚本昌彦, “グローバル通信とローカル通

信を用いたセンサネットワークコンピューティング,” ユビキタスウェアラブルワークショップ 2011, 査読なし, p. 38 (2011年12月)

長岡 佑典, 佐野 涉二, 寺田 努, 塚本昌彦, “複数ユビキタス機器を統合的に扱うためのマクロプログ ラミングモデルの設計,” 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム(DICOMO 2011) 論文集, 査読有, Vol. 2011, pp. 659-666 (2011年7月)

國本 慎太郎, 藤田 直生, 佐野 涉二, 寺田 努, 塚本 昌彦, “格子状に接続されたユビキタスコンピュータ群のモバイルエージェントを用いた制御手法,” 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム(DICOMO 2011) 論文集, 査読有, Vol. 2011, pp. 741-748 (2011年7月)

塚本昌彦, 藤田直生, “ユビキタスセンシングシステム GlocalGrid における並列処理について,” 情報処理学会研究報告(モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告), 査読なし, Vol.2011-MBL-60 No.10/Vol.2011-ITS-47 No.10, pp.1-8 (2011年11月)

柳沢 豊, 須山 敬之, 寺田 努, 塚本 昌彦, “小型無線センサノード用仮想マシン CILIX の適用事例,” 情報処理学会研究報告(ユビキタスコンピューティングシステム研究会 2013-UBI), 査読なし, Vol. 2012-EC-23, No. 1, pp. 1-7 (2013年3月)

猪谷 直人, 藤田 直生, 佐野 涉二, 寺田 努, 塚本 昌彦, “LISP をベースとするユビキタスコンピューティングのためのプログラム処理系の実現について,” 情報処理学会モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 査読なし, Vol. 2012-MBL-64, No. 1, pp. 1-6 (2012年11月)

長岡 佑典, 佐野 涉二, 寺田 努, 塚本昌彦, “ユビキタス機器から構成される電飾アートのプログラム自動生成の集中・分散制御調整について,” 情報処理学会モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 査読なし, Vol. 2012-MBL-64, No. 3, pp. 1-8 (2012年11月)

國本 慎太郎, 藤田 直生, 佐野 涉二, 寺田 努, 塚本 昌彦, “モバイルエージェントプログラムの生成による格子状に接続されたユビキタスコンピュータ群の制御,” 情報処理学会モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会, 査読なし, Vol. 2012-MBL-64, No. 2, pp. 1-8 (2012年11月)

Shintaro KAWABATA, Shoji SANNO, Tsutomu TERADA, and Masahiko

TSUKAMOTO, "A Fault Diagnostic System by Line Status Monitoring for Ubiquitous Computers Connected with Multiple Communication Lines," Proc. of the 5th Augmented Human Conference (AH 2014), 査読あり, No. 35, pp. 1-2 (2014年3月)

川端慎太郎, 佐野渉二, 藤田直生, 寺田 努, 塚本昌彦, "有線で多重接続されたコピキタスコンピュータの回線状態モニタリングシステム," マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2013)シンポジウム 論文集, 査読有, Vol. 2013, pp. 1880-1887 (2013年7月)

Yutaka Yanagisawa, Yasue Kishino, Takayuki Suyama, Tsutomu Terada, Masahiko Tsukamoto, "A CIL Virtual Machine for Wireless Sensor Network Application," 2014 Int'l Conf. on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA'14), 査読有 (2014年7月)

Tomoya Kawakami, Tomoki Yoshihisa, Yutaka Yanagisawa, Masahiko Tsukamoto, "A Rule Processing Scheme Using the Rete Algorithm in Grid Topology Networks," IEEE Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2015), 査読有 (2015年3月)

Tomoya Kawakami, Tomoki Yoshihisa, Masahiko Tsukamoto, "A Control Method of Ubiquitous Computers Using the Rete Algorithm in Grid Topology Network, IEEE Global Conf. on Consumer Electronics (GCCE2014), 査読有 (2014年10月).

永井宏典, 柳沢 豊, 寺田 努, 塚本昌彦, "F#を用いた非同期プログラミングによるコピキタスコンピュータ群の制御手法", 情報処理学会シンポジウムシリーズ マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2014) 論文集, 査読有, Vol. 2014, pp. 1847-1852 (11 July 2014)

永井宏典, 柳沢 豊, 寺田 努, 塚本昌彦, "F#を用いたセンサネットワークにおけるプログラミング手法の提案と実装", 情報処理学会研究報告(コピキタスコンピューティングシステム研究会), 査読なし, Vol. 2015-UBI-45, No. 53, pp. 1-8 (Mar. 2015)

塚本昌彦, "一般トポロジのコピキタスコンピュータ環境における並列データ処理手法," コピキタスウェアラブルワークショップ (UWW2015) 論文集, 査読なし, p.50 (Dec. 2015)

〔産業財産権〕なし

〔その他〕当研究成果をベースとしてドクター卒業生藤本実氏がベンチャー企業を立ち上げ、LED 衣装のエンターテインメント分野での実用化に成功している。JST の大学発ベンチャー表彰 2015 において、研究代表者塚本とともに日本ベンチャー学会会長賞を受賞した。

ホームページ等

神戸大学塚本・寺田研究室

<http://cse.eeddept.kobe-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

塚本 昌彦 (TSUKAMOTO, Masahiko)

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60273588

### (2)研究分担者

寺田 努 (TERADA, Tsutomu)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70324861

### (3)連携研究者

義久 智樹 (YOSHIHISA, Tomoki)

大阪大学・サイバーメディアセンター・准教授

研究者番号：00402743

〔図書〕(計0件)