

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 23 年 5 月 21 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2011

課題番号：20240007

研究課題名（和文） ユビキタス環境のための全体プログラミング方式

研究課題名（英文） Whole programming methods for ubiquitous environments

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

研究成果の概要（和文）：ユビキタスコンピューティング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標として、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ときに、デバイス全体を対象としたマクロなプログラミングを行えるような方式を確立した。複数の LED マトリックス上で光パターンをエディットする方法、グローバル通信とローカル通信を組み合わせるトポロジを構築していく方法などを開発した。さらにプログラム方式としては、ルールベースやプログラム変換、モバイルエージェントなどの枠組みを考えた。

研究成果の概要（英文）：Aiming at realizing “group” computing achieved by a lot of ubiquitous devices distributed in ubiquitous computing environments. We established methods which perform macro-programming for hundreds to thousands of devices as a whole. Further, we developed several methods including a method of editing an optical pattern on LED matrices, and methods of building topology combining global and local communication. Moreover, we developed frameworks of rule-bases, program conversion and mobile agents on such devices.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	9,900,000	2,970,000	12,870,000
2009 年度	11,300,000	3,390,000	14,690,000
2010 年度	11,900,000	3,570,000	15,470,000
2011 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
総計	38,300,000	11,490,000	49,790,000

研究分野：情報システム工学

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：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

近年の半導体の小型化、通信技術の発達に伴い、ユビキタスコンピューティングに対する注目が高まっている。ユビキタスコンピューティング環境では、多数の超小型コンピュータが環境内に埋め込まれ、それらが分散協調動作を行うことにより人々の生活を支援

することが想定されている。一般にこれらのユビキタスコンピュータがどのように動作しているかはユーザ側からは見えず、その存在を意識することなく利用できるという「不可視性」の特徴をもつことが望ましいとされる。そのため、コンピュータ単体で行う処理よりもコンピュータ全体で何ができるかと

ということが重要であり、効率よく多くのコンピュータを制御するメカニズムが必要となる。また、多くのコンピュータを扱うために、ユーザによる入力がなくとも、コンピュータ同士が自律的に連携を取り合い、協調して動作を行うことが求められる。具体的な目標としては、便利・快適、安全・安心、豊か・楽しさなどが挙げられ、「ここにいる人たちがみな便利で快適になるようにリビングルームの AV 環境や照明、エアコンなどを制御する」、「小学校から家庭まで子供たちを追跡し、安全性を確保する」などということを機器の連携により実現したいという要求が考えられる。

従来のユビキタスコンピューティングに関する研究では、IC タグや埋め込み型コンピュータが使われているものが多い。これらは主としてあらかじめ決められた動作を行うものであり、コンピュータの動作を変更するにはデバイスごとにプログラムを変える必要がある。また個々のデバイスレベルでのプログラミングが必要であるため、複数デバイスのインタラクションを実現するにはプログラミングが複雑で、デバッグも困難となる。一方、複数のプログラムの協調動作に関しては、人工知能分野やエージェントを用いたシステムの研究がなされているが、高度な計算を前提とするため、小型コンピュータを駆使するユビキタスコンピューティングでは実現が難しい。このように、現時点のユビキタスコンピューティングに関する研究では、多くのコンピュータが環境に適応しながら協調動作を実現しているシステムはまだ実現されていない。研究代表者らは研究開発当初までにいくつかの観点から以下のようなユビキタスデバイスの研究開発を行っていた。

- ・ルール処理エンジンを搭載し入出力の制御を行う Ahrod (塚本・寺田・義久)
- ・モバイルエージェント実行制御エンジンを搭載するマイクロ Ja-Net (塚本・義久)
- ・ルールエンジンのメタ記述が行えるユビキタス I/O 制御エンジン (塚本・義久)
- ・LISP のインタプリタを搭載したユビキタス LISP チップ (塚本)
- ・入出力関係を強化学習により学習するユビキタス Q 学習エンジン (塚本)
- ・放送型配信を用いたデータ収集のための無線センサノード (塚本・義久)
- ・ルールで動作制御を行う無線加速度センサノード (塚本・義久)

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の連携動作をプログラミングする「群コンピューティング」を実現する。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。具体的には以下のような利用例を考える。

- ・センサネットワークにおいてデバイス全体で同期を取りながらセンシング、I/O 制御を行う。
- ・センサネットワークで一部のデバイスだけを交代で動作させる。地面にばら撒かれたセンサを半分ずつ交換しながら、限られたバッテリーでの動作持続時間を長くする。
- ・空間につりさげられた LED 内蔵の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。探したり、運搬したりさせる。個々のデバイスとしては、簡単なメカニズムで統合的な動作が容易に実現できるルール処理型のユビキタスコンピュータを想定する。それを用いて以下に挙げる 3 つのレベルでのプログラミングを実現することで、上記のような群コンピューティングを実現する。
- ・ルール処理エンジン生成のためのメタプログラミング：各コンピュータのルール処理エンジンのルール形式を変更することで柔軟なコンピュータの機能を実現するプログラミング方式を確立する。個々のデバイスの性能が低くても、コンピュータ群の処理エンジンを書き換えることでより複雑な処理を高速に行える。
- ・実行ルールのためのグローバルプログラミング：コンピュータを制御する実行ルールをコンピュータ群に対してグローバルに記述するプログラミング方式を確立する。グローバルに記述されたプログラムを個々のデバイスに対するコマンドに分解、変換するための開発環境を実現する。
- ・環境適応のためのローカルプログラミング：部屋一室など比較的狭い範囲で学習機能を有するコンピュータの協調学習を行うことで環境の変化に対しても適応することができるプログラミング方式を確立する。変化する環境下での群コンピューティングをある程度の長期にわたって行うためには、デバイスレベルでの個々のデバイスを環境中の様々な状況に適応させる必要がある。個々のデバイスに簡単な学習機能を付与することでスケーラビリティと可用性を増す。

3. 研究の方法

ユビキタス環境においてはプログラミングを行うために図 1 の黄色い丸枠に示す 3 つ

の機能が必要となるものと考えられる。

- ・発見と同定：実空間において周囲の環境や物体を発見し、同定する機能。ユビキタスコンピューティングではコップ、文房具や家電製品、動植物など非常に広範なものを対象とするので、各種センサでセンシングして対象を発見するためのシンプルで簡単な手順が必要である。また、事象を同定するために実世界の対象を記号にモデル化することが有効であると考えられる。ユビキタスコンピューティングにおいては、建物や公共施設、公園といったわりと狭い範囲で一貫性がとれればよく、表現が短く低コストなものが求められる。
- ・処理と適応：求められる処理を行い、周囲の状況に応じて自己の振る舞いや状態を変化させる機能。これについても小型コンピュータで動作できる単純な方式が求められる。実環境でセンサ情報など非同期情報を扱うにはイベント駆動型の実行ルールで処理することが有効であると考えられる。また環境の変化に適応するためにセンサ情報からの学習を考える。
- ・動作と協調：他の小型コンピュータと連携、協調して必要な動作を行う機能。シンプルなルールによるグローバルな連携を目指す。メッセージングやプログラム移動といった分散プログラミングの手法をユビキタスコンピューティングに応用する。いずれの場合にも、コンピュータのリソースを考慮し、必要最小限に機能を絞る必要がある。

研究体制を図2に示す。研究代表者である塚本と研究分担者である寺田、義久によりそれぞれ大学院生とともに、分担して各機能の検討を行った。その後、検討した結果得られた知見を活かし、プログラミング方式、言語の検討を行った。各機能の検討の際には、マイコンを用いた小型デバイスを試作し、その上で各機能を実現するテストプログラムを実際に動作させて、実デバイスにおいて有効にそれらの機能が利用できることを確認した。

平成20年度ははまず、群コンピューティングの実現に向けてプログラミングモデルの検討を行い、プログラム言語の設計を行った。Adaや並列論理プログラミング言語、演繹オブジェクト指向プログラミング言語などから必要な要素を抽出してシンプルな形で利用した。

平成21年度には、図3に示すように、初年度に検討したプログラミング方式、言語を統合するプログラミング環境を実現した。メタプログラミング言語に関しては各ユビキタスコンピュータに設定するエンジンを生成するジェネレータを作成し、グローバルプログラミング言語は環境情報を元にそれぞれ

のユビキタスコンピュータに設定するルールを生成するコンパイラを作成した。ロー

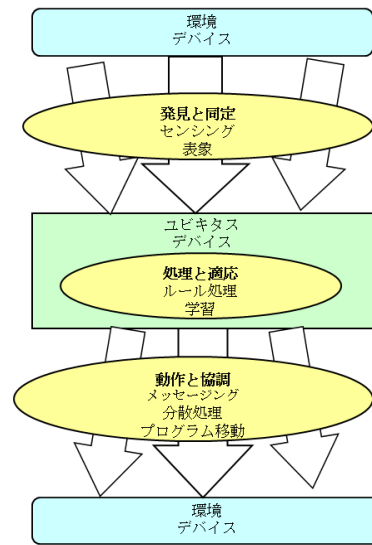


図1. システム構成

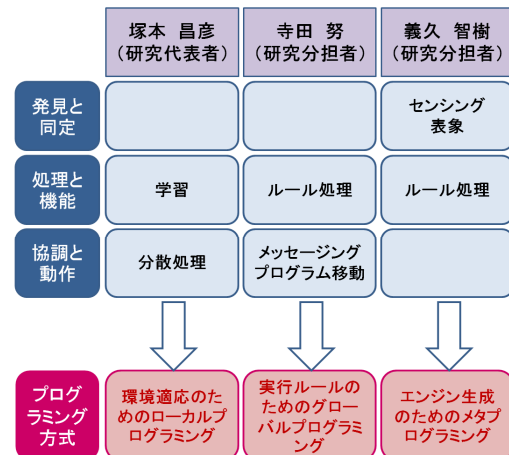


図2. 研究体制

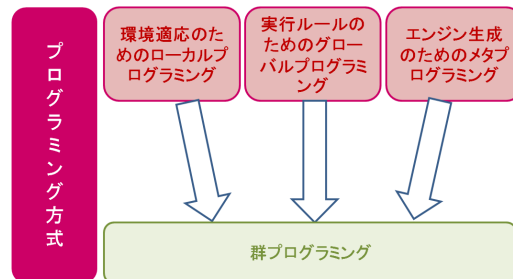


図3. プログラミング方式の統合

カルプログラム言語に関しては、それを実際に処理するユビキタスデバイスを作成した。さらに、それらの結果を統合して、群コンピューティングを行うための各種設定ツールを開発した。

平成22年度には、効率よく群プログラミ

ングが行えるような統合開発環境を整備した。またそれを用いて、コンピュータデバイスが5~10個程度を用いた小規模なシステムにおいて実環境で使用できるか評価実験を行った。必要に応じて、プログラミング方式の再検討を加え、パフォーマンスおよび機能面において最適なデバイスとなるように改良を行った。特に前述の同期やメッセージ送信、配信、動的デバイス発見と動的役割分担などが正しく動作するかどうかを機能面、性能面の両面から確認した。その結果、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には、個々のデバイスがどのような位置にあるかを知り、それをうまく利用して役割を果たしていくことが重要であることが分かった。

本来、本研究課題は平成23年度までの予定であったが、上記の結果を踏まえて研究計画を見直し、新たに科学研究費基盤Aの応募を行った。本件は「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ム」という新たな研究課題名で平成23年度から平成27年度の予定で採択され、現在本研究の発展として、継続的な取り組みを進めている。

4. 研究成果

以上のように、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標として、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ときに環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した。

メタプログラミング、グローバルプログラミング、ローカルプログラミングという観点からは、以下のようなそれぞれのプログラミングモデルを確立した。

- ・メタプログラミングには論理プログラミングの枠組みをベースに、ローカルプログラム自体の記述言語や家庭内の電気機器の利用ポリシーの記述などを対象に、ルールベースの記述形式を考案した。メタプログラムの記述から、ジェネレータによりルールエンジン自体やグローバルプログラムを生成するシステムを構築し、その有用性を評価した。
- ・グローバルプログラミングには並列論理型言語や関数型プログラミングの枠組みなどを検討した。主として、多数のデバイスのグローバルな連携がビジュアルに確認できる分散型の電飾プログラミングを対象とし、ビジュアルアートなどで広く用いられているProcessingをベースとしてプログラミングの記述を考えた。
- ・ローカルプログラミングには主としてルー

ル処理エンジンを用いた。メッセージやイベント処理、システム間同期などの協調の

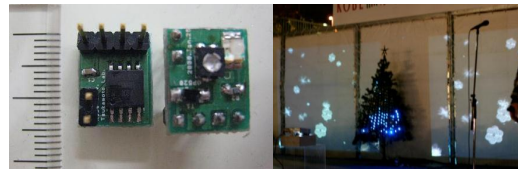


図4. 赤外光に反応する小型デバイス

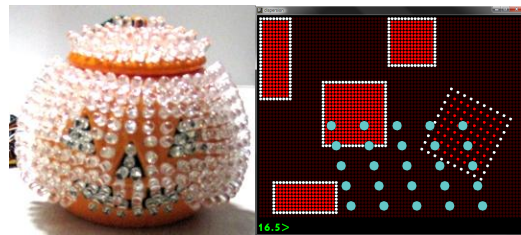


図5. 4マイコンを内蔵する電飾アクセサリ

ためのメカニズムや環境適応のための学習メカニズムについて検討した。

以下にいくつかの具体的なシステムの実現例を示す。図4は赤外光センサと、LEDマイコンを備えた光デバイスである。光センサの値に応じてLEDを点灯する。漏れ赤外光のある液晶プロジェクタの出力部に赤外線のみを通すフィルタをかざすことで、赤外光による映像パターンが出力できる。投影部に多数のデバイスを設置することで、パソコンの映像出力通りのパターンに光らせることができる。数百個のデバイスを作成して、これらを一斉にパソコンから制御するという実験を行った。

図5は、多数のLEDを制御する別のアプローチである。数百個のLEDを4個のマイコンで制御する電飾飾りを作成した。光パターンはPC上のエディタで作成する。図形や文字を描いたり、それを動かしたりする簡単なコマンドを用意し、エディタ上で動きのパターンを確認したのち、4個のそれぞれのマイコンプログラム向けのCのソースコードを生成するシステムを構築した。複雑なプログラムの記述が容易になることを確認した。このシステムはさらに拡張し、ユーザ記述のためのProcessing風の言語を設計した。記述されたプログラムはプログラム変換により個々のデバイス向けのプログラムとなる。汎用性を考えて、対象デバイスを市販されているArduinoに変更し、プログラム変換から無線によるダウンロードの作業までを自動的にプログラムで行えるようにしている。

図6に、これらの経験を踏まえて、電飾服や電飾募金箱への応用を想定して作成したデバイスを示す。各デバイスの上下左右4方向にコネクタがあり、格子状の有線ネットワークを構成できるようになっている。このよ

うにすることで電力供給や通信のロバスト性を高めている。グローバル通信とローカル

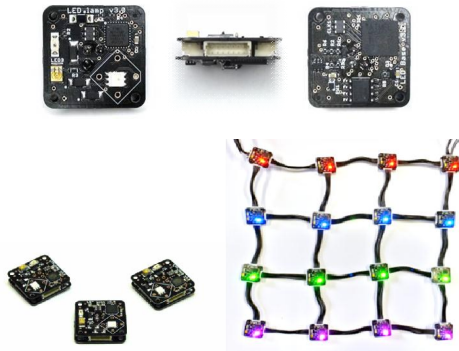


図 6. GlocalGrid を構成するデバイス

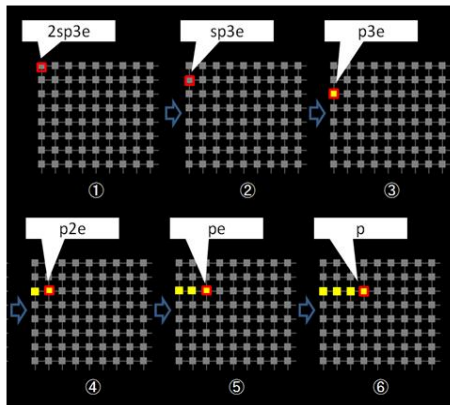


図 7. GlocalGrid 上のモバイルエージェント

通信の 2 種類の通信回線を有するため、多様なメッセージングが可能となっている。さらに、センサや LED、マイコンなどを個々のデバイスが備えている。電飾パターンのエディタを別途作成し、電飾服を着てダンスを踊るというパフォーマンスを実際に行った。激しい動きに対してもロバストにデバイスの同期が行えることを確認した。このデバイスを用いて構成した格子状のネットワークを GlocalGrid と呼んでいる。

本研究ではさらに、GlocalGrid 上で動作するモバイルエージェントシステムを実装している。各デバイス上でインタプリタを動作させ、プログラムを受信するとそれを実行するような動作をさせる。図 7 に、現在実装しているプログラムの実行例を示す。各正方形がユビキタスデバイスを示す。LOGO プログラム風のコマンドを備え、それぞれのコマンドは主として 1 キャラクタベースで表す。文字列でモバイルエージェントのプログラムとなる。“f”を前進、“l”を左回転とし、左上からプログラム“2sp3e”を送ると左の図から順次右の図で表わされるように実行されていく。移動するごとに先頭から一文字ずつ短縮して伝搬する短縮伝播のアプローチをとる。図 7 に、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を示す。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。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)。

これまでの研究の結果として、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役割を果たしていくことが重要であることが分かっているが、これらは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抽象化できるものと想定していたことに反するものである。つまり、トポロジのコーディングがこれらの枠組みにはア priori には備えられていないことから、サンプルアプリと実応用の間には重大なギャップがある。このような研究の過程で、格子状の有線ネットワークがローカルトポロジとグローバルトポロジの関係が比較的自明である(ホップが座標に対応する)ことから、モバイルエージェントの組み合わせにより、シンプルでマイクロなトポロジに基づいて実行可能なプログラムで、マクロな挙動を制することが可能であることに気づき、その後のプロジェクトでは簡単なシステム構築を進めながら方式検討を行っている。

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 4 件) (総計 8 件)

- ① 塚本昌彦, ウェアラブル・ユビキタスコンピューティングによる近未来の暮らし, 情報処理学会誌, Vol. 51, No. 5, pp. 519-522, 査読無
- ② 塚本昌彦, 加藤丈和, スマートタップの共通仕様化に向けて, 情報処理学会誌, Vol. 51, No. 8, pp. 934-942, 査読無
- ③ Ryohei Sagara, Yasue Kishino, Tsutomu Terada, Shojiro Nishio, Application Development Environment for Event-driven Ubiquitous Devices, Int’l Journal of Pervasive Computing and Communication, Vol. 5, No. 2, pp. 87-103, 2009, 査読有
- ④ 中田真深, 児玉賢治, 藤田直生, 竹川佳成, 寺田努, 塚本昌彦, プロジェクトに

よる一成制御が可能なユビキタス光デバイスの設計と実装, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 12, pp. 2871-2880, 2009, 査読有

[学会発表] (計10件) (総計59件)

- ① Tomoki Yoshihisa, Naotaka Fujita, and Masahiko Tsukamoto, HEMS Toolkit: A Toolkit for Constructing a Home Energy Management System, IEEE Consumer Communications & Networking Conf. (CCNC 2011), Jan. 9-12 2011, Las Vegas, U. S. A
- ② 長岡佑典, 佐野涉二, 寺田努, 塚本昌彦, 複数ユビキタスデバイスによる入出力を実現するためのマロプログラミングモデルの提案, ユビキタスウェアラブルワークショップ 2010, 2010年12月19日, 兵庫県立美術館, 兵庫
- ③ 藤本実, 藤田直生, 寺田努, 塚本昌彦, Lighting Choreographer: パフォーマンスアートのためのLED制御システム, ユビキタスウェアラブルワークショップ 2010, 2010年12月19日, 兵庫県立美術館, 兵庫
- ④ 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によるユビキタスデバイスプログラミング, ユビキタスウェアラブルワークショップ 2010, 2010年12月19日, 兵庫県立美術館, 兵庫
- ⑤ 塚本昌彦, 格子状ユビキタスネットワークにおける全体プログラミング, ユビキタスウェアラブルワークショップ 2009, p. 29, 2009年11月, 三木, 兵庫
- ⑥ 義久智樹, 西尾章治郎, 大規模センサネットワークにおける移動型収集ノードを用いたデータ収集方式, 情報処理学会研究報告 (データベースシステム研究会 2009-DBS-148), 2009年7月28日, 大分
- ⑦ 塚本昌彦, 全体プログラミング手法に向けてのセンサネットワークシュミレータの開発, ユビキタスウェアラブルワークショップ 2008, p. 14, 2008年11月, 神戸, 兵庫
- ⑧ Shoji Sano, Tomoki Yoshihisa, and Masahiko Tsukamoto: Design and Implementation of Device with Alterable Functions for Ubiquitous Computing, Proc. of International Symposium on Ubiquitous Multimedia Computing (UMC 2008), Oct. 15, 2008, Hobart, Australia
- ⑨ Mami Nakata, Yoshinari Takegawa, Kenji Kodama, Tsutomu Terada, Naotaka Fujita, Masahiko Tsukamoto, Shinichi

Hosomi, Shojiro Nishio, Design and implementation of a ubiquitous optical device controlled with a projector, The 6th Int'l Conf on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM2008), 2008, Linz, Austria

- ⑩ 木下浩平, 藤田直生, 柳沢豊, 寺田努, 塚本昌彦, 分散制御されたLEDマトリックスを用いた電飾アート制御プラットフォーム, 情報処理学会研究会報告 (エンターテインメントコンピューティング研究会 2009-EC-12), 2008, 京都市, 京都

[図書] (計1件)

- ① Tsutomu Terada, CRC Press, Handbook on Mobile Ad Hoc and Pervasive Communications, 2011

[その他]

学会発表⑩で筆頭著者の学生は情報処理学会平成21年度山下記念研究賞を受賞した。本研究成果である一斉制御デバイス(学会発表③の内容)を用いて、筆頭著者の学生は、IPA未踏プロジェクトに参画し、スーパークリエイタに認定された。その後同学生はメディアアート系の賞を多数受賞している。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塚本 昌彦 (MASAHIKO TSUKAMOTO)
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 (TSUTOMU TERADA)
神戸大学大学院・工学研究科・准教授
研究者番号: 70324861

義久 智樹 (TOMOKI YOSHIHISA)
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